

# Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 353

**bast**

# Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

von

Matthias Gay  
Jan Grimm  
Thomas Otto  
Ina Partzsch

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI  
Dresden

David Gersdorf  
Florian Gierisch  
Stefan Löwe  
Michael Schütze

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH  
Dresden

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 353**

**bast**

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

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

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

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

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

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

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

## Impressum

### **Bericht zum Forschungsprojekt 03.0553**

Nutzung des C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für die ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

### **Fachbetreuung**

Jan Schappacher

### **Referat**

Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

### **Herausgeber**

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

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Kommunikation

### **Druck und Verlag**

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

ISSN 0943-9331

ISBN 978-3-95606-646-7

Bergisch Gladbach, Januar 2022

## Kurzfassung – Abstract

### **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**

Das vorliegende Dokument stellt eine Handlungsempfehlung zur Nutzung des C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für die ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten zur Verfügung. Die erstellte Roadmap baut auf die Systeme im Status quo auf und zeigt Wege für ein sukzessives Upgrade hin zur C2X-basierten ÖV-Priorisierung.

Die Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs ist eine seit den 1980er Jahren angewendete Praxis zur Verbesserung der Reisezeiten der Öffentlichen Verkehrsmittel und der Stärkung des Umweltverbundes auf Basis der Steigerung der Attraktivität des Öffentlichen Verkehrs. Signalisierte Knotenpunkte sind unerlässliche Bestandteile des innerstädtischen Hauptstraßennetzes. Sie beeinflussen maßgeblich die Qualität des Verkehrsablaufs und sind damit von besonderer Bedeutung in Bezug auf die verkehrliche Steuerung und die mitunter verkehrspolitisch motivierte Lenkung des Verkehrsgeschehens.

Seit geraumer Zeit rücken die Potenziale der C2X-Kommunikation aus der theoretischen Forschung hin zur praktischen Erprobung und nähern sich kontinuierlich einer Marktreife an. Kooperative Intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) wurden bereits in mehreren urbanen Testfeldern erfolgreich implementiert und getestet. Die Grundidee der Kooperation zwischen der Lichtsignalanlage (LSA) als infrastruktureitige Einrichtung und dem Fahrzeug inklusive der fahrzeugführenden Person besteht im gegenseitigen Informationsaustausch zur Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Infolge der hohen zu erwartenden Potenziale, welche durch Vernetzung erschlossen werden können, hat sich die Bundesrepublik Deutschland mit dem „IVS-Aktionsplan Straße“ zur koordinierten Weiterentwicklung bestehender und zur beschleunigten Einführung neuer Intelligenter Verkehrssysteme in Deutschland bekannt.

Da sich das bestehende System der ÖPNV-Priorisierung bereits seit Jahrzehnten bewährt hat, ist ein Umstieg auf ein neues C2X-basiertes System nicht einfach. Umstrukturierungen im Frequenzbereich des Analog-Funks geben in vielen Städten jedoch

Anlass für eine Änderung der Bestandssysteme. Die Nutzung der C2X-Kommunikation ermöglicht zum einen die Modernisierung des Datenübertragungssystems und zum anderen ein Optimierungspotenzial für die ÖPNV-Priorisierung sowie weitere Synergien.

Ausgehend von einer Bestandsaufnahme zu gegenwärtig genutzten Verfahren zur ÖPNV-Priorisierung (Kapitel 1) und zu ersten C2X-Erprobungsprojekten (Kapitel 2) erfolgt die Ableitung eines Rahmenkonzeptes zur Migration der konventionellen Technik hin zu einer C2X-basierten Priorisierung (Kapitel 3). Die Aspekte der kommunalen Seite – als Anbieter der streckenseitigen Infrastruktureinrichtungen – und der Verkehrsunternehmen – als Betreiber des Öffentlichen Verkehrs – werden speziell betrachtet. Aufbauend auf den Aspekten von Planung, Umsetzung und Betrieb der ÖPNV-Priorisierung sowie der C2X-Nachrichten und Nachrichteninhalte wird ein Leitfaden zum schrittweisen Übergang der Priorisierung vom Status quo hin zur C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung vorgestellt.

Die C2X-basierte Priorisierung bietet völlig neue Möglichkeiten zur Optimierung der Verkehrssteuerung. Dabei werden in Kapitel 4 die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Verkehrsarten auf der einen Seite sowie die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen C-ITS Services auf der anderen Seite dargestellt.

Als Ergebnis des Dokuments werden in Kapitel 5 ein Pilotierungskonzept sowie eine Handlungsempfehlung/Roadmap zur gezielten Umrüstung hin zur C2X-Infrastruktur für die ÖPNV-Priorisierung, wie sie zielführend von Städten/Kommunen sowie Verkehrsunternehmen umgesetzt werden sollte, aufgezeigt. Dabei wird einerseits auf den stufenweisen Ausbau der Hard- und Softwarekomponenten fokussiert und andererseits die zeitliche Komponente der Realisierung thematisiert. Das beispielhafte Pilotierungskonzept berücksichtigt die spezifischen Anforderungen der Städte und Kommunen sowie die Anforderungen und Wünsche der Verkehrsunternehmen an eine ÖPNV-Priorisierung.

In einem abschließenden Ausblick wird die Schnelligkeit der Informationstechnik als Motivation aufgegriffen, frühzeitig die erforderlichen Entwicklungsschritte anzustoßen.

### **Applicability of V2X for transit signal priority**

This report delivers recommended actions towards the use of the C2X communication standards IEEE 802.11p for the public transport (PT) prioritisation at signalised junctions. The provided roadmap develops on the systems in status quo and points out ways for a gradual upgrade to the C2X-based PT prioritisation.

Prioritisation of public traffic is state of the art since the 1980s for the improvement of the PT travel times and the support of ecomobility on basis of the increase of the attractiveness of public traffic. Signalised junctions are essential components of the main road network in cities. They affect the quality of traffic flow considerably and therefore they are of special importance for traffic control, which is occasionally influenced by municipal traffic policies as well.

For quite some time the potentials of the C2X communication develop from theoretical research towards practical trials and therefore approximate market readiness. Cooperative intelligent traffic systems (C-ITS) were already implemented and tested successfully in several urban test fields. The philosophy of co-operation between the traffic light signal system – being part of the surrounding traffic infrastructure – and vehicles including their drivers consists in bilateral information exchange for the improvement of the quality of traffic flow and for the increase of road safety. Due to the high potentials expected, which can be opened by such a cross-linking, the Federal Republic of Germany has committed in its “National ITS Action Plan for the Roads” to the coordinated advancement of existing and the accelerated introduction of new intelligent traffic systems to Germany.

Since the existing system of the PT prioritisation has established for decades, its transfer to a new C2X-based system is not easy. Restructuration on the frequency bands for analog radio provides a cause for changes on the existing system for many cities. The applicability of C2X communication enables on the one hand the modernisation of the data transmission technology and on the other hand an optimisation of the PT prioritisation and further synergies.

Based on a survey on current PT prioritisation systems in Germany (chapter 1) and on first C2X trials (chapter 2) a framework concept for the migration of the conventional technology to a C2X

based prioritisation is derived (chapter 3). This concept is based on the aspects of planning, implementation and operation of the PT prioritisation as well as the C2X messages and their content. The aspects of the local authorities – who provide the road infrastructure – and the public transport companies – as operators of public traffic – are specifically regarded.

The C2X based prioritisation offers completely new possibilities for the optimisation of the traffic control. In chapter 4 the interdependences between different kinds of traffic as well as between the different C-ITS services are presented.

As result of the document, in chapter 5 a pilot test concept as well as recommended actions for a targeted conversion towards a C2X infrastructure for PT prioritisation are discussed, including how those actions should be implemented by cities/municipalities as well as transport authorities. The gradual development of hard- and software components and the temporal component of the realisation are brought up for discussion. The exemplary pilot test concept considers the specific requirements of the cities and municipalities as well as the demands and requests of the transport authorities towards PT prioritisation.

In a concluding outlook, the fast-moving nature of information technology is highlighted as a motivation to initiate the necessary developments in due time.

## Summary

### Applicability of V2X for transit signal priority

This document provides a recommendation for the use of the C2X communication standard IEEE 802.11p for the prioritisation of public transport at signaled nodes. The roadmap drawn up is based on the systems in the status quo and shows ways for a gradual upgrade to C2X-based public transport prioritisation.

Prioritising public transport is state of the art well established since the 1980s to improve travel times for public transport and to strengthen ecomobility by increasing the attractiveness of public transport (LOHSE & SCHNABEL 2011). Signalised junctions are essential components of the inner-city main road network. They have a decisive influence on the quality of the traffic flow and are therefore of particular importance with regard to traffic control and the sometimes traffic-politically motivated control of traffic.

For some time now, the potential of C2X communication has been moving from theoretical research to practical testing and is steadily approaching market readiness. Cooperative intelligent traffic systems (C-ITS) have already been successfully implemented and tested in several urban test fields. The philosophy of co-operation between the light-signal system – being part of the surrounding traffic infrastructure – and vehicles including their drivers consists in mutual information exchange for the improvement of the quality of traffic flow and for the increase of road safety. Due to the high potentials expected, which can be opened by such a cross-linking, the Federal Republic of Germany has committed in its „National ITS Action Plan for the Roads“ to the coordinated advancement of existing and the accelerated introduction of new intelligent traffic systems to Germany (BMVBS 2020).

The report is divided into the following chapters:

### 1 Survey on current PT prioritisation systems and determination of essential boundary conditions

The focus is on the practical relevance of the survey results for an inventory in Germany. The existing

system of public transport prioritisation has proven itself over decades. Switching to a new C2X-based system is therefore not easy.

In the course of the first chapter, the existing systems are characterised with their strengths and weaknesses. As a result, over 80% of the 80 analysed transport companies use analog radio as a transmission technology to exchange messages between the vehicle and the traffic light system. Only two of the cities surveyed in 2019 are actively testing the ETSI ITS-G5 standard. However, the majority of cities are currently considering the hybrid introduction of C2X-based public transport prioritisation. Finally, there was a comparative assessment of the existing systems of communication technologies, such as analog radio, TETRA, Tetrapol, public mobile radio and infrared, with the main focus on the implementation of local public transport prioritisation.

### 2 C2X-based public transport prioritisation

The second chapter presents the main results of the published pilot projects that implement and test C2X-based prioritisation. The regional focus is on projects in the DACH region, as this is where the typical prioritisation techniques using public transport reporting locations are most applied. In 2020, the following major projects, which test and implement C2X-based public transport prioritisation are: KoMoD/KoMoDnext in Düsseldorf, VERONIKA in Kassel, SIRENE in Braunschweig/Magdeburg, BiDiMoVe in Hamburg and C-ROADS Germany – Urban Nodes in Kassel and Dresden. The compatibility of the requirements is discussed on the basis of the findings from the projects. The aspects of EU-wide standardisation and harmonisation as well as IT security play a decisive role. The way to the complete certification process including the connection to a PKI is outlined using the example of a public transport company. Important ordinances, standards and information papers relating to C2X-based public transport prioritisation are summarised on the basis of the current status from 2020. With regard to the market penetration of C2X systems, it can be said that previous studies on the introduction with regard to the degree of equipment and the penetration of the vehicle fleet with C2X tend to be too optimistic. However, many standardisation activities have currently been completed, the

hardware components are available and the technology is being actively installed by automobile manufacturers, so that a rapidly increasing market penetration can be expected.

### 3 Framework and guidelines

Building on the results of chapters 1 and 2, chapter 3 presents a framework for migrating conventional technology to a C2X-based prioritisation. The aspects of the local authorities – who provide the road infrastructure – and the public transport companies – as operators of public traffic – are specifically regarded. Based on the aspects of planning, implementation and operation of the public transport prioritisation as well as the C2X messages and message content, a guide for the step-by-step transition of the prioritisation from the status quo to the C2X-based public transport prioritisation is presented.

The guideline includes a step-by-step transition, starting with the prioritisation of public transport in the status quo, which was described in chapter 2, via a prioritisation of public transport vehicles using the CAM message with public transport containers in stage 1 as an interim solution, towards the use of the SREM and SSEM message as an international standard and the targeted solution in stage 2.

In order to switch from the status quo to the C2X prioritisation of public transport prioritisation, basic hardware upgrades must be carried out regardless of the respective stage. This concerns the installation of the RSU and OBU, as well as the adaptations of the interfaces between the OBU and on-board computer and between the LSA control unit and the RSU. Depending on the stage, further adjustments are necessary, which are described in detail.

### 4 Interactions

C2X-based prioritisation offers completely new possibilities for optimising traffic control. In chapter 4 the interdependences between different kinds of traffic as well as between the different C-ITS services are presented.

Existing interactions between the prioritised traffic types under consideration and public transport prioritisation must be weighed up on a case-by-case basis in terms of overall optimisation or political

and urban planning objectives. The different types of traffic, such as non-motorised individual traffic, e.g. pedestrians and cyclists, motorised individual traffic, e.g. cars and motorcycles, heavy goods traffic or dangerous goods, emergency vehicles and competing public transport vehicles are considered.

With regard to the interactions between the C-ITS services, the basic C-ITS services that are to be introduced in the coming years are presented. In the course of the detailed analysis, the focus is on services that clearly influence public transport prioritisation in terms of traffic quality. These are TSP “Traffic Signal Priority Request”, GLOSA “Green Light Optimal Speed Advisory” and PVD “Probe Vehicle Data”.

### 5 Pilot concept and recommendations for action

As result of the document, in chapter 5 a pilot test concept as well as recommended actions for a targeted conversion towards a C2X infrastructure for PT prioritisation are discussed, including how those actions should be implemented by cities/municipalities as well as transport authorities. The gradual development of hard- and software components and the temporal component of the realisation are brought up for discussion. The exemplary pilot test concept considers the specific requirements of the cities and municipalities as well as the demands and requests of the transport authorities towards PT prioritisation. For explanation, some aspects are deliberately simplified and a transition in four steps is outlined:

- Step (1): Analysis of the line network,
- Step (2): Equipping a line,
- Step (3): Successive expansion with suitable lines,
- Step (4): Expansion of the network.

The procedure described above with its four steps is an idealised way of implementing the C2X-based public transport prioritisation. In reality, the so-called hybrid operation will be necessary as a temporary solution, i.e. the simultaneous mixed operation between vehicles and traffic lights with conventional prioritisation radio technology and systems using C2X-based public transport prioritisation technology.

The report closes with a recommendation for action. The consideration of the individual development strands, including the underpinning with the corresponding time horizons for implementation, is based on the developed framework concept, the guidelines and the piloting concept. When implementing the steps outlined in the piloting concept, it must be taken into account that the introduction of C2X-based public transport prioritisation via modern traffic light hardware including RSU on the one hand and OBU in the vehicle on the other hand will only take place gradually. It therefore makes sense to start the individual steps in parallel as far as possible and to synchronise their implementation at certain points. A period of 2-5 years is estimated to be realistic for the implementation of stage 1 as a transitional solution. A period of 5-10 years can be expected to implement stage 2 as the final expansion stage.

In a concluding outlook, the fast-moving nature of information technology is highlighted as a motivation to initiate the necessary developments in due time.



# Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	11	2.1.3 Braunschweig/Magdeburg (SIRENE) .....	27
<b>1 Bestandsaufnahme ÖPNV- Priorisierung</b> .....	15	2.1.4 Hamburg (BiDiMoVe) .....	28
1.1 Verkehrstechnische Grundlagen der ÖPNV-Priorisierung .....	15	2.1.5 C-ROADS Germany – Urban Nodes ...	28
1.1.1 Meldepunktprinzip .....	15	2.2 Systemskizze und System- übersicht. ....	28
1.1.2 Steuerungsverfahren .....	16	2.2.1 Systemübersicht C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung .....	28
1.1.3 Sonstige Randbedingungen .....	16	2.2.2 Eigenschaften der C2X-Technologie ...	29
1.2 Anforderungskriterien der ÖPNV-Priorisierung .....	17	2.3 IT-Sicherheit .....	31
1.2.1 Räumliche Anforderungen .....	17	2.4 Verordnungen, Standards und Hinweispapiere .....	34
1.2.2 Zeitliche Anforderungen .....	17	2.5 Varianten der LSA-Steuerung .....	36
1.2.3 Situationsbedingte Anforderungen ....	18	2.5.1 C2X-basierte Priorisierung des ÖPNV .....	36
1.2.4 Fahrzeugseitige Anforderungen .....	18	2.5.2 C2X-basierte Priorisierung von Einsatzfahrzeugen .....	36
1.2.5 Infrastruktureitige Anforderungen ....	18	2.6 Prognosen zur Marktdurchdringung C2X-basierter Systeme .....	37
1.3 Ortung der ÖPNV-Fahrzeuge .....	18	<b>3 Rahmenkonzept und Leitfaden</b> .....	38
1.3.1 Wegzählung .....	18	3.1 Tangierende Systeme .....	38
1.3.2 Baken .....	19	3.1.1 Tools zur Planung .....	38
1.3.3 GNSS .....	20	3.1.2 Schnittstellen bei der Umsetzung ....	39
1.4 Datenübertragungssysteme und Sensorik im ÖPNV .....	20	3.1.3 Tools zur Evaluierung .....	40
1.4.1 Analogfunk .....	21	3.2 Rahmenkonzept .....	41
1.4.2 Digitalfunk .....	21	3.2.1 Stufe 1: Übergangslösung – Nutzung von CAM .....	41
1.4.3 Öffentlicher Mobilfunk .....	23	3.2.2 Stufe 2: Zielsystem – Nutzung von SREM/SSEM .....	43
1.4.4 Infrarot .....	23	3.2.3 Fazit Rahmenkonzept .....	44
1.4.5 Weitere Möglichkeiten und Rückfallebenen .....	23	3.3 Leitfaden .....	45
1.5 Bestandssysteme der ÖPNV- Priorisierung .....	24	3.3.1 Anpassung hinsichtlich Verkehrs- technik .....	45
1.6 Bewertung der Bestandssysteme der ÖPNV-Priorisierung .....	26	3.3.2 Anpassungen hinsichtlich Verkehrs- unternehmen .....	47
<b>2 C2X-basierte ÖPNV- Priorisierung</b> .....	26	3.3.3 Machbarkeit und Umsetzungs- hemmnisse .....	48
2.1 Recherche zu Pilotprojekten .....	26	3.3.4 Fazit Leitfaden .....	49
2.1.1 Düsseldorf (KoMoD) .....	26		
2.1.2 Kassel (VERONIKA) .....	27		

<b>4</b>	<b>Wechselwirkungen</b> . . . . .	50
4.1	Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsarten . . . . .	50
4.1.1	Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs mittels C2X-Technologie (SREM/SSEM) . . . . .	50
4.1.2	Priorisierung weiterer Verkehrsarten . . . . .	51
4.1.3	Wechselwirkungen zwischen Verkehrsarten . . . . .	52
4.2	Wechselwirkungen zwischen den C-ITS Services . . . . .	53
4.2.1	Überblick über C-ITS Services . . . . .	53
4.2.2	TSP – Traffic Signal Priority . . . . .	54
4.2.3	GLOSA – Green Light Optimal Speed Advisory . . . . .	54
4.2.4	PVD – Probe Vehicle Data . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Pilotierungskonzept und Handlungsempfehlungen</b> . . . . .	55
5.1	Pilotierungskonzept . . . . .	55
5.1.1	Schritt (1): Analyse des Liniennetzes . . . . .	56
5.1.2	Schritt (2): Ausrüstung einer Linie . . . . .	57
5.1.3	Schritt (3) & Schritt (4): Sukzessive Erweiterung sinnvoller Linien bis hin zum Netzausbau . . . . .	57
5.1.4	Hybride Umsetzung der einzelnen Schritte . . . . .	58
5.2	Handlungsempfehlungen . . . . .	58
5.3	Ausblick . . . . .	59
	<b>Literatur</b> . . . . .	60
	<b>Bilder</b> . . . . .	62
	<b>Tabellen</b> . . . . .	62
	<b>Anhang</b> . . . . .	63

## Abkürzungen

2G	2. Generation, hier Mobilfunk → GRPS	DLC	IEEE 802.11p: Data Link Control
3G	3. Generation, hier Mobilfunk → UMTS	DMO	Funk: Direct Mode
4G	4. Generation, hier Mobilfunk → LTE	DRM	Digital Radio Mondiale
AB	Abmeldung	EA	PKI: Enrolment Authority (PKI-Betreiber)
AT	PKI: Authorisation Ticket	EC	PKI: Enrolment Credentials
BOS	Behörden mit Sicherheitsaufgaben	ECC	PKI: Elliptic Curve Cryptography
BOStrab	Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung	ECTL	PKI: European Certificate Trust List
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik	ELA	Elektronische Lautsprecheransage
BSS	Basic Service Set (WLAN 802.11)	EM	European Modifikation
BTP	IEEE 802.11p: Basic Transport Protocol	ETSI	European Telecommunications Standards Institute
C2X	Fahrzeug-Fahrzeug- oder Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation	EVA	C2X: Emergency Vehicle Approaching
C2C-CC	CAR 2 CAR Communication Consortium	EVP	Emergency Vehicle Priority
CAM	C2X: Cooperative Awareness Message	FMS	Flotten-Management-Schnittstelle
CA	PKI: Certificate Authority	GLONASS	GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, spezifische Ausprägung eines → GNSS
CDD	C2X: Common Data Dictionary, Verzeichnis gemeinsam genutzter Datentypen	GLOSA	C2X: Green Light Optimal Speed Advisory
CP	PKI: Certificate Policy	GNSS	Global Navigation Satellite System (engl. globales Navigationssatellitensystem)
CPM	C2X: Collective Perception Message	GPRS	General Packet Radio Service
CRL	PKI: Certificate revocation list (Zertifikatssperrliste)	GPS	Global Positioning System, spezifische Ausprägung eines → GNSS
CTL	PKI: Certificate trust list (Zertifikats-Vertrauensliste)	HA	Hauptanmeldung
C-V2X	Cellular-V2X	HET	Hilfseinschalttaste
DACH	Deutschland/Österreich/Schweiz	H QML	Hinweise zum Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen
DC	PKI: Distribution Center (Verteilungszentrum)	HSM	PKI: Hardware Security Module (Hardware-Sicherheitsmodul)
DCC	Decentralised Congestion Control (Überlastkontrolle des WLANp Nachrichtenkanals)	IBIS-IP	→ IP basiertes Integriertes Bordinformationssystem
DENM	C2X: Decentralised Environmental Notification Messages-Gefahrenwarnung		

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	OCB	Outside the Context of a BSS (Ad-Hoc-Modus im WLAN IEEE802.11)
IMU	Induktive Meldungsübertragung	OCIT	Open Communications Interface
IP	Internetprotokoll	OCIT-C	OCIT Center
ISO	International Organization for Standardisation	OCIT-LED	OCIT LED
ITCS	Intermodales Transport Control System, früher → RBL	OCIT-O	OCIT Outstation
ITS	Intelligent Transport Systems; englischer Begriff für → IVS	OIVD	OCIT-Instations Versorgungsdaten
ITS-G5	ETSI Spezifikationen für ITS im 5GHz-Band	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ITS PDU	Vollständige Facilities-Layer-Nachricht im ITS-Kontext → ITS → PDU	OSI	Open Systems Interconnection model, Schichtenmodell für Netzwerke
IV	Individualverkehr (→ Pkw, Fahrrad, Motorrad, Fußverkehr...)	PDU	Protocol Data Unit (vollständige Nachricht eines bestimmten OSI-Layers)
IVI	C2X: Infrastructure to Vehicle Information, Bezeichnung für den C-ITS Service, sowie für den Inhalt der → IVIM	PHY	OSI/IEEE 802.11p: Physical Layer, Physische Schicht
IVIM	C2X: Infrastructure to Vehicle Information Message	PKI	Public-Key-Infrastruktur (Zertifikatssystem)
IVS	Intelligente Verkehrssysteme; deutscher Begriff für → ITS	PVD	C2X: Probe Vehicle Data
IVS	C2X: In-Vehicle Signage (im Kontext C-ITS Services)	RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem, veraltete Bezeichnung für → ITCS
LLC	IEEE 802.11p: Logical Link Control	RCA	PKI: Root CA
LSA	Lichtsignalanlage	RCA-CTL	PKI: RCA Certificate Trust List (Wurzelzertifikate-Vertrauensliste)
LTE	Long Term Evolution	RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
MAC	OSI/IEEE 802.11p: Media Access Control	RSU	Road Side Unit
MAP	C2X: Topologiebeschreibung, Inhalt der → MAPEM	RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services, Normung von GNSS Korrekturinformation
MAPEM	C2X: MAP (Topology) Extended Message	RTCMEM	C2X: RTCM Extended Message, ETSI ITS-G5 Nachricht zur Verbreitung von RTCM Korrekturinformation
MVW	C2X: Maintenance Vehicle Warning	RWW	C2X: Road Works Warning
O-Bus	Oberleitungs-Bus	SAE	Society of Automive Engineers
OBU	Onboard Unit	SDS	Short Data Service
		SPAT	C2X: Signal Phase and Timing, Inhalt der → SPATEM
		SPATEM	C2X: Signal Phase and Timing Extended Message

---

SREM	C2X: Signal Request Extended Message
SRM	C2X: Signal Request Message, Inhalt der Europäischen → SREM
SSEM	C2X: Signal Status Extended Message
SSM	C2X: Signal Status Message, Inhalt der Europäischen → SSEM
SSP	PKI: Service Specific Permission
SWD	C2X: Shock Wave Damping
TC	Traffic Class (Priorisierungsstufen für ETSI ITS-G5 Nachrichten)
TDMA	Time Division Multiple Access (Zeitmultiplexverfahren, Zeitschlitzverfahren)
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TJW	C2X: Traffic Jam Ahead Warning
TLP	C2X: Traffic Light Prioritisation
TSP	C2X: Traffic Signal Priority
TV	Television (engl. Fernseher)
UKW	Ultrakurzwelle
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, Mobilfunkstandard der 3. Generation → 3G
VA	Voranmeldung
VDV	Verband deutscher Verkehrsunternehmen, früher → VÖV
VÖV	Verband öffentlicher Verkehrsunternehmen, heute → VDV
VR	Verkehrsrechner; oft als Synonym für Lichtsignalanlagensteuerungszentrale
VRU	C2X: Vulnerable Road User
VTU	Verkehrstechnische Unterlagen oder Verkehrstechnische Untersuchung
WLAN	Wireless Local Area Network



# 1 Bestandsaufnahme ÖPNV-Priorisierung

In diesem Kapitel erfolgt die Bestandsaufnahme zur ÖPNV-Priorisierung an Lichtsignalanlagen (LSA) im DACH-Raum. Dabei wird der allgemeine Stand der Technik am Beispiel der Systeme beschrieben, welche momentan eine große Verbreitung gefunden haben. Neben diesen standardisierten Systemen gibt es darüberhinausgehend mitunter sehr kreative Umsetzungen, die in Einzelfällen eine praktikable und kostengünstige Lösung darstellen. Diese Einzelfälle werden aufgrund der fehlenden Allgemeingültigkeit in dieser Studie nicht berücksichtigt.

## 1.1 Verkehrstechnische Grundlagen der ÖPNV-Priorisierung

### 1.1.1 Meldepunktprinzip

Die Nutzung der sogenannten Meldepunktketten als Meldeprinzip zur ÖPNV-Priorisierung hat sich im DACH-Raum umfassend etabliert. Dabei erfolgt die Übertragung von Nachrichten zwischen ÖPNV-Fahrzeugen und LSA punktwise an definierten Wegpunkten. Es werden die in Bild 1-1 dargestellten Meldepunkte unterschieden (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 2014):

- optional Voranmeldung (VA),
- Hauptanmeldung (HA),
- optional Türkriterium (Tür),
- Abmeldung (Ab).

Die einzelnen Meldepunkte bilden zusammen eine Meldepunkt-kette. Die kleinste Meldepunkt-kette besteht in der Regel aus einer Hauptanmeldung (HA) und einer Abmeldung (Ab). Das reicht aus, wenn zwischen dem Ort der Anmeldung und der Haltlinie eine nahezu ungestörte Fahrt angenommen werden kann (z. B. bahneigener Körper bei Straßen-

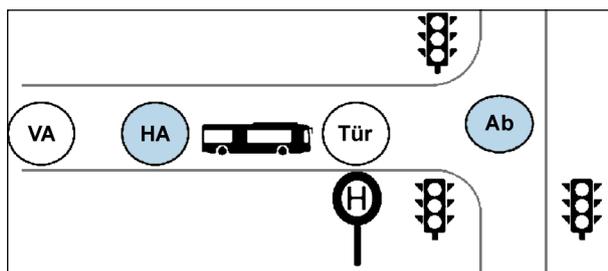


Bild 1-1: Meldepunktprinzip

bahnen), da sich hier die Restfahrzeit bis zur Haltlinie sehr gut vorab bestimmen und in der LSA-Steuerung berücksichtigen lässt.

Da eine solche ungestörte Fahrt nicht immer wahrscheinlich ist, z. B. bei unregelmäßigen Rückstau-längen vor der LSA, kann mit einer Kombination aus Vor- (VA) und Hauptanmeldung (HA) eine Verfeinerung der Restfahrzeitprognose bis zur Haltlinie erreicht werden.

Eine Herausforderung sind variierende Fahrgastwechselzeiten eines ÖPNV-Fahrzeuges an einer Haltestelle im Annäherungsbereich einer LSA. Hier können Spannweiten von gar keiner Haltezeit (Durchfahrt) bis zu sehr langen Haltezeiten (z. B. durch Rollstuhl und Rollator-Nutzende oder Warten auf Anschlüsse) auftreten. Wird innerhalb dieser variierenden Haltezeiten die Freigabe für den ÖPNV gehalten, obwohl dieser noch gar nicht abfahrbereit ist, kommt es zu erheblichen Beeinflussungen der anderen Verkehrsströme an der LSA sowie der gesamten Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes. Dabei wird nicht nur der Individualverkehr (IV) negativ beeinflusst, auch andere ÖPNV-Fahrzeuge können hierdurch beeinträchtigt werden. Deshalb wird bei Haltestellen im Annäherungsbereich einer LSA zusätzlich die Abfahrbereitschaft durch das Schließen der Türen mittels Türkriterium (Tür) als weiterer Meldepunkt genutzt. Das Türkriterium kann die Meldepunkte ersetzen oder ergänzen. Das Kriterium Tür kann innerhalb einer Meldepunkt-kette flexibel eingesetzt werden. Sogar die Nutzung als Abmeldung (z. B. bei dynamischen Halteinseln) ist möglich.

Eine Verfolgung eines ÖPNV-Fahrzeuges zwischen den definierten Meldepunkten ist für die LSA-Steuerung nach heutigem Stand der Technik nicht möglich. Die simulierte Annäherung erfolgt über Zeit-zähler, welche innerhalb der Steuerung als eine Art Countdown rückwärtslaufen. Dieses Extrapolieren führt gerade bei Abweichungen der tatsächlichen Fahrzeit gegenüber der planerischen Fahrzeit zu verfrühten oder verspäteten Freigaben.

Da es vorkommen kann, dass die Übertragung einzelner Meldepunkte in einer Meldepunkt-kette fehlschlägt, muss die LSA-Steuerung auch mit übersprungenen Meldepunkten umgehen können. Ausbleibende Meldepunkte – besonders kritisch ist eine fehlende Abmeldung – darf beispielsweise nicht dauerhaft zum Halten einer ÖPNV-Phase führen und wird heute durch Timeouts, sogenannte

Zwangsabmeldungen, unterbunden. Wäre dies nicht der Fall, würde die Gesamtleistungsfähigkeit des LSA-Knotenpunkts signifikant sinken.

### 1.1.2 Steuerungsverfahren

Steuerungsverfahren dienen der Beschreibung des Ablaufs von Signalprogrammen. Darin enthalten sind Art, Umfang und Zusammenwirken von veränderbaren Steuerungsgrößen und Signalprogramm-elementen. Unterschieden werden Steuerungsverfahren in der Art, wie Verkehrsströme gesteuert werden und wie stark Signalprogrammelemente beeinflusst und verändert werden können. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement 2015)

Grundsätzlich gibt es dabei die Möglichkeit der zeitplan- oder verkehrsabhängigen Aktivierung auf makroskopischer Ebene. Auch die Steuerung der Koordinierung (Grüne Welle) erfolgt auf dieser Steuerungsebene. Dabei werden Freigabezeiten hintereinanderliegender Signalisierungsquerschnitte durch geeignete Zeitversätze aufeinander abgestimmt.

