



Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 38 (2023)

Automatisierte Betriebsfunktionen von Straßenbahnfahrzeugen: Bewertung der Potenziale von Technologien zum vernetzten Fahren



Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Nr. 38 (2023)
FE-Nr. 70.0943/2017 (Forschungsprogramm Stadtverkehr)

Automatisierte Betriebsfunktionen von Straßenbahnfahrzeugen: Bewertung der Potenziale von Technologien zum vernetzten Fahren

von

Prof. Kay Mitusch, Dr. Eckhard Szimba
Institut für Volkswirtschaftslehre, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Eva-Maria Knoch, M. Sc. Robin Knebel
Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Dr.-Ing. Kilian Berthold, M. Sc. Jonas Fesser, Carlos Canales
TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Roland Frindik
MARLO Consultants GmbH, Karlsruhe

im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Volkswirtschaftslehre (ECON)
Waldhornstraße 27
76131 Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
Rintheimer Querallee 2
76131 Karlsruhe

TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH (TTK)
Durlacher Allee 73
76131 Karlsruhe

MARLO Consultants GmbH
Daxlander Straße 74
76185 Karlsruhe

ABSCHLUSS DER STUDIE

November 2022

REDAKTION

DZSF

Felix Heizler, Forschungsbereich Sicherheit

BILDNACHWEIS

Verkehrsbetriebe Karlsruhe / Titellinnenseite

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.230006.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.230006.01)

Dresden, August 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.



Das Projekt wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr unter FE-Nr. 70.0943/2017 im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS; www.fops.de) durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
Abstract	8
1 Einleitung – Projektziele und methodisches Vorgehen.....	9
2 Stand der Automatisierung und Vernetzung im Straßenbahnbereich.....	11
2.1 Vorgehen.....	11
2.2 Automatisierung im Schienenverkehr.....	11
2.3 Vernetzung.....	23
2.4 Zusammenfassung und Bewertung des Standes der Technik.....	31
3 Querschnittstechnologien der Automatisierung und der Vernetzung	34
3.1 Grundlegende Anforderungen und Funktionen	34
3.2 Die einzelnen Querschnittstechnologien	38
Sensorik	38
Fahrzeugbezogene intelligente Datenverarbeitung.....	47
Vernetzte intelligente Datenverarbeitung	49
Mensch-Maschine-Interaktion.....	52
Kommunikationstechnologie.....	54
Kommunikationsinfrastruktur	62
4 Funktionalität der Technologien bezogen auf die Automatisierung des Straßenbahnsektors	66
4.1 Zielsetzungen und Potenziale einer Automatisierung	66
4.2 Lösungsansätzen zur Erfüllung einzelner Potenziale.....	68
4.3 Bewertung von Querschnittstechnologien und technologischen Lösungsansätzen.....	77
4.4 Zusammenfassung Technologieauswahl	82
5 Quantitative Abschätzung der bahnbetrieblichen und wirtschaftlichen Potenziale.....	85
5.1 Allgemeine Vorgehensweise	85
5.2 Simulation am Beispiel Karlsruhe.....	86
5.3 Szenariendefinition.....	91
5.4 Ergebnisse der Betriebssimulationen.....	98
5.5 Wirtschaftliche Potenziale.....	101
5.6 Zwischenfazit: Die Potenziale von Vernetzung und Automatisierung.....	113
6 Zukünftige Marktstruktur des Straßenbahnsektors.....	115
6.1 Begriffsklärung: technische und wirtschaftliche Schnittstellen	115
6.2 Fahrerloses Fahren: Verortung der Hauptkomponente für die Fahrzeugfeinsteuerung.....	116
6.3 Branchenstruktur vernetzter und automatisierter Straßenbahnsysteme.....	120
7 Herausforderungen und Lösungswege für die einzelnen Querschnittstechnologien	123
7.1 Vorbemerkungen zu Hemmnissen und Akteuren.....	123
7.2 Vernetzungstechnologien	124
7.3 Fahrzeugsteuerungstechnologien.....	136

8	Rechtlicher Anpassungsbedarf	142
8.1	Notwendigkeit	142
8.2	Aktueller Rechtsrahmen im Straßenbahn- verkehr.....	143
8.3	Rechtliche Rahmenbedingungen und Anforderungen im Verkehrsbereich für einen automatisierten Betrieb	147
8.4	Ansatzpunkte zur Regelung eines automatisierten Straßenbahnbetriebs.....	151
9	Roadmap	158
9.1	Aufbau und Ziel der Roadmap.....	158
9.2	Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren	158
9.3	Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren	161
9.4	Zusammenfassende Roadmap.....	163
10	Fazit	168
	Abbildungsverzeichnis	170
	Tabellenverzeichnis	172
	Glossar	174
	Abkürzungsverzeichnis	176
	Quellenverzeichnis	183
	Anhang	195
	Anhang 1: Tabellen	195
	Anhang 2: Steckbriefe: 18 Praxisbeispiele in Übersichten	210

Zusammenfassung

Die Studie analysiert die Perspektiven von Vernetzung und Automatisierung im Straßenbahnsektor und mündet in eine „Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren“.

Zum Stand der Technik werden die bereits existierenden Ausgangspunkte (CBTC-Systeme im U-Bahnbereich, ATO-Forschung bei der Vollbahn, Fahrerassistenz bei der Straßenbahn) und die aktuellen Forschungsprojekte dargestellt. Sodann werden die relevanten Querschnittstechnologien adressiert: Sensorik, intelligente Datenverarbeitung zur Fahrzeugsteuerung und -überwachung, vernetzte intelligente Datenverarbeitung (digitale Karten, intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen), Kommunikationssysteme und Mensch-Maschine-Interaktion. Daraus ergeben sich Strategien für die Realisierung von Automatisierungs- und Vernetzungsfunktionen im Straßenbahnsektor.

Die möglichen bahnbetrieblichen Vorteile der Vernetzung und Automatisierung werden in Modellsimulationen für einen konkreten Anwendungsfall mit vier verschiedenen Szenarien beispielhaft untersucht. Anhand von Hochrechnungen, Nutzenbewertungen und Kostenschätzungen können sehr gute volkswirtschaftliche und gute betriebswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Verhältnisse nachgewiesen werden.

Die Herausforderungen und Lösungswege für die weitere Entwicklung und Verbreitung dieser Zukunftssysteme werden separat für die einzelnen Querschnittstechnologien und Anwendungen der Vernetzung, für die Teleoperation und für die Automatisierung von Straßenbahnen analysiert. Dabei werden die jeweils relevanten Akteure genannt und Standardisierungsbedarfe festgestellt. Notwendige wirtschaftliche Schnittstellen für das Herausbilden einer tragfähigen und wettbewerblichen, zukünftigen Branchenstruktur werden identifiziert. Der rechtliche Anpassungsbedarf und der institutionelle Reformbedarf werden herausgearbeitet.

Die Analyse mündet in eine „Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren“. Da unterschiedliche Pfade möglich sind und auch gegangen werden, setzt sie sich aus einer „Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren“ – unter Beibehaltung des Fahrzeugführers – und einer „Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren“ zusammen. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für die Akteure des Sektors und für die Politik gegeben.

Abstract

The study analyses the prospects of digitalisation and automation in the tram sector, leading to a “roadmap for connected and automated driving”.

Based on existing starting points (CBTC systems in the metro sector, ATO research in mainline railways, driver assistance in the tram sector) as well as the current research projects, the state of the art in the field are presented. The relevant cross-sectional technologies are addressed: sensor technology, intelligent data processing for vehicle control and monitoring, connected intelligent data processing (digital maps, intelligent traffic control with traffic signals), communication systems, and human-machine interaction. This results in strategies for implementing digitalisation and automation in the tram sector.

Potential benefits of these technologies are assessed. The advantages in tram operation are investigated by model simulations for a concrete use case with four different scenarios as examples. Based on projections, benefit assessments, and cost estimates, promising benefit-cost ratios can be demonstrated, particularly from a societal point of view, but also from a business perspective.

The obstacles, challenges and solutions for the further development and dissemination of these future technologies are analysed separately for the individual cross-sectional technologies and applications of digitalisation, for teleoperation, and for the automation of trams. The relevant stakeholders who should take action are named and the needs for standardisation are elaborated. Necessary economic interfaces for the development of a sustainable, competitive industry structure are identified. The need for legal adaptations as well as for institutional reforms is identified.

The analysis leads to a “roadmap for connected and automated driving”. Since different paths are possible and are being taken, it consists of a “partial roadmap for connected and assisted driving” – where the driver is still present – and a “partial roadmap for automated driving”. In conclusion, recommendations for action are given for the actors in the sector and for politics.

1 Einleitung – Projektziele und methodisches Vorgehen

Welche Perspektiven haben Vernetzung und Automatisierung bei Straßenbahnen? Welche Vorteile bieten sie und welche Kosten? Welche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Entwicklungsschritte sind notwendig, um sie voranzubringen? Diese Fragen werden in dem vorliegenden Bericht adressiert und aktuelle Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Antworten dazu münden in eine „Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren“, die den Akteuren im Straßenbahnsektor Hinweise für ein abgestimmtes Vorgehen eröffnet.

Im Automobilbereich werden vernetzte und automatisierte Fahrfunktionen mit Hochdruck entwickelt und auf der Autobahn erprobt. Einige Funktionen sind serienreif verfügbar. Auch erste autonome Kleinbusse fahren bereits im Linienbetrieb auf der Straße. Im U-Bahn-Bereich fahren schon seit vielen Jahren einige Linien im fahrerlosen Regelbetrieb. Bei Straßenbahnen finden Fahrerassistenz und Vernetzung zunehmend Eingang, und es gibt Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum automatisierten Fahren im Depot und auf der Strecke. Gleichzeitig gibt es Forschung und Modellprojekte zur „V2X-Vernetzung“ des gesamten Verkehrs. Zu nennen sind insbesondere Entwicklungen zur intelligenten Steuerung von Lichtsignalanlagen. Diese soll mit Hilfe von Sensoren und der Prognose des aktuellen Verkehrsgeschehens den Verkehrsfluss beschleunigen und dabei auch den ÖPNV priorisieren.

Für den Straßenbahnverkehr wurden die Entwicklungsperspektiven von Vernetzung und Automatisierung bisher nicht zusammenfassend analysiert. Daher betrachtet die hier vorgestellte Untersuchung systematisch die Einsatzfelder, in denen sich konkrete Vorteile erzielen lassen, etwa für die Pünktlichkeit und Fahrplanstabilität, für Kostensenkungen oder Kapazitätssteigerungen.

Dabei werden zunächst separat die Entwicklungswege zum vernetzten Fahren – unter Beibehaltung des Fahrzeugführers – und die Entwicklungswege zum fahrerlosen Fahren betrachtet. Innovative Akteure des öffentlichen Verkehrs gehen derzeit unterschiedliche Wege. Die Schritte zur Vernetzung bereiten dabei auch einer Automatisierung den Weg. Die Roadmap wird sich daher aus einer „Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren“ und einer „Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren“ zusammensetzen. Dies zeigt Abbildung 1-1 mit den wesentlichen Elementen der beiden Stränge, mit Einbeziehung von Fahrerassistenz und Teleoperation.

Die Studie geht ausführlich auf die Herausforderungen und Lösungswege ein, die sich stellen, damit sich diese neuen Technologien auch tatsächlich entwickeln und verbreiten können. Dabei ist zu vergegenwärtigen, dass die Unternehmen ihre Entwicklungen nicht für jede einzelne Kommune neu, sondern nur für den gesamten deutschen (und internationalen) Markt vornehmen, während umgekehrt die Kommunen sich nicht von einem einzigen Anbieter auf Dauer abhängig machen wollen. Es bedarf einer sinnvollen Branchenstruktur, damit eine Marktentwicklung mit Arbeitsteilung, Spezialisierung und Wettbewerb möglich wird. Hierfür sind die notwendigen Rahmenbedingungen zu setzen. Die Studie skizziert die Grundzüge einer tragfähigen, zukünftigen Branchenstruktur und zeigt die notwendigen Standardisierungserfordernisse auf. Sie nennt den rechtlichen und institutionellen Anpassungsbedarf und den Kooperationsbedarf zwischen den relevanten Akteuren. Dies sind neben den Anwendern – den öffentlichen Verkehrsunternehmen und Kommunalverwaltungen – die Industrie, die Verbände und Normungsgremien und die staatlichen Akteure.

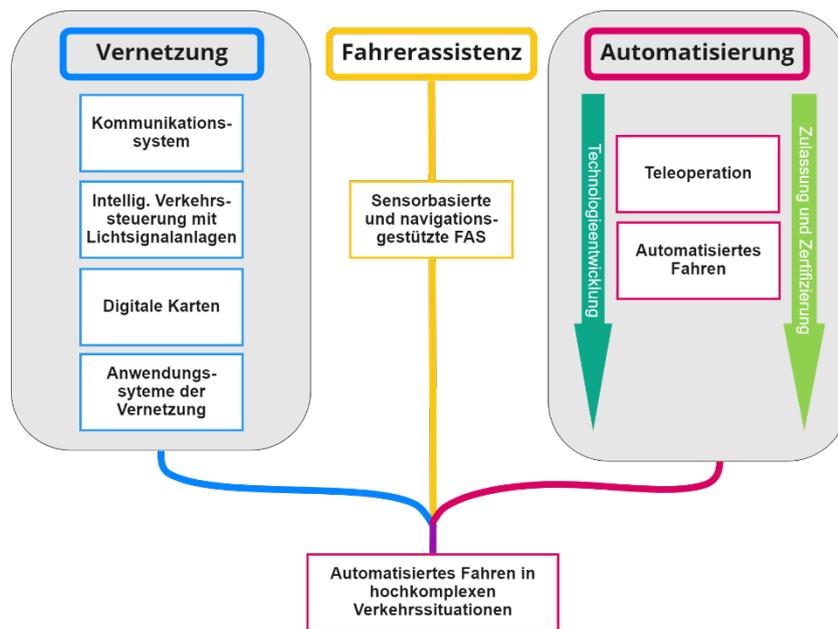


Abbildung 1-1: Wege zur Vernetzung und Automatisierung

Im Kapitel 2 wird der aktuelle Stand der Technik für die bereits existierenden technologischen Ausgangspunkte – CBTC-Systeme im U-Bahnbereich, ATO-Forschung bei der Vollbahn, Fahrerassistenz bei der Straßenbahn – und die aktuellen Forschungsprojekte zur Automatisierung von Straßenbahnen und zur Vernetzung des öffentlichen Verkehrs beschrieben.

Kapitel 3 analysiert die relevanten Querschnittstechnologien: Sensorik, intelligente Datenverarbeitung zur Fahrzeugsteuerung und -überwachung, vernetzte intelligente Datenverarbeitung (digitale Karten, intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen), Kommunikationssysteme und Mensch-Maschine-Interaktion. Im Anschluss beschreibt Kapitel 4 Strategien für die Realisierung von Automatisierungs- und Vernetzungsfunktionen im Straßenbahnsektor.

Kapitel 5 unternimmt eine quantitative Abschätzung der bahnbetrieblichen und wirtschaftlichen Potenziale. Die möglichen bahnbetrieblichen Vorteile werden in Modellsimulationen für einen konkreten Anwendungsfall mit vier verschiedenen Vernetzungs- und Automatisierungs-Szenarien beispielhaft untersucht. Sodann werden anhand von Hochrechnungen, Nutzenbewertungen und Kostenschätzungen volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Verhältnisse für die Szenarien ermittelt.

Anschließend werden die Herausforderungen und Lösungswege für die weitere Entwicklung und Verbreitung dieser Zukunftssysteme beschrieben. In Kapitel 6 wird auf die Bedeutung wichtiger wirtschaftlicher Schnittstellen für die Herausbildung einer tragfähigen und wettbewerbliehen zukünftigen Branchenstruktur hingewiesen. In Kapitel 7 werden die Herausforderungen und Lösungswege separat für die einzelnen Querschnittstechnologien und Anwendungen der Vernetzung, für die Teleoperation und für die Automatisierung von Straßenbahnen betrachtet. Dabei werden die jeweils relevanten Akteure genannt, der Bedarf für Standardisierungen und wirtschaftliche Schnittstellen ermittelt sowie einige institutionelle Vorschläge erarbeitet. Kapitel 8 geht ausführlich auf den rechtlichen Anpassungsbedarf für die Umsetzung insbesondere des automatisierten Fahrens mit Straßenbahnen ein.

Kapitel 9 fasst die Ergebnisse in der Roadmap (mit ihren Teil-Roadmaps) und in Handlungsempfehlungen für die Akteure des Sektors und für die Politik zusammen.

2 Stand der Automatisierung und Vernetzung im Straßenbahnbereich

2.1 Vorgehen

Mit einer umfangreichen Literaturrecherche wurden neben den technischen Grundlagen eines Straßenbahnbetriebs auch aktuelle Studien, Erprobungen, Projekte sowie verfügbare Produkte in den Bereichen Automatisierung und Vernetzung im Schienenverkehr untersucht. Der ermittelte aktuelle Stand der Technik wird in diesem Kapitel strukturiert dargestellt. Die Beschreibung der Automatisierungsmöglichkeiten (Kapitel 2.2) erfolgt dabei getrennt nach Einsatzfällen (unabhängige BOStrab-Bahnen, Vollbahn und straßenabhängige BOStrab-Bahnen), da sich hier erhebliche Unterschiede in betrieblichen Randbedingungen, funktionalen Anforderungen und der technologischen Reife ergeben. Des Weiteren werden in Kapitel 2.3 Grundlagen, Potentiale und Herausforderungen der Vernetzung im Schienenverkehr beschrieben.

Eine Übersicht der konsultierten Literaturquellen, sortiert nach Dokumententyp und inhaltlicher Ausrichtung, ist im Anhang in Tabelle A-1 dargestellt.

Für Projekte und Erprobungen, die im Rahmen der Analyse als besonders relevant und geeignet für eine genauere Betrachtung eingeschätzt wurden, wurden Projekt-Steckbriefe mit den wesentlichen Informationen im Anhang zusammengestellt.

Eine erste Einschätzung des aktuellen Stands der Technik und der möglichen Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Anwendungsfall „Straßenbahn“ findet sich in Kapitel 2.4. Dort werden außerdem offene Forschungsfragen und notwendige Entwicklungsschritte diskutiert.

2.2 Automatisierung im Schienenverkehr

2.2.1 Automatisierungslevel nach GoA und SAE

Im Gegensatz zur Automatisierung des individuellen Straßenverkehrs steht die Automatisierung von Schienenfahrzeugen sowohl in der Gesellschaft als auch in der Forschung und Entwicklung weitaus weniger im Fokus. Aus Sicht einer maximalen Ausschöpfung von betrieblichen, sozialen, ökologischen und technischen Potenzialen stellt der öffentliche Verkehr, der zu großen Teilen auf der Schiene stattfindet, allerdings die vielversprechendere Branche dar. Im direkten Vergleich ist außerdem festzuhalten, dass bereits seit vielen Jahren weltweit vollautomatisierte und sogar fahrerlose Systeme auf der Schiene im Einsatz sind. Bereits 2015 wurden etwa eine Milliarde Fahrgäste allein im europäischen Stadtverkehr durch selbstfahrende U-Bahnen befördert [1]. Demgegenüber befindet sich das automatisierte Fahren der Automobilbranche bisher noch in der Erprobungsphase.

Neben den im Straßenverkehr üblichen sechs Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [2] haben sich im Schienenverkehr fünf Grade (*Grade of Automation*, kurz GoA) für die Automatisierung etabliert. Diese wurden vom Internationalen Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP) formuliert und in der Norm IEC 62267 [3] niedergeschrieben. In der Tabelle 2-1 wird ein Überblick über die Automatisierungsgrade im Schienenverkehr dargestellt [4, S. 26].

TABELLE 2-1: AUTOMATISIERUNGSGRADE IM SCHIENENVERKEHR

Sicherheitsfunktionen im Bahnbetrieb	GoA 0 On-Sight Fahrt auf Sicht	GoA 1 Non-Automated Train Operation (NTO) Nicht automatisiert	GoA 2 Semi-automated Train Operation (STO) Teilautomatisiert	GoA 3 Driverless Train Operation (DTO) Fahrerlos	GoA 4 Unattended Train Operation (UTO) Unbemannt
Sichern der Zuggbewegung	Bediener	Sicherungssystem	Sicherungssystem	Sicherungssystem	Sicherungssystem
Fahren des Fahrzeuges	Bediener	Bediener	Sicherungssystem	Sicherungssystem	Sicherungssystem
Überwachen des Fahrgastwechsels	Bediener	Bediener	Bediener	Sicherungssystem	Sicherungssystem
Überwachen des Fahrwegs	Bediener	Bediener	Bediener	Sicherungssystem	Sicherungssystem
Automatischer Zugbetrieb	Bediener	Bediener	Bediener	Bediener	Sicherungssystem
Störfallerkennung und -management	Bediener	Bediener	Bediener	Bediener	Sicherungssystem

Im Vergleich zu den GoA im Schienenverkehr wird in den SAE-Leveln des Straßenverkehrs die Fahraufgabe in Längs- und Quersteuerung sowie Umfeldüberwachung unterteilt. Außerdem spielen die Rückfallebene und der Betriebsbereich eine entscheidende Rolle. Im teilautomatisierten Modus (SAE-Level 2) werden Längs- und Querführung vom Fahrzeug übernommen, der menschliche Fahrer muss jedoch dauerhaft aufmerksam das Verkehrsgeschehen und die Automatisierung überwachen. Somit dient er als Rückfallebene. In der nächsten Stufe, der bedingten Automatisierung (SAE-Level 3), ist keine kontinuierliche Überwachung durch den Fahrer gefordert. Das System kann jedoch nur in bestimmten Betriebsbereichen und unter bestimmten Bedingungen (was in der sogenannten ODD – Operational Design Domain festgehalten ist) die Fahraufgabe übernehmen. In SAE-Level 4 fällt der Fahrer als Rückfallebene weg und im vollautomatisierten Modus (SAE-Level 5) ist eine uneingeschränkte Automatisierung möglich.

2.2.2 Automatisierung von U-Bahnen durch CBTC

2.2.2.1 Betriebliche und rechtliche Situation in Deutschland

In Deutschland wurde erstmals im Zuge des Projekts RUBIN (Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg) (siehe Steckbrief 1 im Anhang) die Integration fahrerloser U-Bahnen in bestehende Streckennetze vorangetrieben. Im von Siemens Mobility geleiteten Vorhaben wurden 2008 bzw. 2010 die Linien U3 und U2 in Nürnberg auf den automatisierten und fahrerlosen Betrieb umgestellt. Infolge dieser Automatisierung werden Taktzeiten von etwa 100 Sekunden erreicht, was einer Halbierung des Taktes gegenüber dem manuellen Betrieb darstellt [5]. Neben Nürnberg planen auch Berlin und Hamburg in den nächsten Jahren die Einführung automatisierter bzw. fahrerloser U-Bahnlinien [6, 7].

Rechtlich schreibt in Deutschland die Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung, kurz BOStrab, für den Betrieb von U-Bahnen und Straßenbahnen grundlegende Sicherheitsanforderungen vor.

Die Möglichkeit des Verzichts auf einen Fahrzeugführer wird in § 53 Abs. 2 nur für unabhängige Bahnen geregelt. Ergänzend werden in sieben Punkten innerhalb der BOStrab für diesen Fall Anforderungen an den „Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer“ definiert [8]:

- § 16 (6): Verhindern des unbefugten Betretens, Befahrens oder Benutzens des Bahnkörpers
- § 23 (3): Vorhandensein nachrichtentechnischer Anlagen zur Ermöglichung einer Sprechverbindung zwischen Fahrgästen und Betriebsstelle
- § 31 (4): Vorhandensein von Einrichtungen zum Schutz von Personen an Haltestellen
- § 36 (11): Unmittelbares, selbstständiges Abbremsen im Fall einer Entgleisung
- § 38 (1): Überwachung der Ausführung der Bremsbefehle
- § 43 (5): Vorhandensein von Einrichtungen zur Sicherstellung von geschlossenen Türen beim Anfahren
- § 46 (6): Vorhandensein einer Sprechverbindung zur Betriebsstelle
- § 56 (3): Vorhandensein von Vorkehrungen zur unmittelbaren Rettung der Fahrgäste aus liege-gebliebenen Zügen

Gerade die Vorgabe der Unterbindung unbefugten Eindringens in den Bahnkörper ist ohne Weiteres nur bei unabhängigen Bahnkörpern (U-Bahnen) möglich. Straßengebundene und besondere Bahnkörper (Straßenbahnen) sind per Definition in Fahrbahnen oder Gehwege eingebettet oder liegen zumindest im Verkehrsraum öffentlicher Straßen. Somit unterscheiden sich die grundlegenden Rahmenbedingungen so sehr, dass eine Übertragbarkeit von Technologien und Systemen nicht ohne weiteres möglich ist (siehe Kapitel 3.1). Zur Einführung fahrerloser Systeme im Straßenbahnbereich wird daher in Zukunft für eine breitere Anwendung, die über Ausnahmen im Einzelfall hinausgeht (§ 6 BOStrab) eine Anpassung des Rechtsrahmens erforderlich sein.

2.2.2.2 Globale Entwicklung und CBTC

Die weltweite Verbreitung automatisierter U-Bahnsysteme sowie die steigende Anzahl neuer Projekte geht aus dem statistischen Bericht der UITP hervor. Ende 2018 waren dementsprechend weltweit 64 voll-automatisierte U-Bahnlinien in 42 Städten in Betrieb. Kombiniert weisen diese Linien eine Betriebsstrecke von knapp über 1.000 km auf. Zu den Ländern mit den meisten automatisierten Streckenkilometern zählen Südkorea (ca. 160 km), Frankreich (ca. 130 km), Singapur (ca. 125 km), Malaysia (ca. 100 km) und die Vereinten Arabischen Emirate (ca. 80 km). Deutschland befindet sich mit etwa 20 km auf dem 13. Platz. Bis ins Jahr 2030 wird von der UITP eine Vervierfachung der weltweit automatisierten Streckenkilometer gegenüber 2018 prognostiziert [9, S. 1-5].

Zur Realisierung automatisierter bzw. fahrerloser Betriebsfunktionen wurden im letzten Jahrzehnt mit über 85 % hauptsächlich sogenannte CBTC-Systeme (*Communication Based Train Control*) eingesetzt [9, S. 3]. Unter CBTC werden hierbei moderne Signalisierungssysteme zusammengefasst, die basierend auf einer kontinuierlichen und bidirektionalen Funkverbindung den Austausch von Echtzeitinformationen zwischen Fahrzeugen und streckenseitiger Infrastruktur ermöglichen [10, S. 1]. Dabei handelt es sich nicht um standardisierte, austauschbare oder interoperable Systemlösungen, sondern vielmehr um firmenindividuelle Produkte unterschiedlicher Hersteller wie Siemens, Thales oder Alstom. Die Komponenten, Funktionen und Systemarchitekturen von CBTC-Infrastrukturen werden in den folgenden Absätzen näher erläutert.

2.2.2.3 Technische Grundlagen von CBTC

Automatischen Zugbeeinflussungssystemen, die auch dem Begriff ATC (*Automatic Train Control*) zugeordnet werden, liegen drei Subsysteme zugrunde:

- ATP - Automatic Train Protection (automatisierte Zugsicherung): Zuständig für die Sicherstellung des signaltechnisch sicheren Schutzes vor Kollisionen, Entgleisungen, Geschwindigkeitsüberschreitungen und anderen Gefährdungen durch Ortung von Fahrzeugen, Sicherung der Fahrwege und Abstandsregelung.

- ATO - Automatic Train Operation (automatisierter Zugbetrieb):
Ausführung einzelner oder aller Funktionen, die im manuellen Betrieb vom Fahrzeugführer bewerkstelligt werden. Hierzu zählen beispielsweise Geschwindigkeitsregulation, Zielbremsung und Türsteuerung.
- ATS - Automatic Train Supervision (automatisierte Zugüberwachung):
Zuständig für die Überwachung der Fahrzeuge, Anpassung und Regelung des Betriebs und Ablaufplanung im Störfall.

Je nach Automatisierungsgrad unterscheidet sich der Umfang eines ATC. Zwingend erforderlich ist die ATP-Komponente. ATO und ATS können als zusätzliche Funktionsblöcke ergänzt und zur Ausschöpfung weiterer Automatisierungspotenziale genutzt werden [11, S. 2]. Die automatisierte Zugsicherung (ATP) ist beispielsweise auch bei Straßenbahnen, die normalerweise lediglich auf Sicht gefahren werden, erforderlich, sobald die zulässige Höchstgeschwindigkeit über 70 km/h liegt oder ein Tunnel befahren wird.

Grundsätzlich bestehen automatische Zugbeeinflussungssysteme aus fahrzeug- und streckenseitigen Komponenten. Zur Veranschaulichung des Gesamtsystems sind diese in Abbildung 2-1 dargestellt. Bei einer funkbasierten Datenübertragung zwischen fahrzeug- und streckenseitigen Teilsystemen wird entsprechend der zuvor genannten Definition der Oberbegriff CBTC verwendet. Als Standard zur drahtlosen Kommunikation haben sich weitgehend WLAN-basierte Systeme (*Wireless Local Area Network*) durchgesetzt [4, S. 15]. Neben WLAN sind auch andere Funkstandards wie Mobilfunk der 4. (LTE) oder zukünftig 5. Generation (5G) denkbar. Hierbei ist jedoch die Verfügbarkeit und Signalstärke im Tunnelbereich zu berücksichtigen. Des Weiteren ist zu beachten, dass aufgrund des Austauschs sicherheitsrelevanter Daten Mechanismen zum Schutz vor Manipulation, Auslastung, Verfälschung usw. implementiert werden müssen (vgl. 12).

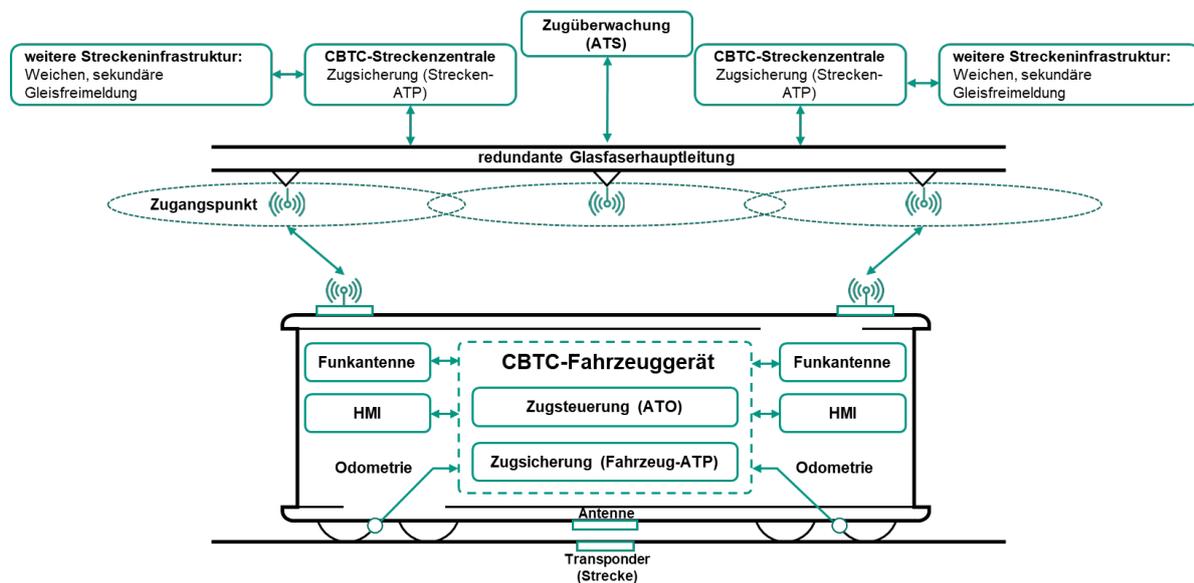


Abbildung 2-1: Architektur von CBTC-Systemen [4, S. 10]

Die Fahrzeugausrüstung setzt sich aus fahrzeugseitigem ATP und dem ATO zusammen. Hierzu gehören der Fahrzeugrechner, ein Human Machine Interface (HMI) zur Führerstandssignalisierung, Odometrie sowie Sende- und Empfangseinrichtungen. Vom Fahrzeugrechner werden unterschiedliche Funktionen des ATP (Geschwindigkeitsüberwachung und Überwachung der streckenseitig übermittelten Fahrerlaubnis) und ATO (Fahr- und Bremssteuerung) ausgeführt. Des Weiteren sind relevante Informationen zur befahrenen Strecke, wie z. B. die Positionen von Haltepunkten und Weichen, Gradienten und Streckenge-

schwindigkeiten, im sogenannten Streckenatlas integriert. Mithilfe der Odometrie wird eine Redundanz hinsichtlich der Weg- und Geschwindigkeitsmessung geschaffen, die in manchen Produkten zusätzlich durch radarbasierte Messsysteme ergänzt wird [12, S. 7]. Die kontinuierliche, bidirektionale Datenübertragung über Sende- und Empfangseinrichtungen dient dem dauerhaften Empfang von Führungsgrößen von der Streckeneinrichtung und der Weitergabe von Positionsmeldungen [10, S. 15] [4, S. 11 f.].

Da es sich bei CBTC-Systemen nicht um standardisierte Systemarchitekturen handelt, sind unterschiedliche Varianten der streckenseitigen Infrastruktur denkbar. Zu den wesentlichen Bestandteilen zählen allerdings Zugangspunkte zur Datenübertragung, CBTC-Streckenzentralen (Strecken-ATP) und das ATS-Subsystem. Die entlang der Strecke gleichmäßig verteilten Zugangspunkte ermöglichen die WLAN-basierte Kommunikation und unterteilen die Strecke in eine Vielzahl von sich teilweise überlappenden Funkzellen. Die kabelgebundene Verbindung von Zugangspunkten und CBTC-Streckenzentralen wird beispielsweise über redundante Glasfaserhauptleitungen realisiert. Zusammen mit Transpondern, die als passive Ortungsreferenzpunkte eingesetzt werden, bilden die CBTC-Streckenzentralen das streckenseitige ATP-Subsystem. Unter Berücksichtigung aktueller Zugpositionen, Gefahrenpunkte und Restriktionen wird in dieser Einheit die fahrzeugindividuelle Fahrerlaubnis kalkuliert und bereitgestellt. Weitere Elemente der Streckeninfrastruktur sind Weichen und Einrichtungen zur sekundären Gleisfreimeldung, beispielsweise Achszähler, die bei Störungen des automatischen Systems als Rückfallebene dienen. Das Zugleitsystem ATS ist ebenfalls mit der Hauptleitung verbunden und daher imstande, Streckeneinrichtungen, Fahrzeuggeräte und das Kommunikationsnetzwerk zu überwachen. Außerdem haben Disponenten die Möglichkeit durch gezielte Eingriffe in die Verkehrsabwicklung eine Optimierung der Verkehrsqualität herbeizuführen [10, S. 15] [4, S. 12 f.].

Konventionelle Signalsysteme erlauben das Fahren im festen Raumabstand. Mit CBTC-Systemen ist es möglich, Fahrzeuge im wandernden Raumabstand zu betreiben. Grundlage ist die kontinuierliche und bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrzeug- und Streckeneinrichtungen. Dadurch ist die genaue Fahrzeugposition zu jedem Zeitpunkt bekannt. Die Geschwindigkeit aufeinanderfolgender Bahnen kann unter Berücksichtigung des individuellen Bremsweges und des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug geregelt werden. Der sich ergebende Raumabstand zwischen den Fahrzeugen ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Wichtig ist beispielsweise der vorgegebene Sicherheitsabstand, der nach Bremsung des Folgezuges zur Position des führenden Zuges besteht. Theoretisch ist es möglich, den Bremsweg des vorderen Zuges ebenfalls zu berücksichtigen, sodass eine weitere Reduktion des absoluten Raumabstandes erreicht werden kann. Dies erfordert eine höhere Zuverlässigkeit und Präzision im gesamten CBTC-System. Es ist jedoch fraglich, bis zu welchem Grad eine Verringerung der Zugfolgezeiten auch aus betrieblicher Sicht notwendig ist. Moderne Systeme erreichen mithilfe von CBTC einen Takt von weniger als 60 Sekunden [13, S. 2].

Zur Sicherung des Gefahrenraums an Bahnsteigen existieren unterschiedliche Konzepte. Die im internationalen Vergleich am häufigsten umgesetzte Lösung (77 % aller 2018 automatisierten U-Bahnlinien) ist die Ergänzung der Haltestellen um ebenfalls automatisierte Bahnsteigtüren [9, S. 4]. Hierzu ist neben einer standardisierten Türkonfiguration aller eingesetzten Fahrzeuge ein hochgenaues Halten der Fahrzeuge im Bahnsteigbereich erforderlich, welches allein durch automatisierte Bremsvorgänge gewährleistet werden kann. Bahnsteigtüren verhindern das unbefugte Betreten des Bahnkörpers und stellen darüber hinaus den problemfreien Fahrgastwechsel sicher. Gleichzeitig sind damit erhöhte bauliche und finanzielle Aufwendungen verbunden. Ein anderes Konzept der Bahnsteigsicherung ist auf den Nürnberger U-Bahnlinien U2 und U3 zu finden. Der Gefahrenbereich am Bahnsteig wird mithilfe von Radarsensoren und Kameras überwacht, die das Eindringen detektieren und im Gefahrenfall eine unverzügliche Bremsung des ankommenden Fahrzeuges bewirken. Zusätzlich werden Ultraschallsensoren im Bereich des Kupplungspunktes zweier Fahrzeuge eingesetzt, um beim Halt den Zwischenraum zu observieren [14, S. 24].

CBTC-Systeme mit den Funktionen Zugsicherung, Zugsteuerung und Betriebsüberwachung sind für den Betrieb unabhängiger Bahnen konzipiert. Damit fehlen diesen Systemen noch die Funktionen, die für die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern erforderlich sind. Generell könnten CBTC-Systeme in zwei

Arten auf Straßenbahnstrecken zur Anwendung kommen: Entweder sie werden als Assistenzsysteme eingesetzt, die den fahrerbedienten Betrieb unterstützen, oder sie werden mit intelligenten Systemen zur Teilnahme am Straßenverkehr ergänzt, so dass auch eine autonome Teilnahme am Straßenverkehr möglich wird.

2.2.3 Automatisierung im Vollbahnbereich

Der sichere und gesteuerte Zugbetrieb nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) wird auf bestehenden deutschen Schienennetzen hauptsächlich mit punktförmiger oder linienförmiger Zugbeeinflussung realisiert. Beide Systeme ermöglichen das Absichern und Fahren im festen Raumabstand, wobei sie sich je nach Ausführung nur in der Häufigkeit bzw. der Kontinuität der Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur unterscheiden. Außerdem ist eine punktförmige Zugbeeinflussung nur bis zu einer Geschwindigkeit von 160 km/h zulässig. Da es sich hierbei um proprietäre und herstellerspezifische Systemlösungen bzw. Produkte handelt, sind lediglich Fahrzeuge mit Mehrgesystemausrüstung fähig, verschiedene Eisenbahnverkehrssektoren zu befahren. Zur Schaffung einer harmonisierten europäischen Zugbeeinflussung wurde im Jahr 2005 die Etablierung des sogenannten European Train Control System (ETCS) beschlossen [16]. Ziel war es dabei, die Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur zu harmonisieren, um interoperable Teilsysteme (Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung) zu erhalten. Im Allgemeinen werden drei Stufen (ETCS-Level) definiert, die sich in ihrer Funktionalität unterscheiden [17, 18]:

- ETCS-Level 1:
 - punktförmiges Zugsicherungssystem (Nutzung von Eurobalisen)
 - Überlagerung konventioneller Signalanlagen
 - Abschnittsweise Nutzung von GSM-R (erweiterter Mobilfunkstandard für Eisenbahnanwendungen) möglich
- ETCS-Level 2:
 - kontinuierliche Kommunikation zwischen Fahrzeug und Strecke (über Euroradio – standardisiertes Übertragungsverfahren basierend auf GSM-R)
 - Führerstandssignalisierung
 - Strecke ist weiterhin in feste Blockabschnitte untergliedert
 - weiterhin Verwendung von Eurobalisen
- ETCS-Level 3:
 - ortsfeste Streckeneinrichtung zur Erkennung der Gleisbelegung entfällt
 - Positionserfassung fahrzeugseitig
 - Positionsmeldung rein über ETCS-Fahrzeugeinrichtung (GSM-R, Euroradio)
 - Fahrzeugseitige Zugintegritätsprüfung erforderlich
 - Fahrt im relativen Bremswegabstand wird ermöglicht

In Deutschland sind bisher 340 Streckenkilometer mit ETCS-Technik ausgerüstet, weitere 446 Kilometer sollen bis 2025 folgen [19].

Hinsichtlich der Automatisierung im Vollbahnbereich ist jedoch nicht ETCS alleine, sondern in Kombination mit einer automatisierten Zugführung (ATO, siehe Kapitel 2.2.2) interessant. Dieser interoperable Betriebsstandard wird als „ATO over ETCS“ bezeichnet und ist mit der Automatisierungsstufe GoA 2 zu vergleichen [20, S. 107]. ETCS wird als zugrundeliegendes Zugbeeinflussungssystem genutzt, welches die sichere Einhaltung von Zugabständen und die Überwachung der zulässigen Geschwindigkeiten gewährleistet.

Grundsätzlich besteht das ATO-System aus zwei Komponenten [21, S. 9]:

- fahrzeugseitige ATO-Komponente:
 - berechnet das optimale Fahrprofil basierend auf Infrastruktur- und Streckendaten sowie der Fahrplaninformationen
 - regelt Antriebs- und Bremsvorgänge durch Steuerung des Traktionssystems und der Bremsen
- streckenseitige ATO-Komponente:
 - sammelt statische und dynamische Strecken- und Fahrplandaten von bestehenden Verkehrsmanagementsystemen
 - überträgt relevante Daten an ATO-Fahrzeuggeräte

Im EU-finanzierten Forschungsprogramm „Shift2Rail“ werden derzeit unter anderem Standardisierungsaktivitäten gebündelt, die auf europäischer Ebene eine einheitliche Definition der Spezifikationen von ATO over ETCS und der notwendigen Schnittstellen vorantreiben.

Die erste Realisierung eines ATO over ETCS Betriebs in Deutschland wurde im Zuge des Projekts „Digitale S-Bahn Hamburg“ (Steckbrief 5) verwirklicht. Im Projekt wurden bis zu vier S-Bahnen der Linie 21 auf 23 Kilometer Strecke hochautomatisiert betrieben. Dazu wurden die Fahrzeuge mit Balisenantennen, Radaren sowie ETCS- und ATO-Computern ausgestattet. Infrastrukturseitig wurden zusätzliche Eurobalisen integriert und Erweiterungen am Stellwerk und der Signaltechnik vorgenommen. Ziel ist es, die automatisierte Betriebsform im Anschluss an das Pilotprojekt im gesamten Hamburger S-Bahnnetz auszurollen [22].

Um in Zukunft zusätzliche Automatisierungsfunktionen umzusetzen, wurden im Hamburg des Weiteren Methoden zur hochgenauen Lokalisierung von Zügen erprobt. In Zusammenarbeit mit Industriepartnern untersuchte die Deutsche Bahn AG im Projekt „Sensors4Rail“ (Steckbrief 6) die auf Umgebungswahrnehmung basierende Ortung von Schienenfahrzeugen. Hierzu wurde ein Testfahrzeug mit Radar-, LiDAR-, Kamera- und GNSS-Sensoren ausgestattet. Die Informationen der einzelnen Umfeldsensoren werden dabei fusioniert und dienen der Erkennung des Schienenverlaufs und besonderer Objekte, sogenannter Landmarken, im Streckenbereich. Die Positionsdaten von Landmarken wie Oberleitungsmasten, Bahnsteigkanten, Brücken usw. sind gleichzeitig auf einer digitalen High Definition (HD)-Karte hinterlegt. Dadurch ist ein Abgleich zwischen unterschiedlichen Ortungsverfahren und somit eine präzise Lokalisierung des Zuges möglich. Mithilfe der Verbesserung der Positionsgenauigkeit und einer kontinuierlichen Ortung lassen sich zukünftig Züge optimiert und in kürzeren Abständen zueinander steuern. Neben der damit einhergehenden Kapazitätssteigerung können außerdem Hindernisse im Gleisumfeld detektiert werden. Diese Informationen werden unmittelbar an die Leitstelle weitergeleitet, sodass frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden können [23].

2.2.4 Fahrerassistenzsysteme und Automatisierungstechnologien für Straßenbahnen

U-Bahnen verkehren auf unabhängigen Bahnkörpern, auf denen im Allgemeinen ein Betretungsverbot auf dem kompletten Streckennetz gilt. Sie können außerdem auch durch physische Absicherung gegen unbefugtes Betreten geschützt werden. Straßenbahnen stehen dagegen in direktem Kontakt mit anderen, auch nicht schienengebundenen Verkehrsteilnehmern. Die gemeinsame Nutzung des städtischen Verkehrsraumes erfordert dabei die multimodale Interaktion zwischen allen Beteiligten. Im Gegensatz zur vergleichsweise trivialen Fahrbahnsicherung in CBTC-Systemen ist bei Straßenbahnen die präzise Wahrnehmung der hochkomplexen Umgebung notwendig. Infolge der Einbettung der Gleise in Fahrbahnen oder Gehwege ist dauerhaft mit kreuzenden oder sich parallel bewegendenden Fußgängern, Radfahrern oder

Straßenfahrzeugen zu rechnen. Darüber hinaus sind Bahnsteige gleisseitig nicht abgesichert. Diese hochkomplexen Verkehrssituationen sind derzeit lediglich durch erfahrene Fahrzeugführer zu bewerkstelligen (Fahren auf Sicht), die auf betriebliche Erfahrung und menschliche Intuition zurückgreifen können.

Um dennoch eine Automatisierung im oberirdischen städtischen Bereich durch bereits verfügbare CBTC-Systeme zu ermöglichen, ist es ebenfalls denkbar, die Komplexität des Verkehrsraums gezielt zu reduzieren. Dies könnte in der Theorie beispielsweise durch die Absicherung von Haltestellen, die Absonderung von Fahrbereichen oder die Umstellung auf besondere und unabhängige Bahnkörper umgesetzt werden. Demgegenüber steht jedoch das in den meisten Kommunen vorherrschende Zielbild einer barrierefreien, grünen und offenen Stadt. Die Integration weiterer physischer Restriktionen und die damit einhergehende Abkapselung einzelner Verkehrsarten nur zum Zweck einer Automatisierung erscheint äußerst fragwürdig. Zudem ist ein solches Konzept mit erheblichen infrastrukturellen Kosten verbunden. Aus diesen Gründen wird von einer Berücksichtigung unabhängiger Bahnkörper als Ersatz für bestehende Straßenbahnsysteme im Zuge dieses Berichts abgesehen.

Funktionen, die zur Automatisierung von Straßenbahnen umgesetzt werden müssen, ähneln entsprechend der zu handhabenden Szenarien vielmehr denen des automatisierten Straßenverkehrs als denen des bereits automatisierten Schienennahverkehrs. Dazu gehören vor allem die Umfeldwahrnehmung und (Eigen-)Lokalisierung. In den folgenden Abschnitten werden aktuelle Projekte mit Bezug zur Automatisierung von Straßenbahnen analysiert. Darüber hinaus werden auch bereits im Einsatz befindliche Fahrerassistenzsysteme betrachtet, die wie auch im Straßenverkehr als erforderliche Vorstufe höherer Automatisierungsstufen dienen.

2.2.4.1 Fahrerassistenzsysteme als Wegbereiter

Um die Übertragbarkeit von Fahrerassistenzsystemen (FAS) aus der Automobilbranche für den Einsatz in Straßenbahnen zu analysieren, wurde 2017 die „Studie zu Straßenbahn-Fahrerassistenzsystemen“ durchgeführt [24]. Dabei wurden Verkehrsunternehmen zu ihrer Einschätzung unterschiedlicher Systeme in Bezug auf verschiedene Kriterien befragt. Als subjektive Bewertungsmerkmale wurden beispielsweise die erwartete Nützlichkeit und Bedarfshäufigkeit, die gewünschte Eingriffstiefe, der tolerierbare Aufrüstaufwand und die Zahlungsbereitschaft verwendet. Das Ranking der beurteilten Fahrerassistenzsysteme ist Abbildung 2-2 zu entnehmen, wobei die horizontale Achse entsprechend einem Schulnotensystem zu interpretieren ist (1 – sehr gut, 5 – mangelhaft). Grundsätzlich ist anzumerken, dass laut der Studie die Zahlungsbereitschaft von Verkehrsunternehmen lediglich im Bereich bis 1000 € pro Fahrzeug liegt [24, S. 41]. Die in der Umfrage bewerteten FAS sind in der nachfolgenden Tabelle 2-2 zusammengestellt:

TABELLE 2-2: FAHRERASSISTENZSYSTEME AUS DEM AUTOMOBILBEREICH

Assistenzsystem	Beschreibung der Funktion
Navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe	Vorgabe einer energieeffizienten Fahrweise basierend auf Streckeninformationen
Fahrer-Müdigkeitswarner	Sensorbasierte Erkennung von Fahrermüdigkeit
Emergency Brake Assist	Einleitung einer Notbremsung mit maximaler Verzögerung, wenn Kollision nicht mehr vermeidbar ist
Soft Stop	Komfortables Abbremsen
Toter-Winkel-Assistent	Erkennen von und warnen vor Hindernissen im toten Winkel
Frontkollisionsschutzsystem	Erkennen von und warnen vor Hindernissen im Fahrbereich
Navigationsgestützte Kurvenassistenz	Warnung vor überhöhter Geschwindigkeit vor Einfahren in eine Kurve

Assistenzsystem	Beschreibung der Funktion
Secondary Collision Mitigation	Automatische Notbremsung bei Kollision
Head-Up Display	Projektion relevanter Informationen im Sichtfeld des Fahrers
Roll Over Mitigation	Vermeidung von Kippen durch automatische Reduktion der Antriebskraft bei kritischer Kurvenfahrt
Adaptive Frontlight System	Anpassung der Lichtverteilung an aktuelle Umgebungsbedingungen
Adaptive Cruise Control	Automatische Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an Verkehrssituation
Kreuzungsassistent	u.a. automatisches Erkennen von Stopp-Schildern, Ampelphasen und Querverkehr
Electronic Brake Prefill	Vorausschauendes Anlegen eines kleinen Bremsdrucks, wenn potenzielle Gefahrensituationen erkannt werden
Brake Disc Wiping	Trocknen der Bremsbelege durch periodisches Aufbauen eines geringen Bremsdrucks bei Regen
Nachtsichtsystem	Anzeige von Infrarotkameradaten zur frühzeitigen Erkennung von Hindernissen bei Nacht
Automatic Warning Brake	Haptische Warnung des Fahrers durch kurzes Bremsen bei sensorisch erfasster Gefahrensituation

Neben den sicherheitssteigernden Fahrerassistenzsystemen wie Müdigkeitswarner, Emergency Brake Assist und Toter-Winkel-Assistent zählen auch die komfort- und effizienzsteigernde navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe und der Soft Stop zu den fünf am besten bewerteten Plätzen (siehe Abbildung 2-2). Auf die navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe, die in ähnlicher Form im Projekt VERONIKA (Steckbrief 12) in Kassel und mithilfe des Systems COSEL (Steckbrief 14) in Dresden umgesetzt wurde, wird in Kapitel 2.3.3 näher eingegangen.

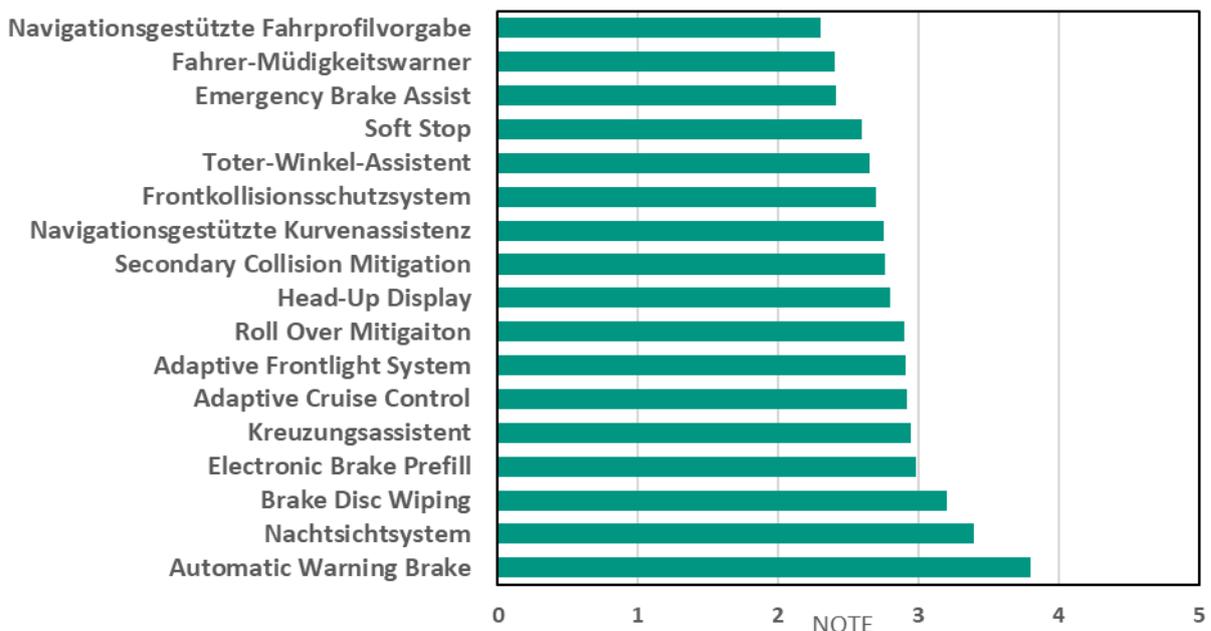


Abbildung 2-2: Ranking Fahrerassistenzsysteme durch Verkehrsunternehmen [24, S. 44]

Das Frontkollisionsschutzsystem, welches unterschiedliche Eingriffstiefen erlaubt (Warnung bis automatische Bremsung), wird bereits von verschiedenen Herstellern angeboten und betrieben. Dazu gehören der *Siemens Tram Assistant*, das *Tram Forward Collision Warning System (TFCW)*, das *Obstacle Detection Assistance System (ODAS)* und der *Cognitive Tram Pilot*. Alle Systeme haben gemeinsam, dass sie die Funktionen „Kollisionswarnung“ und „Erzeugung von Bremsbefehlen“ kombinieren. Unterschiede ergeben sich in der Auswahl der integrierten Umgebungssensoren (multimodales Konzept bestehend aus Radar- und Kamerasensoren, Stereokameras) [25, 26, 27, 28, 29]. Neben Radar und Kamera können ebenfalls laserbasierte LiDAR-Sensoren eingesetzt werden, die allerdings mit einem erheblichen finanziellen Mehraufwand verbunden sind [29, S. 725]. Auf die Kosten der einzelnen Sensortechnologien wird in Kapitel 3.2.2.1 genauer eingegangen. Basierend auf den erfassten Sensordaten werden folgende Aufgaben algorithmisch in der Recheneinheit der Fahrerassistenzsysteme umgesetzt, deren Grundfunktionen in Kapitel 3.1.2 näher beschrieben werden:

- Identifikation der Spur (Schienen)
- Objektdetektion, -tracking und ggf. auch Klassifizierung
- Distanzmessung
- Bewegungsschätzung von detektierten Objekten
- Trajektorienplanung
- Bewertung des Kollisionsrisikos

Bei Fahrerassistenzsystemen wird zwischen zwei Eingriffsstufen differenziert. Die Erste beinhaltet die Erzeugung eines meist auditiven Warnsignals bei Identifizierung einer potenziellen Kollisionsgefahr. Bleibt die Reaktion des Fahrzeugführers aus, wird als zweite Stufe ein aktiver Bremsbefehl generiert.

Die genannten Systeme werden in unterschiedlichen Städten Europas in Testprojekten oder im Betrieb verwendet. Das weltweit erste Fahrerassistenzsystem in Straßenbahnen mit aktiver Eingriffsmöglichkeit wurde in Abstimmung mit der Technischen Aufsichtsbehörde am 25. Juni 2015 in Frankfurt zugelassen. Hierbei handelte es sich um das von Bombardier entwickelte ODAS, welches im darauffolgenden Jahr in der gesamten Frankfurter Flotte (73 weitere Flexity Classic Straßenbahnen der Baureihe S) nachgerüstet wurde [31]. Die 2020 vorgestellte neue Flexity-Niederflurstraßenbahn in Duisburg wird ebenfalls mit diesem System geliefert [32]. Laut UITP gibt es darüber hinaus weitere Einsätze in Blackpool, Zürich und Brüssel [30]. Außerdem wird das neue COMPAS aktuell in Wien und in Blackpool erprobt [33]. Das Fahrerassistenzsystem von Siemens wird ebenfalls in mehreren europäischen Städten betrieben. Ulm, Duisburg, Düsseldorf und Den Haag wurden bereits mit neuen Straßenbahnen des Typs Avenio beliefert, die allesamt mit dem Siemens Tram Assistant ausgestattet sind [34, 35, 36]. Cognitive Pilot implementierte in Kooperation mit dem russischen Straßenbahnhersteller PC Transport Systems eine Bahn des Typs Vityaz-M mit dem Fahrerassistenzsystem Cognitive Tram Pilot und testete diese 2019 in Moskau [27]. Hardware- und Softwarekomponenten des Bosch TFCW-Systems werden teilweise als eigenes Produkt in Straßenbahnen integriert, sind gleichzeitig aber auch Bestandteil anderer Fahrerassistenzsysteme wie beispielsweise des Siemens Tram Assistant.

2.2.4.2 Erprobung automatisierter Betriebsfunktionen bei Straßenbahnen

Siemens Autonomous Tram (Steckbrief 16)

Während die bisher vorgestellten Produkte als Fahrerassistenzsysteme lediglich eine unterstützende Rolle einnehmen, behandelt dieses Kapitel außerdem Projekte, die sich mit der tatsächlichen Abgabe von Fahrfunktionen vom Fahrer an das Fahrzeug beschäftigen. Das wohl bekannteste Entwicklungsprojekt in diesem Zusammenhang wurde 2018 auf der InnoTrans vorgestellt. Siemens Mobility präsentierte zusammen mit den Verkehrsbetrieben Potsdam (ViP) den weltweit ersten Versuchsträger für Straßenbahnautomatisierung, die Siemens Autonomous Tram. Dabei handelte es sich um eine um Rechen- und Steuer-

einheiten sowie umfangreiche Sensorik erweiterte Niederflur-Straßenbahn der Baureihe Combino [37, S. 1]. Diese wurde darüber hinaus in Potsdam auf einer 13 km langen Strecke eingesetzt und diverse Automatisierungsfunktionen wurden getestet. Ziel dieses Projektes war die Untersuchung der Anwendbarkeit von Technologien des automatisierten Fahrens aus dem Automobilbereich für Schienenfahrzeuge. Des Weiteren sollten technische Schwierigkeiten abgeleitet und die Fähigkeiten sowie Potenziale zukünftiger automatisierter Straßenbahnen aufgezeigt werden. Zu den automatisierten Funktionen zählten unter anderem [38, 39]:

- Automatische Beschleunigung und präzises Anhalten
- Geschwindigkeitsüberwachung und Abstandhalten
- Positionsbestimmung des Fahrzeugs auf einer Karte
- Objektdetektion und Objekthandhabung
- Signaldetektion und Signalinterpretation
- Ein- und Ausfahrt an Haltestellen
- Berücksichtigung kreuzender Fußgänger und Pkw
- Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern über akustische Warnsignale

Zu den nicht umgesetzten Funktionen gehörte beispielsweise der Betrieb mit Passagieren, die Berücksichtigung von Fahrplänen und das Öffnen und Schließen von Türen. Es war dauerhaft ein Sicherheitsfahrer an Bord der neben der Überwachung des Systems für die manuelle Übernahme im Ein- und Ausfahrtbereich der Teststrecke verantwortlich war. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass keinerlei Vernetzung mit der Infrastruktur umgesetzt wurde. Die gesamte Technik und somit die Intelligenz des Systems waren daher im Fahrzeug angesiedelt.

Die nachgerüstete Ausstattung des Versuchsträgers setzte sich aus unterschiedlichen Hardware- und Softwareelemente auseinander. Zur Lokalisierung des Fahrzeuges wurde ein um GNSS erweitertes inertiales Navigationssystem (INS) verwendet. Beim GNSS handelt es sich um ein globales, satellitengestütztes Navigationssystem wie beispielsweise dem GPS. Dieses wurde im INS mit Odometrie- und Beschleunigungssensoren kombiniert. Erstere kalkulieren aus der Raddrehzahl und dem Radumfang die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeuges, wohingegen letztere durch die Integration von Beschleunigungswerten ebenfalls Informationen zu Geschwindigkeit und zurückgelegter Strecke bereitstellen. Damit konnten insgesamt Messungen mit Genauigkeiten von 0,01 m (Position) und 0,05 km/h (Geschwindigkeit) erzielt werden. Als Umfellsensoren wurden im Automobilbereich bereits eingesetzte LiDAR- und Radarsensoren sowie Kamerasysteme integriert. Jeweils drei LiDAR- und Radarsensoren mit integrierter Objektverfolgung dienten der Detektion von Hindernissen jeglicher Art im Nah- und Fernbereich. Mithilfe von insgesamt neun Kameras wurden zusätzlich visuelle Daten zur Interpretation von Objekten und Signalen generiert.

Zu den größten Herausforderungen, die innerhalb der Projektlaufzeit in Potsdam identifiziert werden konnten, zählte unter anderem die Zuverlässigkeit der Sensorik. Die Objektdetektion mit Radarsensoren zeigte häufig Probleme infolge der starken Reflexion der emittierten Strahlung an metallischen Gegenständen. Solche Objekte sind in Form von Schienen oder Strommasten allerdings im Gegensatz zur Straßenumgebung dauerhaft im Detektionsbereich von Straßenbahnen zu finden. Dies führte teilweise zu einer Überdeckung und somit ausbleibenden Detektion von Fußgängern. Des Weiteren wurden auch bei Kombination unterschiedlicher Sensormodalitäten unkritische Objekte, wie beispielsweise Vegetation oder Plastiktüten, als Hindernisse klassifiziert, sodass eine Gefahrenbremsung initiiert wurde. Generell stellten schlechte Wetterbedingungen für kamerabasierte Funktionen wie Signal- und Objekthandhabung einen limitierenden Faktor dar. Auch die Prädiktion der Bewegungstrajektorien anderer Verkehrsteilnehmer und eine adäquate Reaktion auf ebendiese stellten sich als schwierig heraus. Fehlende Ausweichmöglichkeiten gekoppelt mit einem vergleichsweise trägen Bremsverhalten forderten eine Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit in der Nähe potenziell kreuzender Fußgänger von 50 auf 40 km/h [38, S. 6 f.].

Durch diese erste anwendungsnahe Umsetzung automatisierter Funktionen in realen Verkehrsszenarien konnten relevante Erfahrungen gesammelt und gezeigt werden, dass automatisiertes Fahren nicht nur im Straßenverkehr umsetzbar, sondern auch für Straßenbahnen technisch möglich ist. Auch wenn sich die Implementierung von Hard- und Software aus dem Automobilbereich als schwierig herausstellte, konnten wichtige Verbesserungspotenziale identifiziert werden. Neben den bereits aufgezeigten Herausforderungen, die sich durch technischen Fortschritt angehen lassen, ist es ebenso wichtig, die Interaktion mit Passagieren innerhalb und außerhalb der Straßenbahn möglichst intuitiv und menschlich zu gestalten [39, S. 18]. Um im nächsten Schritt die Erprobung des vollautomatischen Fahrens auf weniger dicht befahrenen Teilstrecken zu ermöglichen, ist es erforderlich, Zulassungsverfahren für diesen neuartigen Einsatzbereich zu entwickeln. Daher arbeiten VDV und Siemens Mobility gemeinsam an der Definition von sicherheitstechnischen und juristischen Rahmenbedingungen [40, S. 5].

Autonome Straßenbahn im Depot: AStriD (Steckbrief 18)

Aktuell und in den kommenden Jahren will Siemens Mobility verstärkt in die Weiterentwicklung von Technologien und Systemen des automatisierten Fahrens investieren [25, S. 9]. In dem im Jahr 2019 gestarteten Projekt AStriD, welches sich mit der Automatisierung von Straßenbahnen im Depot auseinandersetzt, übernimmt Siemens Mobility die Projektkoordination. Zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie und weiteren Industriepartnern soll hierbei ein digitalisierter Betriebshof entwickelt werden, der von einer automatisierten, fahrerlosen Straßenbahn befahren wird. Dabei handelt es sich erneut um die erste kommerzielle Anwendung. Das Straßenbahndepot, der Betriebshof der Verkehrsbetriebe Potsdam, als abgeschlossener und geschützter Bereich stellt ein ideales Testfeld dar. Aus betrieblicher Sicht ist es das Ziel abzuschätzen, inwieweit eine Reduktion des Personalaufwandes für wiederkehrende Rangiertätigkeiten (Waschen, Besanden, Wartung, usw.) möglich ist. Außerdem stehen Auf- und Abrüstzeiten sowie Wegezeiten beim Abstellen und Bereitstellen im Fokus [41, S. 17]. Als zentrales Element steuert und disponiert das Managementsystem des Betriebshofs alle anstehenden Prozesse. Hierzu wird die genaue Position einzelner Bahnen, der Zustand relevanter Infrastrukturkomponenten und die Stellung von Signalen oder Weichen benötigt. Daher ist die sichere und zuverlässige Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und Depotmanagement von großer Bedeutung. Da GNSS-Sensoren in den Hallen des Depots keine ausreichende Genauigkeit liefern, wird die präzise Lokalisierung der Straßenbahnen mithilfe weiterer Sensoren sowie einer infrastrukturseitigen Unterstützung realisiert. Zugrunde liegt außerdem eine digitale Karte, auf der alle erforderlichen Informationen in Echtzeit abgebildet werden [42, S. 23]. Neben technischen und betrieblichen Aspekten werden ebenfalls von Anfang an rechtliche Randbedingungen, insbesondere die Genehmigung des Betriebs, mitgedacht [43]. Auch wenn das vom BMVI geförderte Projekt noch bis Ende 2022 läuft, ist die Marktreife des automatisierten Depots bis 2026 geplant [44, S. 9].

Ein weiteres Projekt zur Erprobung automatisierter Straßenbahnen wurde 2018 zwischen Thales Deutschland und der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft (AVG) vereinbart. In der ersten Phase wurde sich hierbei, wie im Projekt AStriD, auf den Betrieb im Depot fokussiert. Dabei wurden bereits im Dezember 2018 Testfahrten in der Automatisierungsstufe GoA 3 durchgeführt [45]. Darüber hinaus sollen in einer zweiten Phase unterschiedliche Lösungen unter Verwendung der Technologie von Thales auch außerhalb des Depots untersucht werden. Langfristiges Ziel ist es, automatisierte und elektrische Schienenfahrzeuge ohne Oberleitung zu nutzen, um neue Einsatzbereiche zu erschließen [46].

2.2.4.3 Teleoperation als Zwischenstufe zum automatisierten Fahren

Da die Einführung höherer Automatisierungsstufen, neben weiteren Rahmenbedingungen wie Zulassung, rechtlichen oder versicherungstechnischen Aspekten, eine sehr hohe technologische Reife voraussetzt, müssen Zwischenschritte erarbeitet werden, die schon frühzeitig die Erprobung im Realbetrieb ermöglichen. Teleoperation von automatisierten Straßenbahnen gilt dabei als potenzielle Zwischenstufe zum vollständig fahrerlosen Betrieb.

Im Forschungsprojekt MAAS (Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsystemen der Straßenbahn) (Steckbrief 17) werden ebenfalls die Potenziale und Herausforderungen der Straßenbahnautomatisierung analysiert. Dafür wurde ein Prototyp mit Sensorik aus dem Automobilbereich ausgestattet. Allerdings wird dieses Testfahrzeug weiterhin manuell im normalen Fahrgastbetrieb eingesetzt. Die alltäglichen Verkehrssituationen werden zur Entwicklung und Erprobung der Umfelderkennungssoftware verwendet, ohne dass ein aktiver Eingriff in die Fahrzeugsteuerung stattfindet. Einzelne Szenarien mit aktivem Eingriff werden im späteren Verlauf des Projekts auf einem abgeschlossenen Testfeld erprobt [47]. Auch die Teleoperation wird betrachtet. Durch teleoperiertes Fahren besteht die Möglichkeit das automatisierte System in kritischen Situationen zu assistieren. Prinzipiell werden dabei einem menschlichen Operator, der mehrere Fahrzeuge auf einmal überwacht, Kamera- und Zustandsdaten der Straßenbahn auf einem Interface präsentiert. Anhand dieser Daten ist eine Situationseinschätzung in Echtzeit realisierbar. Mit der Eingabe von Steuerungsbefehlen werden anschließend Anweisungen an die Fahrzeugsteuerung übermittelt und dort umgesetzt. Zur sicheren Anwendung der Teleoperation ist es notwendig, Kamerabilder in Echtzeit zu übertragen und zu empfangen, um eine Steuerung aus der Ferne optimal umzusetzen. Die Anforderungen an Latenz, Reichweite und Datenübertragungsrate sind lediglich über das Mobilfunknetz realisierbar. Nach Aussagen der Projektvertreter ist das in Ballungsgebieten derzeit vorhandene 4G-Netz allerdings nicht ausreichend. Die Vorteile, die durch den neuen Mobilfunkstandard 5G entstehen, sollen im Projekt MAAS analysiert werden [47]. Als weiteres Anwendungsbeispiel sind Bereiche denkbar, in denen kurzzeitig keine Automation erlaubt ist [48]. Die bisherigen im Projektverlauf gewonnen Erkenntnisse wurden in [49] vorgestellt. Als grundsätzliche Herausforderungen bezüglich der Automatisierung von Straßenbahnen wurden die geringe Manövrierbarkeit, die große Masse und das träge Reaktionsverhalten der Fahrzeuge, die geringe Distanz zu Menschen und Objekten sowie die äußerst schwierige Intentionsschätzung definiert. Darüber hinaus führe das Wissen über die bahngelundene Bewegung dazu, dass sich Passanten und andere Verkehrsteilnehmer nicht selten sehr nahe am lichten Raum der Straßenbahn aufhalten.

2.3 Vernetzung

2.3.1 Grundlagen der intelligenten Verkehrsvernetzung

Ausgereifte Sensortechnologien und Algorithmen in Verbindung mit Hochleistungsprozessoren sind in der Zukunft aller Voraussicht nach in der Lage, Fahrzeuge unterschiedlicher Typen zu automatisieren. Auch wenn diese Fahrzeuge eigenständige, intelligente und autonome Systeme verkörpern, ist es ohne die Vernetzung aller Teilsysteme eines Mobilitätssystems nicht möglich, die betrieblichen, sozialen und ökologischen Verbesserungspotenziale vollständig auszuschöpfen.

Zur Lösung unterschiedlichster Problemstellungen und zur vollständigen Ausschöpfung von Potenzialen einer intelligenten Verkehrssteuerung ist es notwendig, intelligente Transportsysteme (ITS) zu entwickeln und einzuführen. Diese basieren in erster Linie auf der Vernetzung verschiedener Komponenten und Systeme dieses Sektors, die zusammenfassend als V2X-Kommunikation bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um einen Überbegriff, der die funkbasierte Vernetzung mehrerer Subsysteme, wie beispielsweise Fahrzeuge, Infrastruktur, Fußgänger oder Netzwerke, beschreibt. In Abbildung 2-3 sind die grundlegenden Begriffe und Vernetzungstechnologien der V2X-Kommunikation dargestellt.

Zum aktuellen Zeitpunkt stehen zwei Funk- bzw. Kommunikationstechnologien¹ zur Verfügung, die den Anforderungen der sowohl sicherheitskritischen als auch nicht sicherheitskritischen Verkehrsvernetzung

¹ Im Bericht wird in der Regel die Begrifflichkeit Kommunikationstechnologie verwendet. Die Nutzung des Begriffs Funktechnologie wird an einzelnen Stellen analog verwendet.

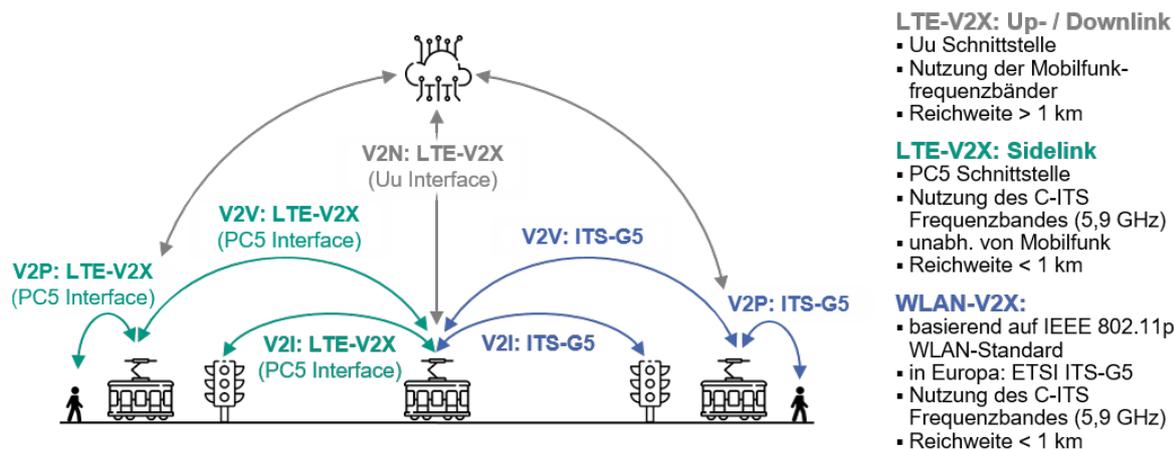


Abbildung 2-3: V2X-Kommunikation

gerecht werden: WLAN-V2X und Cellular-V2X. Beide wurden speziell für die Fahrzeugkommunikation und die damit einhergehenden Anwendungen entworfen und basieren auf existierenden Standards [50, S. 25]. Für ein tieferes Verständnis werden in den folgenden Abschnitten die wesentlichen Eigenschaften dieser Standards analysiert und gegenübergestellt.

2.3.1.1 V2X über WLAN: ITS-G5

Basierend auf der bereits existierenden Familie von Kommunikationsstandards IEEE 802.11, wurde WLAN-V2X speziell für die Kommunikation von Fahrzeugen untereinander (V2V) und mit der Infrastruktur (V2I) konzipiert. In den USA wird diese Drahtlos-Technologie vom IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) in der Standarderweiterung IEEE 802.11p definiert und als DSRC (*dedicated short-range communication*) bezeichnet. Demgegenüber sind in der EU die Techniken und Parameter für die Datenübertragung im Standard EN 302 663 des ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) festgehalten und die Technologie wird als ITS-G5 bezeichnet. [51, S. 412].

Zum Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und der streckenseitigen Infrastruktur sind sogenannte On-Board-Units (OBU) und Road-Side-Units (RSU) erforderlich. Beide Geräte sind ähnlich aufgebaut und bestehen im Wesentlichen aus einem Funkgerät und einem Prozessor. Darüber hinaus verfügen viele kommerzielle Produkte über ein GPS-Modul [52, S. 9]. IT-Sicherheit wird durch die Installation einer Public-Key-Infrastruktur (PKI) gewährleistet, die auf digitalen Signaturen und Zertifikaten basiert [50, S. 26]. Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 3.2.4.3.

2.3.1.2 V2X über Mobilfunkstandard: Cellular-V2X

Neben der Verwendung von WLAN-basierter Nahbereichskommunikation ist es ebenfalls möglich, das bestehende öffentliche Mobilfunknetz für V2X-Anwendungen zu nutzen. Dabei gilt zu beachten, dass derzeit unterschiedliche Mobilfunkgenerationen koexistieren, deren Eigenschaften sich bezüglich Latenz und Datenrate stark unterscheiden. Die aktuell weltweit noch im Ausbau befindliche LTE-Generation (*Long Term Evolution*) entspricht der vierten Generation. Für die Standardisierung im Mobilfunk ist das 3GPP (3rd Generation Partnership Project), eine Kooperation aus internationalen Standardisierungsgremien, zuständig. Das 3GPP veröffentlichte 2015 den auf LTE basierenden Standard LTE-V2X. Diese Direktkommunikationsschnittstelle wurde entsprechend der für V2X-Anwendungen erforderlichen Anforderungen entwickelt und steht daher in direkter Konkurrenz mit dem WLAN-basierten Äquivalent ITS-G5 [53, S. 19].

Grundsätzlich gibt es somit zwei Möglichkeiten, über mobilfunkbasierte Technologien Daten auszutauschen:

1. Up- und Downlink-Kommunikation:
Damit wird die indirekte Verbindung zwischen zwei Knoten (z. B. zwei Fahrzeuge) über das Mobilfunknetz bewerkstelligt. Dabei kommuniziert ein Fahrzeug über die konventionelle Mobilfunkschnittstelle (sog. Uu Interface) mit der nächstgelegenen Mobilfunkzelle, die wiederum mit dem Zielfahrzeug vernetzt ist.
2. Sidelink-Kommunikation:
Diese ermöglicht die direkte Verbindung zwischen zwei Knoten ohne dass eine Verbindung zum Mobilfunknetz notwendig ist. Diese Art der Direktkommunikation wird beim LTE-V2X verwendet und über die sogenannte PC5 Schnittstelle realisiert.

Darüber hinaus umfasst die Sidelink-Kommunikation zwei weitere Modi. Im PC5 Mode 3 befinden sich die Knoten in der Funkabdeckung einer Basisstation, wodurch die Steuerung von Übertragungsressourcen von ebendieser koordiniert wird. Der Datenaustausch erfolgt dennoch direkt zwischen beiden Endgeräten. Demgegenüber ist im PC5 Mode 4 keine Funkabdeckung vorhanden, sodass die Zuweisung von Ressourcen verteilt stattfindet und mit dem Prinzip von WLAN-V2X vergleichbar ist [50, S. 28].

Welche Funkfrequenzbänder für die LTE-basierte V2X-Kommunikation genutzt werden, hängt direkt vom Betriebsverfahren ab. Während Up- und Downlink-Kommunikation auf konventionelle Mobilfunkfrequenzen zugreifen, arbeitet die Sidelink-Kommunikation genau wie WLAN-V2X im für ITS-Anwendungen vorgesehenen 5,9 GHz Frequenzband. Die für eine Koexistenz und Interoperabilität beider Technologien erforderlichen Rahmenbedingungen werden derzeit vom ETSI anhand von zwei technischen Berichten erarbeitet. Eine Fertigstellung einschlägiger Normen wurde allerdings noch nicht final terminiert [54, S. 3]. Genauere Informationen auch hinsichtlich der zukünftigen Aussichten beider Standards werden in Kapitel 3.2 erläutert.

2.3.1.3 Vergleich

Ein direkter Leistungsvergleich der beiden Kommunikationsstandards ist aufgrund verschiedener Reifegrade und fehlender experimenteller Benchmarking-Studien schwierig [55, S. 60]. Während WLAN-V2X bereits seit etwa einem Jahrzehnt kontinuierlich weiterentwickelt und in einer Vielzahl von Projekten europaweit erprobt wird (siehe C-Roads Plattform²), befindet sich LTE-V2X noch in den Anfängen [55, S. 59] [50, S. 26]. Diese Tatsache wird darüber hinaus von der Verfügbarkeit kommerzieller Produkte bekräftigt. Ein Großteil der marktreifen V2X-Geräte (OBUs und RSUs) weist lediglich eine Kompatibilität und Unterstützung von ITS-G5 auf [52, S. 10]. Demgegenüber befinden sich Chipsets und Geräte für LTE-V2X in der Testphase [55, S. 60].

Die Reichweite der Nahbereichskommunikation zwischen einzelnen Knoten, die über WLAN-V2X oder die PC5 Schnittstelle des LTE realisierbar ist, ist auf wenige hundert Meter beschränkt und stark von der zwischenliegenden Bebauung und Vegetation beeinflusst. Hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten erfordern daher schnelle Übergabeprozesse. Gleichzeitig ist bei hohen Verkehrsdichten und somit einer hohen Anzahl verbundener Geräte mit ansteigenden Latenzen und Signalinterferenzen zu rechnen [52, S. 6]. Aufgrund der zentralen Vergabe von Ressourcen im PC5 Mode 3 gehen Protzmann et al. in [50] von einem Vorteil seitens Cellular-V2X aus. Die Auswirkungen einer potenziellen Überlastung der Mobilfunknetze in Ballungsgebieten sind jedoch nicht klar quantifizierbar. Mit der in den nächsten Jahren zunehmenden

² C-Roads Plattform: Initiative Europäischer Mitgliedsstaaten und Straßenbetreiber zur Erprobung und Implementierung von C-ITS-Services mit dem Ziel einer grenzüberschreitenden Harmonisierung und Standardisierung.

großflächigen Einführung der 5. Mobilfunkgeneration (5G) wird Cellular-V2X eine wesentliche Performancesteigerung zugesagt [53, S. 31] [52, S. 16] [50, S. 28]. Auch der WLAN-basierte Standard wird bereits weiterentwickelt. Nähere Informationen zu allen Kommunikationsstandards sind in Kapitel 3.2.6 zu finden.

2.3.2 Integration intelligenter Transportsysteme und Standardisierung

Die Integration intelligenter Transportsysteme und die Erweiterung um zusätzliche Kooperationsmöglichkeiten (C-ITS, *cooperative intelligent transport systems*) bedarf eines umfangreichen Standardisierungs- und Harmonisierungsprozesses. Hierzu wurde 2016 die von der EU geförderte Plattform C-Roads ins Leben gerufen, die eine gemeinsame Initiative europäischer Mitgliedsstaaten und Straßenbetreiber zur Erprobung und Implementierung von C-ITS-Anwendungen darstellt. Im Projekt C-Roads Germany wurden unterschiedliche Dienste basierend auf V2X-Kommunikation in den Testfeldern Hessen und Niedersachsen umgesetzt. Bis 2023 werden weitere Pilotprojekte in Hamburg, Kassel und Dresden im Rahmen von C-Roads Germany-Urban Nodes durchgeführt. Zu den geplanten C-ITS-Anwendungen zählen unter anderem die Baustellenwarnung, der Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer, die Verkehrszeichendarstellung im Fahrzeug, die Einsatzfahrzeug-Warnung, die Prioritätsanforderung für Lichtsignalanlagen und der grüne Welle- und Verzögerungsassistent [56]. Auch wenn der primäre Fokus der Anstrengungen der C-Roads-Plattform im Straßenverkehr liegt, ist die Relevanz für die Vernetzung von Straßenbahnen nicht vernachlässigbar. Neben dem Nutzen der oben genannten Funktionen für assistiertes und automatisiertes Fahren auf der Schiene wird mit der Harmonisierung von Kommunikationstechnologien und Systemarchitekturen ein Grundbaustein für die Entwicklung vernetzter Mobilität gelegt. Als Teil des öffentlichen Nahverkehrs profitiert der städtische Schienenverkehr ebenfalls von den Ergebnissen der C-Roads-Plattform.