Auf der mikroskopischen Ebene wird zwischen Festzeitsteuerung sowie regelbasierter und modellbasierter verkehrsabhängiger Steuerung unterschieden. Die Festzeitsteuerung dient einerseits als Rückfallebene und bildet andererseits die Grundlage zur Planung der verkehrsabhängigen Steuerung. Die Umsetzung der Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs wird innerhalb des verkehrsabhängigen Steuerungsverfahrens regelbasiert oder modellbasiert umgesetzt. Das Signalprogramm kann dabei über eine Anpassung der Freigabe- und Versatzzeit, Phasentausch oder Phasenforderung an die Verkehrssituation adaptiert werden. Kenngrößen für die Steuerung können direkt oder indirekt gemessen werden. Zu den direkten Kenngrößen gehören die Zeitdauer seit der Anforderung, die Zeitlücke sowie der Belegungsgrad. Indirekte Kenngrößen können beispielsweise mittlere Wartezeiten oder Staulängen sein.

### 1.1.3 Sonstige Randbedingungen

Wesentliche weitere Randbedingungen sind bspw. auch die Eigentumsverhältnisse und die Verantwortlichkeiten im Umfeld einer LSA. Davon sind vorwiegend organisatorische und finanzielle Aspekte zur Umsetzung einer ÖPNV-Bevorrechtigung abhängig.

Die LSA selbst ist in der Regel im Eigentum und Verantwortung des jeweiligen Straßenbaulastträgers. Baulastträger ist das jeweilige Bundesland (für Bundes-, Landes- und Staatsstraßen), der Kreis (Kreisstraßen) oder die Kommune (übrige öffentliche Straßen).

Komponenten zur ÖPNV-Bevorrechtigung – z. B. der Empfänger für Funkmeldungen – können sowohl vom Baulastträger beschafft und betrieben werden als auch Beistellungen des jeweiligen ÖPNV-Unternehmens sein. Bei Beistellungen werden überwiegend gemeinsame Steuerschranken genutzt, teilweise müssen aber auch separate Steuerschranke für den ÖPNV-Empfänger errichtet werden.

Weitere Beteiligte sind die Signalbaufirmen, die im Auftrag des Straßenbaulastträgers die LSA errichten und ggf. auch warten und betreiben.

Die eigentlichen LSA-Programme und deren Abläufe werden im Rahmen der Erstellung der Verkehrstechnischen Unterlagen (VTU) definiert. Die VTUs werden vom Baulastträger, von den Signalbaufirmen oder externen Ingenieurbüros erstellt und von der Straßenverkehrsbehörde angeordnet.

Seit den RiLSA 2010 ist das Qualitätsmanagement wesentlicher Aufgabenbestandteil beim Betrieb einer LSA – sowohl allgemein als auch in Bezug auf die ÖPNV-Beschleunigung. Insbesondere ist damit eine Aussage zur Wirksamkeit von ÖPNV-Beschleunigungsmaßnahmen möglich. Eine Qualitätssicherung ist manuell sehr aufwendig und kaum leistbar. Deshalb sind technische Systeme zur Qualitätssicherung unerlässlich. Dennoch werden solche bei weitem noch nicht flächendeckend eingesetzt. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Qualitätsmanagement – trotz der Forderung in der RiLSA – häufig nicht oder zumindest nicht vollumfänglich stattfindet. Um die Einführung und Anwendung eines Qualitätsmanagements für Lichtsignalanlagen zu erleichtern, wurde ein gleichnamiger Leitfaden veröffentlicht (Leitfaden Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen) sowie durch die H QML-Hinweise zum Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement 2014) erweitert.

Insgesamt gibt es keine deutschlandweit einheitliche Struktur zur Realisierung der ÖPNV-Priorisierung. Die Strukturen und Prozessabläufe unterscheiden sich von Bundesland zu Bundesland, von Kreis zu Kreis und von Kommune zu Kommune.

Auch ist der Ausrüstungsgrad der einzelnen Regionen unterschiedlich und je nach Alter sind die Lichtsignalanlagen auf einem anderen technischen Stand. So gibt es laut einer deutschlandweiten Studie einen Unterschied in der Altersstruktur der Anlagen zwischen alten und neuen Bundesländern, wobei in den alten Bundesländern das Durchschnittsalter bei den 48 angefragten Kommunen bei 12,5 Jahren lag (LEUPOLD 2014). Dies zeigt auch, dass zukünftig vermehrt Lichtsignalanlagen wegen ihres Alters ersetzt werden müssen, was dort den Einsatz von C2X-basierter ÖPNV-Beschleunigung auf modernen Steuergeräten ermöglicht. Entsprechende Lösungsvarianten sind aber nicht ohne weiteres aufeinander übertrag- und anwendbar, sondern immer im jeweiligen Kontext zu prüfen.

## 1.2 Anforderungskriterien der ÖPNV-Priorisierung

Die Anforderungen an Systeme zur ÖPNV-Priorisierung werden in räumliche, zeitliche, situationsbedingte, fahrzeugseitige und infrastrukturseitige Kriterien unterschieden.

### 1.2.1 Räumliche Anforderungen

Wesentliches Merkmal der räumlichen Anforderung ist es, dass eine Meldung vom ÖPNV-Fahrzeug an die LSA so rechtzeitig erfolgt, dass das LSA-Steuerprogramm in der Lage ist, in die entsprechende ÖPNV-gerechte Phase zu wechseln. Dies sollte so erfolgen, dass das ÖPNV-Fahrzeug möglichst die Geschwindigkeit beibehalten kann.

Die Entfernung der ersten Meldung an der LSA resultiert aus der Annäherungsgeschwindigkeit und der Reaktionsfähigkeit des LSA-Programms. Die Werte sind abhängig von der konkreten Situation an einer LSA und werden im Rahmen der Verkehrstechnischen Untersuchungen (VTU) detailliert bestimmt.

Die Mindestentfernungen ergeben sich durch verschiedene Zeitanteile, welche von einer LSA benötigt werden, um ein ÖPNV-Fahrzeug bei der Annäherung möglichst ohne Halt oder Verzögerung über den Knotenpunkt zu führen. Um eine ungehinderte Fahrt des ÖPNV-Fahrzeugs gewährleisten zu können, muss die Mindestfreigabezeit einer feindlichen Phase, deren Zwischenzeit zur ÖPNV-Phase (situationsabhängig je nach aktueller Gegebenheit mehrere Sekunden) sowie die technische Reaktionszeit

der Übertragung und der Datenverarbeitung im LSA-Steuergerät berücksichtigt werden.

Im städtischen Umfeld erfolgen die ersten LSA-Meldungen (VA) eines ÖPNV-Fahrzeuges daher häufig zwischen 200 und 300 m vor einer LSA. Bei höheren Geschwindigkeiten (z. B. bei bahneigenem Körper) oder komplexeren Knotenpunktsteuerungen mit mehreren konkurrierenden Randbedingungen innerhalb des Steuerungsprogramms zur Schaltung der Freigabe für das ÖPNV-Fahrzeug sind in seltenen Fällen aber auch Entfernungen bis zu 800 m denkbar.

Von einem System zur funktechnischen Meldungsübertragung zwischen ÖPNV-Fahrzeug und LSA müssen aktuell im Normalfall Entfernungen zwischen 200 m und 300 m und in Ausnahmen von bis zu 800 m zuverlässig realisiert werden können.

Neben der Entfernung ist auch die Genauigkeit der Aussendung entscheidend, um im LSA-Programm die ÖPNV-Phase zeitgerecht schalten zu können. Das Aussenden der LSA-Meldung vom Fahrzeug sollte mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 5$  m um den in der VTU projektierten Meldepunkt erfolgen. Diese Genauigkeitsanforderung entspricht auch den Anforderungen an ITCS-Systeme (Intermodales Transport Control System) aus der VDV-Schrift 730 (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 2015).

### 1.2.2 Zeitliche Anforderungen

Nach dem Aussenden vom Fahrzeug muss eine Meldung zeitnah an der LSA eintreffen, um dort zeitgerecht die ÖPNV-Priorisierung schalten zu können. Entscheidend ist hier sowohl die Zeitdauer der Übertragung als auch die Steuerungslogik der LSA.

Eine kurze Zeitdauer ist aus Sicht des ÖPNV vor allem beim Türsignal (Tür) notwendig, da hier ansonsten eine Verlustzeit in Höhe der Übertragungszeit entsteht. Aus Sicht der anderen Verkehrsteilnehmer ist eine kurze Zeitdauer insbesondere bei der Abmeldung (AB) notwendig, da sonst die ÖPNV-Phase unnötig lang gehalten wird und somit Verlustzeiten für die anderen Verkehrsteilnehmer entstehen können. Bei Vor- (VA) und Hauptanmeldungen (HA) ist eine längere Zeitdauer jedoch weniger kritisch, da dieser Effekt durch eine Vorverlegung der Meldepunkte um eine entsprechende Meterzahl ausgeglichen werden kann.

Ausgehend von der Genauigkeitsanforderung von  $\pm 5$  m (siehe Kapitel 1.2.1) und bei einer Geschwindigkeit von bis zu 50 km/h im städtischen Umfeld sollte die Zeitdauer einer Übertragung 500 ms nicht überschreiten.

### 1.2.3 Situationsbedingte Anforderungen

Eine LSA-Steuerung kann den ÖPNV nur dann optimal priorisieren, wenn der Standort und die Annäherungsgeschwindigkeit des ÖPNV-Fahrzeuges genau bekannt sind und den planerischen Vorgaben entspricht. Zur Verbesserung der Genauigkeit sollten zusätzlich Fahrplan, Fahrweg und Liniennummer übertragen werden. Im Idealfall wird die Annäherung des ÖPNV-Fahrzeuges kontinuierlich überwacht und in der LSA-Steuerung entsprechend berücksichtigt. Dies ist aufgrund der beschriebenen Meldepunktketten mit den aktuellen Verfahren zur ÖPNV-Priorisierung nicht möglich.

### 1.2.4 Fahrzeugseitige Anforderungen

Die fahrzeugseitigen Anforderungen werden durch viele externe Randbedingungen bestimmt. Trotz der Größe von ÖPNV-Fahrzeugen ist der Einbauplatz für elektronische Systeme verhältnismäßig beschränkt und vielfach bereits durch andere Systeme wie z. B.: ITCS-Bordrechner, Radio, Elektronische Lautsprecheranlage (ELA), Steuergerät für Außenanzeigen etc. belegt. Auch sind heute in der Regel bereits verschiedenen Antennen auf dem Fahrzeug montiert (GNSS, WLAN, Mobilfunk, UKW-Radio etc.). Deshalb ist es in jedem Fall sinnvoll und notwendig, vorhandene Komponenten mit zu nutzen und zusätzliche Komponenten für die ÖPNV-Priorisierung soweit wie möglich zu reduzieren. Insbesondere sollten bereits auf dem Fahrzeug vorhandene Informationen (z. B. GNSS-Standort, Geschwindigkeit, Türstatus) über standardisierte Schnittstellen gemeinsam verwendet werden. Als Schnittstelle könnte beispielsweise der nach der VDV-Schrift 301-1 (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 2014) definierte Standard für das Internetprotokoll basierte integrierte Bordinformationssystem IBIS-IP genutzt werden. Hier werden viele Informationen vor allem mit Fokus auf Fahrgastinformation im ÖPNV-Fahrzeug vorgehalten und verwaltet, wobei auch Informationen zur Linie, des Kurses, der aktuellen Fahrplanlage oder der Ortung für die Generierung von LSA-Telegrammen verwendet werden können. Eine weitere stan-

dardisierte Schnittstelle bietet die Flotten-Management-Schnittstelle (FMS), welche fahrzeugspezifische Parameter wie die aktuelle Geschwindigkeit oder den Status der Türen beinhaltet. Der vollständige Funktionsumfang ist in der „FMS-Standard description“ festgelegt (ACEA Task Force HDEI/BCEI 2017).

### 1.2.5 Infrastruktureitige Anforderungen

Seitens der Infrastruktur, d. h. speziell der LSA, muss ein ÖPNV-Empfangsmodul installiert werden. Dieses sollte vorzugsweise in die vorhandenen LSA-Schaltschranke integriert werden können. Im Idealfall sind außerhalb des LSA-Schaltschranks keine Maßnahmen erforderlich und es können vorhandenen Komponenten (z. B. zukünftige RSUs) mitverwendet werden. Müssen Komponenten außerhalb des Schaltschranks installiert werden – z. B. Antennen etc. – entstehen in der Regel hohe Aufwendungen für Tiefbau bzw. zur Kabeldurchführung.

## 1.3 Ortung der ÖPNV-Fahrzeuge

Voraussetzung für die Übertragung von ÖPNV-Anforderungen an die LSA ist die ausreichend exakte Eigenortung des ÖPNV-Fahrzeugs. Nur bei einer genauen Ortung kann das Fahrzeug die entsprechenden Meldungen zeit- und ortsgerecht an die LSA senden. Dies wird bei einer Genauigkeit von  $\pm 5$  m erreicht (siehe Kapitel 1.2.1). Für die Ortung finden aktuell unterschiedliche Methoden Anwendung, welche nachfolgend erklärt werden. Dies sind Verfahren der logischen Ortung wie Wegzähler, Baken, Infrarotbaken oder induktive Baken sowie satellitengestützte Systeme (GNSS). Die genannten Verfahren werden oft auch in Kombination eingesetzt.

### 1.3.1 Wegzählung

Ein älteres Prinzip zur Ortung eines ÖPNV-Fahrzeuges ist die Wegzählung auf dem bekannten Linienweg. Ausgehend von der ersten Haltestelle im Fahrtverlauf – deren Erreichen manuell durch das Fahrpersonal bestätigt wird – wird der zurückgelegte Weg gezählt. Da die Entfernungen zu den nächsten Haltestellen oder Aktionspunkten (z. B. LSA-Meldepunkt) in den Daten des Bordrechners hinterlegt sind, ist jederzeit eine exakte Ortung auf dem

geplanten Fahrweg möglich. Das Fahrzeug wird somit logisch auf dem geplanten Fahrwegverlauf geortet.

Die Wegzählung unterliegt gewissen Ungenauigkeiten. So kann z. B. ein Bus eine Kurve enger oder weiter durchfahren. Bei Schienenfahrzeugen können z. B. durchdrehende (schleudernde) oder blockierende (gleitende) Räder die Zählung verfälschen. Deshalb erfolgt in der Regel an Haltestellen nach Freigabe der Türen eine Synchronisation auf die planmäßige Weglänge im Linienverlauf. Dabei dürfen ungeplante Halte außerhalb von Haltestellen sowie Doppelhaltestellen mit unklarer Halteposition nicht zur Synchronisation genutzt werden, da dies zu einem Ortungsfehler führt.

Aufgrund der hohen Anfahrgenauigkeit und insbesondere bei Stadt- und Straßenbahnen häufig exakt vorgegebenen Haltepositionen kann mit der logischen Ortung eine sehr hohe Genauigkeit ( $\pm 2$  Meter) erreicht werden. Bei Bussen mit nicht so exakt definiertem Fahrweg sind im städtischen Bereich in der Regel noch bis zu  $\pm 10$  Meter möglich. Bei mehrfach inexakten Fahrwegen (z. B. mehreren Kreisverkehren infolge) oder sehr langen Haltestellenabständen und ausgelassenen Halten (z. B. im regionalen Busverkehr) kann die Abweichung jedoch auch wesentlich höher ausfallen.

Die Wegzählung kann als alleiniges Ortungssystem eingesetzt werden. Allerdings erfordert das System beim Verlassen des geplanten Fahrweges einen manuellen Eingriff durch das Fahrpersonal, da die Wegabweichung nicht automatisch erkannt werden kann. Deshalb wird die Wegzählung heute in der Regel mit Baken ( $\rightarrow$  Kapitel 1.3.2) oder einer satellitengestützten Ortung ( $\rightarrow$  Kapitel 1.3.3) kombiniert.

In einigen Systemen wird auch bereits auf die klassische Wegzählung verzichtet. Dies reduziert den Installationsaufwand im Fahrzeug, da kein Wegimpulssignal notwendig ist.

### 1.3.2 Baken

Baken sind an festen Punkten im Liniennetz installiert. Zwischen ÖPNV-Fahrzeugen und Baken können während der Vorbeifahrt Informationen in geringem Umfang (wenige Bytes) ausgetauscht werden. Dies ist in der Regel eine im jeweiligen Verkehrsnetz eindeutige Ortskennung (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 1993).

Grundsätzlich können Baken als alleinige Ortung genutzt werden, allerdings entsteht dann ein hoher Aufwand (eine Bake pro LSA-Meldepunkt). Deshalb werden Baken in der Regel mit dem Wegzähler ( $\rightarrow$  Kapitel 1.3.1) kombiniert, sodass eine Bake eine ganze Meldepunkttafel für den folgenden Streckenabschnitt enthält. Die Baken übernehmen nicht nur die Ortungsfunktion, sondern auch die Datenversorgung, wo welche Meldepunkte zu senden sind. In allen anderen Ortungssystemen müssen die Ortsbezüge der LSA-Meldepunkte vorweg in der Fahrplanung auf dem jeweiligen Fahrwegabschnitt definiert werden.

Zusätzlich können Informationen zum unmittelbar folgenden Fahrtverlauf enthalten sein, z. B. die auszusendenden LSA-Meldepunkte im folgenden Streckenabschnitt, Informationen zur Ansteuerung von Ansagen für die Fahrgäste, Ausstiegsseite und Ausstiegshöhe der folgenden Haltestelle etc.

In Kombination mit dem Wegzähler werden sehr hohe Ortungsgenauigkeiten ( $\pm 5$  Meter) erreicht. Vorteilhaft ist insbesondere, dass die Ortungsgenauigkeit gegenüber der einer Wegzählung ( $\rightarrow$  Kapitel 1.3.1) von der Anfahrgenauigkeit z. B. an Doppelhaltestellen entkoppelt werden kann. Gegenüber der satellitenbasierten Ortung ( $\rightarrow$  Kapitel 1.3.3) besitzen Baken den Vorteil, dass diese auch in vom Satellitensignal abgeschatteten Bereichen (Tunneln, Bahnhofshallen, Häuserschluchten) sehr genau funktionieren.

#### Infrarotbaken

Am weitesten verbreitet sind Infrarotbaken, da diese von Bus und Bahn gleichermaßen gelesen werden können. Sie werden gemäß Vorgabe der VDV-Schrift in einem vorgegebenen Winkel montiert. Die Infrarotbaken verfügen in der Regel über eine autarke Energieversorgung, z. B. Langzeitbatterien (Lebensdauer  $> 10$  Jahre) oder akkugepufferten Solarzellen.

Infrarotbaken können sehr einfach an häufig ohnehin vorhandenen Masten (Straßenbeleuchtung, Oberleitungsmasten, Verkehrszeichen) befestigt werden. Alternativ kann ein eigener Mast zu verhältnismäßig geringen Kosten (Punktfundament, vernachlässigbare Windlast) errichtet werden.

Bei Infrarotbaken handelt es sich um ein optisches Übertragungsverfahren. Das Verfahren ist damit anfällig für externe Störungen. Das System kann

bei extremer Witterung (hohe Luftfeuchtigkeit, Vereisung) gestört werden. Außerdem können die Sensoren durch Grünwuchs und durch große Fahrzeuge (z. B. Lkw während des Be- und Entladens) verdeckt werden. Hier sind ggf. zusätzliche organisatorische Maßnahmen (Grünpflege, Halteverbote und Überwachung) notwendig.

Infrarotbaken sind heute noch weitverbreitet im Einsatz. Durch Abkündigung seitens eines großen Herstellers ist die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Neulieferungen bereits heute sehr eingeschränkt bzw. kostenintensiv. Deshalb ist die Infrarotbake eine Auslauftechnologie und wird zunehmend durch alternative Ortungsverfahren wie z. B. GNSS (→ Kapitel 1.3.3) ersetzt. Dennoch werden einige Bestandssysteme noch über viele Jahre Infrarotbaken einsetzen.

### Induktive Baken

Induktive Baken nutzen Koppelspulen am Fahrzeug und an der Strecke zur induktiven Meldungsübertragung (IMU). Aufgrund der notwendigen exakten Ausrichtung der Antennen zwischen Fahrzeug und Strecke ist das Verfahren nur für Schienenfahrzeuge geeignet. Durch die induktive Übertragung ist das System sehr robust und zuverlässig und weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen (z. B. Witterung).

Nachteilig bei induktiven Baken ist der hohe Aufwand für Einbau und Pflege. Insbesondere in straßenbündigen Gleiskörpern entstehen hohe Aufwände für den Tiefbau. Im eigenen offenen Bahnkörper ist die Verlegung einfacher, aber im Vergleich zur Montage von Infrarotbaken immer noch aufwendiger.

Demgegenüber können induktive Baken die ohnehin bei Schienenfahrzeugen vorhandenen Einrichtungen zur Ansteuerung von Weichen nutzen, so dass auf dem Fahrzeug kein zweites System (Infrarot) installiert werden muss.

### 1.3.3 GNSS

Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) dienen allgemein der Positionsbestimmung und Navigation per Satellit. Die Positionierung erfolgt dabei mittels Trilateration, der Entfernungs- und Abstands-

messung zu drei Punkten. Dabei wird der Abstand zu drei Satelliten bestimmt, in deren Schnittpunkt sich die eigene Position befindet. Ein vierter Satellit ist für die Synchronisation der Zeit notwendig (MANSFELD 1998).

Das am weitesten verbreitete und bekannteste System ist dabei GPS (Global Positioning System) des Verteidigungsministeriums der USA. Offiziell in Betrieb ist es seit 1995 und wurde nach einer anfänglichen rein militärischen Nutzung auch für zivile Zwecke zur Verfügung gestellt. Im Einsatz sind dabei aktuell 32 aktive Satelliten.

Das europäische Pendant zu GPS ist Galileo. Es soll genauer als GPS und das russische GLONASS sein und dient primär ziviler Nutzung. Seit Anfang 2019 ist es mit 26 Satelliten nutzbar.

Das System GLONASS (GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) wird von der russischen Raumfahrtbehörde Roscosmos betrieben und dient wie GPS sowohl für militärische als auch für zivile Zwecke. Für die Ortung stehen 27 Satelliten zur Verfügung.

Seit 2004 existiert das chinesische Satellitennavigationssystem BeiDou. BeiDou arbeitet mit 12 Satelliten, die Nutzung war allerdings auf große Teile Asiens und den Pazifikraum begrenzt. Seit Beginn des Jahres 2019 ist es auch weltweit nutzbar.

Stand der Technik sind heute GNSS-Empfänger, die mehrere dieser Systeme gleichzeitig nutzen, um durch die Redundanz eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Heute eingesetzte GNSS-Empfänger geben den Standort bei Bedarf auch mehrmals je Sekunde aus, was eine vergleichsweise genaue Ortung auch bei hohen Geschwindigkeiten ermöglicht.

## 1.4 Datenübertragungssysteme und Sensorik im ÖPNV

Die für die ÖPNV-Priorisierung verwendeten Übertragungstechnologien sind Grundlage für die Übermittlung von Informationen vom ÖPNV-Fahrzeug an die LSA. Die wesentlichen im DACH-Raum eingesetzten Übertragungssysteme wie Analogfunk, Digitalfunk, Öffentlicher Mobilfunk, Infrarot sowie weitere Möglichkeiten werden nachfolgend erläutert.

### 1.4.1 Analogfunk

Im Mai 1980 wurde die VÖV<sup>1</sup>-Schrift 04.05.01 „Technische Anforderungen an rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme – Übertragungsverfahren Datenfunk“ (Ausschuß für elektrische Anlagen des VÖV 1984) veröffentlicht, welche das Übertragungsverfahren für den analogen Datenfunk definiert. Der analoge Datenfunk ist das bis heute weitverbreitetste Verfahren zur LSA-Ansteuerung. Die VÖV-Schrift beschreibt die „Luftschnittstelle“ und einige Dateninhalte. Die für die LSA-Ansteuerung relevanten Datentelegramme der R09-Familie wurde 1990 mit der VÖV-Schrift 04.05.1/Ergänzung 2 spezifiziert.

Die Telegramme werden in der Regel im 2m- oder 4m-Band, welches ursprünglich häufig zur Übertragung von analogen Sprachsignalen verwendet wurde, auf einem gemeinsamen Funkkanal mit einer Sendeleistung zwischen 1 W und 6 W ausgesendet. Da es keine Kanalsynchronisation gibt, können Telegramme auch gleichzeitig von verschiedenen Teilnehmenden gesendet werden. Dies kann zu einer gegenseitigen Störung dieser gleichzeitig gesendeten Telegramme führen, sodass keines dieser Telegramme erfolgreich am Empfänger dekodiert werden kann. Aus diesem Grund werden die Telegramme häufig wiederholt gesendet. Um bei der Wiederholung eine gegenseitige Störung zu vermeiden, wird ein dann zufälliger Zeitversatz gewählt. So steigt die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übermittlung. In der Regel wird jedes Telegramm einmal wiederholt. Höhere Wiederholraten sind möglich, führen aber zu einer insgesamt höheren Last auf dem Funkkanal und damit zu einer erhöhten Störwahrscheinlichkeit. Eine höhere Wiederholrate erhöht also nicht per se die Zuverlässigkeit der Übertragung. Gleiches gilt bei der Anhebung der Sendeleistung. Da sich hier die räumliche Ausbreitung eines jeden Telegramms erhöht, steigt auch die Wahrscheinlichkeit zur Kollision der Telegramme.

Auf der physikalischen Ebene werden die Informationen der LSA-Telegramme über verschiedenen Modulationsverfahren übermittelt. Dabei werden im praktischen Einsatz das klassische Fast-Frequency-

Shift-Keying (FFSK) oder das NEMO-Modulationsverfahren verwendet. Beim FFSK werden einzelnen Zeichen verschiedene Funkfrequenzen zugewiesen, welche auf das Trägersignal nacheinander aufmoduliert werden. Im Gegensatz dazu wird beim NEMO-Übertragungsverfahren nicht die Frequenz verändert, sondern die Amplitude und die Phasenlage je nach zu übertragenden Binärfolge, wodurch einerseits eine höhere Übertragungsrate bei gleichzeitig geringerer benötigter Bandbreite als bei FFSK erreicht werden kann. Das NEMO-Verfahren wurde 1993 geschützt (PFIFFNER 1992).

In jedem Fall darf auf der Seite des LSA-Steuergertes nur das jeweils erste erfolgreich dekodierte Telegramm ausgewertet werden. Andernfalls führt dies zu Störungen, wenn beispielsweise bei einer Doppelanmeldung lediglich eine einfache Abmeldung folgt.

### 1.4.2 Digitalfunk

Ende der 1990er Jahre wurden als Ablösung von Analogfunksystemen die ersten Digitalfunksysteme im ÖPNV eingeführt. Hauptfunktion aller dieser Systeme, die im Kern auf die Anforderungen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie Polizei und Feuerwehr ausgelegt sind, war zu dieser Zeit der Sprachfunk.

Allerdings hat dieser Anwendungsfall – Übertragung kleinster Datenmengen von einem dezentralen Sender (Fahrzeug) an einen dezentralen Empfänger (LSA) – keine Entsprechung im BOS-Funk. Dieser Direktmodus (Direct Mode Operation, DMO) für Daten ist zwar z. B. im TETRA-Standard spezifiziert, aufgrund der geringen Verbreitung des Anwendungsfalls von den Systemlieferanten aber entweder nicht implementiert oder mit Nachteilen verbunden. So führt der Wechsel in den Direktmodus zur Ausbuchung aus dem Trunk-Mode und das Fahrzeug ist, solange es sich nicht wieder vollständig im Trunk-Mode angemeldet hat, für einige Zeit weder im Sprach- noch im Datenfunk für die Leitstelle erreichbar. Da zur LSA-Ansteuerung viele solcher Meldungen in kurzen Zeitabständen notwendig sind, wäre das ÖPNV-Fahrzeug kaum durch die Leitstelle erreichbar, was nicht praktikabel ist. Auch die Ausrüstung mit einem zweiten Funkgerät, welches permanent nur für die LSA-Ansteuerung im Direktmodus arbeitet, ist aufgrund des Preises und

<sup>1</sup> Vorgängerorganisation des VDV

des geringen verfügbaren Einbauplatzes in den Fahrzeugen nicht praktikabel.

Deshalb arbeiten diese Systeme heute nahezu ausschließlich im Trunk-Mode. Das heißt es erfolgt keine direkte Kommunikation zwischen ÖPNV-Fahrzeug und LSA. Stattdessen werden die Meldungen vom Fahrzeug an die Infrastruktur (Funknetz) übergeben und von dort aus an die LSA. Nachteilig ist hierbei das Zeitverhalten. Freie Dateninhalte benötigen relativ lange, um auf diese Weise übertragen zu werden<sup>2</sup>. Dies ist für eine qualitätsgerechte LSA-Ansteuerung nicht ausreichend. Deshalb kommen hier teils zusätzliche Verfahren zum Einsatz, indem Statusinformationen mit geringem Informationsinhalt und schnellerer Übertragung (SDS) zur Signalisierung und Aktivierung eines zuvor langsam übertragenen LSA-Telegramms verwendet werden.

Das digitale Funksystem muss hochverfügbar aufgebaut sein, da andernfalls beim Ausfall des Funknetzes (Backend) netzweite Ausfälle der LSA-Ansteuerung auftreten. Es ergeben sich gegenüber dem Analogfunk keine funktionalen Vorteile, da die gleichen Informationen übertragen werden. Dem gegenüber steht jedoch ein erheblicher Mehraufwand in der Infrastruktur bei längeren und unsteten Signallaufzeiten. Deshalb haben Digitalfunksysteme zur ÖPNV-Ansteuerung nur eine geringe Verbreitung gefunden. Vielmehr ist bei den Verkehrsunternehmen in der Vergangenheit der Trend zu beobachten, die Leitstellenkommunikation zu digitalisieren, den analogen LSA-Datenfunk aber beizubehalten.

In der VDV-Schrift 426 (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 2014) werden die im ÖPNV zur LSA-Ansteuerung in Deutschland verbreiteten Digitalfunklösungen beschrieben. Es ist zu beachten, dass diese VDV-Schrift im Gegensatz zu älteren Schriften (z. B. VÖV 04.05.01) keine Standardisierung mehr darstellt, sondern eine Aufzählung der bestehenden, untereinander nicht kompatiblen Insellösungen aufzeigt.

## TETRA

Terrestrial Trunked Radio (TETRA), ursprünglich Trans European Trunked Radio, entstand Mitte der 1990er Jahre vor allem im BOS-Umfeld und ist als Standard für digitalen Bündelfunk inzwischen weit verbreitet. Schwerpunkt von TETRA war zunächst die Sprachkommunikation. Datendienste hatten im BOS-Umfeld nur eine geringe Bedeutung, während bei ÖPNV-Unternehmen bereits frühzeitig die Datenkommunikation dominierte. Da TETRA frühzeitig als offener Standard angelegt und vom European Telecommunications Standards Institute (ETSI) öffentlich dokumentiert<sup>3</sup> wurde, hat dieser eine große Verbreitung im Daten- und Sprechfunk des ÖPNV gefunden.

Für die ÖPNV-Priorisierung hat sich der Analogfunk durchgesetzt. Im Anwendungsfall LSA-Ansteuerung weist TETRA Nachteile in der praktischen Umsetzung auf. Die Übermittlung von Meldungen vom Fahrzeug zur LSA ist im Prinzip ein klassischer Fall für den Direktmodus (DMO). Da in den ÖPNV-Fahrzeugen aus Platz- und Kostengründen jedoch nur ein TETRA-Funkgerät verbaut wird, müsste dieses dann regelmäßig zwischen DMO (für die LSA-Ansteuerung) und dem Trunked-Mode (für die Kommunikation mit der Leitstelle) umschalten. Das Verfahren ist nicht praxistauglich, da das Einbuchten im Trunked-Mode aufgrund der notwendigen Synchronisation für das in TETRA verwendete Zeitmultiplex-Verfahren (TDMA) relativ lange dauert und das Fahrzeug in dieser Zeit nicht durch die Leitstelle erreichbar ist.