Neben der Definition des WLAN-basierenden V2X-Kommunikationsstandards ITS-G5 sind weitere Nachrichtentypen für C-ITS-Anwendungen spezifiziert und standardisiert. Dabei können verschiedene Nachrichtentypen direkt den korrespondierenden C-ITS-Funktionen zugeordnet werden. In Tabelle 2-3 sind einige dieser V2X-Nachrichten enthalten [57]. Diese sind nicht an bestimmte Verkehrsmittel gebunden und können daher sowohl im Straßen- als auch Schienenverkehr angewandt werden. Dies sorgt gleichzeitig für eine direkte Kommunikationsmöglichkeit zwischen beiden Verkehrsarten.

Bezüglich der Einrichtung und Integration von C-ITS in Verkehrssysteme existieren zwei Leitfäden, die Kommunen einen Überblick über mögliche Anwendungsfälle, bestehende Standards und Erfahrungen aus bisherigen Projekten bieten:

- Leitfaden für die Einrichtung kooperativer Systeme der öffentlichen Hand als Teilergebnis des UR:BAN Projekts für vernetztes Verkehrsmanagement [58]
- Leitfaden zur Einführung kommunaler C-ITS Verkehrssysteme herausgegeben von der OpenTraffic Systems City Association e.V. (OCA) [59]

In beiden Leitfäden wird die Umsetzung infrastrukturbasierter kooperativer Systeme behandelt. Dabei werden technisch-organisatorische Systemarchitekturen aufgezeigt und deren Komponenten sowie Schnittstellen erläutert. Im folgenden Abschnitt wird unter anderem näher auf eines der zugrundeliegenden Pilotprojekte aus dem Testfeld Hessen eingegangen. Dort werden detailliertere Informationen hinsichtlich der Vernetzung von Infrastruktur und Straßenbahnfahrzeugen bereitgestellt.

TABELLE 2-3: BEISPIELE FÜR STANDARDISIERTE V2X-NACHRICHTENTYPEN

V2X-Nachricht	Inhalte
CAM Cooperative Awareness Mes- sage	Informationen über Position, Zustand, Fahrzeugdynamik (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Bewegungsrichtung), Fahrzeugtyp Periodische Übertragung im Broadcast
DENM Decentralized Environmental Notification Message	Informationen über Typ und Position von Gefahren auf Straße oder andere unnatürliche Verkehrsbedingungen Eventbasierte Übertragung
CPM Collective Perception Mes- sage	Informationen über lokal detektierte Objekte wie beispielsweise nicht-vernetzte Verkehrsteilnehmer, Hindernisse usw. Periodische Übertragung im Broadcast
MAP Map Message	Informationen über Basisdaten zur Lage und funktionalen Zuordnung von Fahrstreifen, Haltelinien, Signalgebern usw. Periodische Übertragung im Broadcast
SPAT Signal Phase and Timing Mes- sage	Informationen über dynamischen Zustand einer signalisierten Kreuzung: Signalphase, Zustandsprädiktion, Geschwindigkeitsempfehlung, Periodische Übertragung im Broadcast

2.3.3 Erprobung vernetzter Betriebsfunktionen

In diesem Abschnitt wird anhand von drei Projekten beispielhaft aufgezeigt, wie Fahrzeugvernetzung durch V2X-Kommunikation bereits im Schienenverkehr erprobt oder langfristig implementiert wurde. Hierbei werden die technische Ausstattung von Fahrzeugen und Infrastruktur, die realisierten Funktionen, die identifizierten Herausforderungen und Potenziale sowie die relevanten Erkenntnisse zusammengefasst.

2.3.3.1 Rail2X – Smart Services

Das im Rahmen von mFund geförderte Verbundprojekt Rail2X (siehe Steckbrief 13) beschäftigte sich mit der Spezifikation und dem Bau eines Rail2X-Demonstrators zur Bewertung der Übertragbarkeit von V2X-Technologien auf den Eisenbahnbereich. Hierzu wurde ein Fahrzeug Desiro Classic der Baureihe 642 entsprechend um V2X-Komponenten erweitert. Ein weiteres Ziel bestand in der Nutzung einheitlicher Standards und der Verbindung mit einem zentralen Datenspeicher, in diesem Fall der mCLOUD. Innerhalb des Vorhabens wurden drei Use Cases konzipiert und getestet:

- Use Case 1 – Service und Diagnose: Datenaustausch zwischen Zug und Infrastrukturelementen zur Erfassung von Wartungsdaten der Infrastrukturelementen und somit einer Verbesserung der Instandhaltungseffizienz
- Use Case 2 – Bahnübergang: Datenaustausch zwischen Straßenverkehr und Bahnübergangssicherungsanlage zur automatischen An- und Abmeldung von kreuzenden Pkw
- Use Case 3 – Bedarfshalt: Datenaustausch zwischen Zug und Haltepunkt zur bedarfsgesteuerten Anfahrt oder Durchfahrt bestimmter Haltestellen

Aufgrund der potenziellen Anwendbarkeit im Straßenbahnbereich wird folglich Use Case 1 näher betrachtet. Dieser fokussierte sich auf den Empfang, die Speicherung und spätere Übertragung von Diagnosedaten einzelner Infrastrukturelemente, welche über streckenseitige stationäre Sensoren erfasst wur-

den. Der Zug erfüllt somit die Funktion eines Informationsträgers und dient als Bindeglied zwischen Infrastrukturelementen und einer zentralen Diagnoseplattform [60, S. 20]. Zur drahtlosen Datenübertragung von der Strecke zum Fahrzeug wurde ITS-G5 als Kommunikationsstandard verwendet. Umgesetzt wurde dieser durch die technische Plattform Sitraffic ECoS. Die V2X-Komponente ECoS RSU verfügt über insgesamt sechs Antennen, wovon jeweils zwei für LTE- und WLAN-V2X ausgelegt sind. Die RSU beinhaltet weiterhin ein Steuergerät, welches für die Aufnahme der Messdaten und deren Umwandlung in ein konformes Format zuständig ist. Mess- und Diagnosedaten wurden regelmäßig als DENM-Nachricht im Broadcast-Modus versendet [60, S. 23]. Als fahrzeugseitiger Gegenpart wurde das MK5 OBU der Firma Cohda Wireless im Zug integriert.

Die über ITS-G5 bei der Vorbeifahrt übertragenen Daten wurden im Fahrzeug zwischengespeichert, um anschließend im Depot an die Depot-RSU transferiert zu werden. Die Transportzeit eines Telegramms zwischen Infrastrukturelement und Datenmanagementsystem betrug je nach Entfernung mehrere Stunden. Daher wurde zusätzlich die Möglichkeit der direkten Übertragung kritischer Messwerte über das Mobilfunknetz integriert.

Im Zuge von Rail2X konnte aufgezeigt werden, dass V2X-Kommunikation neben dem Straßenverkehr auch im Eisenbahnbereich relevante Einsatzgebiete aufweist. Mithilfe vorhandener kommerzieller Komponenten und bereits standardisierter Nachrichtenformate wurde anhand von drei Use Cases die Funktionsfähigkeit veranschaulicht. Um den Standardisierungsprozess hinsichtlich bahntechnischer Anwendungsfälle voranzutreiben, wurde im Projekt darauf geachtet, bestehende ETSI Nachrichtenformate lediglich zu erweitern. Darauf aufbauend wurde ein konkreter Standardisierungsvorschlag entwickelt, der in die Arbeit der Gremien zur ETSI-Normung einfließt [60, S. 89].

2.3.3.2 VERONIKA

Das Ziel des in Kassel durchgeführten Projekts VERONIKA (Vernetzung von Fahrzeugen des ÖPNV mit verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5 (siehe Steckbrief 12) lag in der Integration von C-ITS zur Verbesserung der Anmeldung und Priorisierung von ÖPNV-Fahrzeugen an Lichtsignalanlagen. Die dabei eingesetzte V2X-Technologie diente auch der Überführung des bisher verwendeten Bake-Funk-Systems. Bei dieser etwa 30 Jahre alten Technologie wird über eine streckenseitig ortsfeste Infrarotbake beim Überfahren ein Datensatz mit Ortsinformationen kommender Meldepunkte an die Straßenbahn übertragen. Über den fahrzeuginternen Wegstreckenzähler schätzt das Fahrzeug ab, wann ein solcher Anmeldepunkt passiert wird und versendet ein Telegramm (R09/16-Telegramm) an die Empfangseinheit im Steuergerät der Lichtsignalanlage. Dort werden die Informationen ausgewertet und im Steuerprogramm berücksichtigt. Das Bake-Funk-System weist wesentliche Nachteile wie fixe Anmeldepunkte ohne Berücksichtigung des Fahrzeugtyps, veraltete technische Komponenten und somit hohe Anschaffungspreise auf. Außerdem schreitet der allmähliche Abbau von Analogfunkfrequenzen voran [61, S. 6]. Mithilfe von V2X-basierter Kommunikation soll ein kontinuierlicher bzw. hochfrequenter Informationsaustausch zwischen Fahrzeug und Infrastruktur gewährleistet werden. Dadurch kann die Schaltzeit der Lichtsignalanlage zur Priorisierung des Straßenbahnverkehrs erheblich präzisiert werden. Darüber hinaus lässt sich der Fahrzeugtyp im Nachrichtenformat CAM hinterlegen, sodass nicht nur ÖPNV-Fahrzeuge, sondern auch Einsatzfahrzeuge unter Verwendung der gleichen Technologie und Ausstattung inkludiert werden können. Die Bevorzugung solcher Fahrzeuge sollte dabei einen noch höheren Wichtigkeitsgrad erhalten. Durch die Erprobung und den Einsatz moderner V2X-Technologie wird die Integration einer flexiblen und universell, fahrzeugtypunabhängig nutzbaren Systemlösung zur intelligenten Steuerung von Lichtsignalanlagen verfolgt.

Im Zuge des Projekts wurden fünf Straßenbahnen und zehn Busse mit ITS-G5-fähigen OBUs ausgestattet. Gleichzeitig wurden an 15 signalisierter Knotenpunkten RSUs installiert, um eine kontinuierliche Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalanlage im jeweiligen Einflussbereich zu realisieren [62]. Die V2I-basierende Anmeldung und Schaltzeitprognose wurde mithilfe der vom ETSI standardisierten Nachrichtentypen MAP (Ortsdaten von RSU), SPAT (Signalzustand und aktuelle Prognose von RSU),

SRM (Priorisierungsanforderung von OBU), SSM (Anforderungsbestätigung durch RSU) durchgeführt. Beim Eintritt in den Funkabdeckungsbereich eines Knotenpunktes empfängt die Fahrzeug-OBU die periodisch von der RSU ausgesendeten MAP- und SPAT-Daten. Aus diesen Daten kann das fahrzeugseitige Steuergerät bestimmen, welches Signal für den Fahrtwunsch relevant ist und wo sich die entsprechende Haltelinie befindet. Anschließend fordert das Fahrzeug die Freigabe an (SRM-Nachricht), wobei ebenfalls der erwartete Ankunftszeitpunkt übermittelt wird. Nach abgeschlossener Bearbeitung versendet die RSU eine Bestätigung der Anforderung in Form eines SSM-Telegramms (Signal Status Message). Wird die Schaltzeitprognose daraufhin für die ÖPNV-Priorisierung aktualisiert, wird abschließend eine korrigierte SPAT-Nachricht übermittelt. Die Schaltzeitdaten der Lichtsignalanlage werden im Führerstand mithilfe der speziell entwickelten VERONIKA-App auf einem Smartphone angezeigt. Gleichzeitig wird eine Richtgeschwindigkeit vorgeschlagen, mit der die Ankunft am Knotenpunktes zum Beginn der ÖPNV-Grünphase erreichbar ist [63, S. 750 f.]. Auf diese Weise ist der Fahrzeugführer in der Lage, energieeffizientes Fahren mit einem optimierten ÖPNV-Betrieb zu kombinieren. Im Umkehrschluss handelt es sich also um ein V2X-basiertes Fahrerassistenzsystem, welches die C-Roads C-ITS-Dienste GLOSA (*Green Light Optimal Speed Advisory*) und Traffic Signal Priority Request (TSP) zusammenfasst.

Eine mögliche Gestaltung einer Systemarchitektur zur Umsetzung dieser Funktionalitäten wird in Kapitel 3.2.7 beschrieben. Hervorzuheben ist dabei, dass im Projekt VERONIKA auf die Verwendung standardisierter Kommunikationstechnologien und Schnittstellen geachtet wurde. Darunter fällt zum einen die Drahtloskommunikation zwischen fahrzeug- und infrastrukturseitigen Funkgeräten, die über ITS-G5 realisiert wird. Zum anderen wurden sogenannte OCIT-Schnittstellen (*Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems*) implementiert, die zur Vernetzung dezentraler und zentraler Komponenten in Verkehrsmanagementsystemen dienen. Des Weiteren wird über Mobilfunk eine Verbindung zu einem Metadatenserver hergestellt, der Informationen bezüglich Linie, Kurs, Ziel und anderen betrieblichen, nicht sicherheitskritischen Daten bereitstellt.

Auch wenn die Projektergebnisse als großer Erfolge einzustufen sind, wurden einige Herausforderungen und Verbesserungspotenziale identifiziert. Dazu zählten beispielsweise Unsicherheiten innerhalb der Schaltzeitprognose, die je nach Komplexität der Kreuzung im zweistelligen Sekundenbereich liegen konnte. Bei Abweichungen dieser Größenordnung ist eine Weitergabe an den Fahrer nicht förderlich, da sie dessen Akzeptanz hinsichtlich des Assistenzsystems langfristig negativ beeinflusst. Ein weiterer Aspekt, der die optimale Ampelsteuerung und Priorisierung des ÖPNV erschwert, ist die Ungenauigkeit der Ankunftszeitprognose in Situationen, in denen auf dem Weg zum Knotenpunkt eine Haltestelle bedient werden muss. Die Ermittlung der genauen Dauer eines Haltestellenaufenthalts ist aufgrund verschiedenster Einflussfaktoren, wie beispielsweise des Passagieraufkommens oder Vorhandenseins anderer Fahrzeuge im Haltestellenbereich, sehr komplex. Sowohl Schaltzeit- als auch Ankunftszeitprognose bedürfen daher weiteren Anstrengungen [61, S. 114 f.].

Insgesamt wurde im Projekt VERONIKA die schrittweise Umstellung vom konventionellen Bake-Funk-System zu einem präzisen, kontinuierlichen Knotenpunktmanagement mithilfe einer kooperativen und intelligenten Verkehrssteuerung demonstriert. Vergleichbar mit den Ergebnissen des Projekts Rail2X konnte gezeigt werden, dass V2X-Technologie nicht nur für Anwendungen im Straßenverkehr genutzt werden sollte. Durch eine Implementierung im Straßenbahnsektor lassen sich ebenfalls erhebliche Vorteile hinsichtlich des Betriebes, der Energieeffizienz, aber auch der Verkehrssicherheit generieren. Konkrete Potenziale einer zunehmenden Vernetzung werden in Kapitel 4 ausführlich diskutiert.

Im Rahmen von Folgeprojekten, die als Teil der Plattform C-Roads Germany Urban Nodes umgesetzt werden, ist die Ausstattung weiterer 60 Knotenpunkte in Kassel mit V2X-Technologie geplant [63, S. 757]. Für den Übergang in den Regelbetrieb ist darüber hinaus die Integration eines Zertifikatmanagements (gemeint ist eine *Public-Key-Infrastructure*, kurz PKI) zur Absicherung der Kommunikation erforderlich, auf die im Zuge des Pilotvorhabens verzichtet wurde [61, S. 117]. Die Funktionsweise einer PKI wird in Kapitel 3.2.4.3 genauer erläutert.

2.3.3.3 Digital Train Control und Frankfurt MIND+

Mit zwei Projektvorhaben strebt Frankfurt am Main an, innerhalb der nächsten zehn Jahre zu einer der ersten sogenannten „CBTC-Städte“ zu werden (siehe Steckbrief 15). Dabei wird unter dem Begriff CBTC nicht nur die Modernisierung des Zugsicherungssystems der U-Bahn (siehe Kapitel 2.2.2) verstanden, sondern auch der Ausbau der Vernetzung zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur an der Oberfläche. Bis Ende 2031 sollen sowohl Fahrzeuge umgebaut als auch unterschiedliche Streckenabschnitte der U- und Straßenbahn mit entsprechender Technologie ausgestattet werden. Auch wenn aufgrund des sehr jungen Projekts bisher wenige Informationen zur detaillierten Realisierung dieser Zielvorgaben existieren, werden im Folgenden die Bestandteile der Gesamtarchitektur beschrieben und die angestrebten Vorteile erläutert [64, 65].

Im ersten Schritt wird auf unterschiedlichen U-Bahnlinien und Streckenabschnitten CBTC als neues digitales Zugsicherungssystem (DTC) etabliert. Infolge der ununterbrochenen Kommunikation zwischen Fahrzeugen und streckenseitigen Komponenten lässt sich hierbei das Fahren im wandernden Raumabstand umsetzen, wodurch vor allem ein Zuwachs in der Streckenkapazität erreicht wird. Darüber hinaus wird ein teil- bis vollautomatisierter (GoA 2 bis GoA 4) Zugbetrieb ermöglicht. Die Kommunikation wird, wie bereits in vorherigen Kapiteln erwähnt, über WLAN zwischen der fahrzeugseitigen OBU und der streckenseitigen Steuereinheit realisiert. Außerhalb von Tunneln wird auf C-ITS-Technologie zurückgegriffen. OBUs sind somit ebenfalls in der Lage, über den V2X-Funkstandard ITS-G5 im 5,9 GHz Frequenzband mit den meist an Lichtsignalanlagen installierten RSUs zu kommunizieren. Diese sind ähnlich wie im Projekt VERONIKA an die Lichtsignalsteuerung und per Mobilfunk oder Ethernet an eine sogenannte V2X-Zentrale gekoppelt, die der Überwachung der RSUs dient. Auf Zentralenebene wird zusätzlich eine kooperative Leitstelle für ÖPNV und Individualverkehr integriert, die Werkzeuge zur Simulation und strategischen Planung des Verkehrs beinhaltet. Durch die Verbindung dieser Leitstelle mit weiteren Datenplattformen und einem zentralen Verkehrsrechner, können Zusatzinformationen wie Umwelt und Verkehrsdaten bzw. ein mesoskopisches Verkehrsmodell einbezogen werden.

Insgesamt werden mit diesem umfangreichen Projektvorhaben neben der Automatisierung und Kapazitätssteigerung des U-Bahnbetriebs ein optimiertes Auslastungsmanagement, eine vernetzte Verkehrslenkung inklusive der Priorisierung von Einsatzfahrzeugen und Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs sowie weitere Anwendungsfälle von C-ITS (z. B. Gefahrenmeldungen oder energieoptimale Fahrweise) angestrebt. Im Gegensatz zu anderen bisher vorgestellten Projekten wird hinsichtlich der technischen Umsetzung außerdem nicht zwischen U-Bahnen und Straßenbahnen unterschieden. Es wird explizit das Ziel verfolgt, Fahrzeuge mit gleicher Ausstattung sowohl für den vernetzten Betrieb im Tunnel als auch an der Oberfläche zu ertüchtigen. Zudem wird ein ganzheitliches Verkehrsmanagement verfolgt, welches Schienen- und Straßenverkehr durch moderne Kommunikationstechnologien und eine digitale Infrastrukturarchitektur berücksichtigt. Zu beachten ist dennoch, dass streckenseitige Komponenten und Systeme aufgrund der grundverschiedenen Anforderungen der jeweiligen Umgebung und damit einhergehend auch der Fahraufgabe in U-Bahn- und Straßenbahnbereichen stark voneinander abweichen. In abgeschlossenen Bereichen ist es möglich, dauerhafte bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur zur Zugsicherung und automatisierten Zugsteuerung zu nutzen. Infolge der direkten Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und der daraus resultierenden Komplexität der Fahrzeugumgebung ist dieses Prinzip nicht ohne Weiteres auf die Fahrzeugführung von Straßenbahnen übertragbar. Hier ergeben sich durch Vernetzung andere Funktionalitäten, die auf den vorherigen Seiten ausführlich erläutert wurden. Unabhängig davon kann eine einheitliche Fahrzeugausrüstung bei entsprechender Konzeptionierung für beide Anwendungsfelder verwendet werden.

2.4 Zusammenfassung und Bewertung des Standes der Technik

Im Zuge einer Literaturanalyse wurden Pilotprojekte und Entwicklungen im Themenfeld der Straßenbahnautomatisierung untersucht. Dabei konnten vier Forschungs- und Anwendungsschwerpunkte identifiziert werden: Kollisionsschutzassistent, Grünphasenassistent und Priorisierung, Automatisierung im Linienbetrieb und Automatisierung im Depot. Zusammenfassend sind die relevanten Informationen in der Tabelle 2-4 festgehalten.

TABELLE 2-4: ÜBERSICHT ZU BISHERIGEN FORSCHUNGSSCHWERPUNKTEN AUTOMATISierter STRASSENBAHNEN

	Kollisionsschutz-assistent	Grünphasen-assistent, Priorisierung	Automatisierung im Linienbetrieb	Automatisierung im Depot
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Objektdetektion ▪ Objekthandhabung ▪ Einschätzung Kollisionsrisiko ▪ Warnung oder Eingriff 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anmeldung und Prioritätsanforderung ▪ Übertragung SPAT ▪ Optische Anzeige der Fahrgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierte Fahrzeugführung ▪ Objekt-/ Signaldetektion und -handhabung ▪ Berücksichtigung und Interaktion mit Verkehr 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funktionen aus Linienbetrieb ▪ Lokalisierung auf digitaler Karte ▪ Automatisierte Depotprozesse ▪ Kommunikation
Technologiereife	Technologie im Markt, Einsatz im Regelbetrieb	Technologie in Erprobung (z. B. Kassel)	Prototypischer Einsatz (z. B. Potsdam)	Prototypischer Einsatz (z. B. Potsdam)
Projekte /Produkte	Siemens Tram Assistant, Bosch TFCW, ODAS, Cognitive Tram Pilot	VERONIKA	Siemens Autonomous Tram, MAAS	AStrID

Aus der Recherche geht hervor, dass zum aktuellen Entwicklungsstand noch erhebliche Herausforderungen auf dem Weg zum automatisierten Straßenbahnbetrieb zu bewältigen sind. Die rechtlichen, betrieblichen und technologischen Grenzen wurden im ersten Fachworkshop des Projekts [66, S. 9] mit Experten aus Industrie, Wissenschaft und Verbänden diskutiert. In Kombination mit den Rechercheergebnissen lassen sich folgende Problemstellungen festhalten:

- Technologie:
 - unbefriedigende Leistungsfähigkeit von Umgebungswahrnehmung, Interpretation und Risikoeinschätzung (vor allem bei schlechten Wetterverhältnissen und komplexen Verkehrssituationen)
 - Intentionsschätzung besonders schwierig
 - Unklarheit bezüglich der sich durchsetzenden Technologie (siehe Kapitel 3.2.6)

- Migration:
 - unklarer Übergang in Bestandsnetzen
 - Teilautomatisierung im Mischbetrieb komplex
- Anforderungen an funktionale Sicherheit:
 - keine Standards oder Regelwerke vorhanden
 - Klärung der Verantwortlichkeiten bei fehlendem Fachpersonal
 - Umgang mit funktionsunfähigen, sicherheitsrelevanten Systemen
 - fehlende Kontrollinstanz durch den Menschen
- Unterschiede zum Straßenverkehr:
 - Höheres Fahrzeuggewicht inkl. starker Varianz in Abhängigkeit der Passagierzahl
 - Spurführung und geringe Manövrierbarkeit
 - lange Bremswege durch geringe Reibwerte bei Rad-Schiene-Kontakt
 - begrenztes Bremsvermögen aufgrund der Verletzungsgefahr im Innenraum
- Rechtsgrundlage und -entwicklung:
 - Fokus auf Pkw-Bereich und straßengebundener Personenbeförderung
 - Notwendigkeit von Anpassungen der Sicherheitsanforderungen an die Rahmenbedingungen im Straßenbahnbetrieb
 - Aktuell keine Einbindung des Straßenbahnbetriebs im Gesetz zum autonomen Fahren (2021)
- Zulassung:
 - Unklares Vorgehen bei auf künstlicher Intelligenz basierenden Systemen mit sicherheitskritischen Funktionen
 - Fehlende Einbindung von Zulassungsstellen in den Entwicklungsprozess und die Forschung
 - Keine von Zulassung und Technologieentwicklung, Erforderlichkeit einer gemeinschaftlichen Betrachtung
- Akzeptanz:
 - Fahrer: keine ablenkenden Assistenzsysteme
 - Passagiere: Misstrauen in Technik
 - Verkehrsbetriebe: Funktionsfähigkeit der Systeme noch nicht ausreichend

Durch die seit einigen Jahren fortschreitende Ausstattung neuer Straßenbahnflotten mit kollisionsvermeidenden Fahrerassistenzsystemen ist bereits ein erster Schritt hin zur Sicherheitssteigerung mithilfe automatisierter Teilsysteme und -funktionen getan. Kriterien zur Planung und Verifikation solcher Systeme werden in der VDV-Schrift 191 zusammengefasst. Darin werden beispielsweise Anforderungen an die Detektionsqualität, Reichweite und Betriebsbedingungen definiert [67]. Des Weiteren wird in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2019 die Position des Verbandes bezüglich des derzeitigen Entwicklungsstandes automatisierter Straßenbahnen dargelegt [68]. Vergleichbar mit den Ergebnissen der hier vorliegenden Literaturliteraturanalyse wird im VDV-Positionspapier erläutert, dass die Schwerpunkte bisheriger Forschungs- und Erprobungsanstrengungen in der Entwicklung von Systemen zur zuverlässigen Erfassung und Interpretation der Umgebung liegen. Solche Systeme werden mit dem ATP des automatisierten Betriebes gleichgestellt [68, S. 5]. Offene Aspekte, die für die Realisierung eines automatisierten Regelbetriebs zu klären sind, werden ebenfalls erörtert. Hierzu zählen die folgenden:

- Handhabung des Passagierbetriebes (Ein- und Aussteigen)
- Vorgehen im Störfall
- Verhalten bei Sensorausfall oder -beschädigung, beispielsweise im Zuge eines Unfalles
- Betriebssteuerung automatisierter Bahnen
- Kosten im Vergleich zum konventionellen Betrieb mit Fahrer
- Intelligenter Umgang mit der Automation mit unterschiedlichen Situationen in Analogie zum heutigen Fahrzeugführer

Neben den betrieblichen Vorteilen automatisierter und vernetzter Straßenbahnen wird außerdem auf den Mangel an Fahrzeugführern hingewiesen, der langfristig die Etablierung fahrerloser Systeme erforderlich macht. Aufgrund der technologischen Komplexität, des finanziellen Aufwandes, der hohen Sicherheitsanforderungen und der bisher geringen Anzahl an Forschungsprojekten, gepaart mit den fehlenden rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, geht der VDV nicht von einer flächendeckenden Umsetzung des fahrerlosen Straßenbahnbetriebs in der nahen Zukunft aus [68, S. 6].

3 Querschnittstechnologien der Automatisierung und der Vernetzung

3.1 Grundlegende Anforderungen und Funktionen

In diesem Kapitel werden diverse Anwendungsbereiche automatisierter Funktionen im Straßenbahnsektor auf deskriptivem Niveau diskutiert. Abgeleitet werden diese aus den bisher üblichen, im Fahrzeugumlauf auftretenden Aufgaben einer Straßenbahn bzw. des zuständigen Personals. Die Grundfunktionen der Automatisierung ergeben sich dabei aus der Robotik bzw. dem automatisierten Straßenverkehr, werden jedoch teilweise um straßenbahnspezifische Aspekte ergänzt.

3.1.1 Aufgaben im Straßenbahnverkehr

Im täglichen Fahrzeugumlauf haben Straßenbahn- bzw. Stadtbahnführer unterschiedliche verkehrliche Situationen zu bewerkstelligen deren Identifikation und Analyse zur weiteren Untersuchung und Ausarbeitung möglicher Automatisierungsfunktionen zwingend erforderlich ist. Die typischen Verkehrsszenarien ergeben sich außerdem aus der BOStrab und der Teilnahme am Straßenverkehr. Je nachdem, welche physischen bzw. baulichen Elemente wie Haltestellen oder Bahnübergängen, vorhanden sind, gibt es dort anfallende, spezifische Aufgaben und Funktionen. Die wichtigsten Betriebsbereiche und -orte sowie Hauptaufgaben sind Tabelle 3-1 zu entnehmen.

Bei straßenbündigen und besonderen Bahnkörpern ist eine präzise Abgrenzung hinsichtlich der Aufgaben schwierig, da diese erheblich von der genauen Ausgestaltung der Bahnkörper abhängen. Auch wenn besondere Bahnkörper grundsätzlich nicht von anderen Verkehrsteilnehmern wie Pkw, Radfahrern oder Fußgängern mitgenutzt werden, kann eine Überquerung durch ebendiese nicht ausgeschlossen werden. Zusätzlich werden besondere Bahnkörper teilweise durch Busse oder Einsatzfahrzeuge mitbenutzt.

Anhand dieser fundamentalen Aufgaben, die derzeit größtenteils manuell oder im Zusammenspiel mit Zugsicherungssystemen bewerkstelligt werden, werden im nächsten Kapitel erforderliche Funktionen für automatisierte Systeme definiert. Darüber hinaus werden auch die Einsatzfelder und der Mehrwert von Vernetzungsanwendungen erläutert.

3.1.2 Erforderliche Grundfunktionen der Automatisierung

Aus Tabelle 3-1 wird ersichtlich, dass die Charakteristika des Straßenbahnbetriebs aufgrund des Fahrens auf Sicht sehr viele Gemeinsamkeiten mit den Eigenschaften des Straßenverkehrs aufweisen. Vor allem Hinderniserkennung und Risikoeinschätzung, die Detektion und Interpretation von Verkehrszeichen und Signalen sowie die situationsabhängige Fahrzeugsteuerung sind im automatisierten Fahren auf der Straße wiederzufinden. Demgegenüber liegt der Schwerpunkt bisheriger Automatisierungsfunktionen im U-Bahn- oder S-Bahn-Bereich in der präzisen Lokalisierung einzelner Züge auf der Strecke. Sonstige Umgebungseinflüsse werden infolge der fehlenden Interaktion mit anderen, nicht schienenengebundenen Verkehrsteilnehmern nicht berücksichtigt. Daher erscheint es sinnvoll, die Grundfunktionen der Automatisierung im Straßenbahnsektor auf den bereits bekannten Fähigkeiten aus der Automobilbranche aufzubauen.

TABELLE 3-1: HAUPTAUFGABEN DES STRASSENBAHNBETRIEBS

Betriebsbereich / -ort	Hauptaufgaben
Depot, Rangierbahnhof, Endhaltestelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wartungs- und Instandhaltungsprozesse ▪ Aufrüsten, Abrüsten und Abstellen ▪ Kommunikation mit Betriebshofmanagement ▪ Rangierprozesse ▪ Hinderniserkennung
Haltestellen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ präzises Anhalten ▪ sicheres und effektives Abfertigen ▪ Durchführen und Überwachen des Fahrgastwechsels ▪ Hinderniserkennung
Bahnübergänge (signalisiert und unsignalisiert)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz von Sicherungssystemen oder Sicherung basierend auf Sicht ▪ Hinderniserkennung
Kreuzungen (signalisiert und unsignalisiert)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigung von Verkehrsregeln, Verkehrszeichen und Signalen ▪ Hinderniserkennung
Tunnel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interaktion mit Sicherungssystemen bei nicht einsehbarem Bremsweg ▪ Berücksichtigung von Signalen und Verkehrszeichen ▪ Hinderniserkennung
Straßenbündiger Bahnkörper	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hinderniserkennung und Risikoeinschätzung ▪ Abstandhalten zu anderen Straßenbahnfahrzeugen oder anderen Verkehrsteilnehmern ▪ situationsabhängige Fahrzeugsteuerung ▪ Berücksichtigung von Signalen und Verkehrszeichen ▪ Beachtung der Straßenverkehrsordnung ▪ Einstellen des Fahrweges ▪ Reaktion auf Not- und Ausnahmesituationen
Besondere Bahnkörper	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hinderniserkennung und Risikoeinschätzung ▪ Abstandhalten zu anderen Straßenbahnfahrzeugen ▪ ggf. Interaktion mit anderen ÖPNV-Fahrzeugen (z. B. Busse) ▪ Einhalten des Geschwindigkeitsprofils ▪ Berücksichtigung von Signalen und Verkehrszeichen ▪ Reaktion auf Not- und Ausnahmesituationen
Unabhängiger Bahnkörper	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrt nach Vorgabe von Zugsicherungssystemen ▪ Reaktion auf Not- und Ausnahmesituationen
Gesamter Betriebsbereich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kommunikation und Interaktion mit Leitzentrale, Werkstatt, Passagieren, anderen Fahrzeugführern oder Verkehrsteilnehmern

Bei den kommenden Ausführungen ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine Analyse der grundlegenden Funktionen handelt und bauteilspezifische Eigenschaften nicht betrachtet werden. Darüber hinaus wird kein Bezug zu den derzeitigen technischen Möglichkeiten hergestellt. Wie in Kapitel 2 dargelegt, befindet sich der technologische Stand zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht auf einem ausreichend hohen

Niveau. Genauere Erläuterungen hinsichtlich der Sensoren und Algorithmen zur Ermöglichung der Funktionen werden in Kapitel 3.2 dargestellt. Funktionen, die ausschließlich die Automatisierung des Straßenbahndepots betreffen, werden nicht behandelt.

Die Grundfunktionen zur Automatisierung ergeben sich aus der ebenfalls in der Robotik bekannten Steuerungsmethodik Sense – Plan – Act (Wahrnehmen – Planen – Handeln). Im Wesentlichen werden hier mithilfe sensorischer Umgebungswahrnehmung und Lokalisierung, in Kombination mit entsprechender softwareseitiger Datenauswertung, situationsabhängige Handlungen geplant und anschließend über die Ansteuerung der Aktorik ausgeführt. Die Umgebungserfassung (Wahrnehmen) umfasst dabei unterschiedliche Teilfunktionen. Im Fokus stehen die Detektion und Klassifikation von Objekten aller Art. Einerseits ist es erforderlich, statische bzw. ortsfeste Elemente wie Schienen, Verkehrszeichen und Verkehrssignale zu identifizieren und zu interpretieren. Aus ihnen lassen sich die unmittelbar bevorstehende, eigene Bewegungsrichtung und die zur Teilnahme am Verkehr notwendigen lokalen Regelungen und Rahmenbedingungen ableiten. Auch Kreuzungen, Haltestellen und Bahnübergänge müssen als solche erkannt werden können. Andererseits ist die Erfassung dynamischer, nicht ortsfester Elemente, wie z. B. sonstige Verkehrsteilnehmer im relevanten Verkehrsraum, unabdingbar. Hierbei ist jedoch nicht nur die Detektion und Entfernungsschätzung zum Objekt wichtig, sondern auch die Zuordnung von verkehrsteilnehmerspezifischen Eigenschaften. Diese erlaubt basierend auf der Unterscheidung zwischen Hindernissen und Nicht-Hindernissen sowie der zusätzlichen Intentionsabwägung eine Bewertung der Situation und des vorliegenden Kollisionsrisikos. Um neben der sensorbasierten, digitalen Abbildung der Umgebung auch den eigenen Standort und die eigene Orientierung in ebendieser zu bestimmen, ist die Fahrzeuglokalisierung (Wahrnehmen) die zweite Säule der Wahrnehmung. Diese wird sowohl durch absolute, satellitenseitige Verortung als auch durch die Messung von relativen Bewegungen oder der Positionierung im digitalen Zwilling des Umfeldes realisiert.

Unter Verwendung der Erkenntnisse aus Umgebungswahrnehmung und Eigenlokalisierung ist anschließend die Planung des eigenen Verhaltens und der Trajektorie (Planen) erforderlich. Dabei wird kontinuierlich auf sich ändernde Situationen und damit einhergehende Risikozustände reagiert. Grundsätzlich muss ein mögliches Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer antizipiert und bei der Bewegungsplanung mitberücksichtigt werden. Gleichzeitig sind die Einhaltung des Fahrplans und die Minimierung von Verzögerungen anzustreben. Letztendlich wird die auf Umgebungsdaten basierte und softwareseitig evaluierte Fahrzeugführung (Handeln) über Ansteuerung der Motoren umgesetzt.

Unter der Annahme, dass die bisher beschriebenen Grundfunktionen mit sehr hoher Zuverlässigkeit und unter Erfüllung aller potenziellen Sicherheitsanforderungen ausgeführt werden, ist bereits eine automatisierte Handhabung einiger in Tabelle 3-1 aufgeführten Aufgaben denkbar. Zur vollumfänglichen Abbildung des Aufgabenspektrums einer Straßenbahn sind allerdings weitere Fähigkeiten nötig. Dadurch lassen sich komplett neue Potenziale erschließen. Mithilfe einer automatisierten Zustandsüberwachung (Wahrnehmen) werden technische Komponenten, Betriebsmittel oder auch der Fahrzeuginnenraum überwacht. Durch den Einsatz von geeigneten Sensoren können fahrzeugseitige und infrastrukturseitige Defekte frühzeitig erkannt und gegebenenfalls sogar selbst behandelt werden. Zudem kann der Wartungsbedarf unterschiedlicher elektrischer und mechanischer Bestandteile im Zuge der Analyse entsprechender Daten abgeleitet und daraus die aktuelle Betriebstauglichkeit bewertet werden. Im Innenraum sind über die Auswertung optischer Daten beispielsweise Vandalismus oder medizinischen Notfällen identifizierbar. Die genannten Einsatzfelder sind sowohl für den Betrieb mit als auch ohne Fahrer von Bedeutung.

Zum kontinuierlichen Informationsaustausch zwischen Straßenbahnfahrzeugen, anderen Verkehrsteilnehmern, der Infrastruktur und der Leitzentrale ist Vernetzung unabdingbar. Diese erlaubt nicht nur eine optimierte Form der bereits etablierten manuellen Ansteuerung von Infrastrukturelementen wie Weichen oder Lichtsignalanlagen, sondern steuert durch die Übermittlung von relevanten Daten auch zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz bei. Aufgrund der hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit, Robustheit, Latenz und Übertragungsraten sowie der notwendigen Vernetzung mit dem stra-

Benutzenden Verkehr, ist hierbei unbedingt auf V2X-Technologien zurückzugreifen. Im Straßenverkehr werden Vernetzungsfunktionen nach deren Komplexität und Anforderungen unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Diese Klassifizierung kann ebenfalls für den Straßenbahnverkehr, der in Zukunft ein Teil des vernetzten städtischen Verkehrssystems darstellen wird, angewandt werden. Dabei wird zwischen sogenannten Tag 1, Tag 2 und Tag 3 Anwendungen differenziert, die auf der Roadmap des Car 2 Car Communication Consortiums definiert werden [69]:

- Tag 1: Awareness Driving
 - Übermittlung von Statusinformationen wie Position und Geschwindigkeit oder besonderer Situationen zur Unterstützung der Umfeldwahrnehmung des Nutzers
 - Assistierende Funktionen
 - Beispiele: Warnung vor Bauarbeiten, Warnung von sich nähernden Einsatzfahrzeugen, Anzeige von Verkehrsschildern oder LSA-Signalen im Fahrzeug
- Tag 2: Sensing Driving
 - Übermittlung von Informationen, die über Sensoren anderer Verkehrsteilnehmer oder der Infrastruktur erfasst wurden (beispielsweise detektierte Objekte oder VRUs)
 - Nutzung als weitere Redundanzebene für das automatisierte Fahren (Erweiterung der eigenermittelten um fremdermittelte Umgebungsdaten)
 - Beispiele: kooperative Perzeption, Warnung vor VRUs, Priorisierung spezieller Fahrzeuge an signalisierten Kreuzungen
- Tag 3: Cooperative Driving
 - Übermittlung von Informationen, die Aufschluss über die Intentionen unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer geben
 - Nutzung für intelligente Koordination und Interaktion automatisierter Fahrzeuge sowie Unterstützung der fahrzeuginternen Intentionsschätzung
 - Beispiele: Platooning, kooperative Fahrspurwechsel, kooperatives Überholen

Teilweise durch Unterfunktionen der Vernetzung abgedeckt, aber dennoch erforderlich, ist ebenfalls die Bereitstellung automatisierter Interaktionsmöglichkeiten (Handeln). Diese müssen vor allem bei Abwesenheit von Fahrerzeugführer und sonstigem Personal in der Bahn die Informationsbereitstellung an Passagiere gewährleisten. Auch Personen oder Verkehrsteilnehmer im umliegenden Verkehrsraum benötigen bei fehlender gestenbasierter Kommunikation möglicherweise andere Wege, die Intentionen automatisierter Straßenbahnfahrzeuge zu interpretieren. Abbildung 3-1 fasst die in diesem Unterkapitel beschriebenen Grundfunktionen und deren Unterfunktionen zusammen.

3.1.3 Chancen, Herausforderungen und Anforderungen automatisierter und vernetzter Funktionen

Mithilfe der beschriebenen Grundfunktionen ist es unter der Annahme einer idealen Funktionsweise möglich, die in Tabelle 3-1 genannten Aufgaben im Straßenbahnverkehr zu bewerkstelligen. Dennoch ergeben sich hierzu einige Herausforderungen, die sich zu notwendigen Anforderungen formulieren lassen. Diese sind in der im Anhang befindlichen Tabelle A-2 stichwortartig zusammengetragen. Dabei werden die Hauptaufgaben der Straßenbahnautomatisierung in Teilaufgaben untergliedert und ihnen werden benötigte Grundfunktionen zugeordnet. Neben den Herausforderungen und Anforderungen werden außerdem Chancen aufgezeigt, die sich potenziell mit der Automatisierung realisieren lassen. Insgesamt handelt es sich, wie grundsätzlich in Kapitel 3.1, um eine Sammlung qualitativer Aussagen, die zu einem großen Teil aus den projektteaminternen Workshops generiert werden konnten. Diese werden nach der Darstellung und Bewertung erforderlicher Technologien (siehe Kapitel 3.2) in konkretisierte, zielorientierte Lösungskonzepte überführt (siehe Kapitel 4).

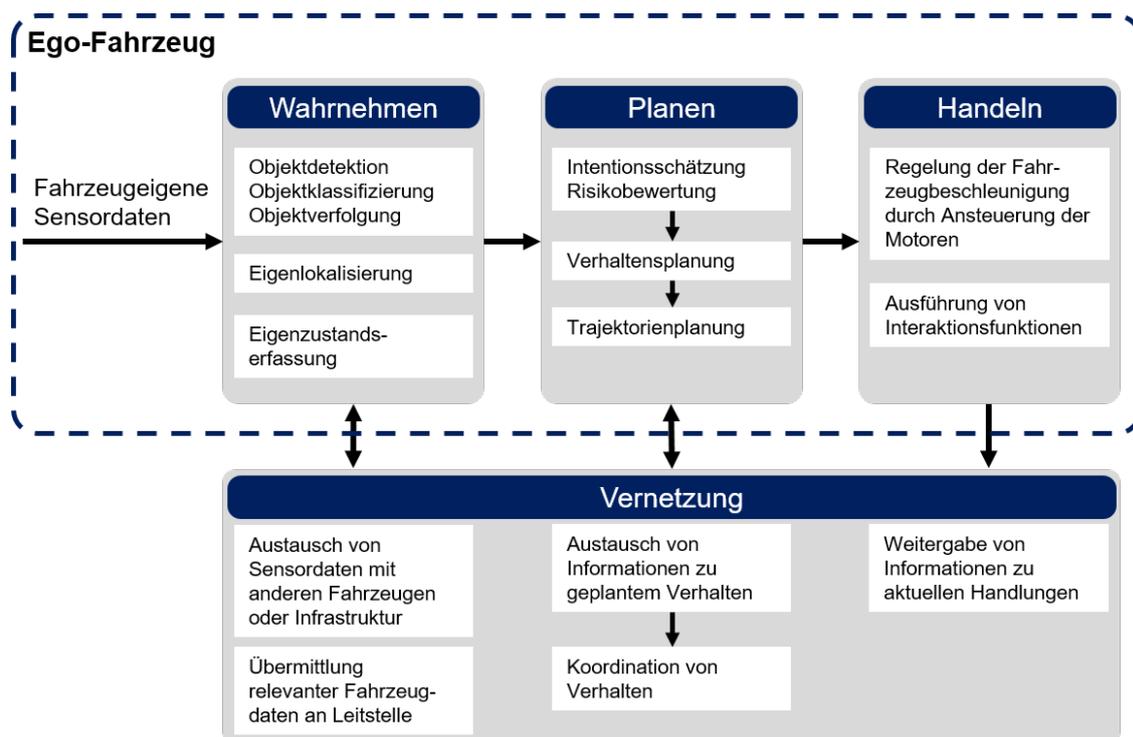


Abbildung 3-1: Grundfunktionen der Automatisierung

3.2 Die einzelnen Querschnittstechnologien

3.2.1 Übersicht

Um die in Kapitel 3.1 vorgestellten Automatisierungs- und Vernetzungsfunktionen umsetzen zu können, steht eine Vielzahl von potenziellen Technologien zur Verfügung. Da diese größtenteils bereits in anderen Wirtschaftszweigen zum Einsatz kommen, oder ein Einsatz in weiteren Wirtschaftszweigen denkbar ist, wird im Folgenden von Querschnittstechnologien gesprochen. Im Zuge dieses Berichts werden die in Abbildung 3-2 dargestellten Querschnittstechnologien vorgestellt, verglichen und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Automatisierung des Straßenbahnbetriebs evaluiert. Der Fokus liegt dabei auf der Sensorik zur Realisierung von Umgebungserfassung und Lokalisierung, der intelligenten Datenverarbeitung sowie den Kommunikationstechnologien und der Kommunikationsinfrastruktur. Deren Nutzung in unterschiedlichen Konfigurationen zur Realisierung unterschiedlicher Potenziale und Zielsetzungen der Automatisierung wird in Kapitel 4 (insbes. Unterkapitel 4.3) behandelt.

3.2.2 Sensorik

3.2.2.1 Sensorik zur Umgebungswahrnehmung

Zur Automatisierung der bereits beschriebenen Teilfunktionen der Umgebungswahrnehmung kommen unterschiedliche Sensortypen infrage. Diese sind aus der Robotik oder dem assistierten und teilautomatisierten Straßenverkehr bekannt. Generell werden für die Erfassung des Umfeldes sogenannte exterozeptive (umgebungswahrnehmende) Sensoren verwendet. Diese lassen sich in aktive und passive Sensoren unterteilen. Aktive Sensoren emittieren Schallwellen oder elektromagnetische Strahlung in eine vordefinierte Raumrichtung und messen anschließend die von umliegenden Oberflächen oder Objekten

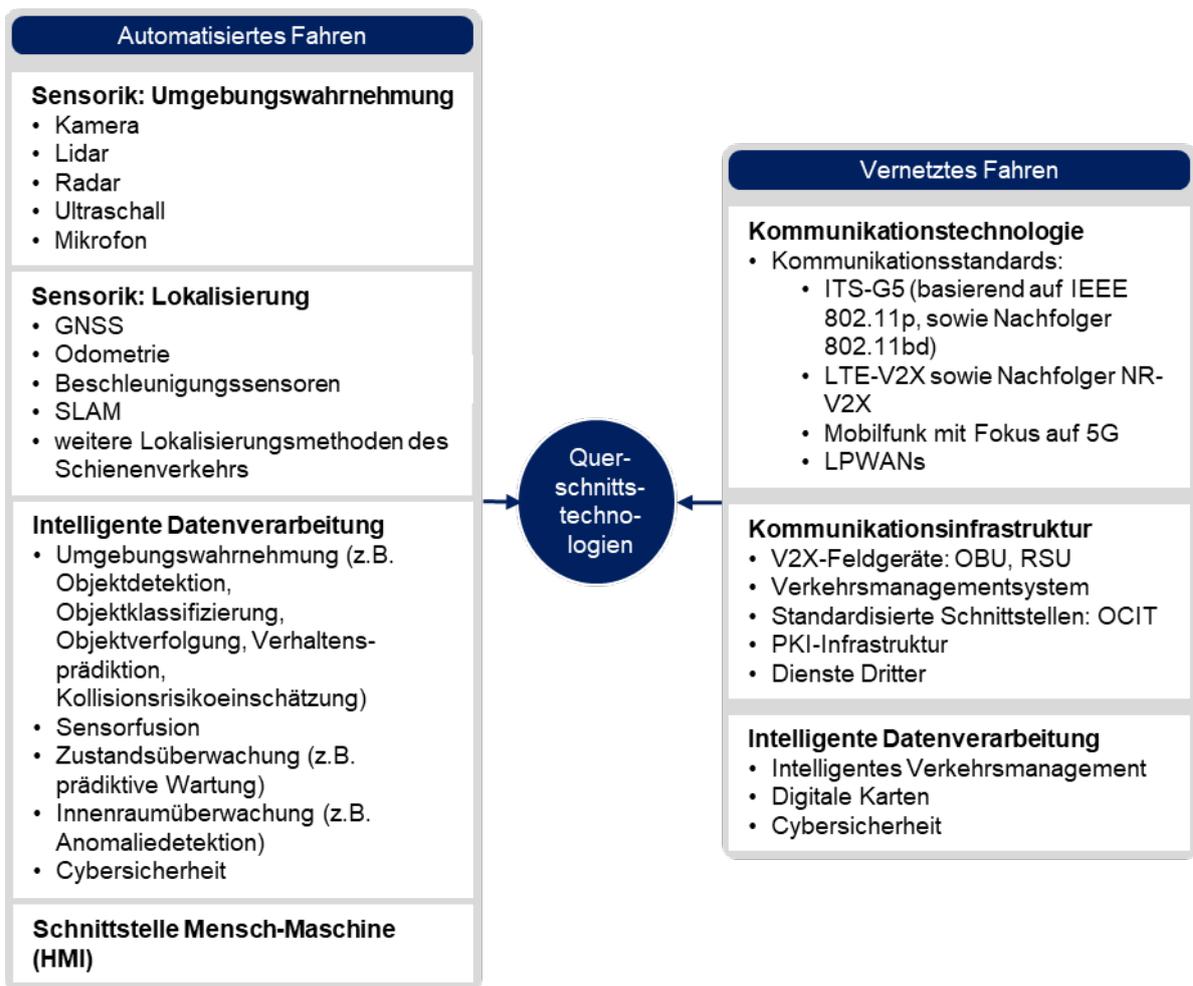


Abbildung 3-2: Querschnittstechnologien des automatisierten und vernetzten Fahrens

ausgehenden Reflexionen. Durch die Auswertung der zeitlichen Differenz zwischen Emission und Eingang der Rückstrahlung können Position und Entfernung der Objekte bestimmt werden. Dieser Sensor-kategorie sind Radar, LiDAR und Ultraschallsensoren zuzuordnen. Demgegenüber emittieren passive Sensoren wie beispielsweise Kameras keine selbsterzeugte Strahlung, sondern erfassen lediglich die elektromagnetische Strahlung aus der Umgebung.

Radar (Radio Detection and Ranging)

Radarsysteme kommen seit vielen Jahren in verschiedenen Branchen wie der Luftfahrt, dem Militär oder der Meteorologie zum Einsatz. Speziell für den Automobilbereich entwickelte Millimeterwellenradare finden großflächig in Abstandsregeltempomaten Anwendung. Die hohe Marktreife äußert sich in den vergleichsweise niedrigen Stückpreisen von 50 – 200 € und der Vielzahl der Hersteller [70, S. 6541]. Radarsysteme bestehen im Wesentlichen aus vier Hauptkomponenten: Sendeeinheit, Antenne, Empfangseinheit und Recheneinheit. Entsprechend des bereits beschriebenen Funktionsprinzips aktiver Sensoren, emittiert die Sendeeinheit elektromagnetische Wellen einer Frequenz von typischerweise 76 GHz in eine bekannte Richtung, die anschließend an Oberflächen oder Objekten hin zum Empfängersystem reflektiert wird. Aus den Informationen des reflektierten Signals können Position und Entfernung des Objektes ermittelt werden. Des Weiteren ist unter Berücksichtigung des Doppler-Effekts die relative Geschwindigkeit

zwischen Ziel und Sensor ohne weitere Zwischenschritte erkennbar [71, S. 97]. Zu den funktionalen Vorteilen von Radarsensoren zählen die große Reichweite (bis zu 250 m), die Unabhängigkeit bzw. Unbeeinflussbarkeit von Licht- und Wetterverhältnissen, der geringe Bauraum, die hohe Robustheit und die Möglichkeit, mehrere Ziele zu detektieren und zu verfolgen [72, S. 651] [70, S. 6543]. Andererseits ist es aufgrund der geringen Winkelauflösung kaum möglich, auf die genaue Kontur oder Form von detektierten Körpern zu schließen, was deren Klassifizierung erschwert. Die Abgrenzung einzelner Objekte voneinander wird mit zunehmender Entfernung nahezu unmöglich [71, S. 97]. Bezugnehmend auf die Erkenntnisse des Testbetriebs der automatisierten Straßenbahn in Potsdam [38, S. 6], haben metallische Gegenstände eine verstärkende Wirkung auf das Radarsignal, wodurch diese größer erscheinen und angrenzende Objekte teilweise sogar überstrahlen. Andere Materialien wie beispielsweise Holz sind nahezu transparent für Radarstrahlung.

LiDAR (Light Detection and Ranging)

Im Gegensatz zum Radar emittieren LiDAR-Sensoren Laserstrahlung, die typischerweise eine Wellenlänge von 905 nm ausweist und für das menschliche Auge weder sichtbar noch schädlich ist. In Anwendungen im Straßenverkehr werden laserbasierte Sensoren häufig zur Erstellung einer dreidimensionalen Punktwolke der Umgebung verwendet. Die 360°-Abdeckung wird mithilfe von rotierenden Spiegeln erzielt, die die Richtung der Laserimpulse variieren. Da ein einzelner Laser auf diese Weise lediglich eine flache Detektionsebene aufspannt, verwenden aktuelle Sensoren 4 bis 128 Kanäle, die einen geringfügigen Winkelversatz zueinander aufweisen und so für die vertikale Auflösung verantwortlich sind. Dadurch lassen sich hochgenaue digitale Karten generieren. Zu den Stärken der LiDAR-Technik gehören eine hohe Genauigkeit bei der Entfernungsmessung, eine hohe horizontale Winkelauflösung und eine Reichweite von bis zu 200 m unter optimalen Umgebungsbedingungen. Damit können Objekte durch den Einsatz entsprechender Algorithmen nicht nur detektiert, sondern auch zuverlässig klassifiziert werden. Infolge der Identifikation einzelner Körperteile und der daraus resultierenden Ableitung der Haltung sind auch die Schätzung von Intentionen oder die Vorhersage von Bewegungen umsetzbar [71, S. 98]. Neben hohen Preisen, die je nach Anzahl der integrierten Kanäle bis zu 75.000 € betragen können, haben LiDAR-Sensoren aufgrund der zugrundeliegenden Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung einige prinzipielle Nachteile zu verzeichnen. Zuverlässigkeit und Reichweite werden stark von den vorherrschenden Wetterbedingungen beeinflusst. Wegen der im Vergleich zum Radar weitaus geringeren Wellenlänge ist die Interferenz zwischen Laserstrahlung und kleinen Partikeln wie Nebeltropfen, Regen oder Schnee deutlich ausgeprägter. Dies führt im Extremfall zu einer Anhäufung von irrtümlichen Objektdetektionen und verhindert den störungsfreien Betrieb von Automatisierungsfunktionen [70, S. 6545] [72, S. 652] [71, S. 98]. Zusätzliche Nachteile ergeben sich aus dem vergleichsweise hohen Energiebedarf, der potenziellen Spiegelung der Laserstrahlung an glatten Oberflächen und dem erhöhten Wartungsaufwand aufgrund rotierender, mechanischer Teile.

Ultraschallsensoren

Ultraschallsensoren finden mittlerweile nahezu in allen neuen Straßenfahrzeugen als Hauptbestandteil von Einparkhilfen Anwendung. Darüber hinaus eignen sie sich während der Fahrt zur Detektion anderer Verkehrsteilnehmer im toten Winkel. Physikalisch unterscheiden sich Ultraschallsensoren in der Hinsicht von Radar und LiDAR, dass keine elektromagnetische Strahlung, sondern Schallwellen ausgesendet werden. Dabei sind die Ausbreitungscharakteristiken, vor allem die Ausbreitungsgeschwindigkeit, stark durch die Eigenschaften des Trägermediums Luft, wie beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit oder Wind, beeinflussbar [70, S. 6546]. Demgegenüber wirken sich Niederschläge, Nebel oder andere in der Luft befindliche Partikel nur geringfügig auf die Leistungsfähigkeit aus. Infolge der geringen Reichweite, Auflösung und Genauigkeit stellen Ultraschallsensoren lediglich eine Option zur robusten und kostengünstigen Detektion von Objekten in unmittelbarer Umgebung zum Fahrzeug dar.

Kameras

Als passive exterozeptive Sensoren übersetzen Kameras mithilfe des photoelektrischen Effekts eingehende Photonen in elektrische Ladungen. Vergleichbar mit dem menschlichen Auge können Wellenlängen des sichtbaren Lichts (400 – 780 nm) erfasst werden. Heute stehen hierfür zwei unterschiedliche Typen von Bildsensoren zur Verfügung: CCD- und CMOS-Sensoren (CCD: charge-coupled device, CMOS: complementary metal-oxide semiconductor). Aufgrund der niedrigeren Kosten und des geringeren Leistungsbedarfs bei gleichzeitig hoher Qualität setzen sich letztere vermehrt für den Einsatz im Automobilbereich durch [72, S. 653]. Grundsätzlich wird außerdem zwischen Mono- und Stereokamerasystemen unterschieden. Entsprechend der Namensgebung wird in Monokamerasystemen lediglich eine Kamera verwendet, sodass es ohne zusätzlichen Rechenaufwand nicht möglich ist, Tiefeninformationen aus den Aufnahmen zu generieren. Stereokamerasysteme bestehen demgegenüber aus zwei geringfügig zueinander winkelvesetzten Kameras, die eine dreidimensionale Wahrnehmung der Umgebung und die Messung von Entfernungen erlauben. Neben der Entfernungsmessung zählen die Erkennung und Interpretation von Verkehrszeichen und Signalen, die Detektion und Klassifizierung von Objekten sowie die Vorhersage von Bewegungsprofilen zu den grundlegenden Applikationen. All diese Funktionen werden durch Anwendung moderner Bildverarbeitungsalgorithmen realisiert. Eine hohe Reichweite, Genauigkeit und Klassifizierungsgüte lässt sich allerdings primär unter optimalen Umgebungsbedingungen erzielen. Starker Niederschlag, Nebel, Staub oder ungünstige Belichtungsverhältnisse führen zu einer unmittelbaren Verschlechterung der Performance [70, 72, 71].

Infrarotkameras

Infrarot- bzw. Wärmebildkameras sind ebenfalls passive Sensoren, die jedoch für den Menschen nicht sichtbares Licht im Wellenlängenbereich von 780 nm bis 1000 nm zur Auswertung der Umgebung heranziehen. Die dabei aufgezeichneten Wärmesignaturen von Objekten und Oberflächen sind besonders im Segmentierungsprozess von Nutzen. In Abhängigkeit von der eingestellten Sensitivität lassen sich bereits kleine Temperaturdifferenzen von Oberflächen im bildlichen Ergebnis voneinander abgrenzen. Infolge der ausgezeichneten Verträglichkeit mit schlechten Belichtungs- oder Wetterverhältnissen bieten sich diese Sensoren hervorragend zur Unterstützung konventioneller Kamerasysteme an. Zu beachten sind allerdings die mit zunehmender Qualität stark ansteigenden Kosten sowie die geringere Auflösung und Genauigkeit [72, S. 653].

Funktionaler Vergleich

Zur besseren Veranschaulichung der unterschiedlichen Eigenschaften der zuvor beschriebenen Sensortypen werden diese in der Tabelle 3-2 hinsichtlich verschiedener Kriterien gegenübergestellt. Somit kann basierend auf diesem qualitativen Vergleich die individuelle Eignung für einzelne Teilfunktionen der automatisierten Umgebungserfassung bewertet werden. Die Bewertungsskala reicht dabei von „sehr schlecht“ (--) über „schlecht“ (-), „neutral“ (o) und „gut“ (+) bis „sehr gut“ (++).

Aus der tabellarischen Übersicht geht hervor, dass ein Sensortyp allein nicht den Anforderungen alltäglicher Situationen im Straßenbahnverkehr gerecht wird. Infolgedessen ist es unbedingt notwendig, die Daten verschiedener Sensoren zu fusionieren. Dieser als Sensorfusion bezeichnete Vorgang wird in Kapitel 3.2.3.2 näher erläutert. Neben Radar, LiDAR, Ultraschall und Kamera, die ausschließlich optische Informationen aus der Umgebung extrahieren, ist auch die Verwendung von Mikrofonen zur Auswertung akustischer Signale denkbar. Mithilfe von Algorithmen zur Lokalisierung von Geräuschquellen kann eine weitere Redundanzebene im Umgebungsmodell des zu automatisierenden Systems geschaffen werden. Im Vergleich zu den konventionellen Sensortypen wurde die Integration von akustikbasierten Ansätzen bisher kaum erforscht [73, S. 174].

TABELLE 3-2: FUNKTIONALER VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER SENSORTYPEN

Bewertungskriterien	Radar	LiDAR	Ultraschall	Kamera	IR-Kamera
Auflösung	o	++	-	++	o
Reichweite	++	++	-	+	++
Genauigkeit	o	++	-	++	+
Robustheit gegen Wetterbedingungen	++	o	+	-	++
Robustheit gegen Belichtungsbedingungen	++	++	++	-	++
Kosten	++	-	++	+	-
Objektdetektion	++	++	++	+	+
Objektklassifizierung	-	+	--	++	o
Direkte Geschwindigkeitsinformationen	++	+	o	--	--
Intentionsschätzung	-	+	--	++	o

Fazit zur Umgebungssensorik

Umgebungssensorik wird zur Wahrnehmung von Situationen außerhalb des Fahrzeugs eingesetzt und soll die automatische Wahrnehmung bestimmter Aufgaben ermöglichen, die bislang das Fahrpersonal bei der Umgebungswahrnehmung übernimmt. Aktuell können Umgebungssensoren dies bereits für bestimmte Anwendungsfälle mit einer hohen Zuverlässigkeit leisten, es fehlt jedoch noch ein Nachweis gleicher Sicherheit, so dass sie aktuell nur als Assistenzsysteme, jedoch nicht als Ersatz für verantwortliche Wahrnehmung und Handlung des Fahrpersonals zum Einsatz kommen. In manchen Bereichen ist die Wahrnehmungsleistung besser als die menschliche Wahrnehmung, aber mit einem anderen Fähigkeitsprofil, also nicht in allen Fällen, speziell in der komplexen Situationswahrnehmung und -bewertung.

Der derzeitige Entwicklungsstand erfordert die Nutzung unterschiedlicher Sensortypen (Kamera, Radar und LiDAR) zur Umsetzung sicherheitskritischer Automatisierungsfunktionen. Die Sensortechnik ist bisher hauptsächlich für Anwendung im Automobilbereich konzipiert, in Straßenbahnprojekten mussten Modifikationen vorgenommen werden.

In den nächsten Jahren ist mit Performancesteigerungen im Bereich der intelligenten Datenverarbeitung und zunehmender Vernetzung zu rechnen, wodurch der Verzicht auf einzelne Sensortypen vorstellbar wird. Anwendungs- und situationsspezifischen Rahmenbedingungen und Anforderungen sind dabei sorgfältig in die Auswahl geeigneter Technologien einzubeziehen.

3.2.2.2 Sensorik zur Lokalisierung

Die Fähigkeit eines Fahrzeuges, seine eigene Position hochgenau und zuverlässig zu erfassen, spielt je nach Verkehrsmittel eine unterschiedlich große Rolle. Während Lokalisierungsinformationen im U-Bahn- und Eisenbahnverkehr zur Zugsicherung unabdingbar sind, stellt das bisherige Fahren auf Sicht im Straßenbahnbereich geringere Ansprüche an das Ortungsvermögen. Im Zuge einer zunehmenden Automati-

sierung im Straßenbahnsektor, gewinnt die Fahrzeuglokalisierung allerdings erheblich an Bedeutung. Einerseits wird die Überwachung der Fahrzeuge aus der Leitstelle heraus dadurch erst möglich, andererseits werden relevante Aufgaben wie das Anfahren und Handhaben von Haltestellen oder Bahnübergängen sowie die Identifikation von kartierten Infrastrukturelementen wie Weichen oder Signalanlagen erheblich vereinfacht. Die Kenntnis über die aktuelle Position, in Kombination mit einer digitalisierten Karte, stellt insgesamt eine weitere Redundanzebene für das Umgebungsmodell dar. Zuletzt ist anzumerken, dass Vernetzungsfunktionen ohne detaillierte Positionsdaten wenig bis kaum Anwendungspotenzial aufweisen.

Zur Realisierung einer präzisen Straßenbahnlokalisierung steht eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung. Dabei handelt es sich primär um bereits im Schienenverkehr eingesetzte Verfahren und um typische Methoden aus der Robotik und dem Straßenverkehr. Erstere sind dabei teilweise ausschließlich streckenseitig verbaut oder besitzen zumindest ein streckenseitiges Gegenstück zur fahrzeugseitigen Ausrüstung (z. B. Balisen). Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Kosten sowie den Implementierungsaufwand, sollte die gewünschte Infrastruktur nicht schon im Schienennetz vorhanden sein. Neben der Komponenteninstallation wirken sich weitere Eigenschaften direkt auf die Eignung eines Lokalisierungsverfahrens aus [74, S. 84]:

- Art der Ortsinformationen:
 - absolut (direkte Angabe, bspw. geografische Koordinaten)
 - relativ (indirekte Angabe, bspw. durch Geschwindigkeitsmessung)
 - diskret (endliche Erfassung an bestimmten Punkten im Raum)
 - kontinuierlich (dauerhafte Erfassung)
- Störanfälligkeiten
- Art der Informationsübertragung:
 - Funk,
 - fahrzeugseitige Signalgewinnung,
 - streckenseitige Signalgewinnung ohne Fahrzeugbeteiligung

In Tabelle 3-3 werden gängige Lokalisierungsverfahren aus dem Schienenverkehr aufgezeigt und deren Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile beschrieben. Aus Tabelle 3-3 geht hervor, dass bei den meisten klassisch schienenverkehrsbezogenen Lokalisierungsmethoden diskrete und absolute Ortsinformationen generiert werden. Damit lassen sich die Hauptaufgaben der punkt- oder linienförmigen Zugbeeinflussung, die auf dem Prinzip der Freimeldung von Gleis- oder Streckenabschnitten beruhen, bewerkstelligen. Unter Hinzunahme von fahrwerkseitigen Wegstreckenzählern (Odometrie), Doppler-Radar oder Wirbelstromsensoren ist zusätzlich eine Erweiterung um eine kontinuierliche, relative Positionskomponente gegeben, die eine Schätzung zwischen vordefinierten Fixpunkten ermöglicht.

Der automatisierte Betrieb von Straßenbahnfahrzeuge stellt sehr hohe Anforderungen an eine hochgenaue, kontinuierliche und fahrzeugseitige Lokalisierung. Infolge der derzeit fehlenden Notwendigkeit der Lokalisierung, die aus dem Fahren auf Sicht resultiert, sind derzeit weder Straßenbahnfahrzeuge noch das Straßenbahnnetz mit den erforderlichen Komponenten für die oben genannten Lokalisierungsverfahren ausgestattet. Unter Berücksichtigung der zur Umgebungswahrnehmung genutzten Sensoren, ist daher die Integration von aus der Robotik oder dem automatisierten Straßenverkehr bekannten Techniken zu analysieren. Dazu zählen globaler Satellitennavigationssysteme und inertielle Messeinheiten (IMU) sowie Methoden basierend auf aktiven und passiven Sensoren.

Unter dem Sammelbegriff globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) werden verschiedene regionale Systeme zusammengefasst. Dazu zählen beispielsweise das von der EU betriebene Galileo, das US-amerikanische GPS, das russische GLONASS und das chinesische Beidou. Durch die Messung von Entfernungen zu mindestens drei unterschiedlichen Satelliten des jeweiligen GNSS lassen sich absolute, geographische Positionsdaten ermitteln. Diese stehen darüber hinaus kontinuierlich zur Verfügung. Die Genauigkeit der geographischen Lokalisierung liegt grundsätzlich in der Größenordnung einiger Meter, kann jedoch

TABELLE 3-3: FUNKTIONSWEISE UND CHARAKTERISIERUNG VON LOKALISIERUNGSVERFAHREN AUS DEM SCHIENENVERKEHR

Verfahren	Funktionsweise	Vorteile	Nachteile
Odometrie	Wegmessung anhand der Daten des Vortriebsystems, im einfachsten Fall durch Radumdrehungszähler	Sehr robust, einfach, kontinuierliche Messung	zunehmende Abweichungen durch Schlupf und Radabrieb
Doppler-Radar	Messung der momentanen Geschwindigkeit mithilfe des Dopplerverfahrens	Radunabhängig, kontinuierlich	Hohe Ungenauigkeit
Achszähler	Messung von Spannungsabfall innerhalb eines Hochfrequenzschwingkreises bei der Überfahrt eines Rads	Hohe Genauigkeit, da Verbauposition auf Schiene bekannt ist	Punktförmige Messung, infrastrukturseitige Installation, Ortsinformationen gelangen nicht ohne weiteres ins Fahrzeug
Balise	Übertragung der Ortsinformationen in das Fahrzeug erhält beim Überfahren eines induktiven Transponders per Funk	Hohe Präzision, fehlerarm	Punktförmige Messung, infrastrukturseitige Installation, Installationsaufwand pro Balise
Gleisstromkreise	Detektion des Kurzschlusses bei der Durchfahrt einer Achse eines Fahrzeuges in einem an der Schiene angelegten Stromkreis.	Technisch einfach, einsetzbar für Zugschlussmeldung und Zugintegrationsprüfung	Abschnittsweise Messung, infrastrukturseitige Installation, Ortsinformationen gelangen nicht ohne weiteres ins Fahrzeug
Linienleiterschleife	Infrastrukturell verlegte Linienleiter kreuzen sich alle 100 m, wodurch sich die gemessene Phasenlage um 180° verschiebt. Dies kann erfasst und bestimmten Positionen zugeordnet werden.	Hohe Präzision, kaum stör anfällig	Punktförmige Messung, Kostenintensiv, infrastrukturseitige Installation
Wirbelstromsensor	Inhomogenität im Gleis induziert eine messbare Spannungsänderung im Sensor. Mithilfe von zwei Sensoren, deren Abstand bekannt ist, können über den zeitlichen Versatz identischer Spannungsänderungen Geschwindigkeitsinformationen gewonnen werden.	Kontinuierliche Messung	Störanfälligkeit durch Geschwindigkeit, elektromagnetische Einflüsse und Witterung

durch die Nutzung von umliegenden Basisstationen zur Bereitstellung von Korrekturdaten auf wenige Zentimeter verbessert werden [75, 76]. Eine solche Korrektur basierend auf der relativen Position zwischen Fahrzeug und Basisstation wird als Real Time Kinematik (RTK) bezeichnet. GNSS zeichnet sich im Allgemeinen durch geringe Kosten und hohe Effizienz aus, ist allerdings aufgrund von Signalverdeckungen durch Gebäude oder dichte Vegetation und die Abhängigkeit von Drittanbietern nicht als alleinstehende Lösung geeignet [77, S. 5]. Zur Unterstützung oder Absicherung bei gestörtem oder fehlerhaftem Signal von GNSS-basierter Fahrzeuglokalisierung können inertielle Messeinheiten, auch als IMUs bezeichnet, genutzt werden. Diese bestehen im Wesentlichen aus Beschleunigungs- oder Drehratensensoren, die in moderner Ausführung mit piezoelektrischen oder optischen Prinzipien funktionieren. Damit lassen sich sehr hohe Genauigkeiten realisieren. Wie bei der Odometrie werden durch IMUs keine absoluten Positionsdaten generiert, sondern über die Integration von Beschleunigungswerten auf das Geschwindigkeits- und schließlich Wegprofil geschlossen. Um zu große kumulative Fehler zu bereinigen, ist in regelmäßigen Abständen eine Kalibrierung durch Referenzdaten erforderlich. Dies kann z. B. durch ortsfeste Referenzpunkte mit bekannten Positionsdaten erreicht werden.

Weitere Lokalisierungsmöglichkeiten beruhen auf dem kontinuierlichen Abgleich der sensorisch wahrgenommenen Umgebung mit vorangefertigten digitalen Karten. Diese Techniken nutzen besondere Strukturen im sichtbaren Umfeld, beispielsweise Gebäude, Infrastrukturelemente oder Vegetation, als sogenannte Landmarken. Die genauen Ortsinformationen der Landmarken sind auf einer bestehenden Karte hinterlegt, sodass ein Fahrzeug mit hoher Präzision lokalisiert werden kann. Im Straßen- oder Eisenbahnbereich bietet sich dieses Lokalisierungsverfahren aus zwei Gründen besonders gut an. Einerseits existiert eine Vielzahl potenzieller Merkmale in Form von schienenverkehrsspezifischen Infrastrukturelementen wie Oberleitungsmasten, Signalanlagen, Verkehrszeichen, Haltelinien oder gar Schienen. Andererseits hält sich der Aufwand im Erstellungsprozess des digitalen Umgebungsabbildes aufgrund des vordefinierten Liniennetzes in Grenzen. Die Kartierung eines Stadtgebietes für den automatisierten Straßenverkehr ist infolge der fehlenden Schienenbindung und den daraus resultierenden Bewegungsmöglichkeiten weit aus komplexer. Des Weiteren können senkrecht zur Fahrtrichtung auftretende Ortungsfehler im Zuge der reduzierten Freiheitsgrade des Schienenverkehrs korrigiert werden.

Zur Erkennung von Landmarken kommen die bereits erwähnten, aktiven und passiven Sensoren aus der Umgebungswahrnehmung zum Einsatz. Dabei ergeben sich aus den typischen Charakteristiken einzelner Sensortypen unterschiedliche Vor- und Nachteile. Im Zusammenspiel mit modernen Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichen Kameras die Identifikation verschiedenster Umgebungsdetails, sodass der Definition geeigneter Landmarken kaum Grenzen gesetzt sind. In vergangenen Studien konnten im Straßenverkehr Ortsinformationen mit durchschnittlich weniger als 0,3 m Positionsfehler erzielt werden [78, S. 301] [79, S. 189] [80, S. 154]. Zu den Nachteilen der kamerabasierten Lokalisierung zählen erwartungsgemäß die nicht vernachlässigbare Leistungsabnahme bei ungünstigen Wetter- und Belichtungsbedingungen sowie der weitaus höhere Rechenaufwand im Vergleich zu anderen Methoden wie GNSS, Odometrie oder IMUs. Anders als Kameras sind LiDAR- und Radarsensoren nicht unbedingt auf vorgefertigte digitale Karten angewiesen. Vielmehr können diese mithilfe der SLAM-Technologie (*Simultaneous Localization and Mapping*) in Echtzeit ein Abbild und somit eine Karte der Umgebung generieren, während zeitgleich die eigene Position innerhalb dieser Karte bestimmt wird [81, S. 99]. LiDAR-basierte Lokalisierung erzielt dabei im Gegensatz zu radarbasierter Lokalisierung höhere Genauigkeiten, was auf die zugrundeliegenden Eigenschaften der Sensortypen zurückzuführen ist. Andererseits werden je nach Detailtiefe bedeutend größere Speicherkapazitäten benötigt. Ferner nimmt auch der Zeitbedarf für die Aktualisierung der aktuellen Positionsdaten mit steigendem Informationsgehalt der Karte zu. Ein wesentlicher Nachteil der Nutzung von Radarsensoren ergibt sich aus der geringen Auflösung und der daraus resultierenden schlechten Objektklassifizierungsfähigkeit. Diese Eigenschaft schränkt dessen Verwendung als Sensor zur Fahrzeuglokalisierung stark ein, da hiermit eine begrenzte Auswahl an geeigneten und erkennbaren Landmarken einhergeht [77, S. 5]. Entgegen diesen Tatsachen wird dem Radar jedoch seit wenigen Jahren eine wichtigere Rolle in der Lokalisierung automatisierter Fahrzeuge zugesprochen. Mithilfe von bodendurchdringenden Radarsensoren (engl.: *localizing ground penetrating radar*, kurz *LGPR*) lassen sich in einer Tiefe von etwa zwei bis drei Metern die Strukturen des Untergrundes analysieren. Diese unterscheiden sich

insoweit, dass eine Kartierung vorgenommen werden kann, anhand derer im Nachhinein eine zentimetergenaue Positionsbestimmung realisierbar ist. Vorteile dieser Technologie sind die Robustheit gegen allgemeine Umweltbedingungen, hohe Präzision sowie ein geringer Energie- und Speicherbedarf [82, S. 98]. Die Autoren erwähnen explizit, dass metallische Komponenten der Fahrzeugkarosserie infolge von Reflexionen der elektromagnetischen Radarstrahlung an der Straßenoberfläche zu Fehlinterpretationen führen können. Vor dem Hintergrund, dass Straßenbahnfahrzeuge und bodennahe Infrastrukturelemente wie Schienen zu großen Teilen aus Metall bestehen, ist die Anwendung solcher Sensoren kritisch zu betrachten. Um fundierte Aussagen hinsichtlich der Eignung im Straßenbahnbereich zu formulieren ist eine grundlegende Erprobung erforderlich. Vergleichbare Publikationen konnten im Zuge der Literaturrecherche nicht identifiziert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Lokalisierung von Fahrzeugen besteht in der Nutzung von V2X und geeigneter Software. Mithilfe spezieller Algorithmen kann die Entfernung zwischen miteinander in Verbindung stehenden V2X-Komponenten (RSUs und OBUs) ermittelt werden. Da die genaue Position der fest installierten streckenseitigen RSUs bekannt ist (z. B. auf einer digitalen Karte hinterlegt), kann durch Kombination unterschiedlicher Entfernungsmessungen zwischen einer OBU und mehreren RSUs die Position eines Fahrzeuges bestimmt werden. Diese Funktionalität ist dabei nicht mit Modifikationen der Hardware verbunden, sondern lässt sich allein durch die Implementierung zusätzlicher Softwarekomponenten realisieren. Für die präzise Lokalisierung ist eine ausreichend dichte Abdeckung des relevanten Einsatzgebietes mit RSUs erforderlich. Da aufgrund der Vielzahl von Anwendungsfällen in Zukunft ohnehin mit einem Ausbau der innerstädtischen Kommunikationsnetzwerke zu rechnen ist und Fahrzeuge ebenfalls vermehrt mit OBUs ausgestattet sein werden, bietet diese Lokalisierungsmethode ein großes Potenzial bei vermeintlich niedrigem Aufwand. Zu beachten ist außerdem, dass diese Lokalisierungsfunktion unabhängig von der genutzten Direktkommunikationstechnologie (siehe Kapitel 3.2.6) umsetzbar ist [83].

Zur besseren Veranschaulichung der Eignung verschiedener Methoden und Sensoren für die Straßenbahnautomatisierung wurden diese in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

TABELLE 3-4: ZUSAMMENFASSUNG METHODEN UND SENSOREN UND DEREN EIGNUNG FÜR STRASSENBAHNAUTOMATISIERUNG

Methoden / Sensoren	Ortsinformationen		Komponenten Fahrzeug / Strecke	Eignung für Straßenbahnautomatisierung
	absolut / relativ	kontinuierlich / punktförmig		
Odometrie	relativ	kontinuierlich	Fahrzeug	++
Doppler-Radar	relativ	kontinuierlich	Fahrzeug	o
Achszähler	absolut	punktförmig	Strecke	--
Balise	absolut	punktförmig	Fahrzeug + Strecke	-
Linienleiterschleife	absolut	punktförmig	Fahrzeug + Strecke	--
Wirbelstromsensor	relativ	kontinuierlich	Fahrzeug	+
GNSS	absolut	kontinuierlich	Fahrzeug	++
IMU	relativ	kontinuierlich	Fahrzeug	++
Kamera	absolut	kontinuierlich	Fahrzeug	++
LiDAR-SLAM	absolut	kontinuierlich	Fahrzeug	++
Radar-SLAM	absolut	kontinuierlich	Fahrzeug	-
V2X	absolut	kontinuierlich	Fahrzeug + Strecke	++

Bewertungsskala: „sehr schlecht“ (--) über „schlecht“ (-), „neutral“ (o) und „gut“ (+) bis „sehr gut“ (++)

Fazit zur Lokalisierung

Positionierungsaufgaben werden derzeit vollständig vom Fahrer übernommen, beispielsweise die Flottensteuerung, Fahrplan-Einhaltung, genauer Halt an der Haltestelle oder der Abgleich der realen Fahrzeugposition mit dem Soll einer digitalen Karte. Klassische Ortungsverfahren aus dem Vollbahnbereich wurden meist zur Erfüllung der Anforderungen von Zugbeeinflussungssystemen konzipiert und stellen daher häufig nur punktförmige Ortsinformationen bereit. Im Bereich der Automatisierung, muss die Lokalisierungssensorik allerdings die Daten zur Erfüllung der beschriebenen Positionierungsaufgaben liefern. Hierzu reichen die klassischen Ortungsverfahren nicht aus.

Mit zunehmender Automatisierung sind sensorbasierte Alternativen notwendig. Fahrwerkseitige Wegensensoren (Odometrie), Beschleunigungs- und Lagesensoren (IMUs) und Satellitennavigation (GNSS) erzielen in Kombination gute Genauigkeiten bei geringen Kosten und niedrigem Energiebedarf. Umfeldsensorik kann neben der Umgebungswahrnehmung ebenfalls zur Fahrzeuglokalisierung verwendet werden, z. B. zum Abgleich der sensorisch erfassten Informationen aus der Umgebung mit hochgenauen Positionangaben aus digitalen Karten.

Eine Fusion von Sensordaten ist erforderlich, da keine Technik alleine über ausreichende Robustheit und Genauigkeit verfügt. Potenziale liegen darüber hinaus in der Vernetzung von straßen- sowie schienengebundenen Fahrzeugen untereinander und mit der Infrastruktur.