Deshalb wird der TETRA-LSA-Funk im Trunked-Mode betrieben. Dies hat den Nachteil, dass längere Telegrammlaufzeiten entstehen. Diese können teilweise (Vor- und Hauptanmeldung) durch Vorverlegung der Meldepunkte um einige Meter ausgeglichen werden. Das funktioniert jedoch nicht bei der Abmeldung. Hier könnte eine Vorverlegung unter Umständen zur Abmeldung vor der LSA-Haltlinie führen. Bei der Abmeldung über TETRA entstehen längere Signallaufzeiten, die die Leistungsfähigkeit der signalisierten Kreuzung negativ beeinflussen

<sup>2</sup> Beispielsweise kann je nach Anzahl von gleichzeitigen Nutzern des TETRA-Funksystems bei einer gemischten Nutzung von Daten- und Sprechfunk eine Paketverzögerung von bis zu 8 Sekunden entstehen (AXIOTIS & SALKINTZIS, 2009). Bei analogen Übertragungsverfahren besteht üblicherweise eine maximale Verzögerung von wenigen Millisekunden.

<sup>3</sup> Die grundlegenden Eigenschaften des TETRA-Funkverfahrens sind in ETSI EN 300 392-1 (2020) und ETSI EN 300 392-2 (2016) beschrieben.

können. Zudem ist im Trunk-Mode die Verfügbarkeit der gesamten TETRA-Infrastruktur notwendig. Bei Ausfall wichtiger Komponenten (z. B. einer Basisstation) entfällt auch die LSA-Kommunikation. Deshalb wird häufig – auch wenn ein ÖPNV-Unternehmen seine Kommunikation ansonsten auf TETRA umgestellt hat – der analoge Funk für die LSA-Priorisierung beibehalten.

### **Tetrapol**

Tetrapol hat nur eine geringe Verbreitung bei den ÖPNV-Unternehmen in Deutschland gefunden. Trotz der Namensähnlichkeit zu TETRA unterscheidet sich das Funkverfahren recht deutlich und die Systeme sind zueinander nicht kompatibel. Grundsätzlich weist Tetrapol gegenüber TETRA für ÖPNV-Unternehmen funktionale Vorteile auf. Durch den anderen technischen Ansatz können Kanalwechsel schneller erfolgen und eine Umschaltung in den Direktmodus (DMO) ist praktikabel. Wie auch im Analogfunk können Leitstellenkommunikation und LSA-Funk mit den gleichen Funkgeräten erfolgen.

Tetrapol war zunächst ein proprietäres Produkt eines einzelnen Herstellers und konnte sich deshalb gegenüber dem offenen TETRA-Standard nicht durchsetzen, obwohl es technisch für den Anwendungsfall der LSA-Ansteuerung besser geeignet ist. Die Entscheidung des Herstellers, auch Tetrapol zu öffnen und zu standardisieren, kam zu spät, sodass TETRA-Systeme insgesamt und im ÖPNV die größere Verbreitung erfuhren.

#### **1.4.3 Öffentlicher Mobilfunk**

Öffentlicher Mobilfunk wird bisher nur in geringem Umfang zur ÖPNV-Bevorrechtigung eingesetzt. Das System bietet sich für kleinere Verkehrsunternehmen an, die in keine eigene Funkinfrastruktur investieren müssen oder wollen.

Bei der Nutzung von 2G-Netzen (GPRS) entstehen lange und vor allem unstete Telegrammlaufzeiten (bis 4 Sekunden von Fahrzeug zur LSA). Hierdurch sind Ausgleichsmaßnahmen notwendig, wie z. B. vorzeitiger Versand mit prognostizierter Durchfahrtszeit o. Ä. Spätere Mobilfunksysteme 3G (UMTS) und 4G (LTE) bieten wesentliche geringere Latenz und damit kürzere Telegrammlaufzeiten.

Die Daten werden als IP-Datentelegramme übertragen. Es kommen zwei verschiedene Konzepte zum

Einsatz. Im dezentralen Konzept sendet ein ÖPNV-Fahrzeug vergleichbar dem Analogfunk eine Meldung direkt an die mit einer statischen IP-Adresse versehene LSA.

Beim zentralen Konzept senden die Fahrzeuge die Meldungen nicht direkt an die LSA, sondern zunächst an eine zentrale Lichtsignalsteuerungszentrale. Von diesem wird die Meldung – auch unter Nutzung nicht mobilfunkbasierter Datenverbindungen – an die jeweilige LSA weitergegeben.

#### **1.4.4 Infrarot**

In nur wenigen Einzelfällen erfolgt die Informationsübertragung und ÖPNV-Anforderung vom Fahrzeug an die LSA per Infrarot und Baken am Straßenrand. Das Verfahren ist nicht mit der Übertragung von Meldepunkt- und Ortungsinformationen von Streckenbaken an Fahrzeuge zu verwechseln (→ Kapitel 1.3.2). Hierbei erfolgt die Übertragung in die umgekehrte Richtung.

In diesem Verfahren sendet das Fahrzeug permanent eine Kennung über im Fahrzeug verbaute Infrarotsender. Aufgrund der geringen Bandbreite werden nur wenige Informationen (z. B. Liniennummer oder Zielnummer) übertragen. Auf der Seite der Infrastruktur sind ortsfeste Infrarotempfänger am Straßenrand vorhanden. Diese leiten die empfangenen Daten per Kabelstrecke an das angeschlossene LSA-Steuergerät weiter.

Es handelt sich um ein optisches Verfahren, was externen Störungen ausgesetzt ist. Das System kann bei extremer Witterung (hohe Luftfeuchtigkeit, Vereisung) gestört werden. Außerdem können die Sensoren durch Grünwuchs und durch große Fahrzeuge (z. B. Lkw während des Be- und Entladens, ...) verdeckt werden. Hier sind ggf. zusätzliche organisatorische Maßnahmen (Grünpflege, Halteverbote und Überwachung) notwendig.

#### **1.4.5 Weitere Möglichkeiten und Rückfallebenen**

In einfachen verkehrstechnischen Fällen und ggf. als Rückfallebene kommen weitere Detektionsverfahren zum Einsatz. Diese sind vielfältig, erfassen in der Regel aber nur eine einfache Anwesenheitsinformation ohne weitere verkehrliche Informationen (Linie, Kurs, ...) und sind für eine qualitätsgerechte LSA-Steuerung daher nur eingeschränkt zu verwenden.

Normalerweise stehen diese Detektoren nur punktuell zur Verfügung, ergeben also keine vollständige Meldepunktkette und werden nur als einzelne Anmeldung genutzt. Die Abmeldung erfolgt über Zeitschaltungen in der LSA-Steuerung. Als Rückfallebene oder bei sehr einfachen verkehrstechnischen Anlagen mit allerdings sehr hohen Anforderungen an die Punktgenauigkeit (z. B. Zeitinseln an Straßenbahnhaltestelle) haben diese Detektoren aber weiterhin ihre Berechtigung und Notwendigkeit.

Oberleitungskontakt (nur Straßenbahn und O-Bus) können nur einfache Anwesenheitsinformationen übergeben werden. Eine Richtungsinformation ist nicht möglich. Ggf. ist in der LSA-Steuerung zu beachten, dass Mehrfachtraktionen auch mit mehreren Stromabnehmern ausgerüstet sein können und hierdurch Mehrfachdetektionen der gleichen Fahrt erfolgen können. Zur Abmeldung wird ein zweiter Kontakt benötigt.

Weitere Systeme sind bspw. Weichenkontakte und Induktivschleifen oder auch manuelle Kontakte wie Schlüsselschalter, Taster, Chipkartenleser etc.

## 1.5 Bestandssysteme der ÖPNV-Priorisierung

Auf Basis der Ergebnisse einer Umfrage im Rahmen der Diplomarbeit „Nutzung des C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für die ÖPNV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten“ (ZIMMERMANN 2019) und eigener Datenbestände der Studierersteller werden in 80 Städten<sup>4</sup> in Deutschland hauptsächlich<sup>5</sup> folgende Übertragungsverfahren eingesetzt:

- Analogfunk (VDV):  
Aachen, Augsburg, Baden-Baden, Berlin (Strab), Bielefeld, Bocholt, Bochum, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bünde, Chemnitz, Cottbus, Darmstadt, Detmold, Dresden, Düsseldorf, Essen, Esslingen, Frankfurt a. M., Freiburg, Freising, Gelsenkirchen, Gera, Görlitz, Gotha, Hal-

berstadt, Halle (Saale), Ingolstadt, Jena, Kaiserslautern, Karlsruhe, Kassel, Kiel, Krefeld, Landshut, Lemgo, Lübben, Lübeck, Lüdenscheid, Ludwigsburg, Ludwigshafen, Mainz, Marburg, Mönchengladbach, München, Münster, Neu-Ulm, Neubrandenburg, Neumünster, Nürnberg, Offenburg, Osnabrück, Passau, Pirmasens, Regensburg, Rostock, Saarbrücken, Schwerin, Solingen, Stuttgart, Ulm, Unna, Weiden i. d. OPf., Weimar, Wiesbaden, Wolfsburg, Wuppertal, Zwickau (69).

- Analogfunk (Nemo):  
Erfurt, Frankfurt (Oder), Leipzig, Potsdam (4).
- Digitalfunk TETRA:  
Bochum, Bonn, Dortmund, Köln (4).
- Digitalfunk Tetrapol:  
Berlin (Bus), Hamburg (2).
- Öffentlicher Mobilfunk:  
Böblingen, Dresden, Düsseldorf, Heidenau (4).
- WLAN IEEE802.11p – ETSI ITS G5:  
Düsseldorf, Kassel (2).  
Hierbei handelt es sich um erste Pilotversuche und keinen produktiven Einsatz der Technologie. Oft kommt ein hybrides System der Priorisierung bestehend aus herkömmlicher Priorisierung und ETSI ITS-G5 zum Einsatz.
- Sonstige:  
Magdeburg (Infrarot), Nordhausen (Oberleitungskontakte) (2).

### Auswertung

Grundsätzlich haben sich funkbasierte Übertragungsverfahren bei der Ansteuerung von LSA durch ÖPNV-Fahrzeuge durchgesetzt. Diese werden ggf. durch unterschiedliche Verfahren in der Rückfallebene ergänzt. Die deutschlandweite Verteilung der Verfahren zeigt Tabelle 1-1.

Dominierend ist heute weiterhin der Analogfunk. In der Stichprobe von 80 Städten verwenden 73 analoge Funktechnologien (VDV & NEMO) zur Ansteuerung von Lichtsignalanlagen.

<sup>4</sup> Keine Vollerfassung, aber ausreichend repräsentativ.

<sup>5</sup> Nebenanwendungen wie Rückfallebenen werden nicht erfasst.

Im Gegensatz dazu sind digitale Bündelfunksysteme (TETRA, Tetrapol) nur punktuell im Einsatz und damit eher Insellösungen. Auch der öffentliche Mobilfunk ist nur in geringer Zahl im Einsatz, ergänzt

aber teils im Mischbetrieb andere Funkverfahren (z. B. Stadtverkehr – Analogfunk, Regionalverkehr – Mobilfunk). Eine geografische Übersicht zur Stichprobe ist in Bild 1-2 dargestellt.

	Analog VDV	Analog NEMO	Digital TETRA	Digital Tetrapol	Öffentlicher Mobilfunk	ETSI ITS-G5
Anzahl	69	4	4	2	4	2
Anteil in %	81,5 %	5,1 %	5,1 %	2,6 %	5,1 %	2,6 %

Tab. 1-1: Funkübertragungsverfahren der Stichprobe (n = 80); Mehrfachnennungen möglich

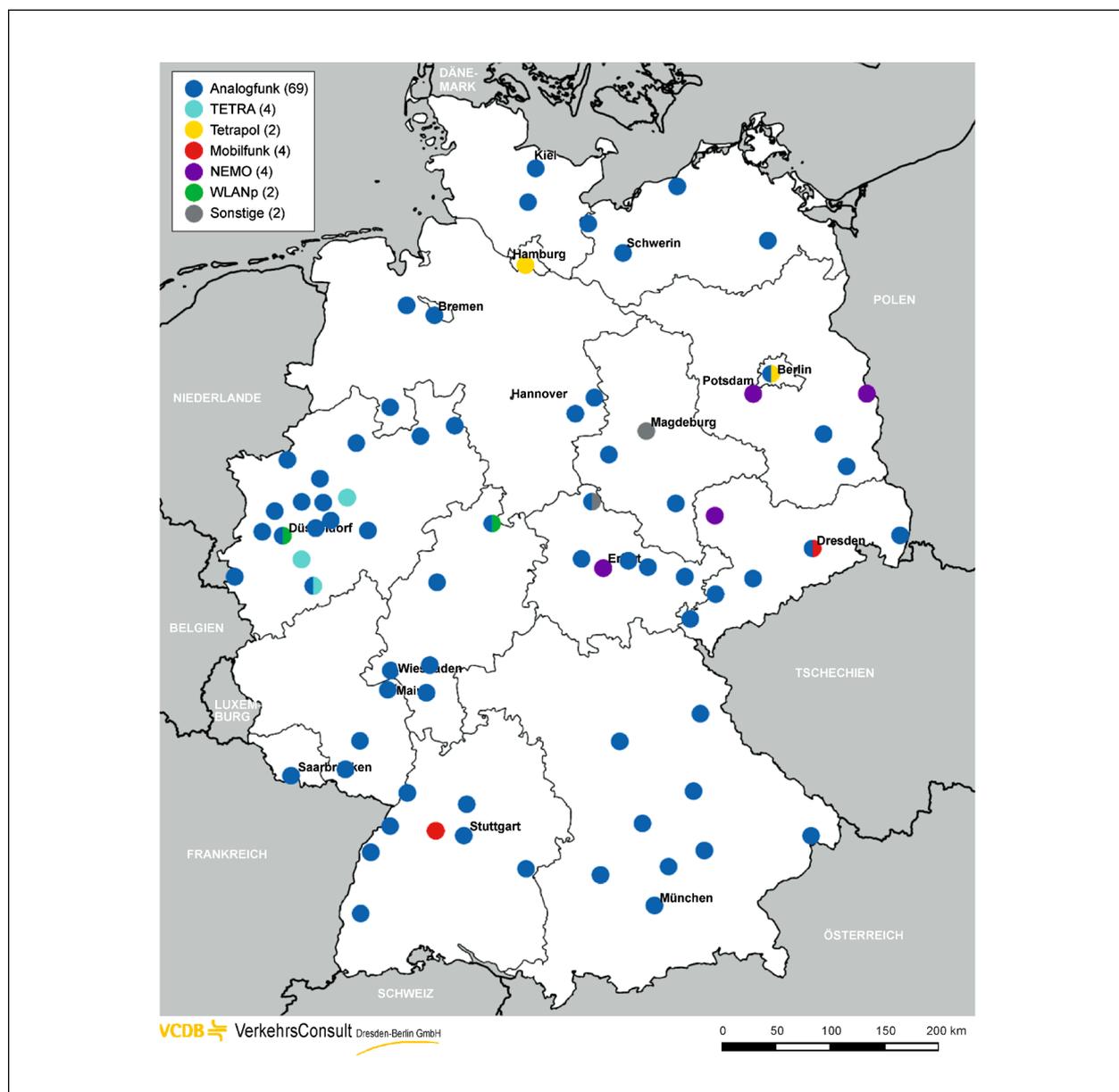


Bild 1-2: LSA-Funkübertragungssysteme im Bestand

### 1.6 Bewertung der Bestandssysteme der ÖPNV-Priorisierung

Die heutigen verbreiteten Verfahren berücksichtigen insbesondere die räumlichen und zeitlichen Anforderungen. Schwächen weisen alle Verfahren bei den situationsbedingten Anforderungen auf. Die Ursache liegt im heute üblichen Meldepunktverfahren (siehe Kapitel 1.1.1), in dem bei einer Zufahrt zu einer LSA nur sehr wenige Meldungen an die LSA übergeben werden und damit für die LSA-Steuerung keine kontinuierliche Fahrzeugverfolgung möglich ist. Bis auf den öffentlichen Mobilfunk, da dieser oft bereits im Fahrzeug integriert ist, sind alle Verfahren relativ platzaufwendig bei der Montage im ÖPNV-Fahrzeug und innerhalb der Infrastruktur.

Die Bewertung der in Tabelle 1-2 gelisteten Verfahren basiert auf der folgend beschriebenen Wertungsskala:

- ++ Kriterium sehr gut bzw. sehr vorteilhaft erfüllt
- + Kriterium gut bzw. vorteilhaft erfüllt
- o Kriterium durchschnittlich erfüllt
- Kriterium nur teils erfüllt
- Kriterium nicht oder nur mit hohem Aufwand bzw. unvorteilhaft erfüllt

## 2 C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung

### 2.1 Recherche zu Pilotprojekten

Die ersten C2X-Systeme zur ÖPNV-Ansteuerung von LSA sind im Rahmen von Forschungsprojekten im Pilot-Status. In diesen Projekten wurden jeweils nur eine geringe Anzahl an ÖPNV-Fahrzeugen und ein geringer Anteil des Streckennetzes ausgerüstet, sodass stets ein Parallelbetrieb mit den bestehenden klassischen Übertragungsmedien (Analogfunk) umgesetzt wurde. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Projekte im DACH-Raum beschrieben und die veröffentlichten Ergebnisse zusammengefasst.

#### 2.1.1 Düsseldorf (KoMoD)

Das Projekt KoMoD (Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf) ist ein vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) gefördertes Projekt und fand von 2017 bis 2019 in Düsseldorf statt.

„Ziel des Projekts war die praxisnahe Erprobung neuer Technologien zur Fahrzeug-Infrastruktur-Vernetzung sowie des hoch- und vollautomatisierten Fahrens. Hierzu zählen die Datenbereitstellung und Kommunikation auf der Grundlage von existierenden C2X-Standards sowie die Untersuchung des Zusammenspiels unterschiedlicher Fahrassistentz-Funktionen in realen Fahrsituationen. Unter Berücksichtigung des Technologiemix im Fahrzeug fokussiert das Testfeld auf Aspekte des infrastrukturseitigen Systemdesigns, die den Weg zur Markteinführung maß-

	Analogfunk	TETRA (Trunked Mode)	Tetrapol (Direct Mode)	Öffentlicher Mobilfunk	Infrarot
Verbreitung	++	o	o	o	--
Räumliche Anforderungen (Reichweite)	+	++	+	++	-
Zeitliche Anforderungen (Zeitverhalten)	+	-	+	- (2G) o (3G) + (ab 4G)	+
Situationsbedingte Anforderungen (Häufigkeit der Standortmeldungen)	o	o	o	o	-
Fahrzeugseitige Anforderungen	o	o	o	+	-
Infrastrukturseitige Anforderungen	o	o	o	+	--
Betriebskosten	++	o	o	-	++

Tab. 1-2: Bewertung der aktuellen Verfahren

geblich beeinflussen werden. Die Automatisierung und Vernetzung der Verkehrssysteme beschränkt sich nicht auf den technologischen Blickwinkel der Verkehrstechnik und des Automobilsektors. Der Zielkatalog des Testfeldes Düsseldorf analysiert in einem integrativen Ansatz die Wirkungen auf Sicherheit, Umwelt und Effizienz ebenso wie gesellschaftliche Aspekte.

Das Projekt betrachtet zahlreiche Anwendungsfälle, die von den Projektpartnern getestet und realisiert werden. Dazu gehört u. a. die kooperative Lichtsignalanlage. Hier wurden unterschiedliche Varianten der Priorisierung getestet. Zum einen die klassische lokale Priorisierung mit einem ergänzenden Fahrassistenzsystem und der Nutzung von C2X-Daten. Zum zweiten eine zentrale Priorisierung unter Nutzung von öffentlichem Mobilfunk.“ (KoMoD 2019)

Im C2X-Anwendungsfall in Düsseldorf wird das R09-Telegramm als Bestandteil der Cooperative Awareness Message (CAM)-Nachricht vom ÖPNV-Fahrzeug an die LSA übergeben. Dabei kommt eine separate OBU zum Einsatz. Es besteht keine Verbindung zum ITCS-Bordrechner. Somit liegen nicht alle Informationen zum Fahrzeugstatus vor (z. B. Türschließkriterium, Linien-, Kursnummer).

Es zeigte sich, dass die exakte Ortung allein per GPS (ohne weiteres Korrektursignal bzw. Kopplung an die Odometrie des Fahrzeugs) im urbanen Umfeld eine Herausforderung darstellt und zu ungenau sein kann, sodass in der Folge Meldepunkte verpasst werden. Dies hat wiederum negative Auswirkungen auf die Qualität der Priorisierung an den LSA.

Das Folgeprojekt KoMoDnext ist Anfang 2020 gestartet und wird voraussichtlich Ende 2021 abgeschlossen sein.

### 2.1.2 Kassel (VERONIKA)

Das Projekt VERONIKA (Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel) war ein vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) gefördertes Projekt und fand von 2017 bis Ende 2019 in Kassel statt.

„Im Projekt sollte die Vernetzung von Lichtsignalanlagen mit Straßenbahnen und Bussen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI G5 exemplarisch umgesetzt und erprobt werden. Eine kontinuierliche und bidirektionale Kommunikation soll neue Signalisierungs- und

darauf abgestimmte Fahrstrategien ermöglichen und so zu einer netzweit energiesparenderen Fahrweise beitragen. Durch die Berücksichtigung vernetzter Rettungsfahrzeuge soll zudem die Verkehrssicherheit weiter verbessert werden.

Im Testfeld Kassel werden Straßenbahnen, Busse und Rettungsfahrzeuge mit Onboard Units ausgerüstet, welche mit Roadside Units operative Daten austauschen. Zudem werden durch eine mobilfunkgestützte Kommunikation mit einem Metadatenserver Informationen zur Behandlung konkurrierender Anforderungen versendet. Die Entwicklungsarbeiten und die Erprobung werden durch eine mikroskopische Verkehrssimulation „in-the-Loop“ unterstützt. Die abschließende Evaluation stützt sich sowohl auf Simulationsversuche als auch auf Feldversuche unter realen Betriebsbedingungen im städtischen Straßenverkehr.“ (VERONIKA 2019)

Im C2X-Anwendungsfall wurde das R09-Telegramm als Bestandteil der CAM-Nachricht vom ÖPNV-Fahrzeug an die LSA übergeben. Im Gegensatz zum Projekt KoMoD (siehe Kapitel 2.1.1) werden zusätzlich neben den CAM-Nachrichten auch direkt die für Prioritätsanforderungen vorgesehene C2X-Nachricht SREM verwendet.

### 2.1.3 Braunschweig/Magdeburg (SIRENE)

Das Projekt SIRENE (Secure and Intelligent Road Emergency Network) ist ein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördertes Projekt und fand mit einer Laufzeit von September 2017 bis August 2020 statt. Es sind die Integration und abschließende Demonstration des entwickelten Systems sowohl in Braunschweig als auch in Magdeburg geplant (BMVI SIRENE 2020).

Ziel des Projektes war die Beschleunigung von Sicherheits- und Rettungseinsätzen durch Grüne Wellen und optimiertes Routing in urbanen Gebieten. Umgesetzt werden sollte dies unter anderem durch ein für Einsatzfahrzeuge optimiertes Navigationssystem. Zudem sollten Lichtsignalanlagen im Bedarfsfall ein Sonderprogramm zur Bevorzugung von Einsatzkräften schalten, um diese schneller an ihr Ziel zu bringen.

Im C2X-Bereich kommt im Projekt SIRENE unter anderem ETSI ITS-G5 zum Einsatz. Details über die gesendeten Informationen wurden noch nicht veröffentlicht.

**2.1.4 Hamburg (BiDiMoVe)**

Das Projekt BiDiMoVe (Bidirektional, Multimodal, Vernetzt) ist ein vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) gefördertes Projekt und findet von 2018 bis Ende 2021 in Hamburg statt.

„Auf Basis der ganzheitlichen IVS-Strategie der Stadt Hamburg wollen die Projektpartner die Implementierung und Erprobung einer Public Key Infrastructure für den informationstechnisch sicheren Betrieb kooperierender IVS-Komponenten erreichen und so einen Piloten für zukünftige Einsatzszenarien erarbeiten. Als Anwendungsfelder dienen die Einsatzoptimierung und gesicherte Priorisierung des ÖPNV sowie die Erprobung eines Abbiegeassistenten für die Busfahrer, mit dem vor parallel querenden Radfahrern und Fußgängern gewarnt wird.

Damit eine gezielte Kommunikation zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmern ermöglicht wird, sind neue Prozesse für die Zertifikats- und Rechteverwaltung zu spezifizieren und umzusetzen. Die Stadt Hamburg nutzt für diese Szenarien Linienbusse in einem ausgewählten Testgebiet, um die Technik im Realbetrieb auf Alltagstauglichkeit, Effizienz und Akzeptanz zu prüfen. Um die Übertragbarkeit von Diensten für das vernetzte Fahren zu gewährleisten, sollen erstmals die neuen OCIT-Schnittstellen (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) der kooperativen Stadtinfrastruktur sowie die nationale IVS-Rahmenarchitektur in einem realen städtischen Umfeld eingesetzt werden.“ (BiDiMoVe 2020)

**2.1.5 C-ROADS Germany – Urban Nodes**

Einen Ausblick über die Entwicklung der ÖPNV-Priorisierung via ETSI ITS-G5 bzw. Cellular-V2X gibt das Projekt C-ROADS – Urban Nodes. Im Zeitraum 2019 bis 2023 erfolgt in über 43 europäischen Städten der Einsatz von C-ITS in städtischen Gebieten. In Deutschland sind die Städte Hamburg, Hessen/Kassel und Dresden beteiligt. Ziel ist die europaweite Harmonisierung der C-ITS Services im urbanen Raum gemäß den EU-Vorschriften und Standards.

Der C-ITS Service Traffic Signal Priority (TSP) wird sowohl in Kassel als auch in Dresden erprobt und umfasst die Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs über die C2X-Technologien und ETSI ITS-G5.

**2.2 Systemskizze und Systemübersicht**

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über das Gesamtsystem der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung inklusive einer Beschreibung der relevanten Systembestandteile und ihrer Schnittstellen. Auf dieser Grundlage werden die Prozessabläufe und Nachrichtenflüsse der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung dargestellt.

**2.2.1 Systemübersicht C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung**

Bild 2-1 zeigt die Systemübersicht der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung. Dabei werden die für eine auf Basis des Kommunikationsstandards ETSI

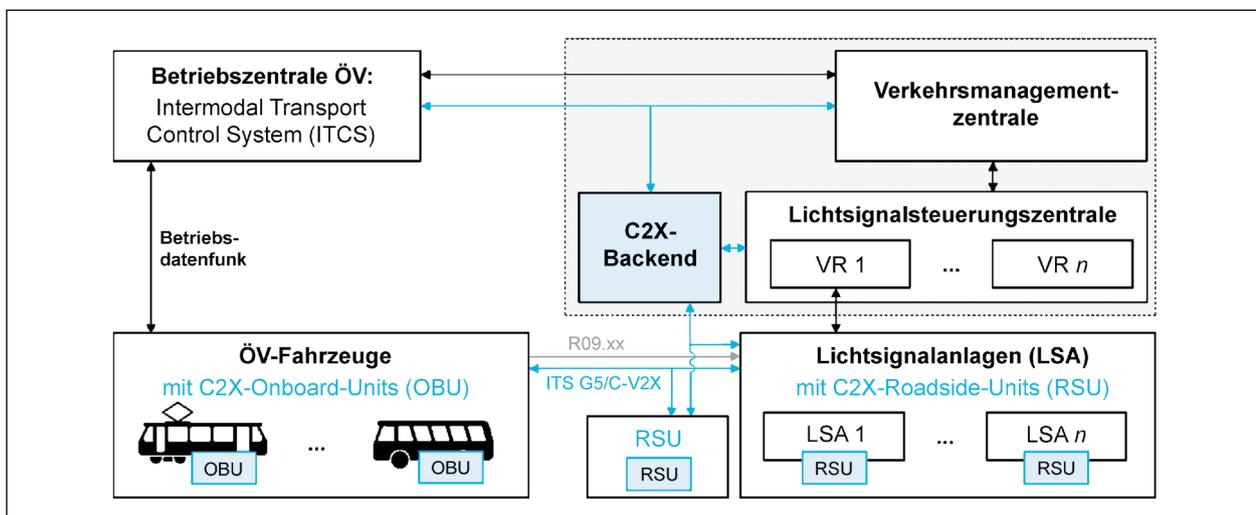


Bild 2-1: Systemübersicht C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung

ITS-G5 basierende ÖPNV-Priorisierung relevanten Systembestandteile und wichtigsten Schnittstellen schematisch dargestellt. Systembestandteile, die durch die Einführung von ETSI ITS-G5 auf Infrastruktur- und Fahrzeugseite hinzukommen bzw. angepasst werden müssen, sind farblich hervorgehoben.

Die verkehrstechnische Infrastruktur eines Straßenbetreibers (z. B. Kommune) umfasst i. d. R. einen oder mehrere Verkehrsrechner (VR) – die sogenannte Lichtsignalsteuerungszentrale, an die wiederum jeweils mehrere Lichtsignalanlagen (LSA) angebunden sind. Größere Kommunen verfügen darüber hinaus i. d. R. über eine Verkehrsmanagementzentrale. Die Lichtsignalanlagen selbst umfassen jeweils ein Steuergerät, an das Signalgeber sowie Dateneingabegeräte (z. B. Detektoren) angebunden sind. Im Zusammenhang mit der konventionellen ÖPNV-Priorisierung sind auch Empfangseinheiten für bspw. R09.xx-Telegramme der einzelnen Meldepunktketten lokal an die Lichtsignalanlagen angebunden.

Wird eine Lichtsignalanlage für C2X-basierte Anwendungen ertüchtigt, so erfolgt die Installation einer Roadside Unit (RSU), die i. d. R. Teil des Gesamtsystems Lichtsignalanlage ist. RSUs umfassen mindestens ein Kommunikationsmodul (Sende- und Empfangseinheit) für ETSI ITS-G5-Nachrichten (auch als WLAN IEEE 802.11p bezeichnet, vgl. Kapitel 2.2.2). Darüber können bestimmte verkehrliche Anwendungen und Funktionen dezentral in einer RSU implementiert sein. Potenziell können RSUs auch andere Übertragungskanäle als ETSI ITS-G5 unterstützen (z. B. Cellular-V2X, auch C-V2X oder zukünftig 5G), was derzeit jedoch nur in Erprobungsinfrastrukturen der Fall ist. Die RSU kann hybrid betrieben werden, d. h. sie übernimmt die Funktionen der R09.xx Empfangseinheit und bedient gleichzeitig die C2X-basierten Anwendungen, oder die herkömmliche R09.xx-Empfangseinheit wird über die C2X-basierten Anwendungen vollständig ersetzt.

Grundsätzlich ist auch die Installation von abgesetzten RSUs möglich. Diese befinden sich nicht in direkter Nähe des LSA-Steuergeräts und können bspw. bei langen Annäherungsstrecken zur Absicherung der Kommunikation eingesetzt werden. Diese RSUs sind in der Regel direkt an das C2X-Backend angebunden, können ggf. auch direkt an eine benachbarte LSA angebunden werden.

Beim Einsatz von RSUs werden die zentralenseitigen Systeme um ein C2X-Backend ergänzt, das grundsätzlich in eine Verkehrsmanagementzentrale bzw. in die Lichtsignalsteuerungszentrale integriert bzw. daran angebunden werden kann. Dieses übernimmt Funktionen der Betriebsüberwachung, der Datenaufnahme und -aufbereitung der einzelnen RSU (insbesondere Probe Vehicle Data, PVD aus Fahrzeugdaten) sowie die Verteilung zentral verfügbarer Nachrichten (z. B. Gefahrenwarnungen mittels Decentralised Environmental Notification Messages, DENM) an bestimmte RSUs.