3.2.3 Fahrzeugbezogene intelligente Datenverarbeitung

In diesem Unterkapitel werden die grundlegenden Funktionsweisen, Lösungsansätze und Zusammenhänge der Umgebungswahrnehmung, Sensorfusion, Zustandsüberwachung, digitalen Karte und Verkehrssteuerung abstrakt vorgestellt. Dabei liegt der Fokus nicht auf einer Beschreibung von Algorithmen, sondern auf der Schaffung einer allgemeinen Wissensbasis, die zur Verbesserung des Verständnisses und Einschätzung potenzieller Anwendungsbereiche beiträgt. Darüber hinaus werden cybersicherheitstechnische Aspekte in direktem Zusammenhang mit automatisierten und vernetzten Fahrfunktionen erläutert.

3.2.3.1 Funktionen in der Umgebungswahrnehmung

Um basierend auf Kameradaten Informationen aus der aufgenommenen Szenerie zu generieren, sind verschiedene Techniken der Bildverarbeitung notwendig. Hierzu zählen beispielsweise Objektdetektion, Objektklassifizierung und Objektverfolgung. Mithilfe der Objektdetektion werden relevante Objekte in Bildern oder Videos erfasst und lokalisiert. Anschließend kann anhand von charakteristischen Merkmalen eine Klassifizierung stattfinden, die eine Differenzierung zwischen einzelnen Objekttypen erlaubt. So lassen sich im Verkehrsraum verschiedene Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger, Radfahrer oder Pkw voneinander unterscheiden. Diese Fähigkeiten erhalten Computer durch die Implementierung von Methoden des maschinellen Lernens, insbesondere dem sogenannten Deep Learning. Als Grundlage dienen riesige Trainingsdatensätze, in denen Bilder der zu erkennenden Objekte vorhanden und gekennzeichnet sind. Daraus werden objektspezifische Eigenschaften automatisch extrahiert und zur späteren Identifikation in neuen Bild- oder Videodateien verwendet. Nach der Detektion von Objekten ist es außerdem möglich, diese in einer Folge von Frames zu tracken bzw. zu verfolgen. Dabei werden einzelnen Objekten Identifikationsnummern zugeordnet. Aus der vergangenen Trajektorie von Verkehrsteilnehmern lassen sich so zukünftige Bewegungsmuster ableiten. Infolge des direkten und unmittelbaren Kontakts von Straßenbahnfahrzeugen zu anderen Verkehrsteilnehmern ist der Verhaltensprädiktion und Intentionsschätzung ebenfalls eine große Bedeutung zuzuschreiben. Diese kann unterschiedliche Bewegungsparameter heranziehen, wobei vor allem Kopfbewegungen und die Dynamik der aktuellen Bewegung relevant sind. Zur Bewertung des Kollisionsrisikos können anschließend stochastische Bewegungsmodelle der Verkehrsteilnehmer, deren bisherige Bewegungsparameter, die Ergebnisse der Intentionsschätzung sowie die fahrzeugeigene Trajektorie genutzt werden.

3.2.3.2 Sensorfusion

Aus Kapitel 3.2.2 geht hervor, dass einzelne Sensortypen allein nicht den Anforderungen automatisierter Fahrfunktionen gerecht werden. Sowohl im Bereich der Umgebungswahrnehmung als auch der Lokalisierung ist es erforderlich, die Daten unterschiedlicher Sensoren zu kombinieren, um deren individuelle Nachteile zu kompensieren und gleichzeitig deren Stärken zu vereinen. Auf diese Weise ist eine Qualitätssteigerung ohne die Entwicklung neuartiger Sensortechnologien realisierbar. Je nach Anwendungsfall ist es hilfreich, zwischen unterschiedlichen Ebenen der Datenfusion zu unterscheiden, da diese einen direkten Einfluss auf die erforderliche Ausstattung und das Leistungsvermögen einzelner Komponenten und Teilsysteme hat [84, S. 15] [85, S. 3]:

- Fusion auf Datenebene:
 - Verschmelzung von Rohdaten vor jeglichen Signalverarbeitungsschritten
 - Vorteile: frühzeitige Klassifizierung mithilfe der Rohdaten aus unterschiedlichen Quellen, kein Informationsverlust, voraussichtlich hohe Qualität
 - Nachteile: sehr große Datenmengen müssen ausgetauscht werden, sehr komplex, geringe Modularität (hoher Aufwand bei Erweiterung um neue Sensoren)
- Fusion auf Merkmalebene: Verschmelzung nach der Extraktion relevanter Merkmale
 - Vorteile: reduzierte Datenmenge und Bandbreite bei ähnlicher Klassifizierungsqualität wie bei Rohdatenfusion
 - Nachteile: erforderliche Bandbreite je nach Anwendungsfall immer noch hoch
- Fusion auf Objektebene: Verschmelzung nach der Identifikation von Objekten und der Erstellung einer Objektliste
 - Vorteile: sensorspezifische Details bleiben erhalten, reduzierter Rechenaufwand in Fusionsmodul, gute Modularität (einfache Implementierung weiterer Sensoren), weiter reduzierte erforderliche Bandbreite
 - Nachteile: erschwerte Klassifizierung da sensorspezifische Nachteile erhalten bleiben und relevante Informationen anderer Sensoren fehlen, erschwerte Fusion durch unterschiedliche Objekterkennungseigenschaften der Sensoren

Im Bereich automatisierter und vernetzter Verkehrssysteme ist für unterschiedliche Anwendungsfälle zu bewerten, inwieweit eine Allokation von Rechenressourcen in der Infrastruktur sinnvoll ist, um die über Funk übermittelten Datenmengen zu reduzieren. Gleiches gilt für die Rechenkapazität im Fahrzeug: Werden lediglich Positions- und Geschwindigkeitsdaten detektierter Objekte zwischen Fahrzeugen ausgetauscht, wird das Kommunikationsnetzwerk im Vergleich zur Übertragung von Rohdaten erheblich entlastet. Die primäre Intelligenz ist in diesem Fall im Fahrzeug anzusiedeln.

3.2.3.3 Zustandsüberwachung

In vorherigen Kapiteln wurde der Begriff Zustandsüberwachung im Zusammenhang mit automatisierten Funktionen in Straßenbahnfahrzeugen in zwei Kategorien untergliedert. Die erste Kategorie, bei der die Überwachung technischer Komponenten im Vordergrund steht, beinhaltet von Seiten der intelligenten Datenverarbeitung die prädiktive Wartung und Instandhaltung sowie die Vorhersage von Defekten. Im Gegensatz zur Durchführung von Wartungsvorgängen in fixen Zeitintervallen, wird bei der vorausschauenden Wartung (auch: predictive Maintenance) auf Basis von Betriebs- oder Komponentendaten ein flexibler und bedarfsorientierter Zeitpunkt definiert. Hierzu ist es notwendig, aktuelle Sensordaten zu analysieren und mit Referenzwerten aus Datenbanken zu vergleichen. Erneut wird dabei auf Methoden des maschinellen Lernens zurückgegriffen, beispielsweise auf Algorithmen der Anomaliedetektion. Zur Überprüfung des Systemzustandes kommen verschiedene Sensoren und Verfahren infrage. Dazu gehören z. B. Infrarotkameras zur Analyse thermischer Eigenschaften, Ultraschall für akustisches Verhalten oder Schwingungsanalysen [86]. Darüber hinaus können auch einfache Leistungs- oder fahrzeuginterne Daten

berücksichtigt werden, sofern auf diese zugegriffen werden kann. Diese Art der Überwachung ist vor allem bei der zur Automatisierung notwendigen Sensorik für Umgebungswahrnehmung und Lokalisierung wichtig. Sensordaten müssen dauerhaft hinsichtlich deren Plausibilität geprüft werden, um sicherheitskritische Fehlerquellen schnellstmöglich identifizieren und beheben zu können.

Während diese Form der Wartungsplanung bisher hauptsächlich in industriellen Fertigungsanlagen zum Einsatz kommt, existieren auch im Fahrzeugbereich, ob Pkw, Lkw oder Schienenverkehr, mögliche Anwendungsfelder. Vor allem zukünftig automatisierte Fahrzeuge benötigen entsprechende Überwachungsfunktionen. Dies ist auf die fehlende menschliche Kontrollinstanz und die größere Anzahl sicherheitskritischer technischer Systeme zurückzuführen. Neben den grundlegenden finanziellen Einsparungspotenzialen durch intelligente Wartungszyklen lassen sich des Weiteren Betriebsausfälle reduzieren, was einen positiven Effekt hinsichtlich der Kundenakzeptanz verspricht und gleichzeitig Kosten reduziert. Vergleichbar mit den Ebenen der Sensordatenfusion können die Analyse fahrzeugeitiger Daten sowie die anschließende Diagnose sowohl dezentral im Fahrzeug als auch zentral im Betriebshof, der Werkstatt oder der Leitstelle stattfinden. Abhängig von der gewählten Ausgestaltung sind Rechenleistung, Speicherkapazitäten und Vernetzungsfähigkeiten bzw. -technologien zu verteilen.

Die zweite Facette der Zustandsüberwachung betrifft den Fahrgastinnenraum eines Fahrzeuges. Infolge der Abwesenheit des Fahrers bei hoher Fahrzeugautomatisierung ist es sinnvoll, durch die Echtzeitauswertung von Kameradaten medizinische Notfälle oder Straftaten wie Vandalismus, Diebstahl oder Vergehen gegen die körperliche Unversehrtheit zu identifizieren. Hierfür bietet sich die Nutzung der ebenfalls im Bereich der Umgebungswahrnehmung relevanten Bildverarbeitungstechniken an. Basierend auf Körperhaltung, Tracking und Merkmalsextraktion lassen sich von der Norm abweichende Situationen feststellen [87, S. 48 ff.]. Da die Erkennung von Anomalien im Innenraum einer Straßenbahn aufgrund der großen Varianz an verschiedenen Situationen potenziell fehlerbehaftet ist, ist von einer automatischen Alarmierung von Einsatzkräften abzusehen. Vielmehr sollte die finale Evaluation der Situation durch Zuschaltung eines Remote-Mitarbeiters durchgeführt werden, der anschließend geeignete Maßnahmen ergreifen kann.

3.2.4 Vernetzte intelligente Datenverarbeitung

3.2.4.1 Digitale Karten

Wie bereits im Zusammenhang mit der Lokalisierung automatisierter Fahrzeuge erläutert, spielen digitale Karten eine besondere Rolle. Während heute verfügbares Kartenmaterial, beispielsweise in Navigationsgeräten, hauptsächlich statische Daten wie Straßengeometrien und feste Geschwindigkeitsgrenzen sowie geringfügig dynamische Daten wie Staus oder Wetterbedingungen enthalten, benötigen fahrerlose Systeme weitaus detailliertere Informationen. Umfassendes Kartenmaterial, dessen Genauigkeit im Zentimeterbereich liegt und welches zusätzlich hochdynamische Daten bereitstellt, unterstützt nicht nur die Lokalisierung, sondern auch die Abbildung und Interpretation der Umgebung des Fahrzeuges. Dabei ist es wichtig, dass mithilfe von Sensorfusion die Informationen verschiedener Quellen gesammelt und in einem Umgebungsmodell vereint werden. Infolge der Nutzung von eigen- und fremderfassten Daten lässt sich die Redundanz und damit einhergehend die Zuverlässigkeit im Betrieb steigern.

Im Rahmen der Standardisierung wurde hierzu von dem ETSI ein technischer Bericht angefertigt (TR 102 863), der die wesentlichen Anwendungsfälle, Inhalte und Eigenschaften lokaler, dynamischer Karten, sogenannter LDMs (*Local Dynamic Maps*), beschreibt. Diese sind in Abbildung 3-5 dargestellt, wobei schienenverkehrsspezifische Aspekte ebenfalls berücksichtigt werden. Falls vorhanden, sollte zudem der städtische Netzgraph, der infrastrukturelle Eigenschaften einer Stadt (Fahrstreifen, Abbiegebeziehungen, Vorfahrtsregeln, Haltelinien, Schienennetz, usw.) in einem Knoten-Kanten-Modell abbildet, mit einbezogen

werden. Informationen bezüglich des Verkehrs werden von Verkehrsmanagementzentralen oder Drittanbietern bereitgestellt. Demgegenüber werden hochdynamische Daten über Umgebungs- und Lokalisierungssensorik der Verkehrsteilnehmer bzw. der Infrastruktur erfasst und über Kommunikationskanäle ausgetauscht. Von großer Bedeutung hinsichtlich der Verkehrssicherheit ist dabei die kontinuierliche und hochfrequente Aktualisierung dynamischer Daten.

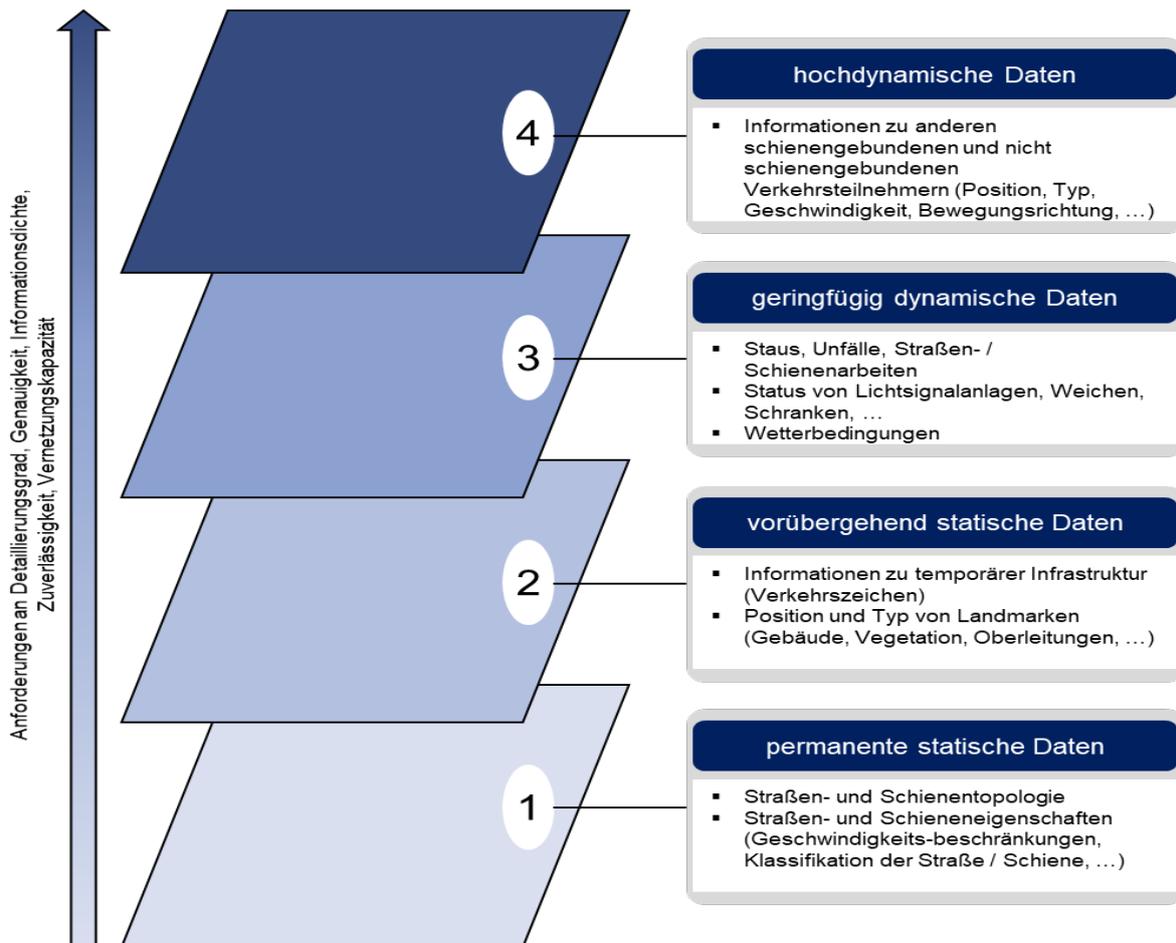


Abbildung 3-3: Vier-Schichten-Modell lokaler, digitaler Karten (vgl. [88, S. 11 ff.])

3.2.4.2 Intelligente Verkehrssteuerung

Einhergehend mit der zunehmenden Vernetzung von Fahrzeugen, steigt auch das Potenzial intelligenter Verkehrssteuerungsmaßnahmen an. Dabei ist die Interaktion unterschiedlicher Akteure und Einrichtungen erforderlich. Fahrzeuge, Infrastrukturelemente wie Lichtsignalanlagen oder dynamische Verkehrszeichen, Verkehrsleitzentralen und dezentrale Datenbanken Dritter stehen in kontinuierlichem Informationsaustausch. Im Straßenverkehr existieren mit Parkleitsystemen, automatisiertem Mautmanagement oder navigationssystemgetriebener Routenoptimierung bereits einige Nutzungen. Für den öffentlichen Verkehr oder im Speziellen den Straßenbahnbetrieb sind allerdings andere Werkzeuge relevant. Dazu gehören beispielsweise die mit ÖPNV-Priorisierung kombinierte intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen oder die energieoptimale Geschwindigkeitsvorgabe bei Kenntnis von Verkehrslage und Ampelphase. Beide sind längst in Erprobung, bedürfen aber weitere Anstrengungen, bevor ein angemessener

Einsatz im Regelbetrieb umsetzbar ist. Bezugnehmend auf Kapitel 2.3.3 zeigen die Ergebnisse des Projekts VERONIKA, dass vor allem die Prognosen der Ankunfts- und Schaltzeit erhebliche Schwächen aufzeigen. Im Idealzustand lässt sich durch die punktgenaue Schaltung von Lichtsignalanlagen eine „Grüne Welle“ für ÖPNV-Fahrzeuge realisieren, die gleichzeitig in kürzeren Stillstandszeiten anderer Verkehrsteilnehmer an Kreuzungen resultiert. Letzteres wird durch die Reduktion von Totzeiten, in denen eine Kreuzung weder vom Schienen- noch Straßenverkehr befahren wird, erzielt. Die Umsetzung dieser Potenziale hängt im Wesentlichen von der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Kommunikationstechnologien ab.

3.2.4.3 Cybersicherheit

Hier werden die Grundlagen der Angriffssicherheit automatisierter Systeme, vor allem im Bereich des automatisierten Fahrens, dargelegt. Dabei sind Straßen- und Schienenverkehr gleichermaßen berücksichtigt. Im Fokus liegt die Kompromittierung des Netzwerkes, nicht der fahrzeuginternen Bussysteme. Das für Verkehrsvernetzung notwendige Zertifikat- und Authentifizierungsmanagement (*Public Key Infrastructure*, kurz PKI) wird in Kapitel 3.2.7 als Teil der Kommunikationsinfrastruktur weiter erläutert.

Angriffe auf die Applikationsschicht wirken sich direkt auf die Funktionalität unterschiedlicher Komponenten aus. Hierzu zählen Nachrichtenfälschung durch Erstellen oder Weiterleiten einer Nachricht, Sensordatenfälschung, das erneute Senden einer vergangenen Nachricht oder der Diebstahl von Identitäten. Zur Absicherung ist es möglich, Ansätze zur Nachrichtenverifikation zu nutzen. Durch einen Abgleich mit alten Datensätzen oder alternativen Sensordaten kann eine Validierung stattfinden. Wiederholte Nachrichten können durch die Verwendung von eindeutigen Zufallszahlen detektiert werden. Werden nicht nur einzelne Komponenten, sondern das gesamte Netzwerk angegriffen, so wirkt sich dies auf alle Vernetzungsanwendungen aus. Hierzu können im Kommunikationsnetz extrem viele Kommunikationsanfragen gestellt werden, was auch als DDoS (*Distributed Denial of Service*) bezeichnet wird. Ein ähnlicher Effekt wird durch das Versenden von Störsignalen, sogenanntes *Jamming*, erzielt [89, S. 12]. Die Abwehr solcher Attacken stellt sich als schwierig heraus, da der betroffene Funkkanal nicht immer gewechselt werden kann. Vor allem im dedizierten 5,9 GHz Frequenzband, welches für ITS-Anwendungen reserviert ist, ist in Zukunft mit einer vollständigen Nutzung der Kanäle und somit einer grundsätzlichen Auslastung zu rechnen. Auch die Verwendung unterschiedlicher Kommunikationstechnologien ist aufgrund der sicherheitskritischen Anforderungen einzelner Vernetzungsfunktionen nicht immer zielführend. Neben den Angriffen auf die Funktionalität automatisierter und vernetzter Fahrzeuge muss auch die Sicherheit privater Nutzerdaten gewährleistet werden.

Die Integration von Schutzmechanismen zur Vermeidung von Cyberangriffen ist in allen Fällen mit einem Anstieg der Komplexität eines Systems verbunden. Gleichermaßen hat diese erhöhte Sicherheit einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Übertragungsgeschwindigkeit. Eine PKI, die auf kryptografischen Ansätzen basiert kann dabei infolge einer Zunahme der Latenz eine Herausforderung darstellen. Daher kann debattiert werden, inwieweit eine komplexe PKI wirklich notwendig ist. Lösungsansätze wie die Plausibilitätsprüfung ein- und ausgehender Informationen stellen eine einfachere, alternative Herangehensweise dar. Durch sensorfusions- und logikbasierte Analyse von Fahrzeug- oder Infrastrukturdaten lässt sich bereits ein Großteil der Nachrichtenfälschungen identifizieren.

3.2.4.4 Fazit zur Intelligenten Datenverarbeitung

Intelligente Datenverarbeitung muss sowohl fahrzeugseitig als auch vernetzt (zur Planung und Verkehrssteuerung) erfolgen. Die Verarbeitung von Sensordaten zur Wahrnehmung des Umfeldes und die darauf aufbauende Entscheidungsfindung sind zentrale Bestandteile automatisierter Fahrzeuge und bilden die Funktionen des menschlichen Fahrers ab oder unterstützen diesen bei komplexen Fahraufgaben. Im Zuge

der Zunahme der Rechenleistung und der stetig wachsenden Leistungsfähigkeit innovativer Algorithmen ist (auch bei theoretischer Stagnation der Sensorentwicklung) von einer anhaltenden Verbesserung automatisierter Fahrfunktionen auszugehen.

Intelligente Systeme sind vielfach komplex programmierte und vernetzte Systeme. Der Einsatz selbstlernender Systeme bzw. mit künstlicher Intelligenz angelernter Intelligenz ist bislang auf eng fokussierte Aufgaben begrenzt, etwa die Erkennung bestimmter Situationen aus Bilddaten, wie z. B. einen Gegenstand oder eine Person mit potenziellem Kollisionsrisiko oder die Bilddetektion bestimmter Signalbegriffe, und zum Teil auch noch im Erprobungsstatus.

Infolge der Auswertung von Fahrzeug- und Komponentendaten lässt sich die Planung von Wartungs- und Instandhaltungsprozessen optimieren und zukünftige Defekte können vorhergesagt werden. Um die Anfälligkeit technischer Systeme mit sicherheitskritischen Funktionen hinsichtlich externer Eingriffe zu reduzieren, müssen Mechanismen zum Schutz von Daten und Kommunikationsschnittstellen implementiert werden (Cybersecurity).

3.2.5 Mensch-Maschine Interaktion (MMI, engl. HMI)

Mit zunehmender Automatisierung von Systemen ist auch die Gestaltung von Schnittstellen zwischen dem Menschen und der Maschine bzw. dem Fahrzeug von großer Bedeutung. Im Anwendungsfall der Straßenbahn beschränkt sich die Interaktion nicht nur auf jene zwischen dem Fahrzeugführer und dem Führerstand. Insgesamt sind vier Schnittstellen mit unterschiedlichen Anforderungsprofilen zu konzipieren. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2.5.1 Schnittstelle zwischen Fahrer und Straßenbahnfahrzeug (Führerstand)

Bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen oder teilautomatisierten Funktionen, die die Anwesenheit eines Fahrzeugführers erfordern, ist es notwendig, entsprechende Schnittstellen im Führerstand zu integrieren. Ein Beispiel verkörpern die bereits kommerziell verfügbaren Kollisionsassistenten, die mithilfe akustischer Signale ein warnendes Signal an den Fahrer übermitteln. Im Allgemeinen ist die Modalität des Informationsaustausches nicht festgeschrieben. Auch visuelle oder haptische Reize können zur Aufmerksamkeitssteuerung verwendet werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass bereitgestellte Informationen nicht zur Ablenkung des Fahrers und somit zur Reduktion von dessen Leistungsfähigkeit führen. Ist es dem Fahrer darüber hinaus erlaubt, im Zuge von höheren Automatisierungsstufen fahrfremden Tätigkeiten nachzugehen, sind Innenraum- bzw. HMI-Konzepte zu entwickeln, die eine möglichst schnelle und qualitativ angemessene Übernahme gewährleisten.

3.2.5.2 Schnittstelle zwischen Passagieren und Straßenbahnfahrzeug (Innenraum)

Die Interaktionsmöglichkeiten für Passagiere lassen sich auch unabhängig von einer Automatisierung optimieren. Hierzu zählen beispielsweise erweiterte Auskünfte zu betrieblichen Aspekten wie Linien- und Fahrpläne oder Verspätungsinformationen. Diese können über bedienbare Bildschirme realisiert werden. Mit Abwesenheit des Fahrers, der in Ausnahmesituationen oder Notfällen eine Schlüsselrolle übernimmt, sind allerdings zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Vor allem die Anleitung und Beaufsichtigung von Fahrgästen in Gefahrensituationen muss alternativ durch technische Lösungsansätze bewerkstelligt werden. Anweisungen können dabei einerseits über fahrzeuginterne Informationskanäle übermittelt werden. Andererseits ist es zum Erhalt der menschlichen Komponente ratsam, mithilfe entsprechender Kommunikationsschnittstellen eine direkte Zuschaltung des Leitstellenpersonals zu erlauben.

3.2.5.3 Schnittstelle zwischen anderen Verkehrsteilnehmern und dem Straßenbahnfahrzeug

Bei der Abstimmung einzelner Teilnehmer im Straßenverkehr wird zum jetzigen Zeitpunkt häufig auf Mimik und Gestik zurückgegriffen. Die wortlose Verständigung dient dem intuitiven Austausch von Informationen und wird regelmäßig zur Lösung von Koordinationsproblemen herangezogen. In fahrerlosen Systemen muss daher eine Möglichkeit geschaffen werden, diese Kommunikationsebene zu substituieren. Erste Forschungsprojekte beschäftigen sich bereits mit der Gestaltung der externen Interaktion von automatisierten Fahrzeugen und Passanten [89, 90, 91]. In [92] wird empfohlen, Schnittstellen möglichst minimalistisch zu gestalten. Außerdem sollten nicht Anweisungen, sondern die eigenen Intentionen an Fußgänger kommuniziert werden. Grundsätzlich können unterschiedliche Kommunikationsmodalitäten genutzt werden. Dazu gehören beispielsweise akustische Signale, an der Fahrzeugfront platzierte Bildschirme oder LED-Displays sowie auf die Straßenoberfläche projizierte Hinweise.

Zur umgebungsfreundlichen und nachhaltigen Etablierung automatisierter Verkehrsmittel ist es unabdingbar, dass Fußgänger, Radfahrer aber auch andere motorisierte Verkehrsteilnehmer ein hohes Maß an Vertrauen gegenüber der neuen Technologie entwickeln. Dies wird durch allgemein verständliche Kommunikationsmethoden gefördert, da diese zu einem gesteigerten Sicherheitsempfinden beitragen. Außerdem spielt die Standardisierung externer Schnittstellen automatisierter Fahrzeuge eine bedeutende Rolle. Der alltägliche Umgang mit ähnlichen oder sogar identischen Interaktionskonzepten, unabhängig vom jeweiligen Fahrzeugtyp, führt langfristig zu Gewöhnungseffekten und hilft somit fehlerhaften Intentionse deutungen vorzubeugen.

Mit Bezug auf Kapitel 4.2 ist neben der Vermittlung von Informationen an Außenstehende ebenfalls die fahrzeuginterne Interpretationsfähigkeit von Personenbewegungen entscheidend. Nur durch die präzise Einschätzung der Intentionen vulnerabler Verkehrsteilnehmer basierend auf Sensordaten ist es möglich, eine sichere und gleichzeitig anwendungsorientierte Fahrweise zu etablieren.

3.2.5.4 Schnittstelle zwischen Leitstellenmitarbeitern und dem Straßenbahnfahrzeug

Zusätzlich zur oben genannten Interaktionsmöglichkeit mit den Fahrgästen innerhalb der Straßenbahn ist des Weiteren die Einrichtung eines adäquaten Arbeitsplatzes für Teleoperatoren in der Leitstelle bzw. der technischen Aufsicht erforderlich. Im 2021 veröffentlichten Gesetz zum autonomen Fahren, welches lediglich auf den Straßenverkehr beschränkt ist, ist es Aufgabe der technischen Aufsicht, vom automatisierten Fahrzeug vorgeschlagene Fahrmanöver in kritischen Situationen freizugeben. Damit unterscheidet sie sich sowohl in der Funktionalität als auch den Anforderungen vom Teleoperator, der in der Theorie in die Steuerung des Fahrzeuges eingreifen kann. Unabhängig von der zukünftigen rechtlichen Ausgestaltung im Straßenbahnbereich muss es der Leitstelle möglich sein, in Echtzeit die aktuellen verkehrlichen Bedingungen im direkten Umfeld des Fahrzeuges einsehen zu können. Je nach Funktionsumfang des Personals sollte außerdem eine führerstandähnliche Umgebung implementiert werden.

3.2.5.5 Schlussfolgerungen zur Mensch-Maschine-Interaktion (MMI)

Bei der Mensch-Maschine-Interaktion sind zwei Personengruppen zu unterscheiden: zum einen Personen, die das System verantwortlich betreiben, unterteilt in Fahrer und Leitstellenmitarbeiter; zum anderen Personen, die in der Öffentlichkeit im Verkehr mit dem System interagieren, unterteilt in Fahrgäste, andere Verkehrsteilnehmer und Dritte (bspw. Anwohner).

Für die Gruppe der für das System Verantwortlichen muss die MMI-Schnittstelle so gestaltet werden, dass klar ist, welche Leistung die Maschine, ggf. automatisch, übernimmt und wann eine menschliche Handlung erforderlich ist. Für die Gruppe der Interagierenden müssen durch den Wegfall des Fahrers, dessen Aufgabenbereich ebenfalls die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Fahrzeuginsassen beinhaltet, andere, technisch umsetzbare Möglichkeiten zur Abbildung dieser Funktionen gefunden werden. Vor allem die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, die zum jetzigen Zeitpunkt häufig nonverbal mithilfe von Mimik und Gestik umgesetzt wird, stellt dabei eine große Herausforderung dar. Deshalb bedarf es Schnittstellen, die auf Mimik und Gestik verzichten können oder über Sensoren und Aktoren die Mimik und Gestik funktional ersetzen.

Grundsätzlich ist es erforderlich, externe Schnittstellen zu standardisieren und so zu konzipieren, dass sie allgemein verständlich sind und zu einem gesteigerten Sicherheitsgefühl beitragen, auch neue Formen einer Sensorik oder Aktorik als akustische, optische oder haptische Schnittstellenelemente können hierzu eingesetzt werden.

3.2.6 Kommunikationstechnologie

Die beiden wesentlichen Kommunikationsstandards ITS-G5 und LTE-V2X wurden bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben. In diesem Kapitel werden darauf aufbauend die Folgegenerationen dieser beiden Technologien untersucht und sowohl von ihren Vorgängern als auch voneinander abgegrenzt. Dabei handelt es sich einerseits um den WLAN-basierten Standard IEEE 802.11bd, andererseits um die auf der fünften Mobilfunkgeneration (5G) basierenden Direktkommunikationsschnittstelle NR-V2X. Zusätzlich wird die Eignung sogenannter Low Power Wide Area Networks (LPWANs) für bestimmte Anwendungen intelligenter Transportsysteme diskutiert. Zur Veranschaulichung und Abgrenzung sind die betrachteten Technologien in Abbildung 3-8 dargestellt.

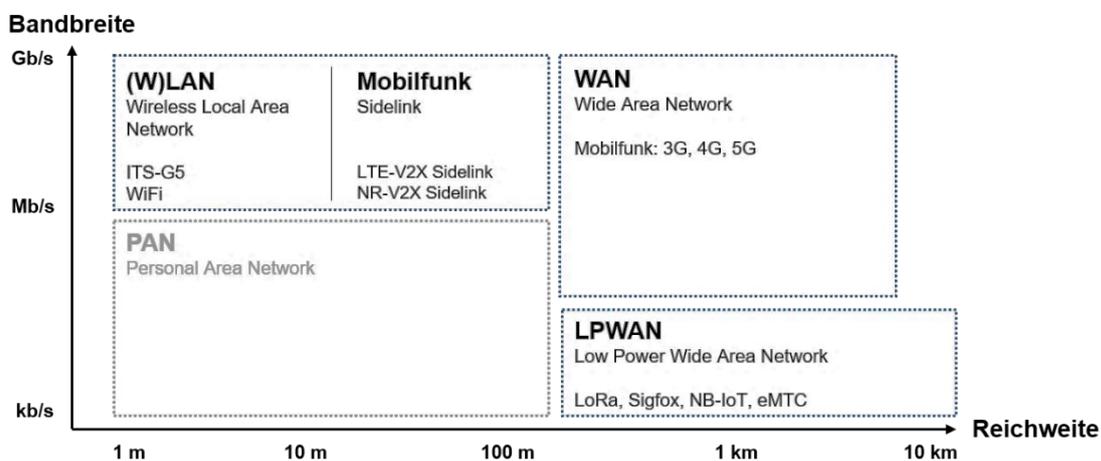


Abbildung 3-4: Unterschiedliche Netzwerktypen und Kommunikationstechnologien

Neben einem grundlegenden Vergleich der Eigenschaften und Leistungsfähigkeiten, liegt der Fokus dieses Kapitels auf der Analyse und Bewertung der langfristigen Rahmenbedingungen hinsichtlich des Einsatzes unterschiedlicher Kommunikationstechnologien. Aufgrund der wesentlichen Unterschiede zwischen den relevanten Funktechniken ist es wichtig, frühzeitig Potenziale und Herausforderungen bezüglich der Interoperabilität, Koexistenz und Rückwärtskompatibilität zu identifizieren. Zur flächendeckenden Nutzung von Verkehrsnetzwerk ist es darüber hinaus erforderlich, dass ein ausreichend großes Spektrum an Frequenzbändern zur Verfügung steht. Aktuell sind in Deutschland 80 MHz im 5,9 GHz-Band für ITS-Anwendungen reserviert. Inwieweit eine Erweiterung in Betracht gezogen werden muss, wird am Ende des Kapitels diskutiert.

3.2.6.1 WLAN

Die aktuelle Version der Direktkommunikationstechnologie ITS-G5 beruht auf dem WLAN-Standard IEEE 802.11p, der bereits 2010 veröffentlicht wurde. Mit Datenraten im Bereich von 3 bis 27 Mb/s, einer Latenzzeit von unter 100 ms und einer Reichweite unter optimalen Bedingungen von bis zu 1.000 m, lassen sich erste Applikationen zur Verkehrssicherung realisieren. Darunter fallen beispielsweise eventbasierte Warnungen vor Stauenden, Straßenbauarbeiten oder Einsatzfahrzeugen sowie die Anzeige von Verkehrsschildern oder Ampelsignalen im Fahrzeug. Bei zunehmender Dichte vernetzter Verkehrsteilnehmer, ansteigender Komplexität der Anwendungsfelder und erhöhten sicherheitstechnischen Anforderungen stößt dieser Kommunikationsstandard allerdings an seine Grenzen [93, S. 343].

Aus diesem Grund wird seit einigen Jahren an einer Folgegeneration gearbeitet, deren finale Publikation voraussichtlich 2022 erscheinen soll [94]. Der neue Standard mit dem Namen IEEE 802.11bd nutzt dabei in seiner Bitübertragungsschicht (PHY – *Physical Layer*) sowie der Medienzugriffsteuerung (MAC – *Media Access Control*) Elemente und Techniken der aktuellsten WiFi-Versionen. Dadurch können weitaus höhere Datenraten und Reichweiten bei gleichzeitig reduzierter Latenz erzielt werden [95, S. 24]. Die Zuverlässigkeit der Datenübertragung soll durch das verkehrsdichteabhängige wiederholte Senden von Paketen verbessert werden. Außerdem wird beabsichtigt, sogenannte Millimeterwellen im Frequenzbereich von etwa 60 GHz zur Übertragung großer Datenmengen über kurze Entfernungen zu verwenden [96, S. 5]. Auch wenn infolge der fehlenden Marktreife noch keine systemweiten Leistungstests vorliegen, ergeben sich neue Chancen und potenzielle Anwendungen. Hierbei werden sogar spezielle Vernetzungsmöglichkeiten für den Schienenverkehr genannt [95, S. 25 f.]:

- Teilen von Sensordaten: periodische Übertragung detektierter Objekte
- Infrastrukturseitige Applikationen: Teilen von hochgenauen, digitalen Karten
- Fahrzeuglokalisierung: Verbesserung gegenüber GNSS
- Unterstützung des automatisierten Fahrens: Koordination von Fahrmanövern
- Zugkommunikation: ATP und ATO zur Kollisionsvermeidung, Remote-Steuerung, automatisiertes, nicht-mechanisches Kuppeln
- Kommunikation zwischen Schienen- und Straßenverkehr bei geteiltem Verkehrsraum

Eine wesentliche Eigenschaft von IEEE 802.11bd liegt in der Tatsache, dass im gesamten Entwicklungsprozess die Interoperabilität mit der Vorgängertechnologie IEEE 802.11p berücksichtigt wurde. Somit ist von einem Schutz der bereits getätigten Investitionen in ITS-G5 auszugehen. In Kapitel 4.3. wird in vertiefter Ausführung auf relevante Aspekte der Zukunftsträchtigkeit unterschiedlicher Kommunikationstechnologien eingegangen.

3.2.6.2 Mobilfunk (LTE und 5G)

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, existieren in der vierten Mobilfunkgeneration LTE zwei Schnittstellen, die zur Vernetzung von Fahrzeugen genutzt werden können. Über Up- und Downlink wird eine Verbindung zur nächsten Basisstation hergestellt, die zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander oder mit der Infrastruktur als Zwischenstation fungiert. Dahingegen wird die direkte Kommunikation mithilfe der PC5 Schnittstelle, dem sogenannten Sidelink, hergestellt. In diesem Fall wird von LTE-V2X gesprochen. Diese Erweiterung des LTE-Standards steht somit in direkter Konkurrenz mit der WLAN-basierten Technologie ITS-G5. Da es sich um einen aktuelleren Funkstandard handelt, verfügt LTE-V2X gegenüber ITS-G5 über weiter fortgeschrittene technische Charakteristika. Dennoch sind Leistung, Zuverlässigkeit und Skalierbarkeit noch nicht vollständig verifiziert. Komplexere Anwendungen in der Verkehrsvernetzung übersteigen jedoch ebenfalls die Fähigkeiten dieser Technologie [93, S. 341 ff.]. Mit der fünften Mobilfunkgeneration 5G (auch als *New Radio*, kurz NR bezeichnet), die 2019 veröffentlicht wurde, konnte das Anwendungsspektrum im Vergleich zu LTE stark erweitert werden.

Zu den drei Hauptapplikationen von 5G zählen:

- verbesserte mobile Breitbandleistung (eMBB – *enhanced mobile broadband*)
- Kommunikation mit sehr hoher Zuverlässigkeit und sehr niedriger Latenz (URLLC – *ultra reliable low latency communications*)
- energieeffiziente Handhabung einer hohen Anzahl von Geräten pro Flächeneinheit (mMTC – *massive machine type communications*)

Neben der auf Up- und Downlink basierenden Kommunikation mit Basisstationen, erlaubt auch die neue Mobilfunkgeneration mit NR-V2X eine direkte Verbindung zwischen Verkehrsteilnehmern und der Verkehrsinfrastruktur. Vergleichbar mit den Modi 3 und 4 im Sidelink des LTE weist NR-V2X zwei Modi (Modi 1 und 2) auf, die sich in der Allokation der Ressourcen unterscheiden. In ersten Modus wird diese durch eine in Reichweite befindliche Basisstation organisiert, sodass dieser nur im Abdeckungsbereich möglich ist. Eine Neuerung in Modus 2 besteht darin, dass bei fehlender Mobilfunkabdeckung Ressourcen sowohl autonom als auch durch andere V2X-Geräte ausgewählt werden können [93, S. 344]. NR-V2X ist durch die Verwendung modernster Kommunikationstechnik weitaus besser für fortgeschrittene Einsatzfelder (Tag 2 Anwendungen, siehe Kapitel 3.1.2) der Fahrzeugvernetzung geeignet. Wie bei IEEE 802.11bd sollen auch Millimeterwellen für datenintensive Kurzstreckenkommunikation hinzugezogen werden. Neben der Übertragung von Daten im Broadcast erlaubt NR-V2X zusätzlich Unicast und Groupcast als neue Kommunikationstypen. Somit können gezielt Informationen zwischen bestimmten V2X-Geräten versendet werden. Zur quantitativen Einschätzung der Leistungsfähigkeit von NR-V2X in unterschiedlich komplexen Verkehrssituationen fehlt zum derzeitigen Entwicklungsstand allerdings die experimentelle Grundlage.