Die einzelnen Fahrzeuge einer ÖPNV-Flotte sind i. d. R. an ein zentrales Intermodal Transport Control System (ITCS) angebunden. In diesem werden die aktuellen Standorte der ÖPNV-Fahrzeuge, ihre Fahrplanlage und weitere für den Betrieb relevante Informationen erfasst sowie die Betriebsdisposition durchgeführt.

Bei konventioneller ÖPNV-Priorisierung umfasst das Bordsystem der ÖPNV-Fahrzeuge neben einer Verbindung zum ITCS auch eine Sendeeinheit zur direkten Kommunikation mit der LSA. Bei Umrüstung auf eine C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung wird diese durch eine Onboard Unit (OBU) ersetzt, bzw. beim hybriden Betrieb um diese ergänzt. Ähnlich wie bei RSUs umfassen diese eine Kommunikationseinheit für ETSI ITS-G5-Nachrichten. Um zyklisch Informationen zum aktuellen Standort und zur Geschwindigkeit senden zu können (Cooperative Awareness Messages, CAM), ist eine Lokalisierung und Erfassung der Fahrgeschwindigkeit erforderlich.

## 2.2.2 Eigenschaften der C2X-Technologie

Die RSU der LSA sowie die OBU in den ÖPNV-Fahrzeugen verfügen über standardisierte Funktionen innerhalb eines sogenannten Kommunikationsstacks, welche die Generierung, die Übertragung und die Interpretation von ETSI ITS-G5-Nachrichten ermöglichen. Der Stack gliedert sich in Schichten, die sich auf bestimmte Ebenen des OSI-Referenzmodells beziehen. Konkret sind für das IVS-Referenzmodell einer Kommunikationseinheit (RSU bzw. OBU, sogenannte ITS-Station) vier horizontale Schichten (Access Layer, Networking & Transport Layer, Facilities Layer und Applications Layer) sowie zwei vertikale Entities (Management und Security) definiert. Bild 2-2 veranschaulicht diese Schichten (Layers/Entities) sowie die zugehörigen Protokolle.

Nachfolgend werden die vier horizontalen Schichten (Layer) von unten nach oben beschrieben.

Der Access Layer ist vom IEEE 802.11 Standard abgeleitet und basiert auf dem WLAN-Mode „outside the context of a basic service set (BSS)“, OCB. Der in Europa relevante Standard ist (ETSI EN 302 663 2020), der die spezifischen Anforderungen an den Access Layer für ITS im 5GHz-Frequenzband definiert.

Der Networking and Transport Layer beinhaltet das ETSI GeoNetworking Protokoll (ETSI EN 302 636-

4-1 2020) und das ETSI Basic Transport (BTP) Protokoll (ETSI EN 302 636-5-1 2019). Die Definition der geografischen Zielgebiete basiert auf (ETSI EN 302 931 2011).

Wesentliche Funktion des Facilities Layer ist die Generierung und die Verarbeitung von Messages zur Unterstützung der Anwendungen. Eine Übersicht der momentan durch ETSI spezifizierter Nachrichtentypen findet sich in Tabelle 2-1.

Die Anwendungsschicht (Applications Layer) umfasst alle Funktionen und fachlichen Prozesse für

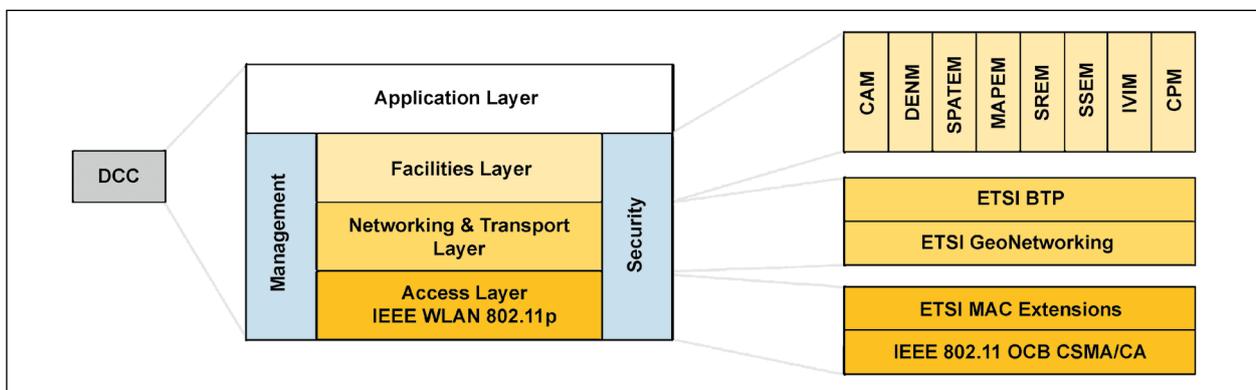


Bild 2-2: IEEE802.11p Protokollstapel

Nachricht	Inhalt/Aufgabe	Ausbreitung	TC	Trigger	Bemerkungen
Cooperative Awareness Messages (CAM)	Information über die sendende ITS-Station; Position, Geschwindigkeit, Status, spez. Rolle etc.	Singlehop Broadcast	2	periodisch	
Decentralised Environment Notification Message (DENM)	Besondere Situationen, Gefahren	Multihop, Geocast	0/1	ereignis-gesteuert	Unterteilung in High-Priority-DENM und normale DENM
MapData Message (MAPEM)	Topologie von Kreuzungen und allg. Streckenabschnitten	Multihop, Geocast	3	periodisch	
Signal Phase and Timing Message (SPATEM)	Status von LSA; Ampelphasen, Restlaufzeiten, Prognose für zukünftigen Signalstatus	Multihop, Geocast	3	periodisch	immer verknüpft mit einer MAPEM, die die zugehörige Kreuzung beschreibt
Signal Request Extended Message (SREM)	Priorisierungsanfrage	Multihop, Geocast	3	ereignis-gesteuert	
Signal Status Message (SSEM)	Antwort Priorisierungsanfrage	Multihop, Geocast	3	ereignis-gesteuert	
Infrastructure to Vehicle Information Message (IVIM)	Verkehrszeichen	Multihop, Geocast	3	periodisch	
Collective Perception Message (CPM)	Verbreitung von durch Sensorik detektierten Objekten im Verkehrsraum	Singlehop Broadcast	n/a <sup>1</sup>	periodisch	noch nicht standardisiert, momentane Beispielspezifikation in Technical Report (ETSI TR 103 562 2019)

<sup>1</sup> Traffic Class für CPM ist zum Zeitpunkt dieses Dokuments noch nicht spezifiziert.

Tab. 2-1: Überblick ETSI ITS-Nachrichtentypen bzgl. Inhalt, Ausbreitungsart, Trigger und Priorisierung

verkehrliche Anwendungen, inklusive Prozesse der Datenverarbeitung, Situationsklassifizierung und -erkennung und die Ableitung von Nachrichteninhalten, die zur Generierung der Nachrichten an die Facilities-Schicht übergeben werden.

Für die hier betrachtete Anwendung der ÖPNV-Priorisierung sind vor allem die Anwendungsschicht und die Facilities-Schicht relevant. ETSI ITS-G5 ist für eine spontane Kommunikation zwischen Beteiligten in einem lokalen Umfeld geeignet (Singlehop Broadcast). Dabei erhalten alle Teilnehmer in der Reichweite des Senders die von diesem ausgesendeten Nachrichten. Die Reichweiten, in denen eine zuverlässige Kommunikation (d. h. ein zuverlässiger Paketempfang) möglich ist, hängen hierbei sehr stark von den vorherrschenden räumlichen/baulichen Gegebenheiten sowie auch den verwendeten Antennen (gerichtet vs. omnidirektional) ab. Bei bestimmten Nachrichten kann die Reichweite durch Multihop (Weiterreichen der Nachricht über mehrere Kommunikationseinheiten hinweg) erhöht werden sowie in bestimmte geografische Bereiche geleitet werden (Geocast). Vergleiche hierzu in Tabelle 2-1.

Zu den Aufgaben der Security-Entity zählen die Pseudonymisierung von Verkehrsteilnehmenden und die Signierung und Verifizierung von Nachrichten. Hierauf wird im Kapitel 2.3 genauer eingegangen. Die Management-Entity ist für schichtübergreifende Koordinierungsaufgaben verantwortlich. Dazu zählt u. a. die Überlastkontrolle, Decentralised Congestion Control (DCC). Sie sorgt für eine Reduzierung der Kanalauslastung, wenn diese sich in einen Bereich bewegt, der die Zuverlässigkeit des Kommunikationssystems beeinträchtigt. Werkzeuge hierfür sind unter anderem das Herunterregeln der Nachrichtenrate oder die Priorisierung der Nachrichtentypen. Die Priorisierung erfolgt über sogenannte Traffic Classes (TC), wobei TC 0 die höchste Priorität bedeutet. Die Traffic Classes sind für die einzelnen Nachrichtentypen in Tabelle 2-1 aufgeführt.

## 2.3 IT-Sicherheit

Die IT-Sicherheit ist ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich neuartiger Systeme der ÖPNV-Priorisierung mit Fokus auf die aktuellen Entwicklungen zum vernetzten Fahren. Mit den neuen Kommunikationsmöglichkeiten werden bisher in sich geschlossene Systeme wie Fahrzeuge oder auch die

Infrastruktur geöffnet und damit einem Risiko durch potenzielle Angreifer ausgesetzt. In der Standardisierung wurden Mechanismen definiert, die im Wesentlichen die folgenden IT-sicherheitsrelevanten Aspekte adressieren:

- Pseudonymisierung von Verkehrsteilnehmenden und zeitlicher Wechsel von Pseudonymen zur Verhinderung/Erschwerung der Nachverfolgung einzelner Teilnehmender (Datenschutz),
- Signierung und Verifizierung von C2X-Nachrichten zum Sicherstellen der Authentizität des Absenders und der Integrität der Nachricht,
- Vergabe von Berechtigungen für spezielle Nachrichteninhalte und -typen zur Absicherung gegen Missbrauch (Autorisierung).

Die Pseudonymisierung dient der Konformität im Sinne des Datenschutzes. Sie spielt für die ÖPNV-Priorisierung eine untergeordnete Rolle und der Wechsel von Pseudonymen wird voraussichtlich im ÖPNV nicht zur Anwendung gebracht. Auf die Punkte zur Authentizität der Kommunikationseinheit, der Interoperabilität und zur Absicherung gegen Missbrauch inklusive der notwendigen Schritte zur Anbindung an eine PKI wird im Folgenden genauer eingegangen.

### Authentizität: Signierung von C2X-Nachrichten und Verifizierung der Signatur

Das „European Telecommunications Standards Institute“ (ETSI) spezifiziert und standardisiert die bereits beschriebenen Nachrichten und Nachrichteninhalte. Darüber hinaus sehen die ETSI-Spezifikationen (ETSI TS 102 941 2019) und (ETSI TS 103 097 2017) vor, dass Nachrichtenpakete zur Sicherstellung der Integrität und Authentizität mit einem Zertifikat digital signiert werden. Diese kryptografische Signatur wird vom Empfänger verifiziert und die Nachricht im Falle eines Fehlers vom Kommunikationsstack verworfen.

Für die Funktionalität einer authentifizierten Übertragung ist es essenziell, dass das Zertifikat des Senders einer signierten C2X-Nachricht dem Empfänger bekannt ist. Der Sender ist für die Bereitstellung des eigenen Zertifikats an den Empfänger zuständig (ETSI TS 103 097 2017). Eine zentrale Public-Key-Infrastruktur (PKI) stellt die Zertifikate für die Signaturschlüssel der Sender (Fahrzeuge oder Infrastruktureinheiten) aus und widerruft sie bei Bedarf.

Zur Inbetriebnahme einer ITS-Station muss diese einerseits in einem sicheren Prozess mit grundlegenden kryptografischen Informationen ausgestattet werden und andererseits an eine PKI angeschlossen werden. Dies wird in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

**Anbindung an die PKI – Allgemein (escrypt\_a 2019), (escrypt\_b 2016)**

Im Februar 2019 startete das vom BSI beauftragte Unternehmen ESCRYPT mit der Implementierung einer nationalen Pilot-PKI. Diese PKI stellt Zertifikate für den Test- und Pilotbetrieb auf Basis des aktuellen Sicherheitsstandards (ETSI TS 103 097 (2017)) aus. Um Zertifikate aus der Pilot-PKI zu erhalten, ist eine sichere Registrierung auf Grundlage eines Verfahrens erforderlich, das ESCRYPT gemeinsam mit dem BSI entwickelt hat. Nach Erstanmeldung des Betreibers werden die OBU bzw. RSU registriert. Anschließend werden diese mit einem Langzeitzertifikat versehen sowie mit Pseudonym-Kurzzeitzertifikaten unter Verwendung des standardisierten Protokolls (ETSI TS 102 941 (2019)) ausgestattet. Die Pilot-PKI erstellt eine Vertrauensliste (Root-Certificate-Authority Certificate Trust List (RCA-CTL)) und eine Zertifikatssperrliste (Certificate Revocation List (CRL)). Beide Listen können von einem öffentlich zugänglichen, standardisierten Webinterface, das vom Verteilungszentrum (DC) der PKI bereitgestellt wird, heruntergeladen werden. Die RCA-CTL führt vertrauenswürdige Certificate-Authority-Zertifikate auf, während die CRL solche aufführt, die widerrufen wurden. Die CRL listet kei-

ne lang- und kurzfristigen Zertifikate für ITS-Stationen auf.

Die Pilot-PKI erfüllt die technischen Anforderungen, die in der European Certificate Policy (CP) Release 1.1 festgelegt sind. Nach dieser CP müssen kryptografische Schlüssel mit Secure Elements von Smartcards oder Hardware Security Modules (HSMs) verwaltet werden. Die CP schreibt außerdem vor, dass Pseudonym-Kurzzeitzertifikate von OBUs jeweils nur maximal eine Woche gültig sind und daher regelmäßig erneuert werden müssen. Es kann ein Vorrat von bis zu drei Monaten angelegt werden.

**Anbindung an die PKI – ÖPNV-Unternehmen**

Um die PKI zu nutzen, sind für das ÖPNV-Unternehmen folgende Schritte notwendig. Bis auf die initiale Registrierung als Betreiber sind diese relativ gut automatisierbar (Bild 2-3).

**a) Einmalige Registrierung als Betreiber von vernetzten Fahrzeugen beim PKI-Betreiber**

Zunächst muss sich der Betreiber von vernetzten Fahrzeugen (bspw. Bussen, Straßenbahnen) bei der PKI registrieren ①. Dazu wird zunächst in einer sicheren Umgebung (z. B. HSM) ein kryptografisches Schlüsselpaar aus privatem und öffentlichem Schlüssel (mittels Elliptic Curve Cryptography (ECC), siehe ETSI TS 102 941 (2019)) erzeugt. Mit den für die PKI wichtigen Informationen, wie z. B. den potenziell vergebaren Service Specific Per-

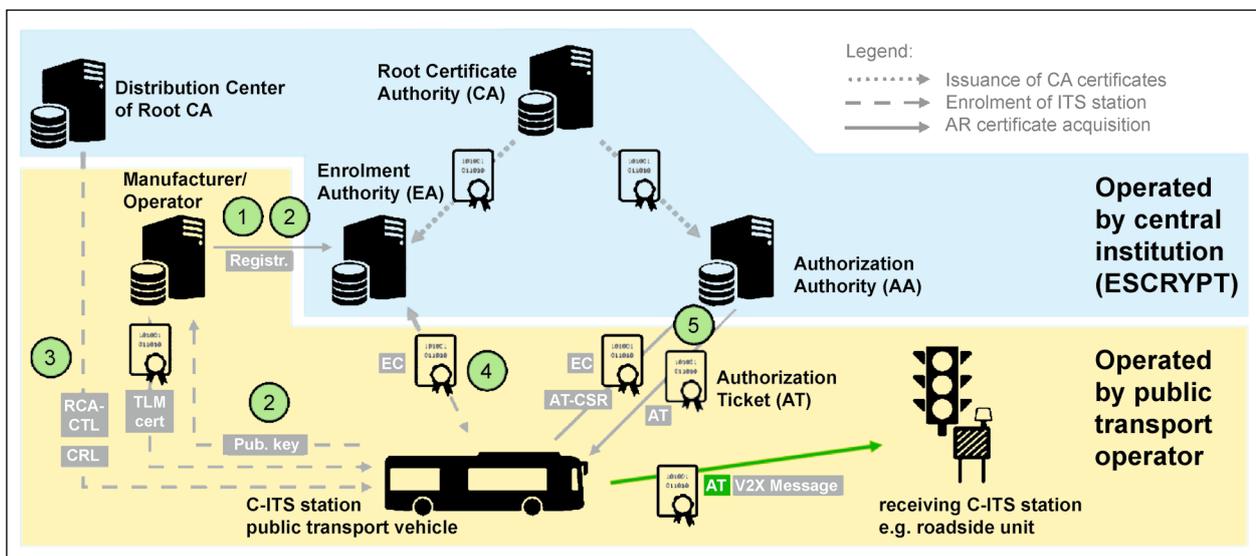


Bild 2-3: C-ITS Public-Key-Infrastruktur (PKI) – Anbindung ÖPNV-Unternehmen

missions (SSPs) für die Nutzung von Sonderrechten, zeitlichem und räumlichem Gültigkeitsbereich, IDs, Namen etc., wird dann eine Registrierungsnachricht (ManufacturerCertificateRequestMessage) erzeugt und mit dem privaten Schlüssel signiert. Nach Eingang beim PKI-Betreiber und Prüfung der Anfrage erstellt dessen Enrolment Authority (EA) ein Manufacturer Certificate, mit welchem dann einzelne ITS-Stationen (Fahrzeuge und Roadside-Units) bei der PKI angemeldet werden können.

In einem automatisierbaren Prozess ist es möglich, das Manufacturer Certificate zu aktualisieren (Update), oder ggf. zu widerrufen (Revocation).

### b) Registrierung von ITS-Stationen bei der PKI

Nach erfolgreicher Registrierung kann der ÖPNV-Betreiber seine Fahrzeuge und Roadside-Units bei der PKI anmelden und mit dieser verbinden. Dieser Prozess besteht aus den zwei Schritten Registrierung ② und Enrolment ③.

Für die initiale Registrierung von ITS-Stationen ② wird auf dem entsprechenden Gerät ein Registrierungsschlüsselpaar erzeugt. Dessen öffentlicher Schlüssel sowie weitere Informationen über die Station (IDs, SSPs, Gültigkeit etc.) sind Inhalt der vom Betreiber erstellten ItsSRegistrationRequestMessage, welche mit dem privaten Schlüssel des Manufacturer Certificates signiert und an die Enrolment Authority (EA) gesendet wird. Nach erfolgreicher Prüfung des Inhalts (insbesondere auch der SSPs) und der Integrität speichert die EA die Daten in einer internen Datenbank ab und bestätigt mit einer verschlüsselten ItsSRegistrationResponseMessage. In ähnlicher Weise wird ein Update oder ein Reset (Löschung aus der Datenbank) der Registrierung durchgeführt.

Nach der Ausstattung der ITS-Station mit den o. g. kryptografischen Informationen (RCA-CTL und CRL) ③ und nach erfolgreicher Registrierung der ITS-Station kann diese ihre Enrolment Credentials (EC) bei der EA anfordern ④. Dazu wird ein Certificate Signing Request (EC-CSR) erzeugt und mit obigem privaten Schlüssel signiert und über eine sichere Übertragung an die EA gesendet. Nach dessen Prüfung stellt die EA ein Enrolment Certificate aus und signiert es mit ihrem privaten Schlüssel. Dieses wird dann in einer EnrolmentResponseMessage an die ITS-Station gesendet. In ähnlichen Prozessen kann man die EC aktualisieren (Update) oder widerrufen (Revocation).

### c) Laufender Betrieb

Nach dem erfolgreichen Enrolment einer ITS-Station kann sich diese mit den benötigten Zertifikaten (Authorisation Tickets (AT)) ausstatten, die für die Signierung von C2X-Nachrichten und für die Pseudonymisierung notwendig sind ⑤. Diese Prozesse sind vollständig automatisierbar und bedeuten somit keinen zusätzlichen manuellen Aufwand für den ÖPNV-Betreiber.

### Absicherung gegenüber Missbrauch

Durch die Nutzung kryptografischer Signaturen und die Anbindung an die im jeweiligen Geltungsbereich eingesetzte PKI wird gewährleistet, dass empfangene C2X-Nachrichten zunächst gültig sind und nicht durch Dritte manipuliert und gesendet wurden. Darüber hinaus gibt es in der PKI Mechanismen um zu verhindern, dass ansonsten valide Einheiten Gebrauch von Sonderrechten machen, für die sie nicht berechtigt sind. Die für die jeweilige Einheit gültigen Berechtigungen werden bei der Registrierung angegeben und sind im Enrolment Certificate als SSPs hinterlegt. Damit werden der Einheit auch nur ATs mit diesen Berechtigungen ausgestellt. Dies trifft beispielsweise für die ÖPNV-Priorisierung zu, welche nur von Fahrzeugen des Öffentlichen Verkehrs aktiviert werden kann. Normale Fahrzeuge bekommen diese Sonderrechte nicht in den zugeleiteten Zertifikaten freigeschaltet. Beim Versuch einer missbräuchlichen Nutzung der Sonderrechte werden die Nachrichten vom Kommunikationsstack des Empfängers verworfen.

### Nationale und internationale Interoperabilität (escript\_a 2019), (escript\_b 2016)

Um zu gewährleisten, dass die Services und Applikationen grenzüberschreitend nutzbar sind, ist eine internationale Harmonisierung der Systeme erforderlich. Hierfür gibt es auf europäischer Ebene die C-ITS-Plattform im Rahmen des Projekts C-ROADS, in der Fachleute in verschiedenen Arbeitsgruppen Handlungsempfehlungen für die Einführung und Harmonisierung von C-ITS Services auf europäischer Ebene ausarbeiten. Auch im Bereich der IT-Sicherheit findet eine enge internationale Abstimmung statt. Nationale PKI gleichen die Zertifikate mit den PKI der anderen Nationen ab und müssen entsprechend interoperabel sein. Die Harmonisierung der PKI-Instanzen hat das Ziel, dass sich alle Fahrzeuge und Infrastruktureinheiten in Europa auf Basis der Zertifikate vertrauen können – unab-

hängig davon, in welchem Land sie sind und wer die PKI betreibt. Dazu wird das Root-Zertifikat jeder PKI, sobald es verfügbar ist, in die European Certificate Trust List (ECTL) aufgenommen.

## 2.4 Verordnungen, Standards und Hinweispapiere

Die bestehenden nationalen und europäischen Spezifikationen, Verordnungen und Standards sind

sowohl für das herkömmliche System als auch für die zukünftigen Systeme von Interesse. Die für die Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs wesentlichen Dokumente werden nachfolgend kurz beschrieben.

Die Standardisierung der Nachrichten sowie die Harmonisierung der C-ITS Dienste erfolgt aktuell sukzessive. Im Zuge der Implementierung sind aus diesem Grund immer die jeweils aktuellsten Verordnungen und Standards zu verwenden.

<b>C2C-CC BSP</b>	CAR 2 CAR Communication Consortium – Basic System Profile (Consortium 2020)
<p>Das CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C-CC) ist ein Zusammenschluss von Industriepartnern aus dem Automotive-Umfeld mit dem Ziel, C-ITS und insbesondere C2X-Kommunikation voranzutreiben. Das Basic System Profile (BSP) enthält Empfehlungen, Richtlinien und Anforderungen zur Nutzung von C2X-Kommunikation. Zum Beispiel werden enge Definitionen für folgende Themen erstellt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungen für SPAT/MAP aus Fahrzeug-Sicht</li> <li>• Anforderungen für verschiedene DENM-Szenarien (z. B. Adverse Weather, Dangerous Situation, Stationary Vehicle Warning, Traffic Jam)</li> <li>• Anforderungen an das Hardware Security Module (HSM)</li> <li>• Nutzung des Spektrums</li> </ul>	

<b>C-ROADS Platform</b>	C-ROADS Common C-ITS Service Definitions (C-ROADS 2020), (Platform 2020)
<p>C-ROADS ist eine europäische Plattform, die aus zwölf nationalen Projekten (Piloten) für die Einführung, Erprobung und Harmonisierung von C-ITS-Verkehrssystemen und -Diensten auf europäischen Straßen besteht. Die Plattform arbeitet an einheitlichen Spezifikationen und fördert das länderübergreifende Testen.</p> <p>Das Dokument C-ROADS Common C-ITS Service Definitions definiert die Day One Dienste und Profile für eine Vielzahl von Use-Cases aus Infrastruktursicht. Für die ÖPNV-Priorisierung wird speziell der Use-Case „Signalized Intersections – Traffic Light Prioritisation“ (SI-TLP) definiert und ein detailliertes Anforderungsprofil erstellt.</p>	

<b>ETSI TS 102 894-2</b>	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications Users and applications requirements Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary
<p>Dieser technische Standard beschreibt Datenelemente, die in den ASN.1-Definitionen der verschiedenen ETSI C2X-Nachrichten verwendet werden. Er definiert damit das sogenannte Common Data Dictionary (CDD), also das Verzeichnis der gemeinsam genutzten Datentypen. Insbesondere stützen sich die Normen ETSI EN 302 637-2 und ETSI EN 302 637-3 auf diesen technischen Standard.</p>	

<b>ETSI TS 102 941</b>	Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Trust and Privacy Management
<p>Dieser europäische Security-Standard beschreibt das sogenannte Trust and Privacy Management, also die Verwaltung und Steuerung der Vertrauens- und Datenschutzmechanismen. Im Wesentlichen beschreibt die Kommunikation mit der PKI sowie übergeordnete Prinzipien, z. B. den Security Lifecycle von ITS-Stations.</p>	

<b>ETSI TS 103 097</b>	Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security header and certificate formats
<p>Dieser europäische Standard beschreibt die Formate der Security-Datenstrukturen, im Speziellen die Header und die Zertifikatsformate. Um ein einheitliches Format zu garantieren, stützt sich der Standard auf den Standard IEEE 1609.2-2016 und den Ergänzungen dazu.</p>	

<b>ETSI TS 103 301</b>	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications Basic Set of Applications Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services
<p>Dieser technische Standard beschreibt die europäischen Infrastruktur-Services, d. h. Informationen und Dienste, die von Infrastrukturseite (RSU) an andere Verkehrsteilnehmende verbreitet werden. Innerhalb dieses Standards werden die Nachrichteninhalte aus ISO TS 19091 um die typischen Header für die ETSI-Nachrichtentypen ergänzt sowie deren Namen mit Extended Message (EM) erweitert (z. B. der Inhalt SPAT in der ETSI-Nachricht SPATEM verpackt). Das Dokument spezifiziert ITS-Anwendungen und Basisdienste, die für Generierung, Empfang und Verarbeitung der zugehörigen Nachrichtentypen zuständig sind, für die Verbreitung folgender Inhalte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Traffic Light Maneuver (TLM) service: Information über den Status von Lichtsignalanlagen via SPATEM</li> <li>• Road and Lane Topology (RLT) service: Informationen über die Topologie von Kreuzungen und Streckenabschnitten via MAPEM</li> <li>• Infrastructure to Vehicle Information (IVI) service: Informationen von statischen, variablen und virtuellen Beschilderungen sowie Straßenbauarbeiten via IVI Message (IVIM)</li> <li>• Traffic Light Control (TLC) service: Dieser Service unterstützt die Priorisierung für öffentliche Verkehrsmittel und Fahrzeuge mit Sonderrechten, z. B. zur Erfüllung hoheitlicher Aufgaben (Polizei, Feuerwehr) oder Rettungsdienst. Dies wird realisiert mittels der zwei Nachrichtentypen Signal Request Extended Message (SREM) und Signal Status Extended Message (SSEM). Ein Fahrzeug sendet eine Anfrage zur Priorisierung mittels einer SREM an die RSU, z. B. durch manuellen Request der Fahrzeugführenden oder automatisiert durch eine ITS-S Application. Diese informiert das Fahrzeug (und damit über eine ITS-S Application z. B. den Fahrer) fortlaufend mittels SSEM über den Status der Anfrage.</li> <li>• GNSS positioning correction (GPC) service: Ein Service zur Verbreitung von GNSS-Korrektur-Informationen von der Infrastruktur an mobile Verkehrsteilnehmende via RTCMEM (ETSI-Nachricht zur Verbreitung von Korrekturinformation, spezifiziert durch die Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)).</li> </ul>	

<b>ETSI EN 302 637-2</b>	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications Basic Set of Applications Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service
<p>Dieser europäische Standard beschreibt den Cooperative Awareness Basic Service. Dies bezeichnet den Teil, der die Umgebung einer ITS-Station (OBU oder RSU) von deren Position und ggf. Dynamik sowie weitere Attribute informiert. Die Wahrnehmung (Awareness) anderer ITS-Stationen ist die Basis für viele ITS-Anwendungen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und Effizienz. Die kooperative Wahrnehmung wird technisch über C2X-Kommunikation durch den regelmäßigen Austausch von Cooperative Awareness Messages (CAM) realisiert.</p>	

<b>ISO TS 19091</b>	Intelligent transport systems Cooperative ITS Using V2I and I2V communications for applications related to signalised intersections
<p>Diese technische Spezifikation beschreibt die konkreten Nachrichteninhalte und benutzten Datenelemente der in ETSI TS 103 301 definierten Nachrichtentypen sowie deren konkrete Nutzung. Dazu werden konkrete Anwendungsfälle definiert und beschrieben. Das Dokument gilt auf internationaler Ebene.</p>	

<b>SAE-J2735</b>	Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary
<p>Diese Spezifikation beschreibt die Nachrichtentypen für Dedicated Short Range Communications (DSRC) im amerikanischen Geltungsbereich. Dies umfasst die Inhalte für SPAT, MAP, IVI, SSM, SRM (siehe Tabelle 2-1), welche von ISO TS 19091 auf internationaler Ebene standardisiert sind sowie weitere nur amerikanische Nachrichtentypen, wie z. B. die Basic Safety Message (BSM) als Analogon zur europäischen Cooperative Awareness Messages (CAM).</p>	

<b>VDV-Schrift 420</b>	Technische Anforderungen an rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme-Übertragungsverfahren Datenfunk (Ausführung BON) mit Ergänzung 1 und Ergänzung 2
<p>VDV-Schrift 420 [Print-Version] Technische Anforderungen an rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme-Übertragungsverfahren Datenfunk (Ausführung BON) mit Ergänzung 1 und Ergänzung 2 Ausgabe 01/84 Ausgabe 06/87 Ausgabe 06/90.</p>	

## 2.5 Varianten der LSA-Steuerung

Die im Zuge der im europaweiten Harmonisierungsprojekt C-ROADS stattfindenden Aktivitäten der C-ROADS Plattform münden im Dokument der „Common C-ITS Service Definitions“ der momentan aktuellen Version 1.6 (C-ROADS 2020). In diesem Dokument beschreibt die C-ROADS Plattform eine Funktionsspezifikation und Anwendungsfälle für C-ITS-Dienste, die in den verschiedenen C-ROADS Piloten implementiert werden. Diese Funktionsbeschreibungen sind das Ergebnis der Harmonisierungsbemühungen innerhalb von TF2 (Service Harmonisation) und der Anpassung an die Arbeit von C-ROADS TF3, wo die Harmonisierung der Nachrichtenprofile für die spezifischen Dienste und Anwendungsfälle stattfindet.

Der definierte Service „Signalized Intersection“ liefert Informationen für Verkehrsteilnehmende und Fahrzeuge, um eine sichere und effiziente Annäherung und Überquerung einer signalisierten Kreuzung zu gewährleisten. Die Implementierungen der infrastrukturbasierten Anwendungsfälle für Kreuzungen erhöhen die Sicherheit und die Effizienz des Verkehrsflusses und minimieren negative Umweltwirkungen an einer signalisierten Kreuzung.

Neben anderen C-ITS Services werden innerhalb des Services TSP (Traffic Signal Priority Request) die relevanten Applikationen „Traffic Light Prioritisation (TLP)“ und „Emergency Vehicle Priority (EVP)“ unterschieden.

### 2.5.1 C2X-basierte Priorisierung des ÖPNV

Der Service „Traffic Light Prioritisation (TLP)“ (C-ROADS 2020) wird bestimmten Fahrzeugen (z. B. öffentlichen Verkehrsmitteln, Lastkraftwagen usw.) Vorrang vor einzelnen Fahrzeugen an signalisierten Kreuzungen einräumen, um einen pünktlichen Betriebsablauf (z. B. Bus, Straßenbahn) sicherzustellen und/oder Emissionen zu minimieren.

Szenariodefinition: Das ÖPNV-Fahrzeug (Bus, Bahn) sendet eine Priorisierungsanforderung. Die LSA-Steuerung verarbeitet die Anforderung und akzeptiert entweder die Anforderung (z. B. hat das Fahrzeug Verspätung und/oder ist berechtigt, Priorität zu erhalten) oder lehnt die Anforderung ab (z. B. werden andere Prioritäten gewährt). Weiterhin wird eine Rückmeldung an das Fahrzeug gegeben. Wenn die Anfrage angenommen wird, können z. B. Rotphasen verkürzt werden oder Freigabe-

zeiten verlängert werden, sodass das Fahrzeug mit minimaler oder keiner Verzögerung eine Freigabe erhält. Dabei erfolgt die Priorisierung aufgrund der hinterlegten ÖPNV-Phase, welche parallele, nicht konfliktbehaftete Ströme gleichzeitig freigeben kann. Nachdem das Fahrzeug die Kreuzung erfolgreich durchfahren hat, schaltet die LSA-Steuerung wieder in die normale Steuerungslogik.

Die folgenden Vorteile werden erwartet:

- minimale Verzögerung für priorisierte Fahrzeuge an signalisierten Kreuzungen,
- geringere Emissionen von priorisierten Fahrzeugen,
- verbesserte Pünktlichkeit aufgrund geringerer Störungen,
- erhöhte Attraktivität des ÖPNV aufgrund des verbesserten Komforts,
- verbesserte Effizienz des Fahrzeugbetriebs,
- verbesserte Auswahl der Hardwarelieferanten für Flottenbetreiber oder Kommunen aufgrund der standardisierten C2X-Lösung.

### 2.5.2 C2X-basierte Priorisierung von Einsatzfahrzeugen

Der Service „Emergency Vehicle Priority (EVP)“ (C-ROADS 2020) wird aktiv zur Phasensteuerung einer ausgerüsteten Kreuzung beitragen, um die Durchfahrt von Einsatzfahrzeugen zu erleichtern. Die LSA wird auch den Priorisierungsstatus für andere Benutzer bereitstellen, die sich der LSA-Kreuzung nähern.

Szenariodefinition: Das mit C2X ausgestattete Fahrzeug, das sich der Kreuzung nähert, sendet periodisch und in Echtzeit die aktuellen Positionsdaten inklusive des Priorisierungsstatus. Die LSA empfängt die Priorisierungsanforderung und überprüft ihre Gültigkeit. Abhängig von der Position, der Route und der Entfernung zur Kreuzung werden die LSA-Phasen so gesteuert, dass zunächst feindliche Verkehrsströme gestoppt werden und dann unter Berücksichtigung der Zwischenzeiten und minimalen Freigabezeiten alle oder ausgewählte Fahrstreifen der Zufahrt des Einsatzfahrzeugs eine Freigabe bekommen (Zufahrtssteuerung). Basierend auf den Priorisierungsstatusinformationen passiert das Einsatzfahrzeug die Kreuzung. Nachdem festgestellt wurde, dass das Fahrzeug die Kreuzung passiert

hat, schaltet die LSA-Steuerung wieder in den normalen Betrieb um.

Zu den in erster Linie erwarteten Vorteilen zählen eine kürzere Reisezeit für Einsatzfahrzeuge und ein geringeres Kollisionsrisiko. Ein zusätzlicher Vorteil ist die erhöhte Flexibilität, um die priorisierte Fahrtrichtung oder den priorisierten Fahrstreifen zu ändern und verschiedene Routen zu verwenden.

## 2.6 Prognosen zur Marktdurchdringung C2X-basierter Systeme

In diesem Kapitel wird eine Einschätzung zur zu erwartenden Entwicklung der Marktdurchdringung von C2X-Technologien gegeben. Hierbei wird sowohl die infrastrukturseitige Ausstattung als auch die Ausrüstung von ÖPNV-Fahrzeugen betrachtet. Der Erfolg der Marktdurchdringung wird derzeit von einem Henne-Ei-Problem bestimmt. Dabei stehen sich die Entwicklung zur Ausrüstung der Infrastruktur auf der kommunalen Seite und die Aussagen der OEM zur fahrzeugseitigen Ausrüstung gegenüber. Zum Lösen des Henne-Ei-Problems sollte 08/2019 der sogenannte Delegated Act verabschiedet werden, indem sich u. a. europaweit auf eine Übertragungstechnologie geeinigt werden sollte. Zu dieser Einigung kam es jedoch noch nicht, sodass aktuell das Marktgeschehen die entsprechenden Technologien treiben und vermutlich auch final bestimmen wird.

Der Übergang von prototypischen Lösungen hin zur Serienreife ist auch bei den C2X-Komponenten für die ÖPNV-Priorisierung ein entscheidender Faktor. Dabei kann heute bereits festgestellt werden, dass sowohl die OBU als auch die RSU den technisch-funktionalen Anforderungen des Markts genügen. Um den rechtlichen Rahmen zu prüfen und die Akzeptanz der Kunden (Verkehrsunternehmen und Städte) inklusive der Vertrautheit mit diesem System sowie den neuen Versorgungswegen zu stärken, finden aktuell etliche Pilotprojekte statt. Für eine konkurrenzfähige Situation am Markt fehlt derzeit allerdings noch die Herstellervielfalt, welche sich vorwiegend auf die preisliche Gestaltung der Lösung auswirken wird. Aktuell wird davon ausgegangen, dass die etablierten LSA-Hersteller die Ausrüstung der LSA mit RSU als Komplettsystem übernehmen werden.

Wesentliche Treiber, die eine Markteinführung von C2X-Technologien positiv beeinflussen, sind:

- hohe Technologiereife; Standardisierung weit fortgeschritten,
- Zertifikatsystem zur Nachrichtenverschlüsselung als Pilot-Public-Key-Infrastruktur (PKI) aktuell verfügbar und im Pilotbetrieb,
- Bekenntnis wichtiger Akteure, z. B. verbaut Volkswagen ETSI ITS-G5-Module in einzelnen Modellen,
- sukzessives Abschalten analoger Frequenzen, was Technologiewandel erfordert,
- verkehrlicher Problemdruck, wachsende Verkehrsnachfrage (→ Beitrag C2X-Anwendungen zur Verkehrssteuerung und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit),
- vielfältige Nutzenpotenziale über ÖPNV-Priorisierung hinaus, zunächst insbesondere Annäherungsgeschwindigkeitsoptimierung mittels GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory), Gefahrenwarnung, verbesserte Kenntnis der Verkehrslage mittels Fahrzeugstichproben (PVD).

Demgegenüber stehen folgende wesentlichen Hemmnisse für die Einführung von C2X:

- Derzeit dominiert Fahrzeugvernetzung über Mobilfunk (e-Mobil BW GmbH 2015), bereits bis 2025 wird ein großer Anteil der Pkw- und Nutzfahrzeugflotte eine Verbindung zu einem proprietären Backend inklusive einiger verkehrlich relevanter Dienste haben, 2030 Standard in allen Neufahrzeugen → könnte Einführung der Kommunikation via ETSI ITS-G5 hemmen (Zusammenfassung aus anderen Studien),
- konkurrierende Technologien (dadurch Technologieunsicherheit), z. B. Cellular-V2X, perspektivisch 5G; Eignung von Mobilfunk für viele (nicht zeitkritische) C2X-Anwendungsfälle,
- vorgesehener Delegated Act zur Einführung einer Funkübertragungstechnologie wurde 08/2019 nicht beschlossen, Sicherheit bzgl. dominierender Technologie somit vorerst noch nicht gegeben.

Bisherige Studien zur Einführung von C2X zeigen – so auch die in (e-Mobil BW GmbH 2015) – dass hinsichtlich des Ausrüstungsgrades und der Durchdringung der Fahrzeugflotte mit C2X tendenziell zu optimistisch herangegangen wird. Die reale Durchdringung bzw. Markteinführung bleibt aktuell hinter den Prognosen für bereits erreichte Jahre zurück.

Aktuell sind jedoch viele Standardisierungsaktivitäten abgeschlossen, die Hardwarekomponenten verfügbar und die Technologie wird aktiv von Automobilherstellern verbaut, sodass mit einer schnell zunehmenden Marktdurchdringung zu rechnen ist.

## 3 Rahmenkonzept und Leitfaden

### 3.1 Tangierende Systeme

Im Status quo existieren viele tangierende Systeme, welche zur Planung, zum Betrieb oder zu Evaluierung der Qualität der ÖPNV-Priorisierung eingesetzt werden. Die nachfolgenden Kapitel bieten eine beispielhafte Zusammenstellung der wesentlichen Features dieser Tools. Es wird keine Gewähr auf Vollständigkeit der jeweiligen Darstellung gegeben, da die Ausprägungen in der Praxis oft individuell sehr unterschiedlich aussehen können.

#### 3.1.1 Tools zur Planung

##### Planung von LSA-Steuerungen

Zur Planung und zum Test von LSA-Steuerungen, zur mikroskopischen Simulation der geplanten Logiken sowie mit Tools zur Versorgung existieren eine Vielzahl an Softwaretools.

Die Werkzeuge zur Planung und zum Test von LSA-Steuerungen, die sogenannten Verkehrsingenieur-Arbeitsplätze, unterstützen die Erstellung von LSA-Einzelsteuerungen am Einzelknoten, auf einer koordinierten Strecke sowie in einem gesamten Netz. Festzeitsteuerungen oder verkehrsabhängige Steuerungen können entwickelt, parametrisiert und getestet werden. Die Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen erfolgt über die Bewertung der Steuerung anhand aktueller Richtlinien. Grundlegende Eingangsparameter sind die Verkehrsbelastungen, die verkehrstechnischen Anforderungen, die politischen Wünsche sowie jeweils spezifische Anforderungen der örtlichen Besonderheiten. Hier spielen auch die Anforderungen und Bedürfnisse des ÖPNV eine entscheidende Rolle.

Der Test und die Bewertung der Steuerungen auf die Erreichung der vorgegebenen Zielstellung innerhalb der einzelnen relevanten Belastungsszenarien erfolgt in einem Großteil der Fälle mithilfe einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Die

Steuerungen werden mithilfe des kalibrierten Simulationsmodells getestet, analysiert und bewertet. Sollten bestimmte Zielgrößen bzgl. der Qualität des Verkehrsablaufs nicht nachgewiesen werden können, so erfolgt eine Anpassung der Versorgung, soweit dies möglich ist. Im Fall, dass keine Anpassung der Versorgung möglich ist, kann die Simulation dazu dienen, Kompromisslösungen aufzuzeigen. Die Priorisierung des ÖPNV als verkehrsabhängiger Eingriff sowie die spezifischen Wartezeiten lassen sich für unterschiedliche Szenarien darstellen.

Ein letzter Schritt zur Implementierung der Steuerung im LSA-Steuergerät ist die Versorgung. Die Steuergeräteversorgung erfolgt in den meisten Fällen über eine Direktversorgung am Steuergerät vor Ort. Ab einer Schnittstellenversion OCIT-O V2.0 (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems – Outstation) ist auch eine Fernversorgung über die Lichtsignalsteuerungszentrale möglich. Neben der Versorgung der Logik sind auch wesentliche Parameter der Lichtsignalanlage zu versorgen. Im Zuge der Versorgung erfolgt u. a. ein Test der einzelnen Signale, der richtigen Zuordnung der Detektoren als parallele Eingänge sowie der Realisierung der Meldepunkte des ÖPNV als serielle Eingänge im Steuergerät.

Nach der Inbetriebnahme der Steuerung wird empfohlen, die Wirkung der Steuerung zyklisch zu prüfen und zu überwachen. Dieser Prozess findet aus Ressourcengründen oft nicht oder nur bedingt statt. Am Markt sind hier einige Tools verfügbar, die eine offline-Auswertung mithilfe der Prozessdaten der Lichtsignalsteuerungszentrale ermöglichen. Diese können bspw. Auswertungen zum Individualverkehr aber auch Qualitätserreichungsgrade zur Priorisierung des ÖPNV sein.

Das Monitoring der LSA erfolgt in mittelgroßen und großen Städten heute über die Lichtsignalsteuerungszentrale, an die die meisten LSA angeschlossen sind. Größere Städte haben zudem ein Verkehrsmanagementsystem, wo alle wesentlichen Prozess- und Statusdaten der LSA auflaufen und überwacht werden. Ein automatisches Störungsmanagement der LSA mit den dahinterliegenden Prozessen ist aufgrund der Definition der Lichtsignalanlagen als kritische Infrastruktur vorhanden.

#### Fahrplanungstools und Meldepunktplanung

Das Planen des Fahrplans im ÖPNV ist nicht trivial; hierzu werden heute Softwaretools zur Unterstüt-

zung der Fahrplanung genutzt. Unterschiedliche Takte zu verschiedenen Tageszeiten, abweichende Kurse auf einer Linie, unterschiedlichen Durchbindungen von Linien sowie eine heterogene Fahrzeugflotte führen zu Spezialfällen im Fahrplan.

Die GNSS-basierte ÖPNV-Priorisierung erfolgt auf Grundlage der im Fahrplanungstool versorgten Meldepunktketten. Meldepunkte als virtuelle Punkte auf der Strecke werden im Planungstool definiert. Das Aussenden der Meldungen aus dem Fahrzeug an den entsprechenden Positionen erfolgt nach Export der unterschiedlichen Routen und Kurse automatisch. Voraussetzung ist, dass das ÖPNV-Fahrzeug mit Linie und Kurs angemeldet ist.

Im Falle, dass für die ÖPNV-Priorisierung Infrarot-Baken als Ortungsreferenz genutzt werden, ist dort die Lage der Meldepunkte hinterlegt und wird aus den entsprechenden Systemen in die Bake eingespielt.

### 3.1.2 Schnittstellen bei der Umsetzung

Zur Harmonisierung der für das Gesamtsystem notwendigen Schnittstellen haben sich die vier größten Signalbaufirmen Deutschlands auf den Open Communications Interface for Road Traffic Control Systems-(OCIT-)Standard geeinigt. OCIT-Schnittstellen sind die Basis einer offenen Systemarchitektur im Bereich der Lichtsignalsteuerung. Sie definieren standardisierte Verbindungen zwischen verteilten zentralen und dezentralen Komponenten, wie Teilsystemen, Werkzeugen und Feldgeräten. In den OCIT-Definitionen werden Systemarchitektur, Regeln, OCIT-Protokolle, Funktionen und Übertragungsprotokolle festgelegt (ODG 2020).

Im Wesentlichen wird zwischen der OCIT-Outstation und dem OCIT-Center unterschieden. Unter der OCIT-Outstations werden aktuell die LSA-Steuergeräte mit RSUs, die Signalgeber und die im Straßennetz dezentral verbauten RSUs zusammengefasst.

Das OCIT-Center besteht typischerweise aus einer oder mehreren Lichtsignalsteuerungszentralen und ggf. zusätzlich dem Verkehrsmanagementsystem.

Die wesentlichen Schnittstellen werden im Folgenden beschrieben (ODG 2020):

OCIT-LED ist eine elektrische Schnittstelle zwischen Lichtsignalsteuergerät und LED-Signalgebermodulen in 40 V-Technik. Diese Schnittstelle ist

für die Betrachtung der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung nicht relevant.

OCIT-Car ist eine Schnittstelle für die Anbindung einer dezentralen RSU. Da die Priorisierung des ÖPNV meist mit einer RSU am Steuergerät der LSA verknüpft ist, könnte die die OCIT-Car Schnittstelle vor allem bei der Betrachtung der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung bei weit abgesetzten Voranmeldern relevant werden.

OCIT-O ist eine standardisierte Schnittstelle zwischen Zentrale (Lichtsignalsteuerungszentrale) und Feldgeräten (Lichtsignalanlage). Die OCIT-O-Schnittstelle realisiert die sichere Versorgung, Bedienung und Überwachung der Gerätefunktionen aus der Ferne. Dies erfordert eine sofortige Quittierung oder Fehlerbehandlung. Besondere Bedeutung hat deshalb das für OCIT-O entwickelte Übertragungsprotokoll BTPPL. Für OCIT-O sind mehrere Versionen definiert. Die aktuell verbreiteten Versionen sind OCIT-O V1.1 und OCIT-O V2.0. Ab der Version OCIT-O V3.0, welche aktuell nur für den Testbetrieb zugelassen ist, können auch die sogenannten C2X-relevanten Daten zwischen der Outstation und der Lichtsignalsteuerungszentrale ausgetauscht werden. Das Einspielen einer neuen Versorgung erfolgt entweder am Steuergerät direkt vor Ort oder über eine Fernversorgung, welche ab einer OCIT-O V2.0-Schnittstelle möglich ist.

OCIT-C (OCIT-Center to Center) sind standardisierte Schnittstellen zwischen zentralen Komponenten und Systemen.

Die Übertragung der aktuell relevanten Informationen von den Lichtsignalanlagen (Outstation) in eine Zentrale (Center) ist für das Betriebsmonitoring essentiell. So können bspw. auch die sogenannten ÖPNV-Speicher der Steuergeräte ausgelesen werden. Fehlerhafte Meldekette oder nicht adäquate Fahrzeiten können so sowohl online als auch offline erkannt werden.

Fahrzeuge des Öffentlichen Verkehrs sammeln ebenfalls Daten über ausgesendete Meldepunkte sowie die dazugehörigen Positionen. In den meisten Fällen werden diese Daten innerhalb eines Ringspeichers im Bordrechner gespeichert und können bspw. bei der Ankunft der Fahrzeuge im Betriebshof ausgelesen werden. Teils gibt es auch die Möglichkeit auf diese Daten via Mobilfunk zuzugreifen. Die Schnittstellen zwischen den Bordrechnern und der ITCS Zentrale sind oft proprietär und stark

von der Konfiguration und Parametrisierung der Hersteller abhängig.

Ideal ist die Gegenüberstellung der Daten der Fahrzeuge und der Daten der Lichtsignalanlagen. So können Fahrtrajektorien mit den gesendeten und empfangenen Meldepunkten verglichen werden. Diese Schnittstelle zwischen den Verkehrsunternehmen und der Lichtsignalsteuerungszentrale/ Verkehrsmanagementzentrale der Stadt ist jedoch eher im Ausnahmefall vorhanden.

### 3.1.3 Tools zur Evaluierung

Die Evaluierung der Wirksamkeit der ÖPNV-Priorisierung ist bei der Inbetriebnahme und während des Betriebs von grundlegender Bedeutung.

#### Tools zur Qualitätssicherung von Lichtsignalanlagen

Für die Evaluierung der Qualität der LSA-Steuerung aus Sicht des Straßenbetreibers sind am Markt unterschiedliche Softwaretools verfügbar. Die Qualität einer verkehrabhängigen LSA-Steuerung wird im Wesentlichen von der Qualität der Verkehrslageerfassung beeinflusst. Die Entscheidungen der Verkehrssteuerung und das übergeordnete Verkehrsmanagement basieren aktuell zum überwiegenden Teil auf Informationen aus Detektordaten. Aufgrund der großen Anzahl von Detektoren im städtischen Umfeld ist eine manuelle Überwachung nicht zielführend.

Tools zur Qualitätssicherung von LSA bieten umfangreiche Funktionalitäten zum Monitoring und zur Qualitätsbewertung von Detektordaten. Diese Tools umfassen u. a. folgende Features:

- Standardisierte Schnittstellen zur Lichtsignalsteuerungszentrale für die Datenbereitstellung und Parametrisierung,
- Analyse und Monitoring der Detektorfunktionen (Funktionsprüfung, Qualitätsprüfung),
- Automatisiertes Reporting bei Störungen und Fehlfunktionen,
- Test der Detektorfunktion inklusive vorhandener Testverfahren (Verfügbarkeit, Korrektheit),
- Validierung der Detektorfunktionen.

Die Visualisierung der Ergebnisse kann in tabellarischer bzw. in grafischer Form erfolgen. Weiterhin

bietet ein Großteil der Tools spezielle Ansichten wie Signalplanschreiber, Detektorstatusinformationen oder Kartenansichten für einen schnellen Überblick. Auswertungen können bspw. tageszeitabhängig, detektorspezifisch, knotenabhängig oder streckenabhängig erfolgen. Reportingfunktionen geben proaktiv Fehlermeldungen aus.

Neben der Prüfung der Detektorfunktionen spielt für den flüssigen Verkehr und geringe Reisezeiten die Koordinierung von Lichtsignalanlagen in einem Straßenzug oder einem Streckennetz eine entscheidende Rolle. Geplante Grüne Wellen unterliegen einem Alterungsprozess, wenn sich bspw. bestimmte Rahmenbedingungen ändern. Eine kontinuierliche Prüfung ist sowohl für den Individualverkehr als auch für den Öffentlichen Verkehr entscheidend.

Das integrale Monitoring der Erfassungsqualität der Detektoren sowie der darauf aufbauenden Signalsteuerung ist heute durch eine Vielzahl von Daten und Informationen innerhalb der Verkehrszentralen möglich aber wird, anders als die reine Zustandserfassung von LSA, nur selten durchgeführt.

#### Tools zur Qualitätssicherung der ÖPNV-Priorisierung

Für die Evaluierung der Qualität der Priorisierung aus Sicht des ÖPNV sind am Markt viele Tools verfügbar. Diese erlauben eine Online- bzw. Offline-Evaluierung der wesentlichen Parameter zu Optimierungspotenzialen von ÖPNV-Priorisierungen in Echtzeit bzw. statistisch aufbauend auf aktuellen und historischen Daten. Neben den Fahrgastwechselzeiten entsteht durch Wartezeiten an Signalanlagen ein Großteil der Verlustzeiten des ÖPNV. Im Gegensatz zu den Fahrgastwechselzeiten lassen sich Wartezeiten an LSA zum großen Teil sinnvoll reduzieren.

Qualitätsanalysetools für den ÖPNV ermöglichen ein permanentes automatisiertes Monitoring der folgenden wesentlichen On- und Offlineparameter inklusive der Visualisierung von Auswertungen:

- Fahrzeitstatistiken – Gegenüberstellung der planerischen Fahrzeiten mit den realen Fahrzeiten des ÖPNV (tageszeitabhängig),
- Häufigkeit von Grünzeitankünften bzw. LSA-Verlustzeiten (Qualität des Verkehrsablaufs) inklusive der Freigabezeitverteilung an den Lichtsignalanlagen,

- Pünktlichkeit (Fahrplanabweichung),
- Überwachung der technischen Komponenten (Infrarotbaken) und deren Funktionalität,
- Überwachung der Fahrzeuge (Sendequalität),
- Überwachung der Kommunikation – Gegenüberstellung der gesendeten und empfangenen Telegramme,
- Fehlermeldung von der LSA,
- Meldepunktfehler aufgeschlüsselt nach Meldekette, Knotenpunkt sowie linien- und kursfeine Analysen, Analyse der Zwangsabmeldungen der LSA.

Die Visualisierung der Ergebnisse kann in tabellarischer bzw. in grafischer Form erfolgen. Weiterhin bieten die meisten Tools spezielle Ansichten, wie Signalplanschreiber oder Kartenansichten, einen schnellen Überblick innerhalb der Analysetools. Auswertungen können so tageszeitabhängig, linienabhängig oder knotenabhängig erfolgen. Reportingfunktionen geben proaktiv Fehlermeldungen aus.

Moderne Tools zur Qualitätssicherung der ÖPNV-Priorisierung verfügen in der Regel über standardisierte Schnittstellen. Somit ist beim Einspielen der Meldepunktketten kein zusätzlicher Versorgungsaufwand notwendig. Die Meldepunktketten werden über die OIVD-Datei (LSA-Versorgungsdaten) direkt aus dem Verkehrsingenieurarbeitsplatz übernommen. Weiterhin ermöglichen standardisierte Schnittstellen zum Steuergerät, wie OCIT-O V1.1, V2.0 oder zukünftig auch V3.0 die direkte Übermittlung von Prozessdaten zwischen den Lichtsignalanlagen, der Lichtsignalsteuerungszentrale und den Tools zur Qualitätssicherung der ÖPNV-Priorisierung. Somit wird eine zeitnahe Gegenüberstellung ermöglicht.

## 3.2 Rahmenkonzept

Aufbauend auf den Ergebnissen der Kapitel 1 und 2 ergibt sich ein favorisiertes Rahmenkonzept hinsichtlich der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung. Die Realisierung sollte im Idealfall stufenweise erfolgen. Dies ermöglicht die sukzessive Erweiterung der infrastrukturseitigen und fahrzeugseitigen Hardware einerseits (Stufe 1) und der ÖPNV-spezifischen und LSA-spezifischen Software andererseits (Stufe 2).

- Stufe 1: Übergangslösung mit Nutzung von Cooperative Awareness Messages (CAM) zur Realisierung des Hardwareausbaus
- Stufe 2: Zielsystem mit Nutzung von Signal Request und Signal Status Messages (SREM/SSEM) inklusive aller notwendigen Softwareanpassungen

Das Vorgehen zur Realisierung der Stufe 2 als Zielsystem inklusive dem Zwischenschritt der Stufe 1 als Übergangslösung wird nachfolgend erläutert.

### 3.2.1 Stufe 1: Übergangslösung – Nutzung von CAM

Stufe 1 wird als Übergangslösung definiert. Für diesen ersten Schritt wird eine Integration der herkömmlichen ÖPNV-Meldepunkte in dem Public Transport Container der Cooperative Awareness Messages (CAM-Nachricht) umgesetzt.

CAM im Allgemeinen werden von allen Kommunikationseinheiten (sowohl Fahrzeuge als auch Infrastruktur) periodisch ausgesendet. In Fahrzeugen werden CAMs nach den CAM Generation Rules (EN 302 637-2 Kapitel 6.1.3 „CAM Generation Frequency Management for Vehicle ITS-Ss“) mit einer minimalen und maximalen Rate von 1 Hz bzw. 10 Hz generiert. Sie können nicht über Multihop weitergereicht werden. CAMs enthalten insbesondere Informationen über den Standort sowie (bei Fahrzeugen) über die Geschwindigkeit. CAM-Nachrichten bieten darüber hinaus mit Blick auf die ÖPNV-Priorisierung einen optionalen Special Vehicle-Container, in dem Inhalte der konventionellen, bislang analog verwendeten R09.xx-Telegramme übertragen werden können. Bild 3-1 zeigt die Struktur einer Fahrzeug-CAM-Nachricht.

Die CAM-Nachricht mit Nutzung des Special Vehicle Containers kann von der RSU empfangen und in der LSA-Steuerung berücksichtigt werden. Wie auch bei konventionellen R09.xx-Telegrammen erfolgt eine visuelle Rückmeldung über ein Quittierungssignal der LSA. Der Ablauf der ÖPNV-Priori-

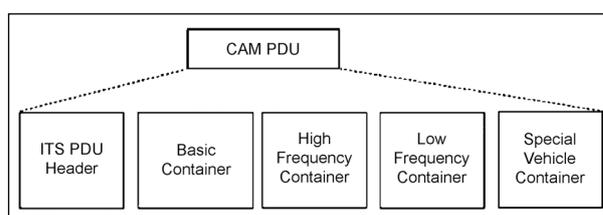


Bild 3-1: CAM-Struktur mit Containern

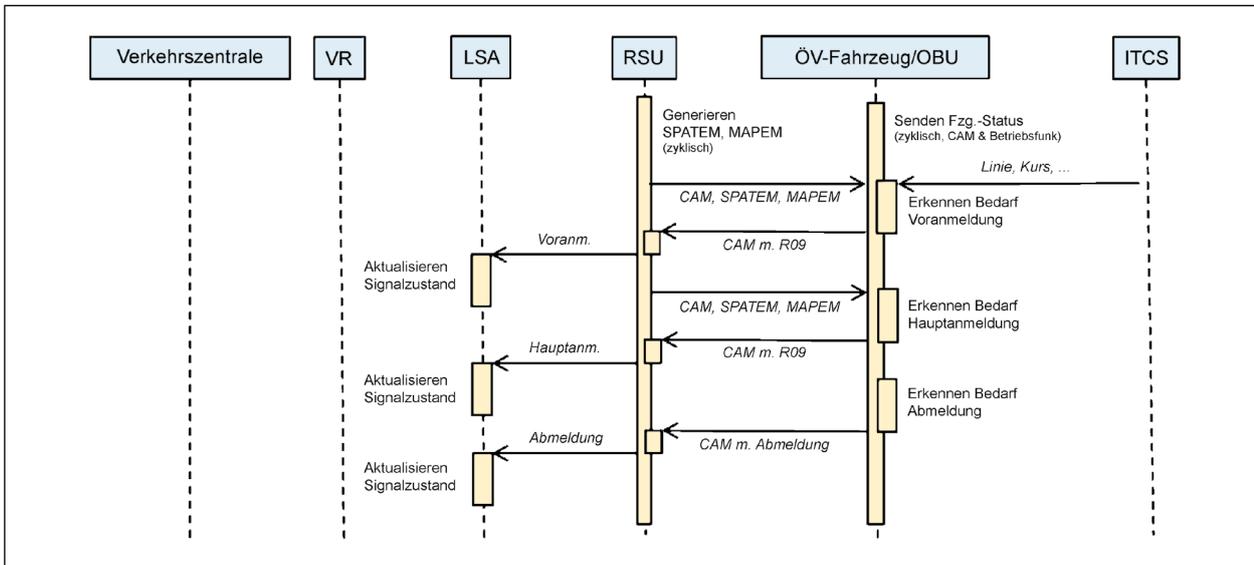


Bild 3-2: Interaktionen ÖPNV-Priorisierung mittels CAM-Nachrichten

sierung in Stufe 1 wird im Sequenzdiagramm des Bild 3-2 dargestellt.

Die Beschreibung des CAM-Nachrichtenformats setzt sich nach ASN.1-Syntaxbeschreibung (Abstract Syntax Notation) bzgl. der Priorisierungsmeldung für den ÖPNV aus mehreren Objekten zusammen.

Der PublicTransport Container befindet sich innerhalb der CAM-Nachricht innerhalb der folgenden Struktur:

**CAM**

- ▶ CoopAwareness
  - ▶ CamParameters
    - ▶ SpecialVehicleContainer (optional)
      - ▶ PublicTransportContainer

Die detaillierte Beschreibung der Inhalte der CAM kann dem Anhang „Nachrichtenprofil CAM“ entnommen werden.

Der PublicTransportContainer ist der Container der CAM-Nachricht, der in dem SpecialVehicle Container für den ÖPNV enthalten ist. Wenn die vehicleRole auf publicTransport (1) gesetzt ist, muss dieser Container vorhanden sein.

**PublicTransportContainer**

- ▶ EmbarkationStatus
- ▶ PtActivation
  - ▶ PtActivationType
  - ▶ PtActivationData

Im PublicTransportContainer wird der Embarkation-Status und die PtActivation definiert.

Der EmbarkationStatus im PublicTransportContainer zeigt, ob der Fahrgastwechsel gerade stattfindet. Der Datentyp kann den Wert true oder false annehmen. Dieser wird in (ETSI TS 102 894-2 2018) näher beschrieben.

Die Definition ptActivation wird vom Öffentlichen Verkehr zur Priorisierung an LSA, Bahnübergängen u. Ä. genutzt. Diese wird in (ETSI TS 102 894-2 2018) näher beschrieben.