3.2.6.3 Low Power Wide Area Networks (LPWAN)

Über die Kommunikationstechnologien basierend auf WLAN- oder Mobilfunkstandards hinaus existieren noch weitere Technologien, die im Bereich der Verkehrsvernetzung eine bedeutende Rolle spielen können. Dazu gehören die sogenannten Low Power Wide Area Networks (kurz LPWAN). Diese bieten grundsätzlich große Reichweiten, niedrigen Energiebedarf und große Kapazitäten im Sinne verbundener Endgeräte. Als Beispieltechnologien, die sich LPWANs zuordnen lassen, seien hier LoRa (*Long Range Wide Area Network*), NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) und eMTC (*enhanced Machine Type Communication*) genannt. Aufgrund der besonderen Eigenschaften wurden diese bisher hauptsächlich für IoT-Anwendungen (*Internet of Things*), wie intelligente Straßenbeleuchtung, Parksysteme oder Gebäude genutzt.

Während es sich bei LoRa um ein proprietäres Übertragungsverfahren handelt, welches in unlizenzieren Frequenzbändern betrieben wird, sind eMTC und NB-IoT in lizenzierten Bändern angesiedelte Funktechnologien. Letztere wurden, wie LTE und NR, von der 3GPP standardisiert und ermöglichen daher eine Vielzahl von Anwendungen für Mobilfunkgeräte und Mobilfunkdienstleistungen. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Kommunikationstechnologien sind in Tabelle 3-6 zusammengefasst [97, S. 477].

TABELLE 3-5: VERGLEICH VON LPWAN-TECHNOLOGIEN

Technologie	Datenrate	Latenz	Reichweite	Unterstützung von Mobilität
LoRa	< 50 kb/s	< 2 s	< 45 km	ja
eMTC	< 1 Mb/s	< 15 ms	< 10 km	ja
NB-IoT	< 250 kb/s	< 10 s	< 35 km	nein

Es zeigt sich, dass lediglich LoRa und eMTC für Mobilitätsanwendungen geeignet sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass NB-IoT nicht fähig ist, Daten zwischen einzelnen Funkzellen des Mobilfunknetzes zu übergeben und somit auf ortsfeste Anwendungen beschränkt ist [97, S. 476]. Im Vergleich zu Direktkommunikationstechnologien wie ITS-G5 oder LTE-V2X weisen LoRa und eMTC sehr geringe Datenübertragungsraten auf. Im Zusammenspiel mit einer sehr hohen Latenz (LoRa) ist eine Nutzung für komplexe und sicherheitsrelevante Vernetzungsfunktionen unrealistisch. Vielmehr sollten die Vorteile einer exzellenten Energieeffizienz, hohen Reichweite und Kapazität im intelligenten und vernetzten Verkehrsmanagement Anwendung finden. Weniger sicherheitskritische und latenzgebundene Einsatzbereiche wie Flottensteuerung, Fahrzeugverfolgung und Fahrzeugdiagnose können teilweise bis vollständig mithilfe von LPWANs umgesetzt werden, um gleichzeitig andere V2X-Technologien zu entlasten.

3.2.6.4 Bewertung der Technologien und deren Kompatibilität

Nachdem unterschiedliche Kommunikationstechnologien, die zur Realisierung verschiedener Vernetzungsanwendungen herangezogen werden können, in den vorherigen Unterkapiteln beschrieben wurden, ist es erforderlich, diese hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen zu bewerten. Die Integration von kooperativen und intelligenten Transportsystemen stellt generell einen erheblichen finanziellen Aufwand dar. Um die Investitionsbereitschaft einzelner Akteure wie Kommunen, Fahrzeughersteller und Verkehrsbetriebe in den nächsten Jahren nicht zu beeinträchtigen, muss eine Absicherung ebendieser Investitionen sichergestellt werden. Da mit dem ITS-G5, basierend auf IEEE 802.11p und IEEE 802.11bd, sowie C-V2X, basierend auf LTE und NR, vier relevante Technologien existieren, muss deren grundlegende Kompatibilität erörtert werden. Im Wesentlichen sind hierfür folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Interoperabilität: Systeme sind fähig, Daten und Informationen mit auf anderen Technologien basierenden Systemen auszutauschen und zu verwerten
- Koexistenz: Systeme sind fähig, die Belegung von Funkkanälen durch andere Technologien zu erkennen und den eigenen Zugriff auf diese Kanäle zu verzögern, um potenzielle Störungen zu verhindern
- Rückwärtskompatibilität: Systeme unterschiedlicher Technologiegenerationen sind interoperabel (z. B. Gerät mit IEEE 802.11p und Gerät mit IEEE 802.11bd)
- Fairness: alle Technologien besitzen die gleichen Zugangsrechte zu relevanten Funkkanälen

In der nachstehenden Tabelle 3-7 wird basierend auf qualitativen Kriterien eine Bewertung der einzelnen Kommunikationstechnologien vorgenommen.

TABELLE 3-6: BEWERTUNG DER KOMMUNIKATIONSTECHNOLOGIEN

Technologien	Eignung Tag 1	Eignung Tag 2, 3	Marktreife	Intrinsische Interoperabilität und Gleichkanalkoexistenz			
				802.11p	802.11bd	LTE-V2X	NR-V2X
IEEE 802.11p	+	--	++	✓	✓	x	x
IEEE 802.11bd	++	+	--	✓	✓	x	x
LTE-V2X	+	--	+	x	x	✓	x
NR-V2X	++	++	--	x	x	x	✓

Auf einen tiefergehenden Vergleich wird aufgrund fehlender Benchmarkings, unterschiedlicher Markt- und Technologiereife sowie nicht standardisierter Studiendesigns verzichtet. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit wird die Eignung zur Umsetzung bestimmter Anwendungsfälle bzw. Vernetzungsfunktionen herangezogen. Dabei werden die in Kapitel 3.1.2 definierten Tag 1-3 Use Cases referenziert. Die Marktreife der Funktechnologien wird unter Berücksichtigung der Literatur, der Verfügbarkeit kommerzieller Produkte und der Nutzung in Test- und Realbetrieben eingestuft. Nachfolgend werden die Kompatibilitätsherausforderungen und deren Ursachen anhand eines paarweisen Vergleichs der Technologien erläutert.

ITS-G5 basierend auf IEEE 802.11p und IEEE 802.11bd:

An die Eigenschaften von IEEE 802.11bd wurde bereits zu Entwicklungsbeginn die Anforderung einer vollständigen Interoperabilität, Koexistenz, Rückwärtskompatibilität und Fairness definiert. Diese Grundvoraussetzung soll technisch durch kompatible Wellenformen, gemeinsame Kanalzugriffsmethoden und gleiche Trägerprüfung realisiert werden [96, S. 11]. Hinsichtlich des Kanalzugriffs verwenden beide Technologien den sogenannten Listen-before-Talk Mechanismus. Dabei wird vor der Übertragung von Datenpaketen die Belegung des Funkkanals überprüft. Vermeintlich negativ wirkt sich die Anforderung an die Wellenform aus, da dadurch das Design der PHY- und MAC-Schicht bestimmten Restriktionen unterlegen ist. Daher lassen sich somit nicht alle Potenziale bezüglich der reinen Leistungsfähigkeit von IEEE 802.11bd umsetzen.

LTE-V2X und NR-V2X:

Bei der Entwicklung von NR-V2X stand nicht der Ersatz von LTE-V2X im Vordergrund, sondern die Komplementierung in komplexeren Situationen mit höheren sicherheitskritischen Anforderungen. Aus technischer Sicht wurden primär die Leistungssteigerung und Eignung für neue, erweiterte Anwendungsbereiche verfolgt, sodass NR-V2X fortgeschrittene Funkeigenschaften integriert. Aus diesem Grund können Geräte mit LTE-V2X keine Nachrichten von NR-V2X Geräten decodieren. Ohne Weiteres sind daher weder Interoperabilität noch Rückwärtskompatibilität gegeben [93, S. 346]. Diese Herausforderung wird mit der Nutzung sogenannter Dual-Radio-Systeme bewerkstelligt, wobei zukünftige Geräte beide Funkstandards und die notwendige Hardware beinhalten sollen.

Die fehlende Rückwärtskompatibilität führt des Weiteren dazu, dass Koexistenz nicht gleichkanalig möglich ist. Vielmehr ist die Implementierung zusätzlicher Mechanismen notwendig. Dazu zählen Frequenz- und Zeitmultiplexverfahren, bei denen die Daten auf einem Träger frequenzseitig bzw. zeitlich verteilt übertragen werden. Beide Verfahren bringen individuelle Nachteile wie beispielsweise reduzierte Übertragungsleistung oder erhöhte Latenzzeiten mit sich [96, S. 10].

LTE-V2X und ITS-G5:

Infolge grundlegender Differenzen in der physischen Schicht und der Medienzugriffssteuerung (PHY und MAC) sind die aktuell verfügbaren Funkstandards nicht interoperabel und können keine Informationen untereinander austauschen. Dadurch werden bei gleichzeitigem Betrieb im 5,9 GHz Frequenzband und in der gleichen geografischen Region wechselseitige Gleichkanalinterferenzen provoziert [98, S. 2]. Ein wesentlicher Unterschied zwischen LTE-V2X und ITS-G5 besteht in der Methode des Kanalzugriffs und der Synchronität. Während mit ITS-G5 vor dem Zugriff die Belegung des Kanals ertastet wird (*listen-before-talk* Mechanismus), nutzt LTE-V2X eine quasi-durchgehende Disposition (*semi-persistent scheduling*). Dabei wird die Belegung des Kanals für eine Sekunde gemessen, um darauf aufbauend Freiräume in zukünftigen Zeitintervallen vorherzusagen. Des Weiteren überträgt ITS-G5 asynchron und somit taktunabhängig Daten, wohingegen LTE-V2X einem synchronen Takt folgt, der vom GNSS-Signal vorgegeben wird. Probleme entstehen daher bei Abbruch oder Störungen des GNSS-Signals. Aufgrund dieser verschiedenen Herangehensweisen werden in einem System mit Geräten beider Technologien des Öfteren ITS-G5-Nachrichten durch LTE-V2X-Nachrichten überlagert. Somit ist auch das Kriterium der Fairness verletzt.

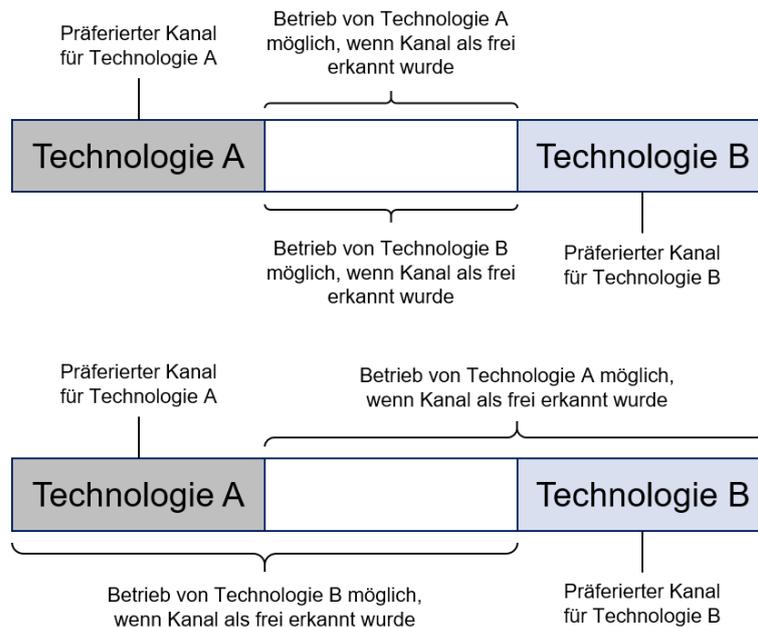


Abbildung 3-5: Methoden für die Koexistenz zweier Kommunikationstechnologien (vgl. [98])

Mithilfe spezieller Mechanismen kann die Koexistenz nicht kompatibler Kommunikationsstandards hergestellt werden, um Interferenzen zu vermeiden und die Qualität der Datenübertragung zu steigern. Von der 5GAA (5G Automotive Association) wurde 2018 ein kurzfristiger und rudimentärer Lösungsansatz vorgeschlagen, bei dem das für ITS-Anwendungen reservierte Frequenzspektrum in einzelne Kanäle aufgeteilt wird, die wiederum nur für einzelne Technologien zur Verfügung stehen [98]. Überlagerungen im gleichen Funkkanal werden somit unterbunden. Zur Reduktion der kanalübergreifenden Interferenz wird außerdem ein Puffer zwischen zwei Kanälen unterschiedlicher Technologien berücksichtigt. Dieser Puffer kann jedoch von beiden Technologien zur Übertragung zusätzlicher Datenpakete verwendet werden, wenn der Kanal gerade nicht belegt ist. Im Zuge einer weiteren Verbesserung könnte sogar der präferierte Kanal der anderen Technologie mitgenutzt werden, falls dort keine Datenübertragungen stattfinden. Die Funktionsweise dieser Methode ist in Abbildung 3-9 veranschaulicht. Während sich auf diese Weise gegenseitige Störungen weitgehend vermeiden lassen, wird das verfügbare Frequenzspektrum allerdings gemindert. Außerdem wird davon ausgegangen, dass beide Kommunikationstechnologien das Listen-before-Talk Prinzip beim Kanalzugriff anzuwenden können.

Im technischen Bericht TR 103 766 [99] des ETSI wird ebenfalls die Problematik der Koexistenz von ITS-G5 und LTE-V2X bzw. NR-V2X diskutiert. Dabei werden unterschiedliche Ansätze formuliert, die im Wesentlichen Varianten des Zeitmultiplexverfahrens darstellen. Grundsätzlich wird hierbei mit sogenannten Superframes gearbeitet, die den Funkkanal in einzelne Zeitabschnitte weniger Millisekunden untergliedern. Innerhalb eines Superframes wird entsprechend von verschiedenen Rahmenbedingungen (z. B. Anzahl bzw. Verhältnis der ITS-G5- und LTE-V2X-Geräte in geografischer Region) die Zeit definiert, in der Daten über die jeweilige Kommunikationstechnologie versendet werden. Da ITS-G5 basierend auf sowohl IEEE 802.11p als auch IEEE 802.11bd immer den gesamten Funkkanal (10 MHz) besetzt, ist kein Frequenzmultiplexverfahren möglich. Eine Visualisierung dieser Koexistenzmethode wird in Abbildung 3-10 bereitgestellt. Im technischen Bericht werden darüber hinaus unterschiedliche Variationen dieser Herangehensweise vorgestellt, auf die in dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Zusammenfassend muss jedoch festgehalten werden, dass jegliche Art von Koexistenz unweigerlich mit einer Leistungsabnahme einhergeht. Außerdem sind in den vorgestellten Methoden Veränderungen an mindestens einer Technologie erforderlich [100, S. 85].

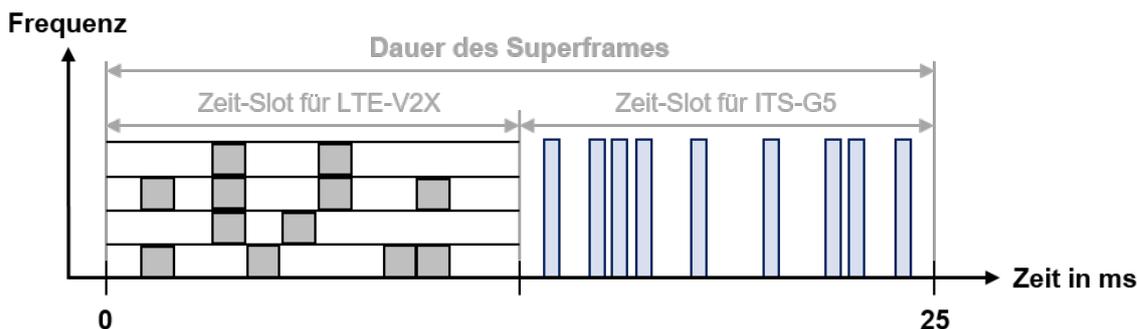


Abbildung 3-6: Zeitmultiplexverfahren zur Gleichkanalkoexistenz unterschiedlicher Kommunikationstechnologien

Neben Koexistenz ist auch die Interoperabilität unterschiedlicher Kommunikationstechnologien von besonderer Bedeutung. Diese ermöglicht es, Daten und Informationen zwischen ITS-G5- und LTE-V2X- bzw. NR-V2X-Geräten auszutauschen und weiterzuverarbeiten. Nur so können die Potenziale der Verkehrsvernetzung effizient ausgenutzt werden. Wie in diesem Kapitel mehrfach erwähnt, ist lediglich zwischen den beiden Varianten von ITS-G5 das Interoperabilitätskriterium gegeben. Da dieses rein technologieseitig erfüllt wird und sowohl LTE-V2X als auch NR-V2X voraussichtlich vorerst keine technologieseitigen Änderungen erfahren werden, ist die Betrachtung weiterer Optionen notwendig. Hierzu werden im technischen Bericht ETSI TR 103 576 [99] verschiedene Ansätze untersucht und anhand relevanter Kriterien bewertet. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 3-8 in verkürzter Form zusammengefasst.

TABELLE 3-7: OPTIONEN ZUR REALISIERUNG VON INTEROPERABILITÄT [99, S. 25]

Optionen	Interoperabilität	Rückwärtskompatibilität	Latenz	Komplexität	Effiziente Spektrumnutzung	Benötigte Infrastruktur
Mehrere Funktechnologien für alle ITS-Stationen: Alle ITS-Stationen sind mit allen Funktechnologien ausgestattet und versenden Daten über alle Technologien	Ja	Nein	Gering	Hoch	Hoch	Nein
Doppelte Übertragung mithilfe von Mobilfunkschnittstelle: Jede ITS-Station ist mit einer Direktkommunikationstechnologie und Mobilfunkschnittstelle ausgestattet. Nachrichten werden zusätzlich an Mobilfunkzellen übermittelt, die wiederum an ITS-Stationen senden.	Ja	Nein	Hoch	Mittel	Gering	Ja
Infrastrukturbasierte Konvertierung: V2X-Nachrichten werden an Infrastrukturausrüstung versendet, dort konvertiert bzw. übersetzt und anschließend über alle Funktechnologien an alle anderen ITS-Stationen übertragen.	Ja	Limitiert	Hoch	Mittel	Gering	Ja

Aus der Tabelle 3-8 wird ersichtlich, dass Interoperabilität auf Basis der bisher existierenden Kommunikationstechnologien und deren Folgegenerationen nur mit zusätzlichem Aufwand und steigenden Kosten realisierbar sind. Außerdem ist zu analysieren, ob infolge der genannten Maßnahmen die Anforderungen sicherheitskritischer und fortgeschrittener Vernetzungsanwendungen an Latenz, Zuverlässigkeit und Datenrate sichergestellt werden können.

Für die Umsetzung von ITS-Anwendungen wurden in der EU unterschiedliche Anteile des 5,9 GHz Frequenzbandes reserviert. Mit dem Durchführungsbeschluss 2020/1426 wurde die Nutzung der Funkfrequenzen im Frequenzband 5875-5935 MHz für sicherheitsbezogene Anwendungen harmonisiert und um 30 MHz erweitert. Insgesamt ist der relevante Teil des 5,9 GHz Frequenzbandes wie folgt aufgeteilt [54, S. 4]:

- 5855-5875 MHz: nicht sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen
- 5875-5935 MHz: sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen
 - 5875-5915 MHz: ITS-Anwendungen im Straßenverkehr haben Vorrang
 - 5915-5935 MHz: ITS-Anwendungen im städtischen Schienenverkehr (CBTC) haben Vorrang
 - 5915-5925 MHz: Zugang des Straßenverkehrs ausschließlich auf ITS-Anwendungen mit Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen (I2V) beschränkt

Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit das zur Verfügung stehende Spektrum den steigenden Zahlen vernetzter Verkehrsteilnehmer und den zunehmenden Anforderungen der Vernetzungsanwendungen gerecht wird. In einer Simulationsstudie der 5GAA wurde diesbezüglich eine vorläufige Schätzung des notwendigen Frequenzspektrums formuliert. Dabei wurden Straßengeometrie, geografische Dichte und Geschwindigkeit des Verkehrs, Größe, Wiederholungsrate, Datenrate und Latenzanforderungen unterschiedlicher V2X-Nachrichten sowie die spektrale Effizienz der Datenübertragung berücksichtigt. Unter der Annahme einer hundertprozentigen Marktdurchdringung kommen sie zu dem Ergebnis, dass für grundlegende Sicherheitsanwendungen (Tag 1) zwischen 10 und 20 MHz und für fortgeschrittene Applikationen (Tag 2) mindestens weitere 40 MHz erforderlich sind. Vor allem die Anforderungen hinsichtlich fortgeschrittener Use Cases wie der kooperativen Perzeption, bei der Sensordaten einzelner Verkehrsteilnehmer geteilt werden, sind von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Dazu gehören beispielsweise das Maß der Datenvorverarbeitung (siehe Sensorfusion in Kapitel 3.2.3.2) in den Fahrzeugen und die Frequenz des Datenaustausches. Solange hierfür keine standardisierten Rahmenbedingungen geschaffen sind, ist es schwierig, den genauen Frequenzbedarf zu identifizieren. Neben dem 5,9 GHz-Frequenzband wird zusätzlich die Bereitstellung von 50 MHz im dienstleistungsunabhängigen Frequenzband unter 1 GHz für V2N-Anwendungen in ländlichen Regionen und von 500 MHz im dienstleistungsunabhängigen Frequenzband zwischen 1 und 7 GHz für V2N-Anwendungen im städtischen Raum empfohlen [101, S. 4].

3.2.6.5 Fazit zu Kommunikationstechnologien

Aktuell stehen zwei Kommunikationstechnologien für unterschiedliche Anwendungsfälle des vernetzten Fahrens im Straßen- und Schienenverkehr zur Verfügung, welche prinzipiell alternativ anwendbar sind (WLAN-basiert oder Mobilfunk-basiert). Beide Technologien sind dafür geeignet, grundlegende Vernetzungsservices mit vergleichsweise niedrigen Anforderungen an Übertragungsgeschwindigkeit oder Datenmenge bereitzustellen.

Zukünftige Anwendungen, wie gemeinsame Umgebungswahrnehmung mehrerer Verkehrsteilnehmer durch das Teilen von Sensordaten oder gemeinsames Steuern von Fahrmanövern, übersteigen deren Leistungsspektrum allerdings merkbar. Die Etablierung großflächig vernetzter Mobilitätssysteme erfordert, dass die einzelnen Kommunikationstechnologien nicht nur alleine für sich, sondern auch in Kombination miteinander funktionieren und entsprechende Schnittstellen geschaffen werden, da ggf. andere Verkehrsteilnehmer im Mobilitätssystem auf die andere Technologie setzen.

Aktuell verhindern die unterschiedlichen Gestaltungsmerkmale der einzelnen Technologien jedoch diese Kombination, sodass hier, vor einer Vernetzung des gesamten Mobilitätssystems, weiterer Entwicklungsbedarf besteht. Bis dahin müssen für solche, hybriden Kommunikationssysteme, zur Sicherstellung der Kompatibilität, spezielle Mechanismen und Verfahren integriert werden, die sich aber negativ auf Systemeigenschaften und Implementierungsaufwand auswirken können. Die Anwendbarkeit weiterer Funktechnologien (z. B. LPWANs), auch als energieeffiziente Alternativen, für weniger sicherheitskritische Applikationen, sollten in Zukunft ebenfalls bewertet werden.

3.2.7 Kommunikationsinfrastruktur

Zur Umsetzung unterschiedlicher Vernetzungsanwendungen ist es notwendig, eine leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur zu implementieren. Die benötigten Komponenten sind dabei im Wesentlichen von den gewünschten Einsatzfeldern abhängig. In Kapitel 2.3.3 wurden bereits einige Bestandteile der Systemarchitektur im Projekt VERONIKA und zwei Leitfäden zur Einführung kommunaler C-ITS-Verkehrssysteme beschrieben. Diese werden auch in den kommenden Abschnitten referenziert. Grundsätzlich ist anzumerken, dass bisher keine standardisierte Lösung für die Gestaltung der Kommunikationsinfrastruktur existiert. Die meisten deutschen Städte verfügen lediglich über proprietäre Lösungen, die sich in einigen Aspekten ähneln. Aus diesem Grund ist die Beschreibung einer einheitlichen Infrastruktur erschwert. Diese Arbeit verfolgt nicht das Ziel, eine ganzheitliche Architektur zu definieren und dabei alle Elemente sowie deren potenzielle Schnittstellen auszuformulieren. Vielmehr soll aufgezeigt werden, welche Komponenten und Systeme zur Etablierung von relevanten Vernetzungsanwendungen nötig sind und wie diese gegebenenfalls verknüpft sein können.

Im nachfolgenden Abschnitt werden daher basierend auf Abbildung 3-12 wichtige Bestandteile einer kommunalen Kommunikationsinfrastruktur erläutert. Bezüglich der Schnittstellen und Kommunikationstechnologien werden standardisierte Varianten gewählt.

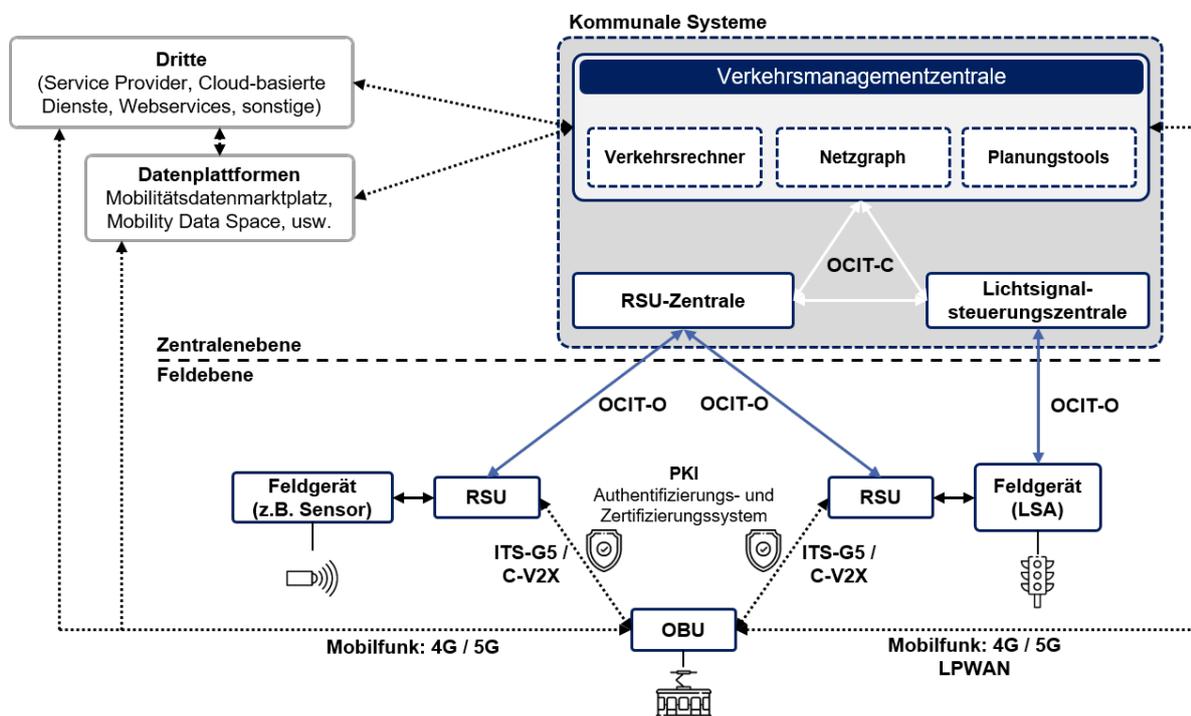


Abbildung 3-7: Beispielhafte Darstellung einer Kommunikationsinfrastruktur (vgl. [58, 63, 59])

Hierarchisch kann zwischen Feld- und Zentralenebene unterschieden werden. Neben fahrzeuginternen OBUs, gehören RSUs und die mit ihnen verbundenen Infrastrukturelemente wie Lichtsignalanlagen, Verkehrszeichen oder zusätzlich installierte Sensorik zu den Feldgeräten. Fahrzeug- und streckenseitige V2X-Geräte kommunizieren dabei über ITS-G5 oder LTE-V2X. Überwacht wird diese Nahbereichskommunikation mithilfe eines Authentifizierungs- und Zertifizierungssystems, dem PKI, auf welches unten weiter eingegangen wird. Für manche V2V- oder V2I-Applikationen wie kooperative Perzeption oder die Übertragung der Ampelphase sind Feldgeräte ohne weitere Schnittstellen theoretisch ausreichend. Andere Informationen, beispielsweise solche zur Verkehrssteuerung, werden demgegenüber aus der Zentralenebene bereitgestellt. Auf kommunaler Seite sind hierbei das Verkehrsmanagementsystem, die RSU-Zentrale und die Lichtsignalsteuerungszentrale zu nennen. Darüber hinaus können Fahrzeuge über eine Mobilfunkanbindung mit Diensten Dritter Informationen austauschen. Daten aus Datenplattformen wie dem Mobilitätsdatenmarktplatz (MDM) oder dem Mobility Data Space (MDS) werden üblicherweise in das kommunale System eingespeist und anschließend anwendungsspezifisch über verschiedene Übertragungspfade an Fahrzeuge weitergeleitet.

Die Datenübertragung zwischen Feld- und Zentralenebene sowie innerhalb der Zentralenebene kann mithilfe standardisierter OCIT-Schnittstellen (*Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems*) realisiert werden. Diese werden von der ODG (*OCIT Developer Group*), einem Zusammenschluss unterschiedlicher Signalbaufirmen entwickelt. Ziel ist es dabei, die wichtigsten Schnittstellen in Verkehrssteuerungssystemen zu standardisieren und so den reibungsfreien Datenaustausch zwischen Produkten verschiedener Hersteller zu gewährleisten.

Im Allgemeinen steigen mit zunehmender Vernetzung, auch in anderen Bereichen außerhalb des Verkehrs, gleichermaßen die Anforderungen an die Ausgestaltung des Glasfasernetzwerks als Rückgrat jeglicher Kommunikationsnetze. Hierzu werden bis Ende 2023 im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts KIGLIS (Künstliche Intelligenz zur Optimierung von Glasfasernetzen in einer intelligenten Stadt) die Anwendungsbedürfnisse von Smart Cities analysiert. Im Fokus steht die Planung von Netzwerken und Infrastruktur [102].

Die Kommunikationsinfrastruktur besteht aus den folgenden fundamentalen Komponenten, Systemen und Schnittstellen:

On-Board-Units (OBU): Die fahrzeugseitige Kommunikationskomponente besteht aus Sende-/Empfangseinheit und Prozessor. Sie dient der Vernetzung mit anderen Kommunikationsgeräten. Diese kann über spezielle V2X-Standards wie ITS-G5 und LTE-V2X oder über Mobilfunkschnittstellen umgesetzt werden. Die Implementierung einer LPWAN-Schnittstelle ist ebenfalls denkbar.

Road-Side-Units (RSU): Die infrastrukturseitige Kommunikationskomponente besteht ebenfalls aus Sende-/Empfangseinheit und Prozessor. Sie ist meistens an weitere Infrastrukturelemente wie Sensoren oder LSA-Steuerungen angeschlossen, um relevante Daten an OBUs zu kommunizieren. Die Vernetzung kann mithilfe der gleichen Kommunikationsstandards realisiert werden, die auch in OBUs Anwendung finden.

Authentifizierungs- und Zertifizierungssystem: Dieses wird auch als PKI (*Public-Key-Infrastructure*) bezeichnet und ist Teil der Cybersicherheit. Fahrzeuge und RSUs erhalten zum Herstellungszeitpunkt Langzeitzertifikate, die von einer sogenannten *Certification Authority (CA)* bereitgestellt werden. Das Fahrzeug erstellt intern Kurzzeitzertifikate, die über einen gesicherten Kanal an die CA übermittelt werden. Dort wird jedem Kurzzeitzertifikat ein Pseudonym zugeordnet, welches zur Kommunikation zwischen OBU und RSU verwendet wird. Die Zugehörigkeit von Pseudonymen zu Kurzzeitzertifikaten und somit zu Langzeitzertifikaten wird in der CA gespeichert und kann im Missbrauchsfall widerrufen werden [89, S. 11]. Zur

Identifikation vertrauenswürdiger Kommunikationspartner werden spezielle Kryptografieverfahren angewandt [59, S. 139]. Während diverse Anbieter von PKIs existieren, wird es notwendig sein, europaweit einheitliche Strukturen für die Integration von Verkehrsvernetzung zu etablieren.

RSU-Zentrale (RSUZ): Die RSUZ dient der Betriebsüberwachung aller RSUs im Zuständigkeitsbereich.

Lichtsignalsteuerungszentrale (LStZ): Die LStZ stellt den zentralen Rechner zur Steuerung aller Lichtsignalanlagen im Zuständigkeitsbereich dar.

Verkehrsmanagementzentrale: In dieser zentralen Instanz werden unterschiedliche Steuerungsfunktionen des Verkehrs geplant, durchgeführt und überwacht. Verkehrsmanagementzentralen unterscheiden sich von Kommune zu Kommune, sodass es schwierig ist, allgemeingültige Aussagen zu treffen. Potenzielle Bestandteile sind Verkehrsrechner, Planungstools und ein Netzgraph. Letzterer stellt ein Knoten-Kanten-Modell der infrastrukturellen Gegebenheiten der Stadt dar und kann Fahrstreifen, Abbiegebeziehungen, Vorfahrtsregeln, Haltelinien usw. enthalten [59, S. 53]. Der Netzgraph beinhaltet somit grundlegende Informationen für zahlreiche V2I-Anwendungen. Die Interpretierbarkeit der Daten wird durch die Zuordnung von Lageinformationen innerhalb eines Bezugssystems sichergestellt (Georeferenzierung).

Datenplattformen: Deutschland- und europaweit verfolgen Industrie und Politik das Ziel, möglichst viele Mobilitätsdaten zu erheben und auf einheitlichen, ortsübergreifenden Datenplattformen für diverse Anwendungszwecke bereitzustellen. Einzelne Länder verfügen dabei über sogenannte nationale Zugangspunkte (engl.: National Access Points – NAP). Diese werden basierend auf der Mobilitätsdatenverordnung mit bestimmten Daten (zunächst statische, in Zukunft ebenfalls dynamische Daten) gespeist. Derzeit dient der MDM als nationaler Zugangspunkt für Verkehrsinformationen in Deutschland. Er wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) betrieben und ermöglicht das kostenlose Anbieten, Suchen und Abonnieren ausgewählter Mobilitätsdaten. Diese Zusatzinformationen können für weitere Vernetzungsanwendungen integriert werden. Zur Übermittlung der Verkehrsdaten wird das standardisierte, maschinenlesbare Datenformat DATEX II genutzt [103]. Im Verlauf des Jahres 2022 wurde der MDM als NAP durch die Mobilithek abgelöst. Neben den NAPs existieren noch weitere Plattformen, auf denen Mobilitätsdaten gehandelt werden. Hierzu zählt beispielsweise der Mobility Data Space (MDS).

Dritte: Darunter werden Online- und Cloudapplikationen von externen Dienstleistern wie Fahrzeugherstellern, Mobilitätsanbieter, Verkehrsbetriebe usw. zusammengefasst.

OCIT-Outstations (OCIT-O): Über diese standardisierte Schnittstelle werden Daten zwischen Feldgeräten und der Zentralenebene ausgetauscht. Damit werden herstellerunabhängig Infrastrukturelemente wie LSA-Steuergeräte an zentrale Softwaresysteme angebunden. Zu den Aufgaben gehört die Versorgung, Bedienung und Überwachung von Feldgerätefunktionen aus der Ferne. Die Schnittstelle ist nicht auf ein besonderes Kommunikationsmedium beschränkt, sodass vorhandene Kabelverbindungen, Funkverbindungen oder das Internet verwendet werden können. Mit der aktuellsten Version OCIT-O V3.0 wurde die Schnittstelle um die Fähigkeit zur Übermittlung von V2X-Nachrichten erweitert. Damit sind ITS-Funktionen mit Bezug zu CAM-, DENM-, MAP- und SPAT-Nachrichten möglich [104, S. 13]. Andere Nachrichtenformate sind derzeit noch nicht integriert.

OCIT-Center-to-Center (OCIT-C): Im Gegensatz zu OCIT-O wird mit OCIT-C der standardisierte Datenaustausch zwischen unterschiedlichen zentrale Verkehrssteuerungs- und Verkehrslenkungssysteme realisiert. Die bereits beschriebenen Eigenschaften von OCIT-O V3.0 sind auf die aktuelle Version OCIT-C V2.0 übertragbar.

Fazit zur Kommunikationsinfrastruktur

Um Vernetzungsanwendungen zu integrieren, ist ein Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur, sowohl fahrzeug- als auch umgebungsseitig, erforderlich. Zentrale Grundelemente einer Vernetzungsinfrastruktur sind die Geräte zur Ausstattung von Fahrzeugen (OBU), der Infrastruktur (RSU) und die Implementierung entsprechender Planungs- und Steuerungsfunktionen im städtischen Verkehrsmanagementsystem. Neben der Auswahl geeigneter Technologien zur Kommunikation zwischen OBUs und RSUs, ist ebenfalls die Nutzung standardisierter Schnittstellen (OCIT-Schnittstellen) zwischen einzelnen Bestandteilen der Infrastruktur zielführend. Zur sicheren Kommunikation muss die Implementierung einer Infrastruktur zur Cyber-Sicherheit (PKI) mitgedacht werden.

4 Funktionalität der Technologien bezogen auf die Automatisierung des Straßenbahnsektors

4.1 Zielsetzungen und Potenziale einer Automatisierung

Nachfolgend werden die bisher erarbeiteten Ergebnisse aus Literaturrecherche, Experteninterviews und projektteaminternen sowie Expertenworkshops gebündelt, um konkrete Konzepte für mögliche technische Umsetzungen abzuleiten. Für eine zielgerichtete Entwicklung technologischer Lösungsansätze ist es zuvor erforderlich, die wesentlichen Potenziale der Automatisierung im Straßenbahnsektor zu identifizieren. Dabei wird vor allem auf die Meinungen der Teilnehmer des Expertenworkshops zurückgegriffen.

Auch wenn sich die Umsetzungsmöglichkeiten automatisierter Fahrfunktionen im Straßenbahnbereich erheblich von denen des U- oder S-Bahnbetriebs unterscheiden, werden dennoch größtenteils ähnliche Ziele verfolgt. Dazu zählen beispielsweise [21, S. 7]:

- Taktverdichtung zur Steigerung der Strecken- und Transportkapazität
- Anstieg der Fahrplanstabilität und Pünktlichkeit
- Reduktion des Energieverbrauchs durch optimierte Fahrweise
- Reduktion des Verschleißes mechanischer Komponenten durch optimierte Fahrweise
- Erhöhung des Fahrgastkomforts durch optimierte Fahrweise
- Steigerung der Flexibilität für bedarfsorientierten Verkehr durch Entkopplung vom Personaleinsatz

Infolge der stärkeren Interaktion mit anderen, nicht schienengebundenen Verkehrsteilnehmern muss jedoch die Realisierbarkeit der genannten Punkte analysiert werden. Vor allem die Aspekte „Taktverdichtung“ und „Erhöhung der Fahrplanstabilität“ sind aufgrund der Abhängigkeit von vielen nicht straßenbahnbetriebsbezogenen Faktoren schwierig oder lediglich in geringerem Ausmaß erreichbar. Während im U- und S-Bahnbetrieb die auf Lokalisierung und Gleisfreimeldung basierende automatisierte Zugsicherung ein Fahren in immer kleineren festen oder gar im bewegten Raumabstand ermöglicht, ist diese Funktion im Straßenbahnbereich nicht nutzbar. Vielmehr wird die Fahrwegfreiheit in den meisten Situationen derzeit durch Fahren auf Sicht gewährleistet. Dementsprechend müssen andere Lösungsansätze zur Erfüllung der Potenziale herangezogen werden. Darüber hinaus wird der Unfallvermeidung durch automatisierte Teilfunktionen bei Straßenbahnen eine größere Rolle zugeschrieben.

Die Fragestellung nach den wichtigsten Potenzialen, die im Zuge der Straßenbahnautomatisierung erreicht werden sollen, wurde ebenfalls im Expertenworkshop mit 37 Teilnehmern behandelt. Neben einer inhaltlichen Diskussion wurde durch Abstimmung eine einfache Bewertung (Einfachnennung) verschiedener Zielsetzungen vorgenommen (siehe Abbildung 4-1).

Aus den Umfrageergebnissen geht hervor, dass der Bedarf an taktverdichtenden und kapazitätssteigernden sowie unfallreduzierenden Lösungsansätzen dominiert. Begründet wird diese Tatsache in der zunehmenden Notwendigkeit eines ausgeweiteten ÖPNV-Angebots infolge steigender Nachfrage. Gleichzeitig dramatisiert sich der Personalangel im Schienenverkehr, sodass eine Ergänzung durch automatisierte

Umfrageergebnisse: Was sind die Potenziale, die mit der Automatisierung des Straßenbahnbetriebs verfolgt werden sollten?

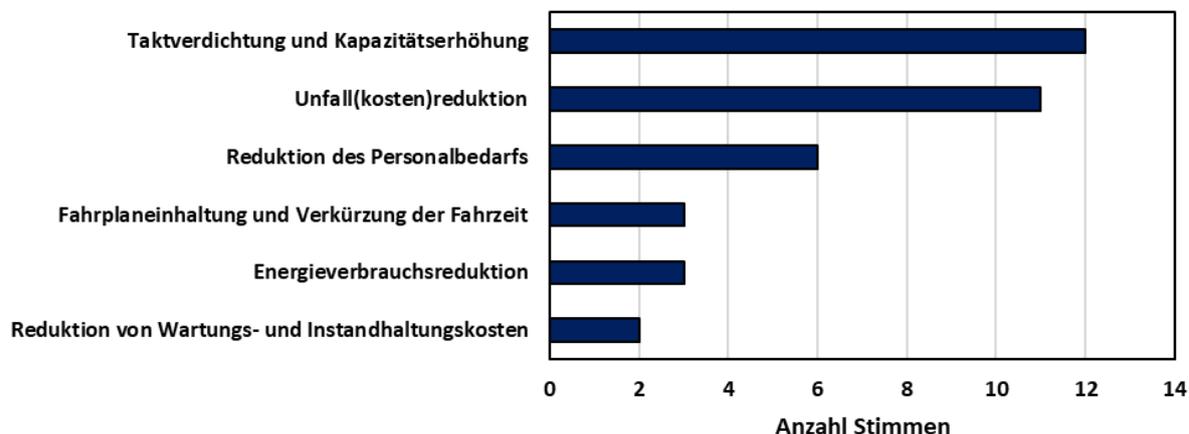


Abbildung 4-1: Umfrageergebnisse zum Thema Automatisierungspotenzial [66]

Straßenbahnen in Zukunft Abhilfe schaffen kann. Die Reduktion der Unfallzahlen ist aufgrund der Kritikalität und Fatalität ebenfalls anzustreben. Straßenbahnen sind zwar absolut betrachtet in weniger Unfälle verwickelt als beispielsweise Pkw oder Busse, jedoch resultieren diese in einer überproportional hohen Anzahl an getöteten oder schwer verletzten Personen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass häufig vulnerable Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Radfahrer von Straßenbahnen erfasst werden [105]. Darüber hinaus sind Unfälle mit anderen Fahrzeugen aus betrieblicher Sicht mit erheblichen Kosten und Störungen verbunden.

Bei den Umfrageergebnissen handelt es sich nur um ein Stimmungsbild innerhalb eines vergleichsweise engen Personenkreises. Daher sollte von einer tiefergehenden Interpretation der Ergebnisse abgesehen werden. Letztendlich obliegt es den verantwortlichen Verkehrsbetrieben und Kommunen, welche technische Entwicklungsrichtung zur Erfüllung individuell angestrebter Veränderungen eingeschlagen wird. Im nächsten Kapitel werden unterschiedliche Ansätze bzw. Konzepte vorgestellt, die sich Automatisierungs- und Vernetzungsfunktionen zunutze machen, um einzelne oder mehrere der oben beschriebenen Potenziale zu erfüllen.

Abgesehen von den Zielen und Potenzialen der Automatisierung, die sich im „klassischen“ Straßenbahnbetrieb ergeben, können durch automatisierte Fahrfunktionen im Straßenbahnbereich auch zusätzliche, neue Geschäftsfelder entstehen. Eine mögliche Anwendung ergibt sich durch eine konsequente Nutzung bestehender, aber nicht genutzter Kapazitäten. Ausgehend von der Annahme, dass insbesondere in Schwachlastzeiten nicht alle Sitzplätze in Straßenbahnfahrzeugen belegt sind und auch ein Teil der Multifunktionsbereiche leer stehen, besteht die Grundidee einer zusätzlichen Nutzung darin, diese ungenutzten Flächen für den Transport von Gütern zugänglich zu machen. Diese Art der kombinierten Nutzung für den Personen- und Güterverkehr ist nicht nur vorteilhaft für eine effiziente Nutzung des Transportvolumens einer Straßenbahn, sondern vermindert dadurch auch Fahrten mit anderen Verkehrsmitteln und damit auch deren Energieverbrauch bzw. deren Schadstoffemissionen sowie die Belegung des Straßenraums durch diese Fahrzeuge.

Natürlich sind Straßenbahnen aufgrund ihres primären Einsatzzwecks zur Personenbeförderung nicht per se für den Transport von Gütern vorgesehen, allerdings zeigen Studien [106, 107] und Forschungsprojekte, dass entsprechende Transportmöglichkeiten mit vertretbarem Aufwand geschaffen werden können. Als Beispiel sei das Verbundprojekt „Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierter Gütertransport - LogIKTram“ [108] aufgeführt.

Im Verbundprojekt LogIKTram wird ein Logistikkonzept sowie eine Informations- und Kommunikationstechnik-(IKT)-Plattform für einen zukünftigen Gütertransport in Straßen- und Stadtbahnwagen entwickelt. So wird der Güterverkehr in der Region Karlsruhe auch auf mittleren und kurzen Strecken stärker von der Straße auf die Schienen verlagert und ein innovatives, umweltfreundliches Transportsystem, eine „Gütertram“, für die städtische und regionale Versorgung von Unternehmen und Haushalten geschaffen. Als eine der möglichen Varianten für den Gütertransport im Straßenbahnfahrzeug wird ein elektrisch angetriebener Fahrradanhänger genutzt und als Demonstrator aufgebaut. Dabei ist vorgesehen, dass dieser im Verteilzentrum außerhalb der Stadt beladen und dann mit der Straßenbahn in die Stadt transportiert wird. An der Zielhaltestelle übernimmt ihn ein Fahrradkurier, der dann die Auslieferung der Waren im Zustellgebiet übernimmt. Der Fahrradanhänger wird so ausgerüstet, dass er automatisiert in das Straßenbahnfahrzeug bzw. aus diesem herausfahren sowie sich innerhalb des Straßenbahnfahrzeugs automatisch gegen Verrutschen sichern kann, ohne dass zusätzliches Personal benötigt wird.

Um dieses Konzept möglichst effizient umzusetzen, muss das Straßenbahnfahrzeug sehr genau an der Haltestelle positioniert werden, so dass der automatisierte, elektrisch angetriebene Fahrradanhänger ohne seitliches Rangieren in die Bahn einfahren und somit der Beladevorgang innerhalb der üblichen Fahrgastwechselzeiten erfolgen kann. Diese Positionierung wird vorteilhaft durch eine automatisierte Fahrfunktion realisiert.

Gleichzeitig kann diese automatisierte Positionierfunktion auch dazu genutzt werden, das Straßenbahnfahrzeug an beliebigen Haltestellen so zum Stehen zu bringen, dass insbesondere die Türen für den Zugang mobilitätseingeschränkter Personen an den am Bahnsteig markierten Bereichen positioniert sind, so dass auch hier Wege in Längsrichtung des Fahrzeugs vermeiden werden. Zusätzlich kann die Steuerung so optimiert werden, dass der Pantograph – sofern keine mobilitätseingeschränkten Personen einsteigen möchten – jeweils an unterschiedlichen Stellen zum Stehen kommt, so dass der Verschleiß des Fahrdrahts beim Anfahren gleichmäßiger auf den Haltestellenbereich verteilt wird.

4.2 Lösungsansätzen zur Erfüllung einzelner Potenziale

4.2.1 Beschreibung der Vorgehensweise

Fahrerassistenzsysteme und Pilotprojekte zur Vernetzung oder weiteren Automatisierung von Betriebsabläufen existieren mittlerweile nicht nur im Straßenverkehr, sondern auch im Straßenbahnsektor. Dennoch ist die Forschungslandschaft primär auf Anwendungen im Pkw-Umfeld fokussiert. Innerhalb dieses Unterkapitels wird daher das Ziel verfolgt, diverse Möglichkeiten der Integration automatisierter oder vernetzter Funktionen im Straßenbahnverkehr qualitativ darzulegen. Dazu werden einzelne Lösungskonzepte vorgestellt, die den in Kapitel 4.1 dargestellten Zielsetzungen zuzuordnen sind. Darüber hinaus werden unterschiedliche Konzeptabstufungen berücksichtigt, die in Funktionsumfang, Komplexitätsgrad aber auch aktueller Marktreife voneinander abweichen. Die Lösungsansätze werden wie in Abbildung 4-2 dargestellt kategorisiert und benannt. Die Nomenklatur wird auch im nachfolgenden Kapitel beibehalten, wenn notwendige Querschnittstechnologien identifiziert und die Erfüllung von Automatisierungspotenzialen und Anforderungen bewertet werden. Um die Anzahl überschaubar zu halten, wird von einer Kombination einzelner Konzepte abgesehen, auch wenn diese grundsätzlich möglich und anzustreben ist.

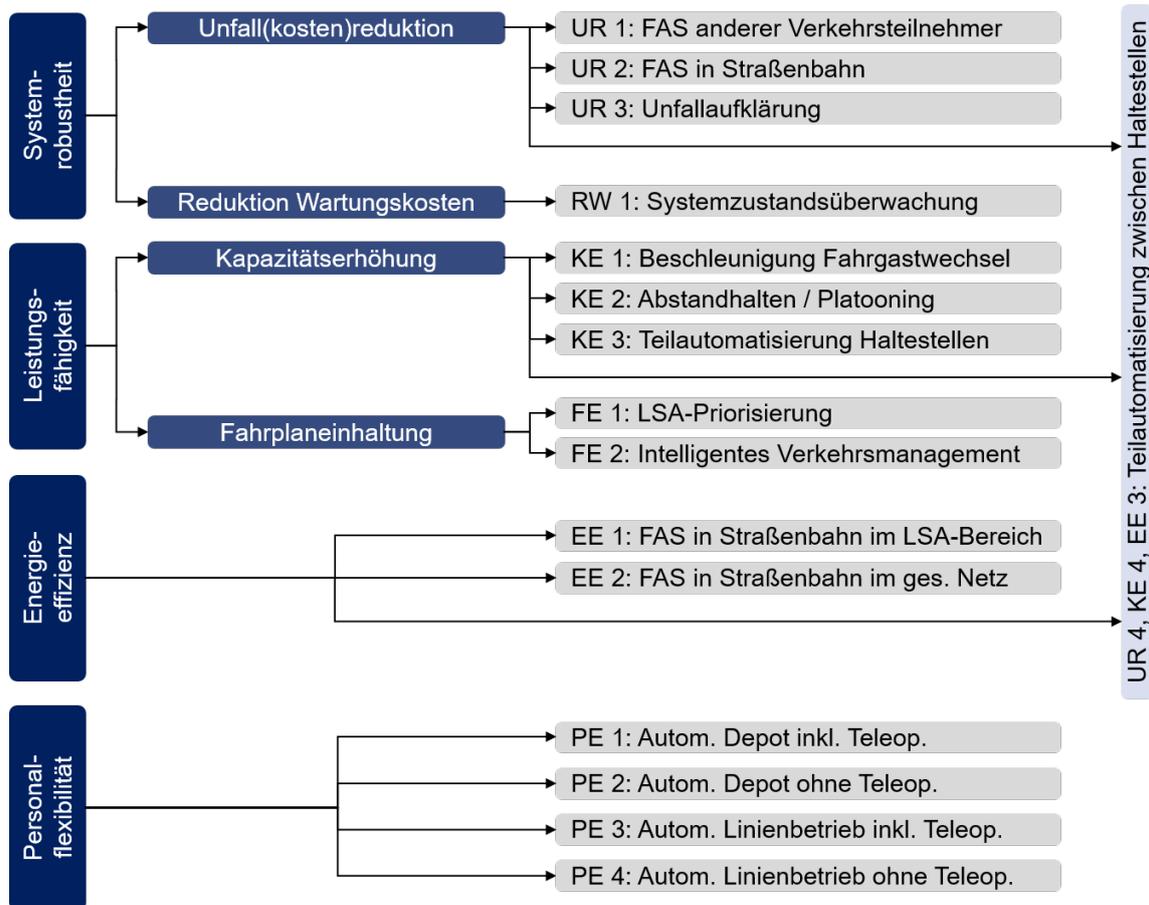


Abbildung 4-2: Kategorisierung und Nomenklatur der Lösungskonzepte

4.2.2 Systemrobustheit

4.2.2.1 Unfallkostenreduktion (UR 1): Fahrerassistenzsystem für andere Verkehrsteilnehmer

Eine Vielzahl von Straßenbahnunfällen ist darauf zurückzuführen, dass Teilnehmer des Straßenverkehrs aufgrund fehlender Aufmerksamkeit oder Situationswahrnehmung eine Kollision mit Straßenbahnfahrzeugen verursachen. Durch eingeschränkte Manövrierbarkeit und lange Bremswege, die primär aus Längsbeschleunigungsgrenzwerten, der großen Masse und dem geringen Reibwert zwischen Schiene und Rad resultieren, ist eine Reaktion des Fahrzeugführers meist unmöglich. Solche Unfälle lassen sich gegebenenfalls durch einschlägige Warnhinweise bezüglich sich nähernder oder kreuzender Straßenbahnen in der Kabine von Pkw oder Lkw verhindern. In ersten Vernetzungsanwendungen wird das standardisierte Nachrichtenformat DENM (*Decentralized Environmental Notification Message*) bereits zur Warnung vor Gefahrensituationen wie Verkehrsstaus oder Straßenarbeiten sowie vor ankommenden Einsatzfahrzeugen genutzt. Neben Einsatzfahrzeugen wie Krankenwagen oder Baustellenfahrzeugen lassen sich Straßenbahnen ebenfalls in diese Funktion integrieren. Verfügt ein Straßenbahnfahrzeug über eine OBU mit entsprechender V2X-Kommunikationstechnologie kann eine Warnung im DENM-Format an relevante vernetzungsfähige Verkehrsteilnehmer übermittelt werden. Da es sich um reine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation handelt (V2V), ist keine zusätzliche streckenseitige Infrastruktur erforderlich.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Anforderungen an Latenz und Datenrate, sind für diese Vernetzungsanwendung die aktuellen Kommunikationstechnologien ITS-G5 (basierend auf IEEE 802.11p) und LTE-V2X ausreichend. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass beide im Broadcast kommunizieren und somit alle in der Nähe befindlichen V2X-Geräte angesprochen werden. Daher obliegt es dem Fahrerassistenzsystem zu entscheiden, ob die Nachricht von Relevanz für den eigenen Fahrverlauf ist und somit als Warnung an den Fahrer ausgegeben werden muss. Eine Anzeige in nicht betroffenen Fahrzeugen führt unmittelbar zur Ablenkung des Fahrers und hat negative Auswirkungen auf dessen Akzeptanz. Infolgedessen ist es notwendig, dass beide Fahrzeuge mit adäquater Lokalisierungssensorik ausgestattet sind, um eine individuelle Bewertung der Kritikalität vorzunehmen.

Als Nachteil ist festzuhalten, dass diese Funktion lediglich Fahrzeugen mit Vernetzungsmöglichkeiten zur Verfügung steht. Der kumulative Nutzen steigt deshalb mit einer zunehmenden Marktdurchdringung von Vernetzungstechnologien im Straßenverkehr an.

4.2.2.2 Unfallkostenreduktion (UR 2): Kollisionsvermeidende Fahrerassistenzsysteme in Straßenbahnen

Frontkollisionsschutzassistenten sind bereits seit einigen Jahren in Straßenbahnfahrzeugen im Einsatz. Die bekanntesten Systeme wurden in Kapitel 2.2.4.1 aufgezählt und näher beschrieben. Sie bilden die Basis für die hier vorgestellten potenziellen Erweiterungen kollisionsvermeidender Fahrerassistenzsysteme. Die marktreifen Produkte greifen auf die Daten der fahrzeugseitig integrierten Sensorik zurück. Kamera- und Radarsensoren dienen der Detektion und Klassifizierung von Objekten. Zusätzlich wird in einer Recheneinheit das Kollisionsrisiko unter Berücksichtigung von Entfernung und prädizierter Trajektorie ermittelt. Daraus werden schließlich Warnhinweise oder, bei fehlender Reaktion des Fahrers, auch automatische Bremsbefehle generiert. Da der Fahrer dauerhaft die Verantwortung trägt, ist es akzeptabel, dass Kamera und Radar unter bestimmten Umgebungsbedingungen eine beeinträchtigte Performance aufweisen. Auch die Tatsache, dass durch Gegenstände oder enge, nicht einsehbare Kurvenverläufe verdeckte Objekte kaum erfasst werden können, ist hinnehmbar, weil das Assistenzsystem selbst keine sicherheitskritischen Fahrfunktionen übernimmt. Es entspricht primär den Anforderungen, die in der VDV-Schrift 191 [67] definiert werden. Insgesamt wird durch die vermehrte Integration von Kollisionsschutzassistenten ein wesentlicher Beitrag zur Vermeidung von Straßenbahnunfällen geleistet.

Gleichzeitig ist es denkbar, die Systeme sowohl hinsichtlich ihrer Wahrnehmungsfähigkeiten als auch der Redundanz und Zuverlässigkeit zu verbessern. Hierfür existieren neben der Verbesserung der fahrzeuginternen Hard- und Software zwei Optionen:

- **Kooperative Perzeption basierend auf Fahrzeugvernetzung (V2V):**
Dieses Konzept macht sich die Möglichkeiten der kooperativen Perzeption zunutze. Dabei werden von unterschiedlichen Fahrzeugen (Straßen- und Schienenverkehr) detektierte Objekte über V2X-Kommunikation miteinander geteilt. Diese Informationen werden mit der eigenen sensorischen Umgebungswahrnehmung fusioniert (siehe Sensorfusion in Kapitel 3.2.3.2). Einerseits wird so die Zuverlässigkeit und Redundanz verbessert, andererseits werden Objekte außerhalb des fahrzeugindividuellen Sichtfeldes einbezogen.
- **Kooperative Perzeption basierend auf infrastrukturseitiger Sensorik und Vernetzung (V2I):**
Im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Erweiterung ist auch die Verwendung infrastrukturseitiger, ortsfester Sensorik zur Verbesserung der Umgebungswahrnehmung möglich. Diese wird an geeigneten Positionen innerhalb eines komplexen oder sicherheitskritischen Verkehrsraums (z. B. Kreuzungsbereich) implementiert. Während sich die Funktionsweise hierbei nicht von der V2V-basierten kooperativen Perzeption unterscheidet, ist zusätzliche streckenseitige Infrastruktur erforderlich.

Auch wenn es sich hierbei weiterhin um Fahrerassistenzsysteme handelt (erweiterter Kollisionsschutzassistent) stellen beide Varianten einzeln betrachtet oder in Kombination hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Kommunikationstechnologien. Die Gewährleistung geringer Übertragungslatenzen und zuverlässiger, fehlerfreier Datenübertragung haben oberste Priorität. Dies ist darin begründet, dass der Fahrzeugführer nur dann Vertrauen in das Assistenzsystem entwickelt, wenn es eine geringe Fehleranfälligkeit aufweist. Für Anwendungen im Bereich der kooperativen Perzeption ist die Eignung bisher verfügbarer Kommunikationstechnologien zu hinterfragen. Wie in Kapitel 3.2.6 erörtert, werden für komplexere Einsatzbereiche die in Entwicklung befindlichen Folgetechnologien (IEEE 802.11bd und NR-V2X) empfohlen.

Grundsätzlich ist der Nutzen der vorgeschlagenen Funktionserweiterungen stark von der letztendlichen Umsetzung abhängig. Eine rein auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation basierte Weiterentwicklung erzielt nur dann den gewünschten Mehrwert, wenn genügend andere Verkehrsteilnehmer sowohl mit Umgebungssensorik als auch mit Vernetzungsfähigkeiten ausgestattet sind. Demgegenüber kann im Zuge der Implementierung infrastrukturseitiger Sensorik und der Installation von RSUs systematisch der Funktionsumfang des Fahrerassistenzsystems an bestimmten Orten im Schienennetz optimiert werden. Darüber hinaus lässt sich dieser Ausbau mit anderen Assistenzfunktionen kombinieren, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels diskutiert werden. Im Folgenden werden zur Unterscheidung die Abkürzungen UR 2.1 (FAS ohne Vernetzung), UR 2.2 (FAS inkl. V2V-Vernetzung) und UR 2.3 (FAS inkl. V2I-Vernetzung) verwendet.

Vor der Kommerzialisierung derartiger Systeme sind weitere Studien notwendig, in denen der erforderliche Funktionsumfang und die funktionalen Mindestanforderungen definiert werden. Dies ist zielführend, um ähnlich der VDV-Schrift 191 einen standardisierten Rahmen für die Entwicklung erweiterter Kollisionsschutzassistenten zu formulieren.

4.2.2.3 Unfallkostenreduktion (UR 3): Unfallaufklärung

Fahrzeugseitige Umgebungssensorik kann neben der Funktion als warnendes oder eingreifendes Fahrerassistenzsystem ebenfalls zur Aufklärung von Unfällen und somit zur Identifikation der Unfallverantwortlichen genutzt werden. Dadurch lassen sich Unfälle zwar nicht vermeiden, eine Verringerung der entstehenden Folgekosten ist jedoch denkbar. Zu beachten sind dabei in erster Linie datenschutztechnische Randbedingungen. Um die Persönlichkeitsrechte unbeteiligter Verkehrsteilnehmer nicht zu missachten, sollte von einer permanenten und anlasslosen Aufzeichnung (inkl. Speicherung) des Verkehrsgeschehens abgesehen werden. Eine Verletzung der Rechte anderer Verkehrsteilnehmer ist in einem solchen Fall nur dann ausgeschlossen, wenn personenbezogene Daten unkenntlich gemacht werden (Verpixelung von Gesichtern, Kennzeichen, usw.). Diesem Mehraufwand kann durch eventbasiertes, also anlassbezogenes, Aufzeichnen entgegengewirkt werden. Kommt es nur im Rahmen eines Unfalls zur Speicherung personenbezogener Daten, ist diese rechtmäßig, da die Wahrung berechtigter Interessen der Verantwortlichen (Verkehrsunternehmen) überwiegt [109].

4.2.2.4 Reduktion Wartungskosten (RW 1): Systemzustandsüberwachung

Im Grunde handelt es sich hierbei um die praktische Anwendung der in Kapitel 3.2.3.3 beschriebenen Theorie zur vorausschauenden Wartung und Instandhaltung. Diese Funktionen werden mithilfe der Auswertung von Sensordaten wichtiger technischer Komponenten und Teilsysteme realisiert. Hierzu werden KI-basierte Algorithmen eingesetzt, die Anomalien erkennen und somit Defekte präzisieren können. Es wird das Ziel verfolgt, die zeitlichen Intervalle von Wartungs- und Instandhaltungsprozessen zu flexibilisieren und somit kosten- und aufwandsseitig zu optimieren. Gleichzeitig wird dadurch die Störungsanfälligkeit von Straßenbahnen oder Infrastrukturelementen reduziert, was sich positiv auf den Betriebsablauf auswirkt. Neben Sensorik und Auswertungssoftware, die sowohl dezentral im Fahrzeug als auch zentral

im Depot bzw. der Werkstatt integriert sein kann, hat die verwendete Kommunikationstechnologie eine entscheidende Bedeutung. Da weder zeitkritische Daten noch extrem große Datenmengen zwischen Fahrzeug und Depot ausgetauscht werden müssen, kann auf Mobilfunk oder LPWANs zurückgegriffen werden. Einer Überlastung des Direktkommunikationsnetzwerkes im 5,9 GHz Frequenzband wird somit ebenfalls vorgebeugt.

Anwendungen prädiktiver Systemüberwachungsfunktionen werden bisher primär im Bereich von Fertigungsanlagen eingesetzt (Industrie 4.0). Auch wenn die Forschung sich hauptsächlich auf die automatisierte Automobilität konzentriert, können daraus in Zukunft wichtige Einsatzfelder im Straßenbahnbereich abgeleitet werden. Die Entscheidung, welche Komponenten automatisiert überwacht werden, muss vom verantwortlichen Verkehrsbetrieb getroffen werden. Zu bevorzugen sind solche, die einen großen Einfluss auf die Betriebsfähigkeit von Straßenbahnfahrzeugen haben oder generell störungsanfällig sind.

4.2.3 Leistungsfähigkeit

4.2.3.1 Kapazitätserhöhung (KE 1): Beschleunigung des Fahrgastwechsels

Da die Strecken- und Transportkapazität im Gegensatz zum U- oder Vollbahnbereich nur geringfügig durch eine Verringerung der Zugfolgeabstände beeinflussbar ist, sind im Straßenbahnbetrieb andere Stellschrauben zu identifizieren. Ein großes Potenzial geht dabei von einer Optimierung des Fahrgastwechsels aus. Dieser ist jedoch direkt vom Verhalten zu- und aussteigender Passagiere und dem generellen Passagieraufkommen abhängig. Neben konstruktiven Einflussfaktoren wie Innenraumgestaltung, Anzahl und Breite von Ein- und Ausstiegsbereichen, Bauart der Türen gibt es weitere Möglichkeiten, die Fahrgastwechselzeit zu reduzieren:

- Präzises Halten (Umsetzung als Fahrerassistenzsystem)
- Bahnsteigseitiges Kennzeichnen der Position von Türen noch vor Einfahrt der Bahn (ortsfeste Markierungen oder adaptive Lösungskonzepte, bspw. Beleuchtung)
 - Insbesondere Kennzeichnen der Türposition für mobilitätseingeschränkte Personen
- Einführung neuer Technologien zur Türüberwachung, um bewusste Störungen durch Personen zu umgehen oder der Anfälligkeit von Lichtschranken entgegenzuwirken
- Maßnahmen zu Koordination des Fahrgastwechsels:
 - Bahnsteigseitiges Anzeigen der räumlichen Belegungsverteilung innerhalb der ankommenden Bahn
 - „Einbahnstraßenregelung“ beim Zu- und Ausstieg

4.2.3.2 Kapazitätserhöhung (KE 2): Vernetzungsbasiertes Abstandhalten oder Platooning

Zugfolgezeiten, die im konventionellen Betrieb durch Fahren auf Sicht und die daraus resultierende Sicherheitseinschätzung des Fahrers bestimmt werden, können mithilfe von Sensorik und Vernetzungstechnologien teilweise reduziert werden. Dies wird erreicht, indem Fahrzeuge in sehr geringem Abstand zueinander fahren. Während das Führungsfahrzeug sowohl manuell als auch automatisiert gesteuert werden kann, werden die per V2V-Kommunikation übertragenen Steuerungsbefehle im Folgefahrzeug nachgeahmt. Im Gegensatz zur bekannten mechanischen Kupplung einzelner Straßenbahnwagen spricht man in diesem Fall auch von einer elektronischen oder virtuellen Kupplung. Hierzu ist einerseits die hochpräzise Lokalisierung der beteiligten Fahrzeuge erforderlich, andererseits muss die Datenübertragung nahezu latenz- und unbedingt störungsfrei verlaufen. Eine zusätzliche Redundanzebene kann gegebenenfalls durch die Integration von Umgebungssensorik zur Entfernungsmessung im Folgefahrzeug geschaffen werden.

Zu den Vorteilen des Platoonings zählt der je nach Abstand reduzierte Energieverbrauch als Folge des verminderten Luftwiderstandes und die zumindest lokale und temporäre Verkürzung der Zugfolgezeiten. Dadurch lassen sich beispielsweise Kreuzungen oder Bahnübergänge gleichzeitig befahren, ohne dass zusätzliche Wartezeiten entstehen. Zu berücksichtigen ist allerdings die Eignung einzelner Streckenabschnitte und Linienkombinationen. Je nach Linien- und Fahrplan verkehrt lediglich eine geringe Anzahl von Bahnen unterschiedlicher Linie für ausreichend lange Zeit auf demselben Streckenabschnitt, um Platooning zweckmäßig zu nutzen. Außerdem muss beim Befahren von Kreuzungen oder Haltestellen die angestiegene Länge der gekoppelten Fahrzeuge beachtet werden.

4.2.3.3 Kapazitätserhöhung (KE 3): Teilautomatisierung der Straßenbahnführung an Haltestellen

Wie in der Beschreibung von KE 1 (Beschleunigung des Fahrgastwechsels) bereits erwähnt, spielt die Fahrgastwechselzeit eine bedeutende Rolle hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und birgt zum aktuellen Zeitpunkt einige Optimierungspotenziale. Durch die Automatisierung der Einfahrt in und Ausfahrt aus dem Haltestellenbereich sowie die automatisierte Durchführung des Fahrgastwechsels kann hierzu ein wesentlicher Beitrag geleistet werden. Die Vorteile gegenüber der manuellen Fahrzeugsteuerung ergeben sich hauptsächlich aus der präziseren, komfortableren und gegebenenfalls schnelleren Ein- und Ausfahrt. In Kombination mit einigen der oben genannten Maßnahmen (bahnsteigseitiges Kennzeichnen der Position von Türen und Anzeigen der Belegungsverteilung) ist dadurch eine Beschleunigung des Fahrgastwechsels möglich. Darüber hinaus findet infolge der automatisierten Fahrzeugführung eine Entkopplung des fahrerindividuellen Fahrstils statt. Dies führt zu einer Steigerung der Reproduzierbarkeit des Verhaltens an Haltestellen und somit zu einer verbesserten Planbarkeit des Haltevorgangs.

Zur Umsetzung werden fahrzeugseitig unterschiedliche Sensoren zur Lokalisierung und Umgebungswahrnehmung benötigt. Da die Sicherheit der wartenden Passagiere von größter Bedeutung ist, müssen kollisionsvermeidende Systeme, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, vorhanden sein. Dabei können zusätzliche Informationen durch bahnsteigseitige Sensorik erfasst und an die Straßenbahn übermittelt werden. Wird im Zuge der Teilautomatisierung die Verantwortlichkeit vom Fahrer auf das Fahrzeug übergeben, ohne dass dessen Überwachung notwendig ist, sind weitaus höhere Sicherheitsanforderungen an das System zu definieren. Andererseits kann trotz Übergabe der Traktionsfunktionen an die Automatisierung der Fahrer dennoch Verantwortlicher mit Überwachungsaufgabe sein. Um eine ausreichende Präzision im Haltevorgang zu erreichen, sollte das Fahrzeug in der Lage sein, seine eigene Position mit einer Genauigkeit in der Größenordnung weniger Zentimeter zu bestimmen. Die Implementierung einer lokalen digitalen Karte unter Verwendung dedizierter Landmarken kann hierfür neben GNSS und Odometrie die Grundlage bilden.

4.2.3.4 Fahrplaneinhaltung (FE 1): Priorisierung an Lichtsignalanlagen

Die Priorisierung von ÖPNV-Fahrzeugen an Lichtsignalanlagen ist bereits in vielen Städten Stand der Technik. Allerdings wird hierfür veraltete Technik genutzt, die einige Nachteile ausweist (siehe Kapitel 2.3.3). Um die Potenziale einer konsequenten und intelligenten Priorisierung und Reihenfolgenvariation an signalisierten Kreuzungen ausschöpfen zu können, ist die kontinuierliche Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur erforderlich. Hierzu wurden im Projekt VERONIKA bereits einige Fahrzeuge und Knotenpunkte in Kassel mit entsprechender V2X-Technologie ausgestattet. Es wurde demonstriert, dass mit der marktreifen Kommunikationstechnologie ITS-G5 und den standardisierten Nachrichtenformaten MAP, SPAT, SSEM und SREM die grundlegende Funktionsfähigkeit erzielt werden konnte. Für weitere Informationen hinsichtlich der Funktionsweise und Ergebnisse des Projekts wird auf Kapitel 2.3.3 verwiesen. Vertiefende technische Details und Hinweise hinsichtlich der praktischen Umsetzung und Migration können außerdem der Literatur entnommen werden [58, 110, 59].

Der Nutzen einer ÖPNV-Priorisierung nimmt mit ansteigender Präzision der Prognosen und somit der hochgenauen Synchronisation von LSA-Schaltung und Fahrzeugankunft zu. Eine zeitlich abgestimmte Schaltung der Lichtsignalanlage resultiert in einer verzögerungsfreien Durchfahrt von Straßenbahnfahrzeugen und reduziert gleichzeitig die Wartezeit anderer Verkehrsteilnehmer an der Kreuzung. Mit zunehmender Vernetzung im motorisierten Individualverkehr kann die Steuerung der Lichtsignalanlage auch bei Abwesenheit von ÖPNV-Fahrzeugen optimiert werden.

4.2.3.5 Fahrplaneinhaltung (FE 2): Ganzheitliches intelligentes Verkehrsmanagement

Unter dem Begriff ganzheitliches intelligentes Verkehrsmanagement werden Steuerungsmechanismen zusammengefasst, die aufbauend auf unterschiedlichsten Informationen des Mobilitätssystems mithilfe von im Wesentlichen KI-basierter Software zur Optimierung des Verkehrs beisteuern. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten aufgezählt.

- ÖPNV-Priorisierung (siehe FE 1)
- Verspätungsminimierung durch Bevorrechtigung bzw. Anpassung der Haltestelleneinfahrtsreihenfolge
- Intelligente Umleitung bzw. Routenanpassung im Straßenverkehr zur Vermeidung einer großen Beeinflussung des Straßenbahnbetriebs
- Berücksichtigung von Haltestellenaufenthaltszeiten in LSA-Steuerung: Abschätzung und Vorhersage von Haltezeiten basierend auf bahnsteigseitiger Sensorik (z. B. Kameras zur Beurteilung der Fahrgastdichte)
- Bedarfssteuerung in Abhängigkeit des Passagieraufkommens

Insgesamt handelt es sich dabei um abstrakte, nicht detaillierte Funktionen, die mithilfe von Verkehrsvernetzung realisierbar sind. Der individuelle Nutzen einzelner Maßnahmen bzw. der damit verbundene Aufwand lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt kaum quantifizieren. All diese Teilaspekte bedürfen jedoch sowohl einer massiven Datenerfassung und Vernetzung als auch einer leistungsfähigen Verkehrsleitzentrale. Letztere kann des Weiteren Informationen von externen Plattformen wie dem MDM oder Dritten (z. B. Service-Provider) integrieren. Eine erste Abschätzung möglicher Auswirkungen können gegebenenfalls durch Verkehrssimulationen formuliert werden.

4.2.4 Energieeffizienz

4.2.4.1 Energieeffizienz (EE 1): Fahrerassistenzsystem zur Vorgabe der energieoptimalen Geschwindigkeit im LSA-Bereich

Die Energieeffizienz im Straßenbahnbetrieb kann auf unterschiedliche Art und Weise positiv beeinflusst werden. Ein optimierter Fahrstil, der gleichmäßiges Beschleunigen, Vermeiden unnötiger Bremsvorgänge, verbesserte Ausrollvorgänge und Fahren im bestmöglichen Wirkungsgradbereich vereint, stellt eine nicht zu vernachlässigende Möglichkeit dar. Wie bereits im Projekt VERONIKA demonstriert, können SPAT-Daten, die Informationen zum zeitlichen Verlauf der Ampelphase enthalten, verwendet werden, um im Anfahrtsbereich von Lichtsignalanlagen optimale Fahrgeschwindigkeiten vorzugeben. Dies wird in Form eines straßenbahnseitigen Fahrerassistenzsystems umgesetzt und erlaubt neben einer leistungsärmeren Fahrweise zusätzlich das präzise Überfahren einer Kreuzung mit Beginn der Grünphase. In Kombination mit der Priorisierung von Straßenbahnfahrzeugen (siehe FE 1) kann somit sowohl die Energie- als auch Verkehrseffizienz gesteigert werden.

Die potenzielle Energieeinsparung lässt sich jedoch nicht ohne weiteres abschätzen, da die Geschwindigkeitsvorgabe nur im Einflussbereich von Lichtsignalanlagen angezeigt werden kann. Darüber hinaus sind die üblichen verkehrs- und sicherheitstechnischen Umgebungsfaktoren zu berücksichtigen, sodass der Empfehlung nicht grundsätzlich Folge geleistet werden kann. Die Reaktion auf kreuzenden Verkehr, unübersichtliche Situationen oder andere Straßenbahnen ist von übergeordneter Bedeutung.

4.2.4.2 Energieeffizienz (EE 2): Fahrerassistenzsystem zur Vorgabe der energieoptimalen Geschwindigkeit im gesamten Schienennetz

Eine Ausweitung der energieoptimalen Geschwindigkeitsvorgabe auf das gesamte Schienennetz kann ebenfalls in Betracht gezogen werden. Eine solche holistische Herangehensweise ist nur in Verbindung mit einem intelligenten Verkehrsmanagement möglich und basiert gleichermaßen auf einer Vielzahl zur Verfügung stehender Daten. Um zu allen Zeitpunkten eine hinsichtlich des Gesamtsystems optimierte Vorgabe des Fahrprofils zu realisieren, müssen neben der Ampelphase auch Informationen zu jeglichen anderen Verkehrsteilnehmern mit etwaigem Einfluss auf die betroffene Linie vorliegen. Dazu zählen beispielsweise Positions-, Geschwindigkeits- und Fahrplandaten anderer Straßenbahnen.

Da es sich hierbei um ein Fahrerassistenzsystem handelt, ist fraglich, inwiefern die Akzeptanz des Fahrzeugführers sichergestellt werden kann. Häufige Diskrepanzen zwischen der in den Augen des Fahrers situationspezifisch sicheren Fahrgeschwindigkeit und der Vorgabe des Systems wirken der Nutzung entgegen. Aus diesem Grund wäre eine Kombination mit einem fortgeschrittenen Kollisionsschutzassistenten (z. B. UR 2) zur Vorgabe einer situationsoptimalen Geschwindigkeit zielführend. Dies kann als Vorstufe der Teilautomatisierung betrachtet werden. Dennoch besteht auch hier die Gefahr, dass der Fahrzeugführer infolge der Fokussierung auf das Fahrerassistenzsystem zunehmend abgelenkt anstatt unterstützt wird.

4.2.4.3 Kombination aus unterschiedlichen Kategorien (UR 4, KE 4 & EE 3): Teilautomatisierung der Straßenbahnführung zwischen Haltestellen

Mit Blick in die ferne Zukunft und weiteren Fortschritten im Bereich der Sensor- und Algorithmenentwicklung erscheint es realistisch, dass Teilaufgaben des Straßenbahnbetriebs durch eine automatisierte Fahrzeugführung übernommen werden. Technologische Grundlage hierfür bilden die Erprobungen und realen Einsätze verbesserter und auf kooperativer Perzeption basierender Fahrerassistenzsysteme. Um jedoch die Verantwortung temporär vom Fahrer an das Fahrzeug übergeben zu können, müssen weitaus höhere Sicherheitsanforderungen erfüllt werden. Für die automatisierte Fahrt zwischen Haltestellen sind eine nahezu fehlerfreie Detektion und Klassifizierung von Objekten, Signalen und Verkehrszeichen sowie eine mit menschlichen Fähigkeiten vergleichbare Intentionsschätzung und Kollisionsrisikobewertung sicherzustellen. Hinsichtlich der Eigenlokalisierung sind Genauigkeiten im Zentimeterbereich und die Nutzung digitaler hochauflösender Karten zu empfehlen. Auch die leistungsstarke und zuverlässige Kommunikation mit der Infrastruktur und mit anderen Verkehrsteilnehmern spielt in diesem Zukunftsszenario eine wesentliche Rolle.

Inwieweit im Vergleich zum den Konzepten in UR 2 (FAS in Straßenbahnen) eine zusätzliche Steigerung der Fahrsicherheit bzw. eine Reduktion der Unfallzahlen möglich ist, ist fraglich. Gegenüber der Sicherheit, die durch Kooperation von verantwortlichem Fahrzeugführer und unterstützendem Fahrerassistenzsystem erzielt wird, ist kaum mit einer weiteren Verbesserung zu rechnen. Niedrigere Unfallzahlen ergeben sich aller Voraussicht nach vielmehr infolge der auch im übrigen Verkehr zunehmenden Vernetzung.

Die Vorteile einer Teilautomatisierung zeigen sich dagegen in betrieblichen Aspekten wie der Kapazitätserhöhung und der Energieeffizienz. Eine vom menschlichen Einfluss entkoppelte Fahrweise ermöglicht zugleich ein reproduzierbares Fahrverhalten, eine Verringerung der Fahrzeitreserven und einen energie-

effizienten, komfortablen und komponentenschonenden Fahrstil. Fahrpläne werden aufgrund der Reduktion fahrstilabhängiger Einflüsse besser kalkulierbar und lassen sich besser einhalten. Gleichzeitig werden infolge der energie- und verschleißoptimalen Fahrweise Wartungsintervalle verlängert und Störunganfälligkeiten verringert. Alle anderen vorerst in Fahrerassistenzsystemen umgesetzten Funktionen wie LSA-Priorisierung oder Kommunikation der Ampelphase zur Vorgabe einer optimalen Geschwindigkeit im Anfahrtsbereich werden ebenfalls in der Teilautomatisierung integriert.

Bezüglich der rechtlichen und versicherungstechnischen Rahmenbedingungen einer Teilautomatisierung ist die Frage nach der Verantwortung der Fahrzeugführung zu klären. Für Straßenbahnen existiert bisher allerdings noch keine präzise Definition von Automatisierungsstufen und die Eignung der GoA-Stufen ist aufgrund der abweichenden Systemeigenschaften zwischen Straßenbahn- und Vollbahnbetrieb ungeklärt. Aus Sicht der Automatisierungsstufen des Straßenverkehrs lassen sich zwei Optionen ableiten. In SAE-Level 2 übernimmt das Fahrzeug sowohl Längs- als auch Querverführung, während die Fahraufgabe dennoch vom Fahrer verantwortet wird und dieser somit keinen fahrfremden Tätigkeiten nachgehen darf. Demgegenüber wird in SAE-Level 3 der Fahrer von seiner Überwachungsaufgabe befreit und darf sich mit fahrfremden Aufgaben beschäftigen. Er ist allerdings dauerhaft als Rückfallebene in das Gesamtsystem integriert, sodass er zu jedem Zeitpunkt in der Lage sein muss, adäquat auf eine Übernahmeaufforderung zu reagieren. Eine ähnliche Regelung wäre auch im Straßenbahnbetrieb denkbar. Um jedoch verbindliche rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, wodurch auch die technischen Anforderungen bedingt werden, ist die einheitliche Festlegung von Automatisierungsstufen inklusive der jeweiligen Verantwortlichkeiten anzustreben.