PtActivationType gibt einen bestimmten Codierungstyp der PtActivationData-Daten an:

- 0: undefinierte Kodierungsart
- 1: Kodierung der PtActivationData gemäß (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 1992)
- 2: Kodierung der PtActivationData gemäß (VDV Ausschuss für Telematik und Informationssysteme (ATI) 1992)

Die Werte 3 bis 255 sind für die alternative und zukünftige Verwendung reserviert.

Heutzutage gibt es verschiedene Stufen für die Aktivierungsdaten des ÖPNV. Der R09.xx-Standard ist einer der Industriestandards, der von öffentlichen Verkehrsmitteln (z. B. Bussen, Straßenbahnen) in Europa (z. B. Deutschland, Österreich) zur Steuerung von Ampeln, Schranken, Poller usw. verwendet wird. Der Inhalt von R09.xx ist in (VDV Aus-

schluss für Telematik und Informationssysteme (ATI 1992) definiert. Er enthält u. a. folgende Informationen:

- Informationen zur Prioritätsanforderung (Voranforderung, Anforderung, Startbereitschaft),
- Priorität des Öffentlichen Verkehrs,
- Besetzung,
- Linienkennung des Öffentlichen Verkehrs,
- Identifikation der Routennummer,
- Zielnummer.

Andere Länder verwenden möglicherweise andere von der örtlichen Verwaltung festgelegte Nachrichtensätze.

Stufe 1 als Übergangslösung wird derzeit vom VDV favorisiert. Ein wesentlicher Vorteil dieser Übergangslösung ist es, dass über die Integration der RSU inklusive Schnittstelle zum Steuergerät/LSA bzw. OBU inklusive Schnittstelle zum Bordrechner hinaus keine Änderungen an bestehenden Systemen erforderlich sind. So können z. B. Fahrplanungstools unverändert bleiben. Auf Basis von Qualitätsanalysen kann die Lage der Meldepunkte auch im Betrieb flexibel angepasst werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Schnittstellen hardware- und softwareseitig realisiert werden können.

**3.2.2 Stufe 2: Zielsystem – Nutzung von SREM/SSEM**

Stufe 2 wird als Zielsystem definiert. In Stufe 2 erfolgt die Anmeldung über die international für Priorisierungsanforderungen vorgesehenen Nachrichten-

tenformate Signal Request Message (SREM) sowie die Signal Status Message (SSEM) zur Realisierung des Rückkanals. Die beiden C2X-Nachrichtenformate sind speziell für die Anforderung der Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung vorgesehen und so – im Gegensatz zur in Stufe 1 dargestellten Vorgehensweise – auch international standardisiert. Bild 3-3 und Bild 3-4 zeigen die Struktur einer SREM- bzw. SSEM-Nachricht.

Bei Verwendung von SREM- und SSEM-Nachrichten sendet das ÖPNV-Fahrzeug bei Annäherung an eine LSA eine SREM-Nachricht. Im Gegensatz zur ersten Realisierungsstufe erfolgt eine Quittierung dieser Anforderung mithilfe der SSEM-Nachricht. Der Ablauf der ÖPNV-Priorisierung in Stufe 2 wird im Sequenzdiagramm des Bild 3-5 dargestellt.

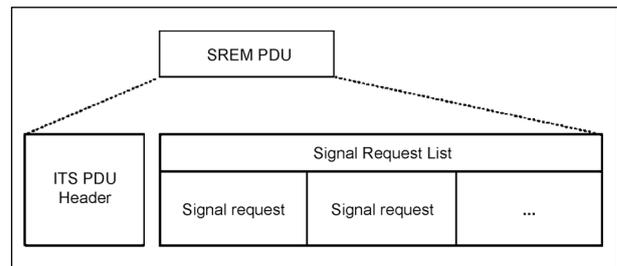


Bild 3-3: Struktur SREM

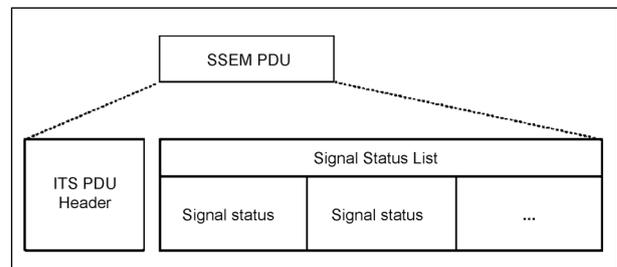


Bild 3-4: Struktur SSEM

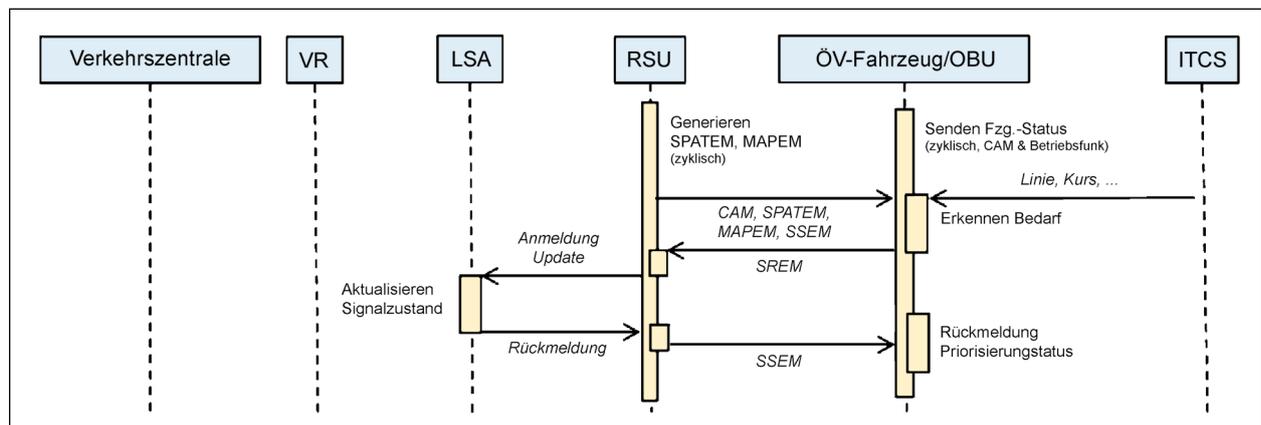


Bild 3-5: Interaktionen ÖPNV-Priorisierung mittels SREM- und SSEM-Nachrichten

Die Beschreibung des SSEM- und SREM-Nachrichtenformats setzt sich nach ASN.1-Syntaxbeschreibung (Abstract Syntax Notation) bzgl. der Priorisierungsmeldung für den Öffentlichen Verkehr aus mehreren Objekten zusammen.

Die SREM wird mit folgender wesentlicher Unterstruktur definiert:

SignalRequestMessage

- ▶ SignalRequestList
  - ▶ SignalRequest
    - ▶ PriorityRequestType
    - ▶ IntersectionAccessPoint
- ▶ RequestorDescription
  - ▶ TransitVehicleStatus
  - ▶ TransitVehicleOccupancy

Die detaillierte Beschreibung der Inhalte der SREM kann dem Anhang „Nachrichtenprofil SREM“ entnommen werden.

Die SSEM wird mit folgender wesentlicher Unterstruktur definiert:

SignalStatusMessage

- ▶ SignalStatusList
  - ▶ SignalStatusPackage
    - ▶ RejectedReason
    - ▶ PrioritisationResponseStatus

Die detaillierte Beschreibung der Inhalte der SSEM kann dem Anhang „Nachrichtenprofil SSEM“ entnommen werden.

Diese Realisierungsstufe erfordert Eingriffe in die LSA-Steuerung, die Steuerungslogik, die Planungstools der Verkehrsunternehmen sowie die ITCS-Bordrechner und ist daher wesentlich aufwendiger. Allerdings entspricht diese Stufe dem standardisierten internationalen Vorgehen und wird perspektivisch als Zielsystem umgesetzt werden. Durch das im Standard hinterlegte Rechtekonzept bietet die Stufe 2 auch die Möglichkeit Einsatzfahrzeuge an

LSA über die identische Methodik zu priorisieren. So können hier Synergien optimal genutzt werden.

Die Stufe 2 ermöglicht erstmalig kontinuierliche Informationen quasi in Echtzeit über die Position und damit die Lage des ÖPNV-Fahrzeugs innerhalb der Anmeldestrecke. Dies bietet gegenüber Stufe 1 enorme Vorteile, wo die LSA-Steuerung das Fahrzeug lediglich an dezidierten Meldepunkten sieht. Bei Umsetzung von Stufe 2 können so auch Rückstaus oder andere Ereignisse im Zufahrtsbereich der LSA detektiert werden. Weiterhin ermöglicht die Einbeziehung der CAM-Informationen anderer Fahrzeuge ein genaues Abbild der Verkehrslage, was für eine optimierte Verteilung der Grünzeiten genutzt werden kann.

### 3.2.3 Fazit Rahmenkonzept

Aufbauend auf der in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Systemübersicht wurden die wesentlichen Systemkomponenten und Schnittstellen beschrieben.

Ein ähnlicher Systemaufbau wurde u. a. in den digitalen Testfeldern Dresden, Düsseldorf und Kassel implementiert.

In Tabelle 3-1 werden die verbreitetsten Systeme des Status quo der C2X-basierten Priorisierung über ETSI ITS-G5 bzw. Cellular-V2X gegenübergestellt sowie Vor- und Nachteile benannt.

Bild 3-6 fasst die wesentlichen Nachrichtentypen und Nachrichteninhalte der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen im Zuge des Rahmenkonzepts zusammen. Dabei wurden die spezifischen Nachrichten und Nachrichteninhalte der beiden Realisierungsstufen spezifisch erläutert. Die Stufe 1 dient dabei als Übergangslösung zum sukzessiven Erreichen der Stufe 2.

Status quo	C2X-basierte Priorisierung
<b>Technologie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Analogfunk 2-Meter-Band</li> <li>von vielen ÖPNV-Unternehmen zur Priorisierung genutzt</li> <li>generelle Ablösung der 20kHz-Kanalbandbreite – Raster gemäß ECC TR/25-08</li> <li>die 20kHz-Kanalbandbreite endet für Sprach- und Datenübertragung am 31.12.2028</li> <li>Sonderfall Funk für ÖPNV-Priorisierung: Mehrere Frequenzen werden im 20kHz Kanalraster belassen. Es erfolgt eine Umwidmung einiger Bänder zum Fernwirkfunk.</li> </ul>	<b>Technologien</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Dedicated Short Range Communication (DSRC)</li> <li>Frequenzband von 5,85 bis 5,925 GHz</li> <li>ITS-Services</li> </ul> ETSI G5 bzw. WLAN IEEE 802.11p <ul style="list-style-type: none"> <li>erweitert die WLAN-Technologie</li> </ul> Cellular-V2X <ul style="list-style-type: none"> <li>Standardisierung im Mobilfunk</li> </ul>
<b>Vorteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verfahren seit &gt;30 Jahren etabliert</li> <li>VDV-Standard mit internationaler Anwendung</li> <li>Meldepunktketten für LSA-Betreiber und ÖPNV-Unternehmen einfach verständlich</li> </ul>	<b>Vorteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verfahren für alle C-ITS Services nutzbar</li> <li>Integration des VDV-Standard inklusive R09-Meldetelegramme</li> <li>neue Möglichkeiten der Priorisierung/Rückkanal</li> </ul>
<b>Nachteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Infrastruktur nur für ÖPNV-Priorisierung</li> <li>Interoperabilität</li> <li>kein Rückkanal</li> </ul>	<b>Nachteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>andere Funkeigenschaften hinsichtlich Reflexion, Beugung und Dämpfung</li> <li>neue Infrastruktur in Fahrzeug und an LSA erforderlich</li> </ul>

Tab. 3-1: Gegenüberstellung der Systeme im Status quo und C2X

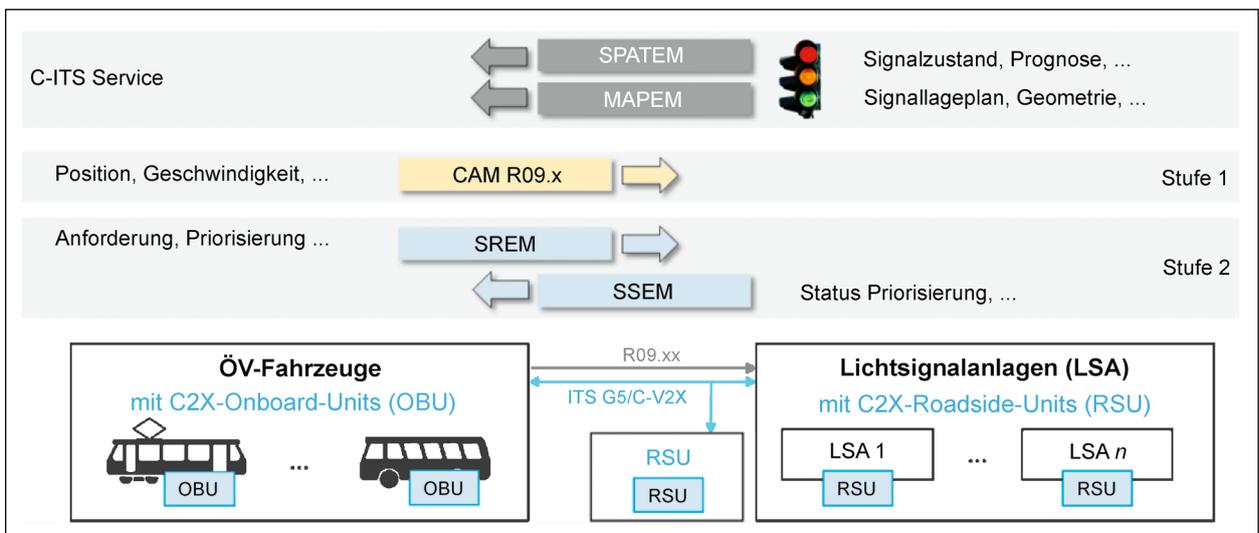


Bild 3-6: Systemübersicht C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung – Stufen inklusive Nachrichten

### 3.3 Leitfaden

In diesem Kapitel wird ein Leitfaden skizziert, der speziell auf den stufenweisen Übergang zwischen den Systemen im Status quo und den Systemen der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung abgestimmt ist. Es werden die notwendigen Anpassungsbedarfe hinsichtlich der tangierenden Systeme zur ÖPNV-Priorisierung mit dem Fokus auf die Verkehrstechnik und die Belange der Verkehrsunternehmen aufgezeigt.

#### 3.3.1 Anpassung hinsichtlich Verkehrstechnik

Damit die Lichtsignalanlage CAM-Nachrichten via ETSI ITS-G5 oder Cellular-V2X empfangen kann, ist ein entsprechendes Send- und Empfangsmodul an der LSA zu verbauen. Die RSUs werden aktuell von etlichen Anbietern am Markt angeboten. Durch die enge Kopplung der RSU mit dem LSA-Steuergerät können die RSUs zur ÖPNV-Priorisierung aktuell fast ausschließlich bei der entsprechenden Signalbaufirma beschafft und installiert

werden. Die Schnittstelle zum Steuerungsverfahren muss dabei nicht angepasst werden. Meldungen des ÖPNV können über serielle bzw. parallele Detektoreingänge an das Steuergerät übergeben werden.

Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass aktuell nur Steuergeräte der neueren Generation hinsichtlich der Rechenleistung in der Lage sind, zusätzlich mit einer RSU ausgestattet zu werden. Ältere Steuergerätegenerationen sind somit zwingend auszutauschen.

Aufgrund der sehr langen Lebensdauer von LSA-Steuergeräten nimmt ein flächendeckender Ausbau innerhalb einer Stadt entsprechend Zeit in Anspruch. Es wird damit immer eine Übergangszeit zwischen der aktuell verwendeten Technologie zur ÖPNV-Priorisierung und dem neuen Standard über ETSI ITS-G5 geben.

### **Stufe 1: CAM**

Neben den hardwareseitigen Installationen, welche zuvor beschrieben wurden, sind für die Stufe 1 die nachfolgend beschriebenen Anpassungen vorzunehmen.

Die LSA/RSU muss mit einer Logik versorgt werden, welche den gesendeten Meldepunkt der CAM-Nachricht ausliest und an das Steuergerät übergibt. Die Steuerungslogik der LSA-Steuerung muss nicht angepasst werden, da diese die bekannten Meldepunkte entsprechend verarbeiten kann. Eine Anpassung muss lediglich erfolgen, sollten weitere Regularien dies erfordern. Die aktuell vorhandenen Planungstools für LSA-Steuerungen können im Bestand ohne weitere Anpassungen genutzt werden.

Eine Anpassung der Schnittstelle zwischen der LSA und der Lichtsignalsteuerungszentrale allein für die C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung ist nicht notwendig, da die Meldepunkte über die herkömmliche Schnittstelle übertragen werden können. Sinnvoll ist es diese Schnittstelle auf eine OCIT-O V3.0 upgraden zu lassen, wenn weitere C-ITS Services (bspw. PVD, Gefahrenwarnung) zentralseitig angebunden und angeboten werden wollen, da über diese Schnittstelle auch weitere C2X-Nachrichteninhalte ausgetauscht werden können.

Die Tools zur Evaluierung von Lichtsignalanlagen können bei Umsetzung der Stufe 1 unverändert weitergenutzt werden.

Die installierte RSU kann für alle weiteren C-ITS-Services und Applikationen, welche zukünftig Verkehrsteilnehmenden angeboten werden, genutzt werden. Dies werden im ersten Schritt Gefahrenwarnungen u. Ä. sein. Die angebotenen C-ITS Services werden sukzessive erweitert.

In Kapitel 1.1.1 wurde das heute vorherrschende Prinzip der ÖPNV-Priorisierung über Meldepunktketten erläutert. Dieses Prinzip und damit verbunden Prozesse bleiben bei Verwendung von IEEE802.11p in Stufe 1 erhalten.

Der Prozess der Voranmeldung stellt keine großen Anforderungen an die Kommunikationslatenz und könnte somit auch über eine Backendkommunikation (bspw. via ITCS oder Lichtsignalsteuerungszentrale) mittels bspw. Mobilfunk realisiert werden. Die Voranmeldung dient der LSA, um in eine adäquate Phase zu wechseln, aus welcher diese bei erfolgter Hauptanmeldung direkt in die Priorisierungsphase wechseln kann. Latenzzeiten von 1-2 Sekunden sind hier vermutlich unkritisch. Die Hauptanmeldung und Abmeldung sind jedoch zeitkritisch, was eine direkte Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage erfordert. Eine solche Verbindung kann insbesondere mittels C2X via ETSI ITS-G5 realisiert werden. Da sichere Kommunikationsreichweiten von ca. 300 m möglich sind, ist die C2X-basierte Übertragung dieser zeitkritischen Meldepunkte unkritisch. Bislang kamen hierzu analoge R09.xx-Telegramme zum Einsatz, jedoch lediglich unidirektional, Rückmeldung wurden (wenn überhaupt) nur visuell über ein Quittierungssignal der LSA angezeigt.

### **Stufe 2: SREM/SSEM**

Neben den Anpassungen, welche in Stufe 1 beschrieben wurden, sind in Stufe 2 die nachfolgend beschriebenen Anpassungen vorzunehmen.

Die LSA muss mit einer Logik versorgt werden, welche die gesendeten Nachrichteninhalte der SREM-Nachricht ausliest und an das Steuergerät übergibt. Die Steuerungslogik der LSA-Steuerung muss komplett überarbeitet werden, da diese die Informationen zur Priorisierung aktuell nicht verarbeiten kann. Prinzipiell könnte hier auch die RSU die SREM-Inhalte in Meldepunkte umwandeln, damit würde jedoch kein Mehrwert gegenüber der Stufe 1 erzielt. Die permanente Übertragung der Position des Fahrzeugs im Bereich der Knotenpunktzufahrt bietet wesentlich Vorteile gegenüber der Stufe 1. Somit müssen die aktuell vorhandenen Planungstools für

LSA-Steuerungen angepasst werden. Neue Logiken zur Berücksichtigung der Priorisierung sind zu entwickeln, zu testen und zu implementieren. Die Aufwände innerhalb der gesamten Versorgungskette sind initial um ein Vielfaches größer. Auch der entsprechende Rückkanal, welcher Informationen innerhalb der SSEM-Nachricht bereitstellt, ist aktuell seitens der Steuerungslogik und Planungstools nicht abgedeckt. Momentan entscheiden Steuergeräte sekundlich je nach aktueller Verkehrslage und schalten entsprechend die Signalgruppen. Eine Begründung für bestimmte Steuerentscheidungen wird nicht kommuniziert. Genau dies ist jedoch ein Bestandteil der SSEM-Nachricht, welcher in der kompletten Versorgungskette berücksichtigt werden muss. Hier sind ebenfalls Entwicklungs-, Implementierungs- und Testarbeiten notwendig.

Die Tools zur Evaluierung von Lichtsignalanlagen müssen an die neuen Gegebenheiten angepasst werden.

### 3.3.2 Anpassungen hinsichtlich Verkehrsunternehmen

Damit die ÖPNV-Fahrzeuge CAM-Nachrichten via ETSI G5 empfangen können, ist ein entsprechendes Sende- und Empfangsmodul im Fahrzeug zu verbauen. Diese OBU gibt es momentan von etlichen Anbietern am Markt. Es ist darauf zu achten, dass die OBU für den Betrieb im Fahrzeug freigegeben ist. Die Schnittstelle zwischen Bordrechner und OBU muss angepasst bzw. neu implementiert werden. In diesem Zuge ist eine Standardisierung dieser Schnittstelle (Bordrechner <-> OBU) anzustreben.

Die installierte OBU inklusive der dazugehörigen Antennen kann für alle weiteren C-ITS Services und Applikationen, welche zukünftig für alle Verkehrsteilnehmenden angeboten werden, genutzt werden. Dies werden im ersten Schritt Gefahrenwarnungen und ähnliches sein. Die angebotenen C-ITS Services werden sukzessive erweitert.

#### Stufe 1: CAM

Neben den hardwareseitigen Installationen, welche zuvor beschrieben wurden, sind für die Stufe 1 die nachfolgend beschriebenen Anpassungen vorzunehmen.

Die OBU muss mit einer Logik versorgt werden, welche die gesendeten CAM-Nachrichten mit den Meldepunkten aus dem Bordrechner versorgt. Der

Bordrechner befüllt die Telegramme für die herkömmliche ÖPNV-Priorisierung bereits heute. Lediglich die Schnittstelle müsste hier adaptiert werden. Die Planungstools der ÖPNV-Unternehmen können unverändert weiterverwendet werden.

Eine Anpassung der Schnittstelle zwischen dem Bordrechner und der Zentrale des ITCS ist nicht notwendig. Ebenfalls müssen die Meldepunktversorgung und somit alle Planungstools nicht oder nur wenig angepasst werden.

Die Tools zur Evaluierung der Qualität der ÖPNV-Priorisierung können bei Umsetzung der Stufe 1 unverändert weitergenutzt werden.

Die installierte OBU kann für alle weiteren C-ITS Services und Applikationen, welche zukünftig Verkehrsteilnehmenden angeboten werden, genutzt werden. Dies werden im ersten Schritt Gefahrenwarnungen u. Ä. sein. Die angebotenen C-ITS Services werden sukzessive erweitert. Damit diese Dienste im Bordrechner visualisiert werden können, sind entsprechende Anpassungen und Implementierungen der Services bspw. durch den ITCS Anbieter notwendig.

#### Stufe 2: SREM/SSEM

Neben den Anpassungen, welche in Stufe 1 beschrieben wurden, sind in Stufe 2 die nachfolgend beschriebenen Anpassungen vorzunehmen.

Die OBU muss mit einer Logik versorgt werden, welche die gesendeten Nachrichteninhalte der SREM-Nachricht befüllt bzw. versorgt. Diese Anpassung der Logik erfordert weitere Anpassung im Bordrechner sowie in der Bordrechnerversorgung. Die benötigten Datensätze und Datenstrukturen sind komplett neu und müssen daher im Bordrechner, im ITCS-Hintergrundsystem sowie im Planungstool durch die jeweiligen Hersteller entwickelt und implementiert werden. Die Aufwände innerhalb der gesamten Versorgungskette sind initial um ein Vielfaches größer gegenüber der Stufe 1. Auch der Rückkanal, welcher Informationen innerhalb der SSEM-Nachricht bereitstellt, ist aktuell seitens der Bordrechner nicht abgedeckt.

Eine Anpassung der Schnittstelle zwischen Bordrechner und ITCS ist notwendig, da nur so die Tools zur Evaluierung der Qualität der ÖPNV-Priorisierung versorgt werden können. Diese Tools sind ebenfalls an die neuen Gegebenheiten anzupassen.

### 3.3.3 Machbarkeit und Umsetzungshemmnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Vor- und Nachteile einer C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung merkmalspezifisch den klassischen Systemen gegenübergestellt. Tabelle 3-2 fasst die wesentlichen Vorteile und Nachteile zusammen.

Aus den zuvor genannten Vor- und Nachteilen der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierungssysteme ergeben sich bestimmte Aspekte, welche eine Umsetzung beschleunigen, aber auch Punkte, die sich als Umsetzungshemmnis darstellen.

Aus Sicht der ÖPNV-Betreiber muss ein neues System zur Übertragung von ÖPNV-Anforderungen an LSA mindestens die Funktionalität des bisher weitverbreiteten Analogfunks erreichen. Das gilt insbe-

sondere für die Zuverlässigkeit der Meldungsübertragung.

Die Invest- und Betriebskosten müssen für die Verkehrsunternehmen im vergleichbaren Rahmen zu den Bestandssystemen liegen. In keinem Fall dürfen diese so hoch sein, dass die betriebswirtschaftlichen Vorteile einer ÖPNV-Beschleunigung vereitelt werden.

Weiter ist zu beachten, dass die Lebensdauer von LSA mit ca. 10 bis 20 Jahren verhältnismäßig groß ist. Ältere LSA-Generationen können nicht mehr<sup>6</sup>

<sup>6</sup> z. B. durch Abkündigung der Unterstützung durch den Hersteller

Merkmal	Vorteile einer C2X Priorisierung	Nachteile einer C2X Priorisierung
Technisch-funktional	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine kontinuierliche Fahrzeugverfolgung im Zuge der LSA-Annäherung ist möglich.</li> <li>Der Rückkanal SSEM-Nachricht ist beim Versand von SREM gegeben. Dies kann stationäre Anforderungs-/Quittungssignal ersetzen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Reichweite einer einzelnen C2X-Meldung ist geringer als beim klassischen Analogfunk, alternatives Backbone und Routing muss konzeptionell untersucht werden.</li> <li>Neue Systeme bringen vor allem in der initialen Phase erhöhte Risiken, welche durch aktuell stattfindende Piloten sukzessive minimiert werden.</li> </ul>
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgrund der hohen Stückzahlen, welche auch im Automotive-Bereich eingesetzt werden, entstehen potenziell geringere Invest- und Betriebskosten.</li> <li>Es handelt sich um standardisierte Module inklusive Software, welche im gesamte Verkehrsbereich eingesetzt werden.</li> <li>Das Equipment an LSA kann auch für weitere C-ITS-Services im Automotive-Bereich genutzt werden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es erfolgt eine komplette Umrüstung der Kommunikationseinheiten der Fahrzeugflotte des Verkehrsunternehmens sowie der infrastrukturseitigen Kommunikationseinrichtungen der LSA. Diese Umrüstung ist teilweise ohnehin erforderlich.</li> </ul>
Kompatibilität zum Status quo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzung der CAM-Nachricht zum Versenden der Priorisierungsmeldung → Es sind keine Anpassungen der LSA-Steuerung und keine Anpassung der Planungssoftware des Verkehrsunternehmens notwendig. Leichte Anpassungen des ITCS des Verkehrsunternehmens werden u. U. notwendig.</li> <li>Die Kompatibilität mit anderen Städten in Deutschland (CAM) und international (SREM/SSEM) ist gewährleistet.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Nutzung der SREM-Nachricht erfordert Anpassungen der LSA-Steuerung, innerhalb der Planungssoftware des Verkehrsunternehmens sowie leichte Anpassungen des ITCS des Verkehrsunternehmens.</li> </ul>
Standardisierung und Harmonisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standardisierung der Systeme im Status Quo erfolgt lediglich und teils auch nicht vollumfänglich im Bereich des ÖPNV. Oft sind die Systeme heute zwischen den Städten nicht interoperabel, auch wenn der identische Kommunikationsstandard genutzt wird.</li> <li>C2X-basierte Systeme stellen keine Sonderlösung nur für den ÖPNV dar, sondern ermöglichen die Mitnutzung eines für den Verkehr insgesamt offenen Systems. Die Standardisierung erfolgt über den gesamten Bereich des IVS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unternehmensspezifische Eigenheiten und Sonderlösungen müssen über den Standard abgebildet werden.</li> </ul>
Rechtliche Rahmenbedingungen/ IT-Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>C2X-basierte Systeme bieten Sicherheitsverfahren zur Sicherstellung der Authentizität und Identität. PKI ist vorgesehen und wird durch den Bereich der Automotives forciert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es besteht ein initialer Aufwand für die Kommunen, sich mit den Schnittstellen vertraut zu machen und dies zu implementieren.</li> </ul>

Tab. 3-2: Vor- und Nachteile der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierungssysteme

oder nur mit großem Aufwand mit neuen Technologien ausgerüstet werden. Das heißt eine flächendeckende Umstellung auf neue Technologien ist sehr zeitaufwendig (bei turnusmäßiger Erneuerung von LSA) oder kostenintensiv (bei vorwegnehmender Erneuerung vor Erreichen der technischen Lebensdauer). In jedem Fall ist in einer – ggf. auch längeren – Übergangszeit ein Mischbetrieb zwischen Altsystemen und C2X-basierter ÖPNV-Priorisierung unerlässlich. Es ist zu vermuten, dass die Installation infolge der Umsetzung von C-ITS Services für weitere Verkehrsteilnehmende (z. B. Fahrzeuge, Fußverkehr) beschleunigt werden kann.

Die Umstellung vom bekannten Meldepunktprinzip (→ Kapitel 1.1.1) auf eine quasikontinuierliche Verfolgung eines ÖPNV-Fahrzeugs per C2X und Aussenden von SREM in Zu- und Abfahrt auf einen LSA-Knoten erfordert ein Umdenken bei den Verkehrsingenieuren und die Erweiterung bestehender bzw. die Entwicklung neuer Steuerungsverfahren. Bei Umsetzung des Aussendens von CAM ist dies nicht notwendig.

Die Spezifikation der ÖPNV-Nachricht im C2X-Standard zur CAM schreibt die bestehende Spezifikation der R09-Telegramme aus dem Analogfunk unverändert fort. Ein gegenseitiger Bezug muss stattfinden, sodass zukünftig z. B. die Standortinformation nicht redundant (GNSS-Location per C2X, Meldepunktnummer per R09) übertragen wird. Dies würde einerseits eine unnötige Datenmenge erzeugen, andererseits besteht die Gefahr von widersprüchlichen Informationen.

Es gibt derzeit keine standardisierte Schnittstelle zwischen einer OBU und dem ITCS-Bordrechner, mit der die für eine ÖPNV-Bevorrechtigung wichtigen Informationen (Linie, Ziel, Fahrplanlage bzw. R09-Telegramm) übergeben werden können. Hier besteht mangels Standardisierung die Gefahr der Umsetzung proprietärer und teurer Insellösungen. Dem muss frühzeitig entgegengewirkt werden.

Die C2X-Infrastruktur für die Bevorrechtigung an einer LSA gilt als sensibler Funktionsbereich und wird durch die im Standard bestimmten Sicherheitsmechanismen abgesichert. Hierfür ist eine Anbindung der Verkehrsunternehmen und der Infrastrukturbetreiber an eine zentrale PKI notwendig.

Für die C2X-Kommunikation ist seit vielen Jahren die Nutzung auf Basis von ETSI ITS-G5 vorgesehen. Die aufgekommene Diskussion stattdessen

auf Mobilfunk der 5. Generation (5G) zu setzen verunsichert und hemmt damit Investitionsentscheidungen. Dabei ist 5G gar keine Voraussetzung für die Nutzung der öffentlichen Mobilfunks zur ÖPNV-Bevorrechtigung, da bereits mit 2G praktikable Ergebnisse erzielt werden (→ Kapitel 1.4.3). Die Diskussionen aus dem Jahr 2019 um den „Delegated Act“ zum Ausrollen von C-ITS-verbreitete weitere Unsicherheit und zeigten weder den Kommunen, den Betreibern von LSA, noch den Verkehrsunternehmen einen klar definierten Weg zur Umsetzung der C-ITS Services. Fazit ist, dass mithilfe der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung die Art und Weise der Bevorrechtigung an die neuen Erfordernisse adaptiert wird. Hierfür stehen bekannte als auch neue C-ITS-Nachrichten und damit auch komplett neue Möglichkeiten zur Verfügung. Die Wahl der Kommunikationstechnologie, also die Frage ob 5G, ETSI ITS-G5 oder Cellular-V2X bzw. eine Kombination der Technologien ist dabei untergeordnet.

### 3.3.4 Fazit Leitfadens

Der Leitfaden umfasst einen stufenweisen Übergang angefangen bei der Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs im Status quo, welche zuvor erläutert wurde, über eine Priorisierung der ÖPNV-Fahrzeuge unter Nutzung der CAM-Nachricht mit Public Transport Container in Stufe 1 als Übergangslösung, bis hin zur Nutzung der SREM- bzw. SSEM-Nachricht als internationaler Standard in Stufe 2.

Für den Umstieg der ÖPNV-Priorisierung vom Status quo zur C2X-Priorisierung sind unabhängig der jeweiligen Stufe grundlegende Hardwareumrüstungen vorzunehmen. Dies betrifft die Installation von RSU und OBU sowie die Anpassungen der Schnittstellen zwischen OBU und Bordrechner sowie zwischen LSA-Steuergerät und RSU. Je nach Stufe sind aber noch weitere Anpassungen notwendig, die im Folgenden beschrieben werden.

- Stufe 1: Übergangslösung – Nutzung der CAM-Nachricht mit Public Transport Container

#### Vorteile

- keine Anpassung des LSA-Steuerungsverfahrens,
- keine Anpassung Schnittstelle zwischen LSA und Lichtsignalsteuerungszentrale,
- keine Anpassung der ÖPNV-Planungstools und Analysetool.

#### Randbemerkung

- Anpassung Schnittstelle zwischen Bordrechner und OBU erforderlich,
  - Anpassung Schnittstelle zwischen LSA-Steuergerät und RSU erforderlich,
  - Qualität der ÖPNV-Priorisierung wie im Status quo,
  - kein Quittierungssignal der Anforderung über SPATEM möglich.
- Stufe 2: Zielsystem – Nutzung der SREM/SSEM-Nachricht

#### Vorteile

- kontinuierliche Anmeldung der ÖPNV-Priorisierung inklusive Rückkanal,
- stetige Fahrzeitprognose innerhalb der Meldestrecke,
- Quittierung und Statusmeldung zur Priorisierung über SSEM.

#### Randbemerkung

- Anpassung Schnittstelle zwischen Bordrechner und OBU identisch Stufe 1 erforderlich,
- Anpassung Schnittstelle zwischen LSA-Steuergerät und RSU identisch Stufe 1 erforderlich,
- Anpassung und Entwicklungen hinsichtlich LSA-Steuerungsverfahren,
- Anpassung hinsichtlich ÖPNV-Planungs- und Analysetools sowie Bordrechner und ITCS notwendig.

Infolge der höheren Aufwände der Stufe 2 gegenüber Stufe 1 wird ein stufenweiser Übergang empfohlen. Bzgl. Stufe 1 erfolgt die Umrüstung der Hardware (Funktechnik). Die sonstigen Spezifika der ÖPNV-Priorisierung bleiben unverändert. Hinsichtlich Stufe 2 erfolgt eine Erweiterung der ÖPNV-Priorisierung, welche zu einer wesentlichen Verbesserung der Qualität der Priorisierung führt. Dies hat jedoch Auswirkungen auf die angewendeten Methoden und führt neben den notwendigen Hardwareänderungen, die auch bereits für Stufe 1 notwendig sind, zu weiterführenden Anpassungen der Software.

## 4 Wechselwirkungen

### 4.1 Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsarten

#### 4.1.1 Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs mittels C2X-Technologie (SREM/SSEM)

Wie in ZIMMERMANN (2019) dargestellt, könnten durch den Einsatz von Car2X-Technologien bestehende Vorteile der ÖPNV-Priorisierung weiter verstärkt werden. Hierzu zählen insbesondere:

- Reisezeitverkürzung durch die Reduzierung von Verlustzeiten an LSA,
- Attraktivitätssteigerung durch Taktverdichtungen mit gleicher Fahrzeuganzahl,
- Komfortgewinn durch vermiedene Halte zwischen Haltestellen,
- Traktionsenergieeinsparung und Emissionsreduktion durch die gleichmäßigere Fahrweise,
- Betriebskosteneinsparung durch Reduzierung der Fahrzeiten auf einer Linienverbindung und Traktionsenergieeinsparungen,
- Effizienzsteigerung der LSA durch Freigabeverkürzung wegen vermiedener Halte-/Anfahrtvorgänge.

Unter idealen Bedingungen, d. h. vollständiger Kommunikation mit allen Verkehrsteilnehmenden, ergibt sich, dass für alle an einer LSA anfragenden Verkehrsströme in Echtzeit das kürzest mögliche, passende Freigabezeitfenster berechnet wird, welches zu einer weiteren Effizienzsteigerung der LSA führt. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass die Verkehrsteilnehmer die jeweiligen Fahr- und Geschwindigkeitsempfehlungen befolgen. Darüber hinaus wird durch den Verzicht auf Meldepunkte eine höhere Flexibilität in der Linienführung (beispielsweise bei durch Baustellen notwendige Umleitungen) erreicht. Weiterhin ermöglicht die neuartige Kommunikation eine Halteplatzprognose, was sowohl betrieblich als auch zur Kundeninformation genutzt werden kann.

Für alle anderen Verkehrsteilnehmenden ermöglicht die einheitliche Kommunikation positive Effekte aufgrund der vorhandenen Information hinsichtlich Effizienz (vermiedene Halte aufgrund passender Freigaben, Priorisierung von Einsatzfahrzeugen oder Schwerlasttransporten), Sicherheit (Informati-

on über Schaltzustände, insbesondere Restrot und Restgrün) und Komfort (bedarfsgerechte Information über die Schaltzustände und Verkehrslage).

#### 4.1.2 Priorisierung weiterer Verkehrsarten

Neben der Priorisierung des Öffentlichen Verkehrs ermöglichen die durch ETSI standardisierten Datentelegramme die Priorisierung weiterer Gruppen von Verkehrsteilnehmenden. Hierzu sind in der SREM-Nachricht bereits verschiedene Priorisierungsklassen vorgesehen (ETSI TS 103 301), namentlich:

- Öffentlicher Verkehr (Requestor role (public transport)),
- Spezialtransporte (Requestor role (special transport)),
- Gefahrguttransport (Requestor role (dangerousGoods)),
- Straßenbau (Requestor role (roadWork)),
- Straßenrettung (Requestor role (roadRescue)),
- Einsatzfahrzeuge (Requestor role (emergency)),
- Sicherungsfahrzeug (Requestor role (safetyCar)),
- Lkw (Requestor role (truck)),
- Motorrad (Requestor role (motorcycle)),
- Polizei (Requestor role (police)),
- Feuerwehr (Requestor role (fire)),
- Krankenwagen (Requestor role (amulance)),
- Verkehrsministerium (Requestor role (dot)),
- Durchgangsverkehr (Requestor role (transit)),
- langsam fahrendes Fahrzeug (Requestor Role (slowMoving)),
- Radverkehr (Requestor role (cyclist)),
- Fußverkehr (Requestor role (pedestrian)),
- Militär (Requestor role (military)).

Zur tatsächlichen Erreichung dieser positiven Effekte ist das multikriterielle Optimierungsproblem der Priorisierung mehrerer potenziell konfliktbehafteter

Verkehrsströme zu lösen. Eine wesentliche Randbedingung ist das vorherrschende politische Leitbild, zum Beispiel das des umweltverträglichen Verkehrs (GERLACH et al. 2015).

So kann das Optimierungsziel beispielsweise als Kostenoptimierungsproblem formuliert werden, welches die internen und externen Kosten des Verkehrs berücksichtigt. Mögliche Kostenarten sind dabei wie dargestellt von (GERIKE et al. 2006):

- Wegekosten,
- Staukosten,
- Unfallkosten,
- Lärmkosten,
- Luftverschmutzungskosten,
- Klimaschäden,
- Natur und Landschaft, Trennwirkung, Flächenverbrauch.

Auch eine Bewertung der Erfüllung von Nachhaltigkeitszielen ist möglich. Hierzu weist die Bundesregierung in ihrer aktuellen Nachhaltigkeitsstrategie folgende mit der Mobilität verbundene Indikatoren aus (Bundesregierung 2018), die durch eine geeignete LSA-Steuerung direkt oder indirekt beeinflusst werden können:

- Endenergieverbrauch im Güterverkehr und im Personenverkehr (11.2.a und b),
- Bevölkerungsgewichtete durchschnittliche ÖPNV-Reisezeit von jeder Haltestelle zum nächsten Mittel-/Oberzentrum (11.2.c),
- Treibhausgasemissionen (13.1.a),
- Primärenergieverbrauch im Inland (7.1),
- Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch (7.2.a),
- Emission von Luftschadstoffen (3.2.a),
- Vorzeitige Sterblichkeit (3.1.a).

Eine Erweiterung dieses Kernindikatorensystems diskutiert (GERLACH et al. 2015) und schlägt eine Erweiterung um soziale und wirtschaftliche Aspekte einer nachhaltigen Verkehrsentwicklung vor. Eine LSA-Regelung muss demnach multikriteriell optimiert werden.

Beispielsweise kann in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad eines Fahrzeugs für einen ressourceneffizienten Verkehrsablauf dasjenige Fahrzeug mit dem höheren Besetzungsgrad priorisiert werden (Minimierung der Summe der Wartezeitverluste über alle Verkehrsteilnehmenden), unter der Randbedingung, dass unnötige Halte vermieden werden (Minimierung der Summe der Energieverluste: Ein schwereres Fahrzeug benötigt viel Energie zum Anfahren, Emissionserzeugung beim Verbrennen und Abrieb). Weiterhin soll der Verkehrsablauf insgesamt für alle Teilnehmenden sicher sein und ein funktionierendes Notfallmanagement ermöglichen (Minimierung der Reisezeit für Einsatzfahrzeuge zum gesamtgesellschaftlichen Schutz von Leib und Leben).

Dieses Optimierungsproblem unterliegt weiteren Randbedingungen:

- Beförderungs-/Transportwünsche,

- zur Verfügung stehende Verkehrsmittel,
- individuelle Verkehrsmittelwahl:  
Anreiz schaffen durch Priorisierung,
- Durchdringung C2X bzw. X2X und Verkehrsdetektion allgemein (Fahrzeuge, Personen mit deren Bewegungswünschen) – Vorhandensein eines umfassenden Verkehrslagebildes).

Auf Basis einer vorher festzulegenden Optimierungsfunktion kann für diese Teilnehmende des Verkehrsgeschehens eine für die jeweilige Situation optimale Priorisierung vorgenommen werden.

#### 4.1.3 Wechselwirkungen zwischen Verkehrsarten

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick zu Effekten, die sich bei der Regelung einer LSA ergeben, die bisher eine klassische ÖPNV-Priorisierung implementiert.

Priorisierter Verkehrsstrom	1. Einfluss der Information über betrachteten priorisierten Verkehrsstrom auf ÖPNV-Priorisierung	2. Einfluss der ÖPNV-Priorisierung auf betrachteten priorisierten Verkehrsstrom	3. Vorteile für betrachteten priorisierten Verkehrsstrom – gesamtverkehrlich	4. Information in Rückkanal von LSA an feindlichen Verkehrsstrom
nmIV: Fußverkehr, Radverkehr	Abwägung Reisezeitverluste der beteiligten Verkehrsteilnehmenden	„Zerlegung“ von herkömmlichen Grünen Wellen zugunsten nmIV (nur Rad: Queren in einem Zug), Anpassung Progressionsgeschwindigkeit für nmIV	Stärkung Umweltverbund, Verkehrssicherheit, Empfindlichkeit gegenüber Wartezeiten – Provozierung Rotlichtverstöße Komfortfaktor: Vermeidung Taster (= Absteigen) insb. für Radverkehr	Restgrün/-rot, Geschwindigkeitsempfehlung, Priorisierungsquittierung (Grüne Welle nmIV)
mIV: Pkw, KRad	Abwägung Reisezeitverluste der beteiligten Verkehrsteilnehmenden	„Zerlegung“ von Grünen Wellen mIV	Komfort IV (insb. flüssiger Verkehrsablauf), Haltevermeidung, Emissionsvermeidung	Restgrün/-rot, Geschwindigkeitsempfehlung, Priorisierungsquittierung (Grüne Welle mIV) Pulkbildung
Schwerlastverkehr/ Gefahrgut	Abwägung Reisezeitverluste (Personen vs. Güter) vs. Umwelteffekte (Anzahl Stopps und verbundene Emissionen, geringe Beschleunigung)	„Zerlegung“ von Grünen Wellen	Emissionsvermeidung durch Haltvermeidung, Kraftstoffeinsparung Stärkung des Wirtschaftsverkehrs (falls politisch gewollt)	Priorisierungsquittierung, Restgrün/-rot, Geschwindigkeitsempfehlung, Pulkbildung
Einsatzfahrzeuge	Einschränkung der ÖPNV-Priorisierung unter Abwägung des öffentlichen Interesses (Sicherheit, Gesundheit, Vermeidung von Sachschäden etc.)	Keine Einschränkung der Priorisierung von Einsatzfahrzeugen, wenn öffentliches Interesse besteht	Gesicherte und effiziente (= vorbereitete) Querung der Kreuzung	Strategische Routeninformation, Priorisierungsquittierung, Restgrün/-rot, Geschwindigkeitsempfehlung
(anderes) ÖPNV-Fahrzeug	Fahrplanlage und Besetzungsgrad		Optimierung der Fahrzeugumlaufzeit bei Priorität der Verspätungsvermeidung und des Durchsatzes bei Priorisierung des Fahrzeugs mit höherem Besetzungsgrad	Priorisierungsquittierung Restgrün/-rot, Geschwindigkeitsempfehlung

Tab. 4-1: Übersicht der Wechselwirkungen zwischen Verkehrsarten

tiert hatte und die nun Informationen über andere priorisierte Verkehrsströme erhält.

Folgende Punkte werden diskutiert:

1. Einfluss der Information über betrachteten priorisierten Verkehrsstrom auf die ÖPNV-Priorisierung
2. Einfluss der ÖPNV-Priorisierung auf den betrachteten priorisierten Verkehrsstrom
3. Vorteile für betrachteten priorisierten Verkehrsstrom – gesamtverkehrlich gesehen
4. Informationen via Rückkanal an betrachteten priorisierten Verkehrsstrom, welcher im Bereich C2X-basierte Priorisierung gegeben ist

Die Wechselwirkungen zwischen den betrachteten priorisierten Verkehrsstrom auf die ÖPNV-Priorisierung und andersrum sind definitiv gegeben und fall-spezifisch im Sinne der Gesamtoptimierung bzw. politischen und stadtplanerischen Zielstellungen abzuwägen.

## 4.2 Wechselwirkungen zwischen den C-ITS Services

### 4.2.1 Überblick über C-ITS Services

In Deutschland ist die Einführung einer Reihe von C-ITS Services geplant, welche einen direkten oder indirekten Einfluss auf die ÖPNV-Priorisierung haben. Die ÖPNV-Priorisierung selbst wird in dem C-ITS Service TSP „Traffic Signal Priority Request“ umgesetzt.

Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über geplante Dienste in Deutschland (Germany 2020), deren Bedeutung im Zuge der ÖPNV-Priorisierung sowie deren Relevanz für den ÖPNV im Allgemeinen. Darüber hinaus sind im europäischen Kontext weitere Services geplant (Pilots 2020).

Die Bedeutung der Dienste wird qualitativ entsprechend folgendes Maßstabs eingeschätzt:

- ++ hohe Bedeutung, beeinflusst die Priorisierung direkt
- + für ÖPNV direkt relevant, jedoch nicht direkt für dessen Priorisierung
- o keine direkte Bedeutung für den ÖPNV

Dienst	Bedeutung für ÖPNV-Priorisierung	Relevanz für ÖPNV allgemein
TSP Traffic Signal Priority Request	++	Technische Umsetzung der ÖPNV-Priorisierung
GLOSA Green Light Optimal Speed Advisory	++	Optimierungskonflikt: sichere Grünzeitvorhersage vs. bedarfsgerechte, hochdynamische LSA-Steuerung
PVD Probe Vehicle Data	++	Zur Verkehrslageermittlung, welche die Priorisierung beeinflusst
RWW Road Works Warning	+	Kann Aufmerksamkeit des Fahrpersonals erhöhen
TJW Traffic Jam Ahead Warning	+	Kann Aufmerksamkeit des Fahrpersonals erhöhen
VRU Vulnerable Road User Protection	+	Kann Aufmerksamkeit des Fahrpersonals erhöhen, Assistenz bei Sichtschatten
MVW Maintenance Vehicle Warning	o	Kann Aufmerksamkeit des Fahrpersonals erhöhen
IVS In-Vehicle Signage	o	Kann Aufmerksamkeit des Fahrpersonals erhöhen
SWD Shockwave Damping	o	Verflüssigung des Verkehrsablaufs allgemein, insb. Autobahnverkehr/Schnellstraßen
EVA Emergency Vehicle Approaching	+	Erleichterung der Bildung von Rettungsgassen, ÖPNV kann frühzeitig Ausweichpositionen anfahren
Route Advice Connected & Cooperative Navigation	o	Veränderte Routenführung aufgrund von Staus durch dispositiven Eingriff

Tab. 4-2: Übersicht über C-ITS Services

Für diejenigen C-ITS Services, die dem Fahrpersonal wertvolle Informationen liefern können, ist zu untersuchen, wie eine Übermittlung bei Beibehaltung der Verkehrssicherheit (Aufmerksamkeit für das Verkehrsgeschehen) die entsprechend gewollte verkehrliche Wirkung erzielen kann.

Nachfolgend werden die im Kontext des Öffentlichen Verkehrs bedeutenden C-ITS Services TSP, GLOSA und PVD, näher erläutert sowie der Nutzen bzw. die Wechselwirkungen diskutiert.

#### 4.2.2 TSP – Traffic Signal Priority

Die Prioritätsanforderung via TSP „zielt darauf ab, den Status der Ampeln einem Einsatzfahrzeug auf dem Weg zu einem Notfall oder einem Fahrzeug mit hoher Priorität (z. B. einem Fahrzeug des Öffentlichen Verkehrs) so zu ändern, dass sie sich schnell durch den Verkehr bewegen können, um zur Verkürzung der Reaktionszeiten und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beizutragen. Je nach Fahrzeugeigenschaften, wie Typ (z. B. Lkw oder Einsatzfahrzeug) oder Status (z. B. ÖPNV-Fahrzeug pünktlich oder verspätet), können unterschiedliche Prioritätsstufen angewendet werden. Wenn die Fahrzeuge Priorität für eine Kreuzung anfordern, wird die Ampelsteuerung je nach Prioritätsstufe und Gegebenheit angepasst. Aktive TSP-Techniken basieren auf der Erkennung von Fahrzeugen, die sich einer Kreuzung nähern, und passen die Signalzeit dynamisch an, um den Service für das Fahrzeug zu verbessern. Im Gegensatz zu passiven Techniken erfordert der aktive TSP-Dienst eine spezielle Hardware: das Detektionssystem besteht typischerweise aus einem Sender am Fahrzeug (OBU) und einem oder mehreren infrastrukturseitigen Empfängern (R-ITS-S/RSU).“ (Germany 2020)

Für aktive Priorisierungstechnologien werden weiterhin intelligente Steuergeräte benötigt, welche die Kooperation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur umsetzen.

Der Nutzen des C-ITS Service TSP wurde im Dokument umfassend beschrieben. Unter idealen Bedingungen, d. h. vollständiger Kommunikation mit allen Verkehrsteilnehmenden, ergibt es sich, dass für alle an einer LSA anfragenden Verkehrsströme in Echtzeit das kürzest mögliche, passende Freigabezeitfenster berechnet wird, welches zu einer weiteren

Effizienzsteigerung des Verkehrsablaufs am LSA-Knotenpunkt führt. Dabei sind Randbedingungen wie bspw. die Festlegung von Prioritäten durch die Straßenverkehrsbehörde oder Politik, das Hinterlegen der Prioritäten im Steuergerät durch den Straßenbaulastträger oder auch das Festlegen der Prioritätsklassen durch das Verkehrsunternehmen zu beachten. Darüber hinaus kann durch den Verzicht von Meldepunkten im Zuge der Umsetzung der Stufe 2 mittels der Nachrichten SREM/SSEM eine höhere Flexibilität in der Linienführung (beispielsweise bei durch Baustellen notwendigen Umleitungen) erreicht werden. Demgegenüber steht ein erheblich erhöhter Aufwand bei der Planung der LSA-Steuerung. Geeignete Steuerungsverfahren, welche die Trajektorien von ÖV-Fahrzeugen zur Steuerung der LSA nutzen, sind noch nicht verfügbar. Weiterhin ermöglicht die neuartige Kommunikation eine Halteplatzprognose, was sowohl betrieblich als auch zur Kundeninformation genutzt werden kann. Die Priorisierung der Verkehrsströme sollte immer unter einer intelligenten Berücksichtigung der gesamtverkehrlichen Interessen erfolgen. Dabei kann eine Priorisierung situationsabhängig zu verlängerten Wartezeiten von konfliktierenden Strömen führen, welche im Sinne der Lösung des multikriteriellen Optimierungsproblems sinnvoll ausgeglichen werden sollten. Das Fahrpersonal wird durch diese Informationen nicht zusätzlich belastet.

#### 4.2.3 GLOSA – Green Light Optimal Speed Advisory

„Das Ziel des Dienstes GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory) ist es, die Grünphasen von Lichtsignalanlagen (LSA) vorherzusagen und diese Informationen für ein effizientes und komfortables Fahren und als Information für den Fahrzeugführende zu nutzen. GLOSA setzt sich aus zwei Anwendungen zur Bereitstellung von Informationen für den Nutzer zusammen, wobei die LSA-Informationen über ETSI G5 in das Fahrzeug bzw. über Mobilfunk zum mobilen Endgerät versendet werden.“ (Germany 2020)

Der verkehrliche Nutzen des C-ITS Service GLOSA wurde bereits durch einige Studien belegt. Weniger Halte führen zu einer Verstärkung des Verkehrsflusses sowie zu einer Erhöhung der Kapazitäten innerhalb der Grünen Welle. Dennoch erfordert dieser Service eine stabile Prognose der Signalwechsel, welche bspw. nicht einfach mit den flexiblen Eingrif-

fen des C-ITS Service TSP in Einklang gebracht werden kann. Eine grundsätzlich offene Fragestellung ist, wie eine zielführende Visualisierung bzw. Interaktion der GLOSA-Applikation im ÖPNV-Fahrzeug erfolgen sollte. Die Ablenkung des Fahrpersonals sollte dabei auf ein Minimum beschränkt werden.

#### 4.2.4 PVD – Probe Vehicle Data

„Die Analyse und Beobachtung des Verkehrsgeschehens erfolgt in Zukunft auch über den Empfang der von den Fahrzeugen über ETSI G5 versendeten Statusmeldungen (CAM – Cooperative Awareness Message). Die von einer ITS Roadside Station (IRS/RSU) empfangenen Meldungen werden an eine Zentrale weitergeleitet und ermöglichen dort eine Ergänzung und Verbesserung der bislang auf stationäre Detektoren gestützte Verkehrslageanalyse. Insbesondere dort, wo die stationären Erfassungsstellen weit auseinanderliegen bzw. nicht vorhanden sind, können diese Meldungen einen Beitrag leisten. Basierend auf diesen Informationen kann ein harmonischer Verkehrsablauf durch ein detaillierteres und zielgerichtetes Verkehrsmanagement zur Minderung von Unfallrisiken ermöglicht werden.“ (Germany 2020)

Zusätzliche Informationen über die Verkehrslage können als Randbedingung für das multikriterielle Optimierungsproblem genutzt werden. Durch die linienhafte Kenntnis der Verkehrslage einzelner Fahrzeuge können die C-ITS Services TSP und GLOSA besser aufeinander abgestimmt werden und auch bei komplexen Knotenpunkten mit verschiedenen Verkehrsarten die negativen Folgen für das Gesamtsystem minimiert werden. Der C-ITS Services ist somit für alle Verkehrsteilnehmende sehr sinnvoll und ergänzt die bisher zumeist stationär-punktueller Erfassung des Verkehrs durch eine linienhaft-mobile Aufnahme der individuellen Kenngrößen. Das Fahrpersonal ist durch die Informationen nicht zusätzlich belastet. Hinsichtlich datenschutzrechtlicher Aspekte werden derzeit bestimmte Mechanismen zum Erfassen der Daten diskutiert und sind noch nicht abschließend geklärt.

## 5 Pilotierungskonzept und Handlungsempfehlungen

### 5.1 Pilotierungskonzept

Nachfolgend wird beschrieben, wie eine Umrüstung von bestehender Kommunikationstechnik zur ÖPNV-Priorisierung auf C2X-Kommunikation schrittweise erfolgen kann. Das Pilotierungskonzept baut auf dem Rahmenkonzept aus Kapitel 3.2 und dem erstellten Leitfaden aus Kapitel 3.3 auf. So unterschiedlich die Ausprägung der Infrastruktur zwischen den Städten heute ist und so heterogen die technische Realisierung der ÖPNV-Priorisierung im Status quo, so verschieden ist auch die explizite Ausprägung des Pilotierungskonzepts. Das Pilotierungskonzept sollte daher immer auf die speziellen Umfeldbedingungen abgestimmt werden und ist hier beispielhaft dargestellt. Randbedingungen wie Dispositionen von Fahrzeugen, Baustellen oder auch der Einsatz von unterschiedlichen Fahrzeugen und Fahrzeugumläufen auf einer Linie, führen zu Abweichungen von dem hier vorgestellten idealisierten Ansatz. Die grundlegenden Fragestellungen bleiben jedoch identisch.

Nachfolgend werden aus diesem Grund die notwendigen Schritte am Beispiel der sukzessiven Erweiterung der Infrastruktur und des Fuhrparks für eine C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung gezeigt, beginnend bei der Umrüstung einer bestimmten innerstädtischen Linie, über die Erweiterung einzelner sinnvoller Linienäste bis hin zum Ausbau des gesamten Netzes.

Dieses hier skizzierte schrittweise Vorgehen im Pilotierungskonzept zur Erreichung der Stufe 2 als Zielsystem einer zukunftssicheren und international standardisierten ÖPNV-Priorisierung wird vorwiegend aus den Perspektiven des ÖPNV-Unternehmens und der Kommune als Infrastrukturbetreiber betrachtet.

Die folgenden Kapitel erläutern das exemplarische Vorgehen und sind schematisch in Bild 5-1 dargestellt:

- Schritt (1): Analyse des Liniennetzes,
- Schritt (2): Ausrüstung einer Linie,
- Schritt (3): sukzessive Erweiterung mit sinnvollen Linien,
- Schritt (4): Ausbau des Netzes,
- hybride Umsetzung der einzelnen Schritte.

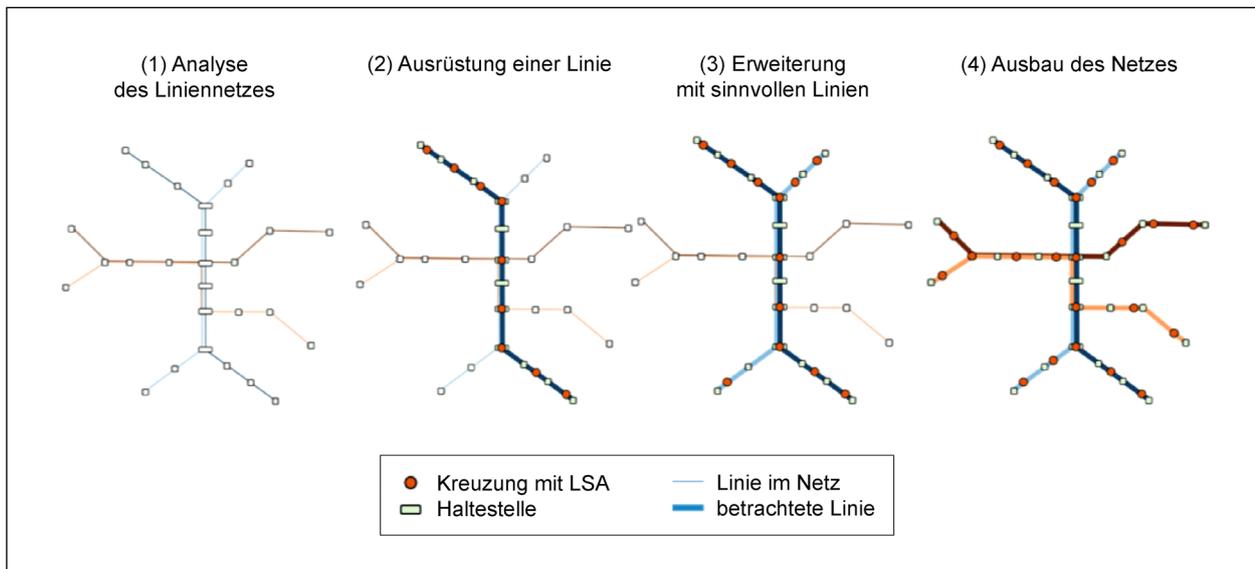


Bild 5-1: Pilotierungskonzept für C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung

### 5.1.1 Schritt (1): Analyse des Liniennetzes

In einem ersten Schritt sollte das gesamte Liniennetz hinsichtlich der existierenden Infrastruktur und der auf den einzelnen Linienwegen eingesetzten Fahrzeugen analysiert werden. Dabei wird eine dichte Abstimmung zwischen den kommunalen Betreibern der Infrastruktur/Lichtsignalanlagen und dem jeweiligen Verkehrsunternehmen empfohlen.

Zur zielführenden Analyse des Liniennetzes sollten folgende Fragen aus Sicht des Verkehrsunternehmens beantwortet werden:

- Welche Linien passieren welche Lichtsignalanlagen?
- Wie viele Lichtsignalanlagen liegen auf den einzelnen Linienwegen?
- Welche Fahrzeuge werden auf den einzelnen Linien eingesetzt?
- Kann die Installation von OBU initial minimiert werden, indem bestimmte Fahrzeuge gezielt auf einer Linie eingesetzt werden können?
- Welche Eingriffe sind bei der täglichen Disposition der Fahrzeuge notwendig? Welche Alternativkurse werden gefahren?

Aus Sicht der Kommune sollten die folgenden weiterführenden Fragen beantwortet werden:

- Sind Lichtsignalanlagen bzw. Steuergeräte für die Ausrüstung der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung

Upgrade-fähig und liegen diese entlang von Linienwegen der ÖPNV-Linien?

- Sind bei älteren LSA turnusmäßige Erneuerungen der Lichtsignalanlagen bzw. der Steuergeräte vorgesehen und liegen diese entlang von Linienwegen des ÖPNV?

Aus der gemeinsamen Sicht von Kommune und Verkehrsunternehmen sollten folgende Ziele verfolgt werden:

1. Identifikation einer Linie, deren Linienweg ausschließlich LSA beinhaltet, die mit geringem technischen Aufwand für die C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung ertüchtigt werden kann.
2. Stufenweise Migration: Zunächst Ausrüstung mit der Funktechnik und Umsetzung der Übergangslösung von Stufe 1 (Nutzung der CAM-Nachricht mit Public Transport Container), anschließende Erweiterung der Funktionalität durch Umsetzung des finalen Ausbaus von Stufe 2 (Nutzung der SREM/SSEM-Nachricht).
3. Bevorzugung von Linien, deren verbesserte Priorisierung hohen verkehrlichen Nutzen bringt – dies wird insbesondere durch die Umsetzung der Stufe 2 ermöglicht.
4. Bevorzugung von Linien die entlang häufig genutzter Strecken von Einsatzfahrzeugen der Feuerwehr und Polizei oder Krankenwagen liegen, da diese bei Umsetzung der Stufe 2 ebenfalls profitieren.

### 5.1.2 Schritt (2): Ausrüstung einer Linie

Nach der detaillierten Analyse des Streckennetzes inklusive der existierenden Infrastrukturkomponenten im Status quo erfolgt die Ausrüstung einer kompletten Linie. Bei der Ausrüstung einer Linie müssen folgende Komponenten berücksichtigt werden:

- LSA entlang der betreffenden Linie
    - Installation der RSUs als Hardware der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung,
    - Versorgung der RSUs mit den notwendigen Protokollversionen,
    - Anpassung der Versorgungskette der LSA inklusive Integration der RSU-Versorgung in diesen Prozess,
    - Anschluss der RSUs an das Hintergrundsystem inklusive Zertifikatsverwaltung,
    - evtl. Tiefbauarbeiten für Verkabelung oder Freilegung von Leerrohren,
    - evtl. Upgrade oder Ersatz des LSA-Steuergerätes,
    - evtl. Anpassung LSA-Steuerungslogik,
    - evtl. Anpassung LSA-Steuerverfahren,
    - evtl. Anpassung Schnittstelle zwischen LSA und Lichtsignalsteuerungszentrale,
    - evtl. Upgrade der gesamten LSA zur Herstellung des Stands der aktuellen Richtlinien (bspw. Blindensignalisierung, LED-Technik, Leitsysteme, ...).
  - Fahrzeuge, die auf dieser Linie eingesetzt werden
    - Installation einer OBU als Hardware der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung,
    - Installation der Antennen und der externen Module der OBU auf dem Fahrzeugdach sowie Herstellung der Verkabelung,
    - Versorgung der OBU mit den notwendigen Protokollversionen,
    - Anschluss der OBU an das Hintergrundsystem inklusive Zertifikatsverwaltung,
    - Schaffung der Schnittstelle OBU – Bordrechner,
    - evtl. Anpassung und Test der OBU hinsichtlich ÖPNV-relevanter Richtlinien (EMV-Prüfung, Einbauplatz, Schnittstellen, ...),
    - evtl. Schaffung der Voraussetzungen für einen zunächst hybriden Betrieb zwischen herkömmlicher Hardware der ÖPNV-Priorisierung und OBU als Hardware der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung.
  - Hintergrundsystem – Kommune/Infrastruktur
    - Anpassung der LSA Versorgungstools zur Versorgung der Meldepunkte bzw. Meldestrecken der RSUs,
    - Anpassung der LSA Planungstools zur Umsetzung der Stufe 2,
    - Anpassung der LSA Tools für das Qualitätsmanagement zur Umsetzung der Stufe 2,
    - Schaffung eines Tools zum Zertifikatabgleich inklusive Anbindung an die PKI.
  - Hintergrundsystem – ÖPNV-Unternehmen
    - Anpassung der ÖPNV-Planungstools zur Versorgung der Meldepunkte bzw. Meldestrecken der OBU,
    - Anpassung der ÖPNV-Tools für das Qualitätsmanagement zur Umsetzung der Stufe 2,
    - Schaffung eines Tools zum Zertifikatabgleich inklusive Anbindung an die PKI.
- Mit „evtl.“ sind diejenigen Komponenten vermerkt, die in Abhängigkeit der örtlichen Spezifika zusätzlich benötigt werden.

### 5.1.3 Schritt (3) & Schritt (4): Sukzessive Erweiterung sinnvoller Linien bis hin zum Netzausbau

Ist eine Linie auf Basis vom zuvor genannten Schritt (2) technisch ausgestattet, können weitere Linienwege ergänzt werden, die günstiger Weise gemeinsame Streckenabschnitte oder Linienäste besitzen. In dieser Art und Weise kann sukzessive das Streckennetz für die C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung ausgebaut werden.

Ziel ist es, die komplette Funktechnik des Status quo durch C2X-basierte Technologien zunächst im

hybriden Betrieb zu erweitern sowie innerhalb der Umsetzung der ersten Stufe nach und nach zu ersetzen und anschließend die vollständige Funktionalität der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung der Stufe 2 als Zielsystem durch Anpassung der Software und Hintergrundsysteme zu erlangen.

#### 5.1.4 Hybride Umsetzung der einzelnen Schritte

Das zuvor beschriebene Vorgehen hinsichtlich der Schritte 1 bis 4 entspricht einem idealisierten Weg zur Umsetzung der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung. Zur beispielhaften Erläuterung wurden einige Aspekte bewusst vereinfacht dargestellt. In der Realität wird es in vielen Fällen zu einer Vermischung der einzelnen Schritte kommen können. Weiterhin wird der sogenannte Hybridbetrieb, d. h. der gleichzeitige Mischbetrieb zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen mit herkömmlicher Priorisierungsfunktion und Systemen der C2X-basierten ÖV-Priorisierungstechnik, für einen reibungslosen Übergang notwendig werden. Dieser hybride Betrieb wird in vielen Städten für eine definierte Übergangszeit erforderlich und ist bei der Konzeption und Umsetzung der zuvor genannten vier Schritte mit zu berücksichtigen. Sowohl infrastrukturseitig als auch fahrzeugseitig müssen entsprechend beide Kommunikationstechnologien hardware- und softwareseitig vorgehalten werden.

## 5.2 Handlungsempfehlungen

Im Zuge dieses Kapitels „Handlungsempfehlungen“ erfolgt die Betrachtung der einzelnen Entwicklungsstränge inklusive der Untermauerung mit den entsprechenden Zeithorizonten für die Realisierung, aufbauend auf dem ausgearbeiteten Rahmenkonzept, dem Leitfaden und dem Pilotierungskonzept. Bei der zeitlichen Umsetzung der im Pilotierungskonzept dargestellten Schritte ist zu berücksichtigen, dass die Einführung der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung über moderne LSA-Hardware inklusive RSU auf der einen Seite und OBU im Fahrzeug auf der anderen Seite nur nach und nach erfolgen wird. Somit ist es sinnvoll, die einzelnen Schritte, soweit möglich, parallel zu starten und deren Realisierung an bestimmten Punkten zu synchronisieren. Es ergeben sich damit die in Bild 5-2 dargestellten stark vereinfachten Entwicklungsstränge inklusive deren zeitlichen Verortung.

Ausgehend von einer umfassenden Analyse des Liniennetzes werden zunächst die Arbeitsschritte der Stufe 1 zur Installation und Etablierung der Hardware für die C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung auf dem Fahrzeug (A) einerseits und im Zuge der Ertüchtigung der LSA/Infrastruktur (B) andererseits initiiert. Dabei ist für die vollständige Umsetzung der Stufe 1 mit einer Dauer von ca. 2 bis 5 Jahren zu rechnen. Abhängig von den örtlichen, organisatorischen und technischen Randbedingungen kann die Dauer zusätzlich variieren. Die unterschiedlichen Arbeitsschritte zum Hardwareupgrade fahrzeugseitig (A) und infrastrukturseitig (B) können innerhalb der einzelnen Verantwortungsbereiche synchron gestartet werden, benötigen jedoch in der ersten Phase nur wenige turnusmäßige Abstimmungen. Jedoch sollte die Schnittstelle sowie deren Definition von Beginn an geklärt sein. Diese ist beim Zusammenführen der Entwicklungszweige (A) und (B) zur Realisierung der Stufe 1 von entscheidendem Interesse.

In vielen Städten wird es über eine längere Zeit zu einem Parallelbetrieb von herkömmlicher Priorisierungstechnik des Status quo und den neuen Modulen OBU und RSU der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung kommen. Begründet liegt dies in dem hohen Alter von Lichtsignalanlagen in Städten oder bspw. Fördermittelbindung, was einen Austausch nur nach und nach zulässt. Eine andere Randbedingung sind beispielsweise Fördermittelbindungen auf Anlagen oder Fahrzeuge, welche nicht ohne weiteres aufgehoben werden können. Die konkrete Abfolge der einzelnen Maßnahmen muss daher im Kontext dieser Rahmenbedingungen festgelegt werden.

Als Zieldefinition zum Ausbau der C2X-basierten ÖPNV-Priorisierung sollte möglichst immer die Stufe 2 als international standardisierter Pfad angestrebt werden. Im Zuge der Realisierung der Stufe 2

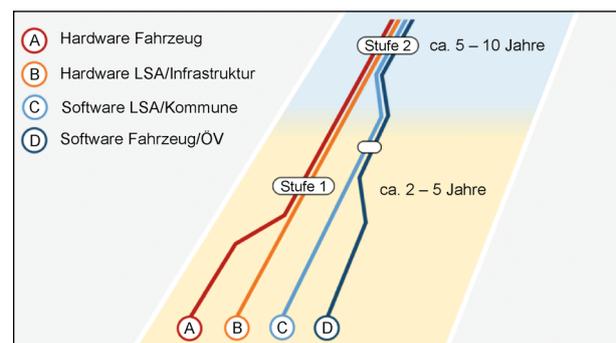


Bild 5-2: Handlungsempfehlung/Roadmap für C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung

sind die genannten Softwareentwicklungen der LSA-Planungs-, -steuerungs-, und QM-Management-Software (C) seitens der Infrastruktur, Kommunen und Hersteller von LSA-Tools notwendig. Ebenfalls muss die Software der ÖPNV-Unternehmen für deren Planung, Monitoring und Qualitätsmanagement (D) entsprechend angepasst werden. Infolge der zeitlichen Ausdehnung dieses Pfads zur Erreichung der Stufe 2 von aktuell geschätzten 5 bis 10 Jahren, sollten die Aktivitäten gleichzeitig zu (A) und (B) gestartet werden. Innerhalb der genannten Pfade finden umfassende Entwicklungsarbeiten statt, weshalb empfohlen wird, frühzeitig entsprechende Arbeiten anzugehen bzw. mit den Anbietern der Software (bspw. Planungstools, Monitoringtools etc.) abzustimmen. Die Umsetzung der Nachrichtentypen SREM und SSEM ist erst mit Erreichen der Stufe 2 möglich. Hier findet eine Synchronisation der Ergebnisse aus den Entwicklungssträngen (A) und (B) mit den Entwicklungssträngen (C) und (D) statt.

Neben den genannten technischen Aspekten spielen auch administrative Themen eine entscheidende Rolle. Technische Änderungen verlangen auch umfassende Einweisung und Schulung von Personal bzw. den Bedienern der Softwaretools. Diese Maßnahmen sollten frühzeitig initiiert werden. Weiterhin sind Prozessketten hinsichtlich Versorgung und Update der Systeme entsprechend anzupassen.

### 5.3 Ausblick

Die C2X-basierte Priorisierung von Verkehrsströmen ermöglicht für alle Verkehrsteilnehmende Vorteile, insbesondere, wenn sie ebenfalls mit dieser Kommunikationstechnologie ausgerüstet sind, Daten und Informationen austauschen können sowie verkehrlich miteinander interagieren.

Neben der C2X-basierten Priorisierung ermöglichen umfassende weitere C-ITS Services und Applikationen die Realisierung von intelligent-vernetzten Mobilitätslösungen. Die grundlegenden Ziele der Services sind:

- gegenseitig nutzbringender Informations- und Datenaustausch,
- Erhöhung der Verkehrssicherheit,
- Steigerung der Effizienz des (intelligenten) Verkehrs sowie

- Schonung von Ressourcen und Sicherung von nachhaltiger Mobilität.

Voraussetzung zur Realisierung der Ziele ist eine umfassende und standardisierte Vernetzung, welche mindestens europaweit harmonisiert ist. Diese ist aktuell so gestaltet, dass sie technologieunabhängig ist. Das heißt die Kommunikationsprotokolle können unabhängig vom Kommunikationsweg (ITS-G5, C-V2X, LTE/5G) und vom Endgerät (OBU, RSU, Smartphone) übertragen werden.

Entsprechend der Erfordernisse der jeweiligen C-ITS Services muss eine PKI dafür Sorge tragen, dass alle Teilnehmenden nur diejenigen Berechtigungen, beispielweise bezüglich einer Bevorrechtigung, besitzen, die ihnen zusteht. Die explizite Umsetzung der IT-Sicherheit wird vor allem dann relevant, wenn C-ITS Services nicht mehr ausschließlich informativ genutzt werden, sondern bspw. einen direkten Einfluss auf Fahrassistenzsysteme oder automatisierte Fahrfunktionen haben.

Die letzte Dekade hat gezeigt, wie rasant sich Kommunikationstechnologien weiterentwickeln und verbreiten. Der gesamte IoT-Bereich wäre ohne diese Grundlage undenkbar. Auch der Verkehrsbereich wird durch diesen Fortschritt mehr und mehr beeinflusst – ob dies die Navigation in Städten, die Verfügbarkeit von aktuellen Verkehrs- oder Stauinformationen oder auch Echtzeitinformationen zu Abfahrtszeiten und zur Verkehrsmittelwahl sind. Dies sind nur einige Beispiele. Aus Sicht der Kommunen/Städte als Infrastrukturbetreiber auf der einen Seite und der Anbieter des Öffentlichen Verkehrs auf der anderen Seite sollte es zukünftig das Ziel sein, diese Entwicklung inklusive des dazugehörigen Informationsflusses zu lenken und strategisch zu steuern, um auch weiterhin die Möglichkeit der kollektiven Verkehrssteuerung und -beeinflussung zu nutzen und zielführend mit individuellen Entscheidungen zu ergänzen. Hierfür müssen frühzeitig die Grundlagen geschaffen werden.

## Literatur

- ACEA Task Force HDEI/BCEI: FMS-Standard description. 2017
- Ausschuss für elektrische Anlagen des VÖV. VÖV-Schriften 04.05.1: Technische Anforderungen an rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme – Übertragungsverfahren Datenfunk. Köln: Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe, 1984
- AXIOTIS, D. I. & APOSTOLIS, K. S.: „Packet data messaging over TETRA: network performance.“ *Wireless Networks, The Journal of Mobile Communication, Computation and Information*: 16, 17. Juli 2009: 1189-1198 (2010)
- BiDiMoVe, BMVI: BiDiMoVe BMVI – Bidirektional, Multimodal, Vernetzt. 2020. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/bidimove.html> (Zugriff am 24.09.2020)
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: IVS-Aktionsplan „Straße“. Berlin, 2012
- BMVI SIRENE: BMVI mFUND Projekte – SIRENE. 2020. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/beschleunigung-von-sicherheits-einsaetzen-sirene.html> (Zugriff am 08.09.2020)
- Bundesregierung: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. 2018. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1546450/65089964e4d4a2ab07ca8a4919e09e0af/2018-11-07-aktualisierung-dns-2018-data.pdf?download=1> (Zugriff am 25.08.2020)
- Consortium, Car2Car Communication: Car2Car Communication Consortium – Basic System Profile. 2020. <https://www.car-2-car.org/documents/basic-system-profile/> (accessed 08.25.2020)
- C-ROADS: Common C-ITS Service Definitions Version 1.6. C-Roads Platform, Working Group 2 Technical Aspects, Taskforce 2 Service Harmonisation. 2020
- e-Mobil BW GmbH: Automatisiert, Vernetzt, Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg. Stuttgart, 2015
- escrypt\_a: escrypt – Pilot-PKI gemäß neuesten Sicherheitsstandards. 2019. <https://www.escrypt.com/de/news-events/car-2-car-pilot-pki-gemaess-neuesten-sicherheitsstandards> (Zugriff am 25.08.2020)
- escrypt\_b: escrypt – ESCRYPT liefert PKI für Cooperative ITS Corridor Pilotprojekt. 2016. <https://www.escrypt.com/de/news-events/pki-fuer-its-corridor-pilotprojekt> (Zugriff am 25.08.2020)
- ETSI EN 300 392-1: „Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 1: General network design; V1.6.1.“ Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 04/2020
- ETSI EN 300 392-2: „Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI); V3.8.1.“ Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 08/2016
- ETSI EN 302 636-4-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multi-point communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality; V1.4.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 01/2020
- ETSI EN 302 636-5-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol; V2.2.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 05/2019
- ETSI EN 302 637-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service; V1.4.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 04/2019
- ETSI EN 302 663: Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band; V1.3.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 01/2020
- ETSI EN 302 931: European Standard Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Geographical Area Definition; V1.1.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European

- Telecommunications Standards Institute, 07/2011
- ETSI TR 103 562: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2; V2.1.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 12/2019
- ETSI TS 102 894-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary; V1.3.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 08/2018
- ETSI TS 102 941: Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Trust and Privacy Management; V1.3.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 02/2019
- ETSI TS 103 097: Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security header and certificate formats; V1.3.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 10/2017
- ETSI TS 103 301: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services; V1.3.1. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute, 02/2020
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement: 321/3 Hinweise zum Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen: H QML. Köln: FGSV-Verlag, 2014
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement: Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Köln: FGSV Verlag, 2015
- GERIKE, R.; SEIDEL, T.; BECKER, U. J.; RICHTER, F. & SCHMIDT, W.: Untersuchung der Auswirkungen von Internalisierungsmaßnahmen. Dresden: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2006
- GERLACH, J.; HÜBNER, S.; BECKER, T. & BECKER, U. J.: Entwicklung von Indikatoren im Bereich Mobilität für die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015
- Germany, C-ROADS – Pilots: C-ROADS – Pilots Germany. 2020. <https://www.c-roads-germany.de/deutsch/c-its-dienste-1/> (Zugriff am 25.08.2020)
- Group, European Expert: C-ITS Platform. 2016
- ISO/TS 19091: „Intelligent transport systems — Cooperative ITS — Using V2I and I2V communications for applications related to signalized intersections.“ International Organization for Standardization, 2019
- KoMoD, BMVI: BMVI – Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf. 2019. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/komod.html> (Zugriff am 11.10.2019)
- LEUPOLD, A.: Analyse der Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für die Anwendung von ÖPP-Geschäftsmodellen im Bereich der innerstädtischen Lichtsignalsteuerung. Band 19 Schriftenreihe der Professur Betriebswirtschaftslehre im Bauwesen. Ilmtal-Weinstraße: Bauhaus-Universitätsverlag, 2014
- LOHSE, D. & SCHNABEL, W.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. DIN e. V., 2011
- MANSFELD, W.: Satellitenortung und Navigation, Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 1998
- ODG: <https://www.ocit.org/>. 18.09.2020. <https://www.ocit.org/> (Zugriff am 08.09.2020)
- OTTO, T.: Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten. Kassel, 2011
- PIFFNER, P.: Method and apparatus for the transmission of binary data strings. CH, AT, ES, DE, US Patent EP0566773B1. 1992
- Pilots, C-ROADS: C-ROADS Pilots – Implemented Services. 2020. [https://www.c-roads.eu/pilots/implemented-services.html?L=0&no\\_cache=1&sword\\_list%5B0%5D=services&chash=](https://www.c-roads.eu/pilots/implemented-services.html?L=0&no_cache=1&sword_list%5B0%5D=services&chash=)

b835291b08825354c66643b1f956e6e5  
(Zugriff am 25.08.2020)

Platform, C-ROADS: C-ROADS Platform. 2020.  
<https://www.c-roads.eu/platform.html> (accessed  
08.25.2020)

PRIEMER, C.: Kommunikationsdatenbasierte,  
dezentrale Lichtsignalsteuerung in städtischen  
Netzen. Braunschweig, 2011

VDV Ausschuss für Telematik und Informationssys-  
teme (ATI): VDV-Schrift 301-1: Internetprotokoll  
basiertes integriertes Bordinformationssystem  
IBIS-IP. Köln: Verband Deutscher Verkehrs-  
unternehmen e. V. , 2014

—. VDV-Schrift 420: Technical Requirements for  
Automatic Vehicle Location/Control Systems –  
Radio Data Transmission (BON Version). Köln:  
Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.,  
1992

—. VDV-Schrift 421: Technische Anforderungen an  
Ortsbakensysteme. Köln: Verband Deutscher  
Verkehrsunternehmen (VDV) e. V., 1993

—. VDV-Schrift 426. Lichtsignalanlagen – Beein-  
flussung über digitale Funktechnik. Juli 2014

—. VDV-Schrift 730: Funktionale Anforderungen an  
ein itcs. Köln: Verband Deutscher Verkehrsun-  
ternehmen e. V., 2015

VERONIKA, BMVI: BMVI – Vernetztes Fahren des  
öffentlichen Nahverkehrs in Kassel – VERONI-  
KA. 2019. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/  
DE/Artikel/DG/AVF-projekte/veronika.html](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/veronika.html)  
(Zugriff am 11.10.2019)

WEISHEIT, T.: Ein Verfahren zur Prognose ver-  
kehrsabhängiger Schaltzeiten von Lichtsignal-  
anlagen. Kassel, 2016

ZIMMERMANN, A.: Diplomarbeit. Nutzung des  
C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p  
für die ÖV-Priorisierung an signalisierten Kno-  
tenpunkten. Dresden, 05.04.2019

## Bilder

Bild 1-1: Meldepunktprinzip

Bild 1-2: LSA-Funkübertragungssysteme im  
Bestand

Bild 2-1: Systemübersicht C2X-basierte  
ÖPNV-Priorisierung

Bild 2-2: IEEE802.11p Protokollstack

Bild 2-3: C-ITS Public-Key-Infrastruktur (PKI) –  
Anbindung ÖPNV-Unternehmen

Bild 3-1: CAM-Struktur mit Containern

Bild 3-2: Interaktionen ÖPNV-Priorisierung mittels  
CAM-Nachrichten

Bild 3-3: Struktur SREM

Bild 3-4: Struktur SSEM

Bild 3-5: Interaktionen ÖPNV-Priorisierung mittels  
SREM- und SSEM-Nachrichten

Bild 3-6: Systemübersicht C2X-basierte ÖPNV-  
Priorisierung – Stufen inklusive Nach-  
richten

Bild 5-2: Pilotierungskonzept für C2X-basierte  
ÖPNV-Priorisierung

Bild 5-2: Handlungsempfehlung/Roadmap für  
C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung

## Tabellen

Tab. 1-1: Funkübertragungsverfahren der Stich-  
probe (n = 80); Mehrfachnennungen  
möglich

Tab. 1-2: Bewertung der aktuellen Verfahren

Tab. 2-1: Überblick ETSI ITS-Nachrichtentypen  
bzgl. Inhalt, Ausbreitungsart, Trigger und  
Priorisierung

Tab. 3-1: Gegenüberstellung der Systeme im  
Status quo und C2X

Tab. 3-2: Vor- und Nachteile der C2X-basierten  
ÖPNV-Priorisierungssysteme

Tab. 4-1: Übersicht der Wechselwirkungen  
zwischen Verkehrsarten

Tab. 4-2: Übersicht über C-ITS Services

## Anhang

### Nachrichtenprofil CAM

#### Allgemeine Beschreibung:

Auszug relevanter Datenfelder nach (ETSI EN 302 637-2 2019)

```

CAM ::= SEQUENCE {
    header ItsPduHeader,
    cam    CoopAwareness
}

CoopAwareness ::= SEQUENCE {
    generationDeltaTime GenerationDeltaTime,
    camParameters      CamParameters
}

CamParameters ::= SEQUENCE {
    basicContainer      BasicContainer,
    highFrequencyContainer HighFrequencyContainer,
    lowFrequencyContainer LowFrequencyContainer OPTIONAL,
    specialVehicleContainer SpecialVehicleContainer OPTIONAL,
    ...
}

SpecialVehicleContainer ::= CHOICE {
    publicTransportContainer PublicTransportContainer,
    specialTransportContainer SpecialTransportContainer,
    dangerousGoodsContainer DangerousGoodsContainer,
    roadWorksContainerBasic RoadWorksContainerBasic,
    rescueContainer         RescueContainer,
    emergencyContainer       EmergencyContainer,
    safetyCarContainer       SafetyCarContainer,
    ...
}

PublicTransportContainer ::= SEQUENCE {
    embarkationStatus EmbarkationStatus,
    ptActivation       PtActivation OPTIONAL
}

```

#### Public Transport Container:

Nach (ETSI EN 302 637-2 2019) und (ETSI TS 102 894-2 2018)

```

PublicTransportContainer ::= SEQUENCE {
    embarkationStatus EmbarkationStatus,
    ptActivation       PtActivation OPTIONAL
}

EmbarkationStatus ::= BOOLEAN

```

```

PtActivation ::= SEQUENCE {
    ptActivationType PtActivationType,
    ptActivationData PtActivationData
}

PtActivationType ::= INTEGER {
    undefinedCodingType (0),
    r09-16CodingType (1),
    vdv-50149CodingType (2)
} (0..255)

PtActivationData ::= OCTET STRING (SIZE(1..20))

```

## Nachrichtenprofil SREM

ETSI-Header nach (ETSI TS 103 301 2020)

```

SREM ::= SEQUENCE {
    header ItsPduHeader,
    srm SignalRequestMessage
}

```

Inhalt nach (ISO/TS 19091 2019)

```

SignalRequestMessage ::= SEQUENCE {
    timeStamp MinuteOfTheYear OPTIONAL,
    second DSecond,
    sequenceNumber MsgCount OPTIONAL,
    requests SignalRequestList OPTIONAL,
    requestor RequestorDescription,
    regional SEQUENCE (SIZE(1..4)) OF
        RegionalExtension {{Reg-SignalRequestMessage}} OPTIONAL,
    ...
}

SignalRequestList ::= SEQUENCE (SIZE(1..32)) OF SignalRequestPackage

SignalRequestPackage ::= SEQUENCE {
    request SignalRequest,
    minute MinuteOfTheYear OPTIONAL,
    second DSecond OPTIONAL,
    duration DSecond OPTIONAL,
    regional SEQUENCE (SIZE(1..4)) OF
        RegionalExtension {{Reg-SignalRequestPackage}} OPTIONAL,
    ...
}

SignalRequest ::= SEQUENCE {
    Id IntersectionReferenceID,
    requestID RequestID,
    requestType PriorityRequestType,
    inBoundLane IntersectionAccessPoint,
}

```

```

outBoundLane IntersectionAccessPoint OPTIONAL,
regional    SEQUENCE (SIZE(1..4)) OF
            RegionalExtension {{Reg-SignalRequest}} OPTIONAL,
...
}

PriorityRequestType ::= ENUMERATED {
  priorityRequestTypeReserved (0),
  priorityRequest      (1),
  priorityRequestUpdate (2),
  priorityCancellation  (3),
  ...
}

IntersectionAccessPoint ::= CHOICE {
  lane      LaneID,
  approach ApproachID,
  connection LaneConnectionID,
  ...
}

RequestorDescription ::= SEQUENCE {
  id          VehicleID,
  type        RequestorType OPTIONAL,
  position    RequestorPositionVector OPTIONAL,
  name        DescriptiveName OPTIONAL,
  routeName   DescriptiveName OPTIONAL,
  transitStatus TransitVehicleStatus OPTIONAL,
  transitOccupancy TransitVehicleOccupancy OPTIONAL,
  transitSchedule DeltaTime OPTIONAL,
  regional    SEQUENCE (SIZE(1..4)) OF
            RegionalExtension {{Reg-RequestorDescription}} OPTIONAL,
  ...
}

TransitVehicleStatus ::= BIT STRING {
  loading      (0),
  anADAuse    (1),
  aBikeLoad   (2),
  doorOpen    (3),
  charging     (4),
  atStopLine  (5)
} (SIZE(8))

TransitVehicleOccupancy ::= ENUMERATED {
  occupancyUnknown (0),
  occupancyEmpty   (1),
  occupancyVeryLow (2),
  occupancyLow     (3),
  occupancyMed     (4),
  occupancyHigh    (5),
  occupancyNearlyFull (6),
  occupancyFull    (7)
}

```

## Nachrichtenprofil SSEM

ETSI-Header nach (ETSI TS 103 301 2020)

```
SSEM ::= SEQUENCE {
  header ItsPduHeader,
  ssm SignalStatusMessage
}
```

Inhalt nach (ISO/TS 19091 2019)

```
SignalStatusMessage ::= SEQUENCE {
  timeStamp MinuteOfTheYear OPTIONAL,
  second DSecond,
  sequenceNumber MsgCount OPTIONAL,
  status SignalStatusList,
  regional SEQUENCE (SIZE(1..4)) OF
    RegionalExtension {{Reg-SignalStatusMessage}} OPTIONAL,
  ...
}

SignalStatusList ::= SEQUENCE (SIZE(1..32)) OF SignalStatus

SignalStatusPackageList ::= SEQUENCE (SIZE(1..32)) OF SignalStatusPackage

SignalStatusPackage ::= SEQUENCE {
  requester SignalRequesterInfo OPTIONAL,
  inboundOn IntersectionAccessPoint,
  outboundOn IntersectionAccessPoint OPTIONAL,
  minute MinuteOfTheYear OPTIONAL,
  second DSecond OPTIONAL,
  duration DSecond OPTIONAL,
  status PrioritizationResponseStatus,
  regional SEQUENCE (SIZE(1..4)) OF
    RegionalExtension {{Reg-SignalStatusPackage}} OPTIONAL,
  ...
}

SignalStatusPackage-addGrpC ::= SEQUENCE {
  synchToSchedule DeltaTime OPTIONAL,
  rejectedReason RejectedReason OPTIONAL,
  ...
}

RejectedReason ::= ENUMERATED {
  unknown,
  exceptionalCondition,
  maxWaitingTimeExceeded,
  ptPriorityDisabled,
  higherPTPriorityGranted,
  vehicleTrackingUnknown,
  ...
}

PrioritizationResponseStatus ::= ENUMERATED {
  unknown (0),
  requested (1),
  processing (2),
```

---

```
watchOtherTraffic (3),
  granted          (4),
  rejected         (5),
  maxPresence     (6),
  reserviceLocked (7),
  ...
}
```

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

#### 2018

- V 300: **Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoff-rückhalt und Standfestigkeit von Banketten**  
Werkenthin, Kluge, Wessolek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 301: **Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung**  
Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 302: **Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB**  
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 303: **Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer**  
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50
- V 304: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015**  
Fitschen, Nordmann € 31,00  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00
- V 305: **Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen**  
Hartmann, Londong € 16,00
- V 306: **Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest**  
Lippold, Wittig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 307: **Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung**  
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50
- V 308: **Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)**  
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 309: **Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO<sub>2</sub>-Pilotstudie Lärmschutzwand**  
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50
- V 310: **Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie**  
Wang, Oeser, Steinauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 311: **Feldversuch mit Lang-Lkw**  
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

#### V 312: **Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen**

Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

#### 2019

- V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**  
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50
- V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**  
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50
- V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**  
Kappich, Westermann, Holst € 15,50
- V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**  
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt € 18,50
- V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**  
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00
- V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**  
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50
- V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**  
Lippold, Vettters, Ressel, Alber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfselemente von Rad-schnellverbindungen**  
Malik, Lange, Andriessse, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00
- V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**  
Hausmann € 18,00
- V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**  
Fitschen, Nordmann € 31,50  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00
- #### 2020
- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wurstthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**  
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckkieß, Schimpf, Schmotz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**  
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**  
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**  
Frenken, Mahmoudi € 16,50

V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**  
Meisel, Balzer-Hebborn, Eilmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**  
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**  
Baier, Leu, Rittershaus  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**  
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**  
Lippold, Zösch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**  
Hänisch, Heidebrunn € 17,00

V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00

V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**  
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00

V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**  
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50

V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**  
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

## 2021

V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**  
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**  
Schneider, Turhan, Pelzer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**  
Fitschen, Nordmann € 31,00

V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**  
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**  
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00

V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**  
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50

V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**  
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00

V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**  
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crijenkovic, Müller, Schady, Elsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**  
Müller, Huth, Liepert € 15,00

V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**  
Schwietering, Löbbbering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**  
Bohle, Busek, Schröder € 18,50

V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**  
Schreck-von Below € 22,00

V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Bartolomaeus, Strigari, Sammet  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**  
Holldorb, Cypra, Pape  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

## 2022

V 352: **Abriebe von Fahrbahnoberflächen**  
Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

V 353: **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**  
Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Webseite 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.