4.2.5 Personaleinsatz

Personaleinsatz ist einer der bedeutendsten Betriebsfaktoren im Straßenbahn- bzw. im gesamten Schienen- oder ÖPNV-Verkehr. Aufgrund des aktuellen Personalmangels wird es in Zukunft schwieriger werden, ausreichend Personal für den im Ausbau befindlichen ÖPNV zu rekrutieren. Mithilfe einer Automatisierung kann dieser Problematik entgegengewirkt werden. Gleichzeitig stellt das Personal eine der größten Kostenkomponenten dar. Dadurch ergibt sich auch ein erhebliches Einsparungspotenzial im Zuge der Automatisierung, für den Fall, dass auf den menschlichen Fahrer verzichtet werden kann. Mittelfristig (10-15 Jahre) sollte jedoch nicht die Substitution des Fahrzeugführers, sondern dessen Unterstützung durch die zunehmende Automatisierung der Flotte zur Reduktion von Personalengpässen verfolgt werden. Hinsichtlich der Verbesserung der personellen Situation existieren folgende Optionen:

4.2.5.1 Personaleinsparung (PE 1): Automatisierung des Depots inklusive Teleoperation

Die Automatisierung bzw. Digitalisierung des Straßenbahndepots wird bereits im Projekt AStriD in Potsdam untersucht (siehe Kapitel 2.2.4.2). Ziel ist es, dass mit Automatisierungs- und Vernetzungstechnik ausgerüstete Straßenbahnfahrzeuge wiederkehrende Rangiertätigkeiten und Depotprozesse (Waschen, Besanden, Wartung, usw.) fahrerlos ausführen können. Da diese Depotfahrten sehr zeitintensiv und somit auch personalaufwändig sind, ergibt sich hierdurch ein großes Optimierungspotenzial. Gleichzeitig handelt es sich beim Depotgelände um einen abgesperrten Bereich, sodass das automatisierte System weniger komplexe verkehrliche Situationen zu bewerkstelligen hat. In Fällen, in denen die Automatisierung versagt, kann des Weiteren in einer Vorstufe die Kontrolle temporär durch einen Teleoperator aus der Leitstelle übernommen werden. Grundsätzlich sind die Funktionsansprüche vergleichbar mit denen der Teilautomatisierten Straßenbahn (siehe UR 4, KE 4 & EE 3). Besonders wichtig ist auch die kontinuierliche Kommunikation mit dem Betriebshofmanagementsystem, welches für die Koordination aller Prozesse verantwortlich ist.

4.2.5.2 Personaleinsparung (PE 2): Vollautomatisierung des Depots

Mit fortschreitender technologischer Reife kann bestenfalls auf die Teleoperation verzichtet werden. Gegenüber PE 1 unterscheidet sich PE 2 daher nur in einem zuverlässigeren und weniger ausfallanfälligen Betrieb, was durch zusätzliche Redundanzen oder optimierte Hard- und Software gewährleistet werden kann.

4.2.5.3 Personaleinsparung (PE 3): Automatisierung des Linienbetriebs inklusive Teleoperation

Diese Variante fasst die Fähigkeiten aus KE 3 (Teilautomatisierung von Haltestellen) und UR 4, KE 4 & EE 3 (Teilautomatisierung zwischen Haltestellen) zusammen und ermöglicht folglich den automatisierten Betrieb im gesamten Liniennetz. Um von der Stufe der Teilautomatisierung zu einem fahrerlosen Betrieb zu gelangen, sind auch hier leistungsfähigere, erprobte und im besten Fall standardisierte Hard- und Softwarelösungen erforderlich. Die genauen Anforderungen lassen sich jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausreichend präzise definieren. Grundvoraussetzung ist jedoch, dass alle Aufgaben, die heute vom menschlichen Fahrer getätigt werden, vom System übernommen werden, ohne dass damit eine Minderung der Verkehrssicherheit einhergeht. Wie in PE 1 beschrieben, kann dennoch in zweifelhaften Situationen die Übernahme oder die Freigabe von Fahrbefehlen durch einen Teleoperator erfolgen. Dieser ist dabei für mehrere Straßenbahnen zuständig.

4.2.5.4 Personaleinsparung (PE 4): Vollautomatisierung des Linienbetriebs

Kann die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Automatisierungssystems weiter gesteigert werden, ist gegebenenfalls auch im Linienbetrieb der Verzicht auf einen Teleoperator denkbar. Da im neuen Gesetz der Bundesregierung zum autonomen Fahren [111] lediglich der Straßenverkehr berücksichtigt ist, müssen für den grundsätzlichen automatisierten Straßenbahnbetrieb und den Einsatz der Teleoperation rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden. Dieser Prozess sollte an die Festlegung und Definition von Automatisierungsstufen im Straßenbahnverkehr gebunden sein. Darüber hinaus ist es notwendig, die Anforderungen einzelner Automatisierungsfunktionen innerhalb der Automatisierungsstufen quantitativ zu beschreiben (vgl. [67]).

4.3 Bewertung von Querschnittstechnologien und technologischen Lösungsansätzen

Dieses Unterkapitel befasst sich mit der Frage, welche der zuvor beschriebenen Querschnittstechnologien (siehe Kapitel 3.2) für die Realisierung der Lösungskonzepte erforderlich sind. Dabei wird zwischen zum aktuellen Wissensstand zwingend notwendigen, leistungssteigernden und alternativen oder ergänzenden Technologien unterschieden. Außerdem wird bewertet, inwieweit die heutige Technologiereife ausreichend für eine Umsetzung bestimmter Funktionen und Konzepte ist. Um zwischen den einzelnen Konzepten hinsichtlich ihres zu erwartenden Mehrwertes zu differenzieren, wird abschließend deren Potenzial zur Erfüllung einzelner Zielsetzungen der Automatisierung evaluiert. Die Ergebnisse dieser Einschätzungen basieren auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und den Meinungen unterschiedlicher Experten aus Industrie und Wissenschaft.

In Abbildung 4-3 sind die vorgestellten Lösungskonzepte qualitativ anhand von Sicherheitsanforderungen und Technologiereife bewertet. Zur besseren Abgrenzung wird eine Einteilung in sechs Bereiche vorgenommen. Hierbei dienen aktuelle Technologiereife und Verantwortung der Fahraufgabe als Differenzierungsmerkmale. Beide Bewertungskriterien sind nicht weiter spezifiziert, sondern verkörpern lediglich eine Skalierung, die den direkten Vergleich und somit eine erste Einordnung unterschiedlicher Konzepte ermöglicht. Es zeigt sich, dass im Mittel höhere sicherheitstechnische Anforderungen mit einer geringeren technologischen Reife und daher einer voraussichtlich späteren Markteinführung korrelieren. Durch farbliche Kennzeichnung wird außerdem verdeutlicht, inwiefern reale Umsetzungen in Forschungsprojekten oder sogar in kommerziellen Produkten existieren.

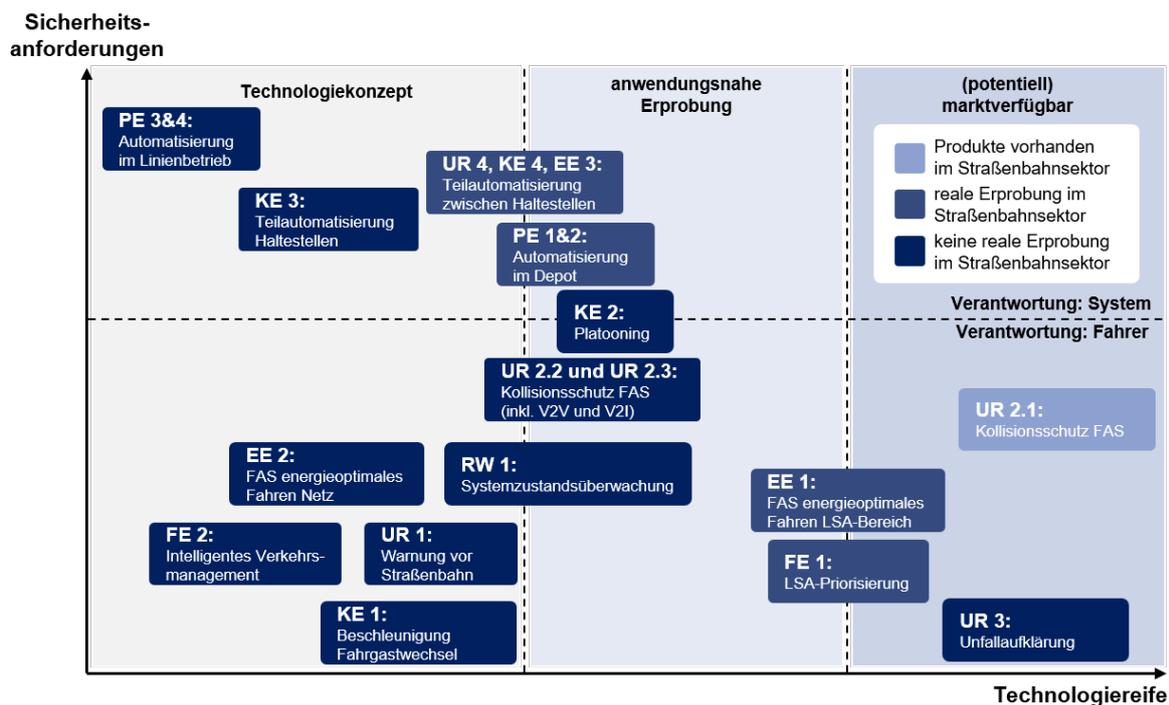


Abbildung 4-3: Qualitative Bewertung der Lösungskonzepte anhand von Sicherheitsanforderungen und Technologiereife

Exemplarisch ist in den nachfolgende Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 die Bewertung anhand von einigen ausgewählten Beispielkonzepten dargestellt. Dabei werden gezielt die Konzepte FAS zur Kollisionsvermeidung (UR 2.1) und Teilautomatisierung zwischen Haltestellen (UR 4 / KE 4 / EE 3) verglichen, um aufzuzeigen, inwieweit Anforderungen und Komplexität der Systeme mit zunehmender Automatisierung ansteigen. Zusätzlich wird mit der LSA-Priorisierung (FE 1) ein rein vernetzungsbasiertes Konzept ohne Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnfahrzeug gegenübergestellt. Die übrigen Bewertungsblätter sind in Tabelle A-2, Tabelle A-3 und Tabelle A-4 im Anhang zu finden. Hinsichtlich der Beurteilung der Notwendigkeit verschiedener Technologien wird zwischen drei Optionen differenziert: erforderlich (E), leistungssteigernd (L), optional (O) oder nicht erforderlich (-).

TABELLE 4-1: BEISPIELHAFTE BEURTEILUNG DER NOTWENDIGKEIT VON QUERSCHNITTSTECHNOLOGIEN FÜR DIE GEWÄHLTEN KONZEPTE

Querschnittstechnologien		UR 2.1	FE 1	UR 4, KE 4, EE 3	
Sensorik (Fahrzeug)	Umgebungswahrnehmung	Kamera	E	-	E
		IR-Kamera	L	-	L
		LiDAR	L	-	L
		Radar	E	-	E
		Ultraschall	O	-	O
		Mikrophon	O	-	O
	Lokalisierung	GNSS	O	E	E
		IMU	O	L	L
		Odometrie	O	E	E
		Umgebungssensoren	O	O	L
Sensoren zur Zustandsüberwachung		-	-	-	
Sensorik (Infrastruktur)	Umgebungswahrnehmung	Kamera	-	-	O/L
		IR-Kamera	-	-	O/L
		LiDAR	-	-	O/L
		Radar	-	-	O/L
		Ultraschall	-	-	-
Intelligente Datenverarbeitung	Sensorfusion (in unterschiedlichen Prozessen)		E	E	E
	Umgebungswahrnehmung (Fahrzeug)	Objektdetektion und Entfernungsmessung	E	-	E
		Objektklassifizierung	L	-	E
		Objektverfolgung	E	-	E
		Verhaltensprädiktion	L	-	E
		Kollisionsrisikoeinschätzung	E	-	E
		Signal- u. Verkehrszeichenhandhabung	O	-	E
	Lokalisierung (Fahrzeug)	RTK-Korrektur	O	L	L
		SLAM	O	O	L
		HD-Map inkl. Landmarken	O	O	L
	Umgebungswahrnehmung (Infrastruktur)	Objektdetektion und Entfernungsmessung	-	-	O/L
		Objektklassifizierung	-	-	O/L
		Objektverfolgung	-	-	O/L
		Verhaltensprädiktion	-	-	O/L
		Kollisionsrisikoeinschätzung	-	-	O/L
	Fahrzeugführung	Ermittlung Brems- und / oder Beschleunigungsbedarf	O/L	-	E
		Ermittlung situationsopt. Geschwindigkeit	-	-	E
		Überwachung Geschw.	O	-	E
		Überwachung Beschl.	-	-	E
	Innenraumüberwachung	Anomaliedetektion	-	-	-
		Objektdetektion und -klassifizierung	-	-	-
		Verhaltensanalyse	-	-	-
	Zustandsüberwachung	Anomaliedetektion	-	-	-
		Defektprädiktion	-	-	-
		Predictive Maintenance	-	-	-
	Intelligente Verkehrssteuerung	Ankunftszeitprognose	-	E	-
		Schaltzeitprognose	-	E	-
Steuerung der LSA im Einflussbereich		-	E	-	

Querschnittstechnologien		UR 2.1	FE 1	UR 4, KE 4, EE 3	
Kommuni- kations- technologie	Aktuelle Generation Direktkommunikationstechnik (ITS-G5, LTE-V2X)		-	E	E
	Nächste Generation Direktkommunikationstechnik (802.11bd, NR-V2X)		-	L	L
	Mobilfunk	LTE (4G)	-	O	O
		NR (5G)	-	O	O
	Andere	LPWANs	-	-	-
Bluetooth		-	-	-	
Kommuni- kations- infrastruktur	Feldebene	OBU	-	E	O/L
		RSU	-	E	O/L
	Zentralenebene	VMZ	-	E	-
		LStZ	-	E	-
		RSU-Zentrale	-	O	-
		Depotmanagement	-	-	-
		Teleoperator	-	-	-
	Service-Provider	MDM-Anbindung	-	-	-
		Private und öffentliche Dienstleister	-	-	-
	OCIT-Schnittstellen		-	O	-
Kartendaten		O	O	L	
PKI-Infrastruktur		-	E	E	
MMI	Führerstand	Warnsignal	E	-	O
		Geschwindigkeitsvorgabe	-	O	-
		SPAT-Informationen	-	E	-
	Innenraum	Koordination Ausstieg	-	-	-
	Straßenbahn außen	Warnsignale	O	-	E
		Intentionsmitteilung	-	-	L
		Koordination Einstieg	-	-	-
Bahnsteig	Anzeige Belegung Bahn	-	-	-	
	Koordination Einstieg	-	-	-	

Die wesentlichen Unterschiede zwischen einem bereits marktreifen Kollisionsassistenten (UR 2.1) und einer Teilautomatisierung zwischen Haltestellen resultieren aus der Verteilung der Verantwortung auf Fahrer und System. Während der Fahrer bei einer mit FAS ausgestatteten Straßenbahn zu jeder Zeit verantwortlich für die Führung des Fahrzeuges ist, kann diese bei einer Teilautomatisierung vollständig an das System abgegeben werden. Der Fahrer dient lediglich als Rückfallebene und greift erst bei expliziter Aufforderung in die Fahrzeugsteuerung ein. Daraus ergeben sich weitaus höhere Anforderungen an die Ausstattung und die Leistungsfähigkeit der Automatisierungssysteme. Wie in der Tabelle 4-1 dargestellt sind neben unterschiedlichen Sensortypen und zusätzlichen Softwarefunktionen auch Vernetzungskapazitäten erforderlich. Umgebungsinformationen von anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur unterstützen die fahrzeugeigene Wahrnehmung und dienen als weitere Redundanzebene. Gleichzeitig nehmen Aufwand und Komplexität der Sensorfusion zu. Im Gegensatz dazu spielt Umgebungswahrnehmung im Zuge der LSA-Priorisierung (FE 1) keine Rolle. Letztere basiert primär auf dem Austausch von nicht Positionsdaten mit der Infrastruktur. Die Intelligenz im Sinne der Steuerung von Lichtsignalanlagen ist außerhalb des Fahrzeuges integriert.

Die Erfüllung unterschiedlicher Automatisierungspotenziale durch einzelne Konzepte wird in Tabelle 4-2 bewertet. Außerdem werden weitere Kriterien wie Marktreife, Verantwortung der Fahraufgabe und Kosten herangezogen. Die Bewertung ist dabei so gestaltet, dass eine Skalierung der Auswirkungen von

sehr positiv (+++) bis sehr negativ (---) vorliegt. Wird davon ausgegangen, dass kein Einfluss auf das Bewertungskriterium vorliegt, wird dies mit (O) gekennzeichnet. Wird ein Bereich aufgespannt (z. B. + bis -), ist dies in der Abhängigkeit von der genauen Umsetzung begründet. Beispielsweise kann eine Teilautomatisierung zwischen Haltestellen mit optimaler technologischer Reife potenziell zu einer Geschwindigkeitssteigerung beitragen. Gleichzeitig kann diese bei unzureichendem Reifegrad geringere Fahrgeschwindigkeiten fordern, um das notwendige Sicherheitsniveau zu halten.

TABELLE 4-2: BEISPIELHAFTE BEWERTUNG DER MÖGLICHKEIT EINER AUTOMATISIERUNG ANHAND AUSGEWÄHLTER LÖSUNGSKONZEPTE

Bewertungskriterien		UR 2.1	FE 1	UR 4, KE 4, EE 3
Automatisierungspotenziale	Fahrplaneinhaltung / -stabilität	O	+	+
	Verkürzung Fahrzeit	O	+	+ bis --
	Taktverdichtung / Kapazitätserhöhung	O	O/+	O/+
	Flexibilitätssteigerung	O	O	O
	Reduktion von Wartungs- und Instandhaltungskosten	O	O	O/+
	Energieeffizienz	O	+	+
	Reduktion von Unfällen u. Unfallkosten	+	O	++ bis +
	Reduktion Personalbedarf	O	O	O
	Reduktion Störungen	O	O	O/+
Weitere Kriterien	Marktreife	+++	+	--
	Verantwortung der Fahraufgabe	Fahrer	Fahrer	Fahrer / System
	Kosten Fahrzeuge	-	O/-	--
	Kosten Infrastruktur	O	-	- bis --
	Rechtl. Rahmenbedingungen vorhanden	Ja	Nein	Nein
	Funktionale Anforderungen definiert	Ja	Nein	Nein
	Standardisierungspotenzial	Ja	Ja	Ja
	Standardisierung vorhanden	Ja	Nein	Nein
	Akzeptanz	++ bis --	++	++ bis --

Aus der Tabelle 4-2 geht hervor, dass die Reduktion von Unfällen und Unfallkosten infolge einer Teilautomatisierung zwischen Haltestellen im Vergleich zur Nutzung eines FAS nicht signifikant ist. Zugrunde liegt die Annahme, dass ein menschlicher Fahrer, unterstützt durch ein Assistenzsystem, bereits ein sehr hohes Sicherheitsniveau erreicht. Der Vorteil der Teilautomatisierung liegt im Wesentlichen in der auf Vernetzung beruhenden Antizipation von nicht sichtbaren aber potenziell gefährdeten Objekten bzw. Verkehrsteilnehmern. Diese Sicherheitssteigerung ist allerdings abhängig von der Vernetzungsleistung zwischen Straßen- und Schienenverkehr sowie der Infrastruktur. Betriebliche Vorteile wie die Taktverdichtung oder Verkürzung der Fahrzeit sind ebenfalls stark vom tatsächlichen Leistungsumfang der Teilautomatisierung abhängig.

4.4 Zusammenfassung Technologieauswahl

Wie in Kapitel 4 aufgezeigt wird, existieren unterschiedliche Möglichkeiten die Aufgaben, die im Straßenbahnbetrieb zu bewerkstelligen sind, mithilfe von Automatisierung und Vernetzung zu optimieren. Dabei ist es wichtig zu berücksichtigen, welche Chancen, Herausforderungen und Anforderungen den einzelnen Tätigkeiten oder Funktionen zugrunde liegen. Zur Umsetzung und Implementierung von Automatisierungsfunktionen steht auch heute schon eine große Anzahl Technologien zur Verfügung. Bisher finden jedoch gerade im Straßenbahnbereich nur wenige Anwendung. Im Fokus der Forschung und Entwicklung steht vielmehr die Automobilindustrie, die unter anderem aufgrund der größeren Absatzmenge auf mehr finanzielle Mittel zurückgreifen kann. Die Ergebnisse der bis heute durchgeführten Pilotprojekte und die Marktreife erster Assistenzsysteme beweisen allerdings, dass die Nutzung bekannter Querschnittstechnologien auch auf der Schiene in der Zukunft relevant sein wird.

Gerade hinsichtlich der Auswahl geeigneter Sensorik ist es erforderlich, die individuellen Vor- und Nachteile einzelner Sensortypen zu berücksichtigen und für den jeweiligen Einsatzbereich zu bewerten. Maschinelle Umfeldwahrnehmung mit geringer Fehlerrate und hoher Zuverlässigkeit ist zum heutigen Stand nahezu ausschließlich durch die Kombination von Kamera, Radar und LiDAR möglich. Vor allem Anwendungsfälle mit hohen Sicherheitsanforderungen fordern gewisse Redundanzen. Variable Wetter- und Beleuchtungsbedingungen machen die Fusion von Sensordaten unumgänglich. Um in Zukunft Produkte realisieren zu können, die eine Teilautomatisierung von Fahraufgaben bewerkstelligen, ist eine kontinuierliche Steigerung der Leistungsfähigkeit von Sensoren aber auch der Datenverarbeitung notwendig. Der sichere und adäquate Umgang mit kreuzendem Verkehr, der direkte Kontakt mit Fußgängern oder Radfahrern oder mit komplexen Verkehrssituationen, kann nur durch bessere bildverarbeitende Algorithmen gewährleistet werden. Aufgrund der Ähnlichkeit zur menschlichen Intuition spielt die Intentionsschätzung und Bewertung von Kollisionsrisiken eine besonders wichtige Rolle. Neben der Umgebungswahrnehmung ist auch die Eigenlokalisierung von großer Bedeutung. Die im Schienenverkehr üblichen Methoden der Positionsbestimmung sind jedoch wenig für Straßenbahnen geeignet. Dies ist darin begründet, dass es sich meist um diskontinuierliche und infrastruktureitige Lokalisierungsverfahren handelt, die den dynamischen Anforderungen beispielsweise im Innenstadtbereich nicht gerecht werden. Satellitengestützte Ortung mithilfe von GNSS-Sensoren zur durchgängigen und absoluten Positionsbestimmung in Kombination mit relativen Wegmessungsverfahren wie Odometrie oder IMUs können Straßenbahnen demgegenüber als Grundlage dienen. Werden ohnehin Kameras oder LiDARs am Fahrzeug angebracht, können diese außerdem zur Erkennung von Landmarken und der damit verbundenen Ortung auf einer digitalen Karte verwendet werden.

Eine weitere Redundanzebene der Fahrsicherheit kann mithilfe von Verkehrsvernetzung integriert werden. Diese ermöglicht darüber hinaus eine Vielzahl von Funktionen, die sich positiv auf Verkehrs- und Energieeffizienz sowie Fahrplanstabilität oder Streckenkapazität auswirken können. Um Vernetzung in großem Maßstab umzusetzen, sind sowohl eine entsprechend ausgebaute Kommunikationsinfrastruktur als auch leistungsfähige Kommunikationstechnologien erforderlich. Möglichkeiten zur Einführung von C-ITS Verkehrssystemen und deren infrastrukturelle Anforderungen werden bereits in Leitfäden beschrieben. Grundsätzlich sollten hierbei im Sinne von Kostenreduktion, Übertragbarkeit, Funktionalität, Modularität und Nachhaltigkeit langfristig standardisierte Lösungskonzepte angestrebt werden. Kommunikationstechnologien befinden sich bereits seit vielen Jahren in der Entwicklung und sind außerdem bereits standardisiert. Während sich Mobilfunkstandards wie 4G oder in Zukunft 5G zum Datenaustausch mit Clouds, Back-Ends oder dem Internet eignen, wurden für die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander oder mit der Infrastruktur spezielle Ad-hoc-Kommunikationsstandards konzipiert. Das europäische ITS-G5 basiert dabei auf der WLAN-Normenfamilie IEEE 802.11. Demgegenüber nutzt LTE-V2X eine Direktkommunikationsschnittstelle (PC5) des Mobilfunkstandards der vierten Generation. Beide Technologien sind jedoch nur für rudimentäre Applikationen der Fahrzeugvernetzung ausgelegt. Die Re-

alisierung von anspruchsvollen, datenintensiven Vernetzungsanwendungen mit hohen sicherheitstechnischen Anforderungen wird erst durch Folgegenerationen bewerkstelligt werden können. Aus kommunaler oder verkehrsbetrieblicher Sicht ist zu evaluieren, welche Technologien in der städtischen Infrastruktur installiert werden. Aktuell erfüllen nicht alle Kommunikationstechnologien die Kriterien der Interoperabilität oder Koexistenz. Auch Folgegenerationen sind nicht ohne weiteres rückwärtskompatibel mit ihren Vorgängern. Zwar wird diesbezüglich an Lösungsansätzen gearbeitet, diese gehen bisher jedoch mit Einbußen in den Bereichen Leistungsfähigkeit, Frequenzbandnutzung oder Implementierungsaufwand einher. Lediglich die beiden Generationen des WLAN-Standards ITS-G5 sind aufgrund der ähnlichen technischen Eigenschaften interoperabel und können koexistieren.

In Kapitel 4.2 werden diverse Konzepte vorgestellt, die unter Verwendung unterschiedlicher Querschnittstechnologien realisierbar sind und unterschiedliche Verbesserungspotenziale im Straßenbahnbetrieb verfolgen. Bei der Bewertung dieser Konzepte zeigt sich, dass in den Bereichen Unfallsicherheit, Wartung- und Instandhaltung, Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz und Personaleinsatz Optimierungsmöglichkeiten bestehen. Diese lassen sich jedoch nur dann erreichen, wenn der Straßenbahnsektor vermehrt in Standardisierungs-, Zulassungs- und Entwicklungsprozesse integriert wird. Technologisch und funktional betrachtet, sind viele Parallelen zwischen Anwendungen im Straßenbahn- und Automobilbereich zu erkennen. Gerade hinsichtlich der Vernetzung, Sensorik und intelligenten Datenverarbeitung sollte auf Synergieeffekte zurückgegriffen werden. Werden infrastruktureitige Investitionen in beispielsweise Sensorik, RSUs oder Kommunikationsinfrastruktur sowohl vom Straßen- als auch Schienenverkehr genutzt, lassen sich daraus finanzielle Vorteile ableiten. Darüber hinaus wird so dem Einsatz verschiedener proprietärer und gegebenenfalls nicht kompatibler Technologien entgegengewirkt und positive Skaleneffekte werden ermöglicht.

Die einzelnen in den Automatisierungskonzepten für Straßenbahnen vorgestellten Teilsysteme und Funktionen können mit denen des automatisierten U-Bahnbetriebs oder genauer den CBTC-Systemen verglichen werden. In beiden Fällen lässt sich eine Unterteilung nach Zugsicherung (ATP), Zugführung (ATO) und Zugüberwachung (ATS) vornehmen. Zu beachten ist allerdings, dass es sich im Falle der automatisierten Straßenbahn nicht um die im klassischen Sinne rein signaltechnische Zugsicherung handelt. Gemeinsamkeiten und Unterschiede sind hierzu in Tabelle 4-3 dargestellt.

Um letztendlich Automatisierungs- und Vernetzungsfunktionen in den Realbetrieb zu integrieren, ist es erforderlich, sicherheitstechnische und funktionale Anforderungen zu definieren. Dies erleichtert die spätere Validierung und Zulassung von Produkten oder Systemen. Der Prozess der Anforderungsdefinition muss in enger Zusammenarbeit unterschiedlicher Akteure wie Verkehrsbetriebe, VDV, Industrieunternehmen oder anderer Gremien stattfinden. Als Resultat kann beispielsweise ein Dokument vergleichbar mit der VDV-Schrift 191 [67] bereitgestellt werden. Die dort dargestellten Mindestanforderungen werden basierend auf den Ergebnissen diverser Testbetriebe oder Forschungsprojekte festgelegt und ermöglichen weiteren Herstellern die Entwicklung entsprechender Lösungen.

TABELLE 4-3: VERGLEICH CBTC UND AUTOMATISIERTE STRASSENBAHN HINSICHTLICH ATP, ATO UND ATS

	CBTC	Automatisierte Straßenbahn
Zugsicherung (ATP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ streckenseitige Zugortung in Kombination mit fahrzeugseitiger Sensorik ▪ signaltechnische Sicherung des Fahrwegs ▪ Abstandsregelung basierend auf Positionsdaten ▪ Betretungsverbote und physische Absicherung des Bahnkörpers 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sensorische Umfeldwahrnehmung (fahrzeugseitig und ggf. infrastrukturseitig) ▪ sensorische Eigenlokalisierung ▪ Vernetzung (kooperative Perzeption, Kommunikation mit Lichtsignalanlagen und Weichen, Vermittlung der eigenen Position an andere Fahrzeuge und Leitstelle) ▪ Kollisionsrisikobewertung basierend auf Sensorinformationen und Vernetzung
Zugführung (ATO)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geschwindigkeitsregelung basierend auf streckenseitig bereitgestellten Daten ▪ Zielbremsung ▪ Türsteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Situationsoptimale Geschwindigkeitsregelung basierend auf vorliegenden Umgebungsdaten, Reaktion auf Verkehrssituationen ▪ Anfahren, Abfahren Haltestellen, Türsteuerung ▪ Befahren von Kreuzungen, Bahnübergängen, usw. ▪ ggf. Teleoperation
Zugüberwachung (ATS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Fahrzeuge (technische Daten, Position) ▪ Anpassung und Regelung des Betriebs ▪ Störfallerkennung und -management 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systemzustandsüberwachung (technische Systeme und Innenraum) ▪ Intelligentes Verkehrsmanagement (z. B. Steuerung von Lichtsignalanlagen) ▪ Störfallprädiktion, -erkennung, -management

Aus rechtlicher Sicht ist zu klären, inwieweit die Regelungen innerhalb der BOStrab anzupassen sind. Dort wird zum jetzigen Stand lediglich der Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer beschrieben, der jedoch nur auf unabhängigen Bahnkörpern (z. B. U-Bahnen) erlaubt ist. Andere Automatisierungsstufen werden nicht genannt. In diesem Zusammenhang wird auf Kapitel 8 verwiesen. Zusätzlich sollte diskutiert werden, inwieweit die Definition neuer Automatisierungsstufen für den Straßenbahnbetrieb notwendig ist. Die Automatisierungsgrade des Schienenverkehrs (GoA) lassen sich problemlos auf unabhängige oder besondere Bahnkörper ohne direkten Kontakt mit anderen Verkehrsteilnehmern anwenden. Demgegenüber sind Straßenbahnen aufgrund der Einbettung in den öffentlichen Verkehrsraum nicht durch klassische streckenseitige Zugsicherungssysteme kontrollierbar. Automatisierbare Fahr- und Betriebsaufgaben sind teilweise besser mit denen des automatisierten Straßenverkehrs vergleichbar. Eine Verantwortungsregelung zwischen Fahrer und System kann daher potenziell ähnlich der SAE-Level im Straßenverkehr umgesetzt werden. Die Teleoperation, wie sie seit 2021 im Straßenverkehr erlaubt ist, sollte in Zukunft ebenfalls in der BOStrab berücksichtigt werden.

5 Quantitative Abschätzung der bahnbetrieblichen und wirtschaftlichen Potenziale

5.1 Allgemeine Vorgehensweise

In diesem Kapitel erfolgt nun die modellbasierte, quantitative Abschätzung des Potenzials zum Einsatz automatisierter Betriebsfunktionen bzw. der mit einer Automatisierung verbundenen Effekte. Dabei wird das mit dem Einsatz automatisierter Betriebsfunktionen verbundene quantitative Potenzial abgeschätzt und für Deutschland monetarisiert. Für die Abschätzung erfolgt zunächst eine Kategorisierung in typische Netzabschnitte und Betriebssituationen. Die ehemalige Linie 1 des Karlsruher Straßenbahnnetzes, welche zwischen den Karlsruher Stadtteilen Durlach und Oberreut verkehrte, deckt in ihrem Linienverlauf verschiedene typische Netzabschnitte ab, sodass sie als Simulationsgrundlage herangezogen werden kann.

Die in Open Track nachgebildete Linie 1 wird mithilfe eines realitätsnahen Basis- bzw. Referenzszenarios, ohne einen automatisierten Betrieb (Ohne-Fall), kalibriert und validiert. Hierzu wird u. a. auf die im Fahrzeug aufgezeichneten Daten des Intermodal Transport Control System (ITCS)-Daten zurückgegriffen. Aus diesen lässt sich beispielsweise die Aufenthaltszeit an Haltestellen oder vor Kreuzungen bestimmen. Für jede Haltestelle im Modell ergeben sich damit eigene Verteilungen der Haltezeiten.

Es werden vier Szenarien für den Einsatz automatisierter Funktionen definiert. Diese unterteilen sich in drei Szenarien zur Beurteilung von Leistungsfähigkeit und ein Szenario zur Beurteilung der energetischen Effizienz. Die einzelnen Szenarien werden in Open Track simuliert, indem bestimmte Modellparameter angepasst werden. Anhand der Simulationsergebnisse wird anschließend das Potenzial des Einsatzes automatisierter Funktionen im Straßenbahnbetrieb quantitativ abgeschätzt.

In die Analyse miteinbezogen werden dabei folgende Dimensionen:

- Erhöhung der Betriebssicherheit
- Erhöhung der Zuverlässigkeit/Verringerung der Störanfälligkeit
- Erhöhung der Kapazität und Leistungsfähigkeit
- Erbringen von Mehrwertdiensten/Kundennutzen
- Wirtschaftlichkeit/Amortisierung von Investitionen/Kosteneinsparungen
- Positive Effekte für die Entlastung der Fahrbediensteten

Untersucht werden damit sowohl die Potenziale, welche sich durch den Einsatz automatisierter Funktionen für den Betrieb von Straßenbahnen ergeben, als auch die Potenziale, welche sich für die Nutzenden von Straßenbahnen bieten.

In Abbildung 5-1 wird der Arbeitsprozess in der Übersicht dargestellt. Nach der Definition der Szenarien werden diese für die Simulation in OpenTrack operationalisiert. Das Simulationsmodell wird mit Input-Variablen als Berechnungsgrundlage versorgt. Die Output-Variablen des Simulationsmodells dienen anschließend als Grundlage für die Berechnung des volks- und betriebswirtschaftlichen Potenzials.

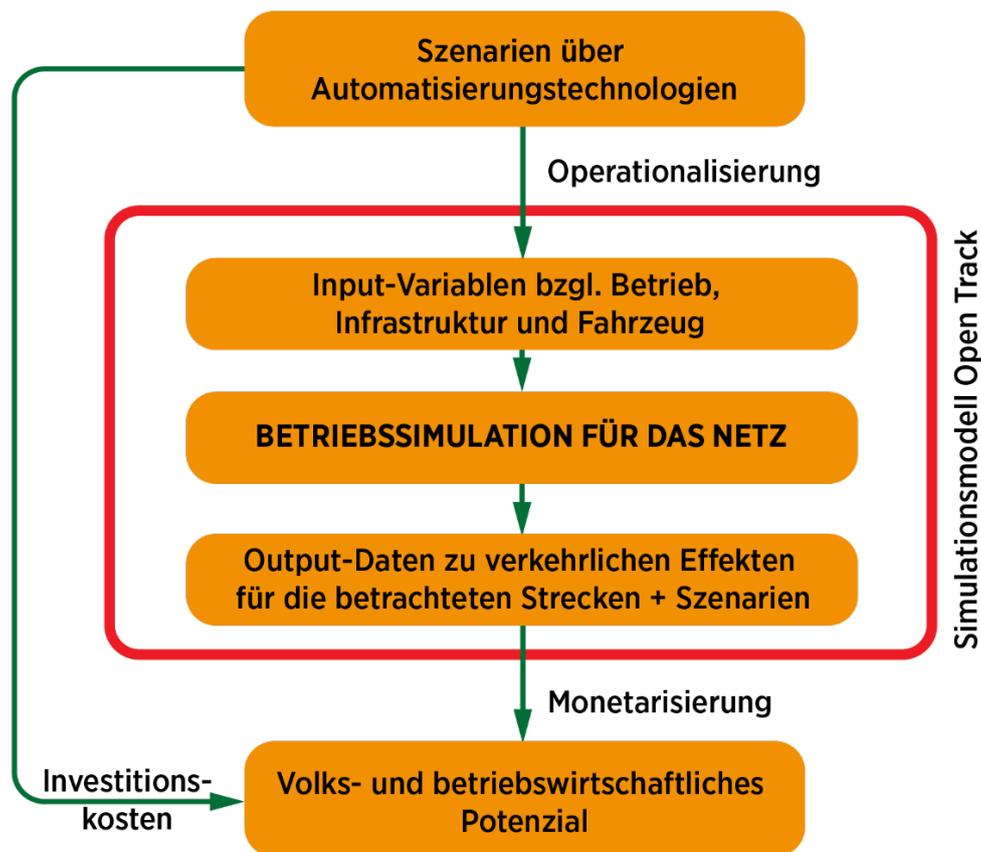


Abbildung 5-1: Vorgehensweise der quantitativen Abschätzung der Effekte einer Automatisierung

Für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes automatisierter Betriebsfunktionen werden zunächst die Kosten für die notwendigen Automatisierungskomponenten je Szenario ermittelt (siehe Tabelle A-7 bis Tabelle A-9 im Anhang). Die ermittelten Kosten werden anschließend auf einen Zeithorizont von 30 Jahren als Zins- und Abschreibungskosten umgelegt und den Kosteneinsparungen, insbesondere auf der Personalseite, gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Simulation der einzelnen Szenarien in OpenTrack und die Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden verwendet, um eine überschlägige Hochrechnung für das bestehende Potenzial bei den Straßenbahnnetzen in Deutschland aufzeigen zu können. Verwendet wird für die Abschätzung der quantitativen Automatisierungspotenziale dabei die Investitionsperspektive 2050.

5.2 Simulation am Beispiel Karlsruhe

5.2.1 Analyse Straßenbahnnetz Karlsruhe

Die exemplarische Simulation eines automatisierten Straßenbahnbetriebs wird auf Basis des Karlsruher Straßenbahnnetzes vorgenommen. Dieses hat eine Länge von ca. 70 km und besteht aus sechs Straßenbahnlinien [112]. Im Jahr 2021 wurde das Karlsruher Liniennetz grundlegend neu strukturiert, da ein Straßenbahntunnel durch die Innenstadt in Betrieb genommen wurde. Im Folgenden wird auf Basis des Netzzustands vor der Tunnelöffnung gearbeitet, da die zur Modellierung und Simulation verwendete Daten-

basis auf diesem Zustand basiert. Im Rahmen der Simulation wird die ehemalige Linie 1 von Durlach nach Oberreut vertiefend analysiert. Die Auswahl der Linie 1 erfolgte aus dem Grund, dass diese Linie die Innenstadt komplett in Ost-West-Richtung durchquert und dabei die typischen verkehrlichen Rahmenbedingungen einer Straßenbahnlinie abdeckt. In diesem Kapitel wird die ehemalige Linie 1 zunächst analysiert.

5.2.1.1 Detailanalyse Infrastruktur

Die ehemalige Straßenbahnlinie 1 in Karlsruhe verfügt, wie im Straßenbahnverkehr mit Einrichtungsfahrzeugen üblich, an ihren Endpunkten jeweils über Wendeanlagen (vgl. Abbildung 5-2). An der Endhaltestelle Oberreut Badeniaplatz handelt es sich dabei um eine klassische Wendeschleife, in Durlach ist die Wendeanlage in Form einer Häuserblockschleife ausgeführt. Zwischen der Endhaltestelle Oberreut Badeniaplatz und der Haltestelle Weinbrennerplatz verläuft die ehemalige Linie 1 auf einem besonderen Bahnkörper in Seitenlage bzw. zwischen der Haltestelle Hardecksiedlung und der Haltestelle Weinbrennerplatz sogar als unabhängiger Bahnkörper. Der Streckenabschnitt zwischen den Haltestellen Hardecksiedlung und Weinbrennerplatz wird dabei allerdings nicht als eigene Kategorie geführt, da dessen Verkehrsführung mit der eines typischen, straßenbegleitenden besonderen Bahnkörpers in Seitenlage vergleichbar ist. Der Streckenabschnitt enthält mehrere Querungsstellen für den Fuß- und Radverkehr sowie Kreuzungspunkte mit dem Kfz-Verkehr. Zu nennen sind hier vor allem die Kreuzungspunkte mit der Otto-Wels-Straße, der Rudolf-Breitscheid-Straße, der Albert-Braun-Straße oder der Pulverhausstraße.

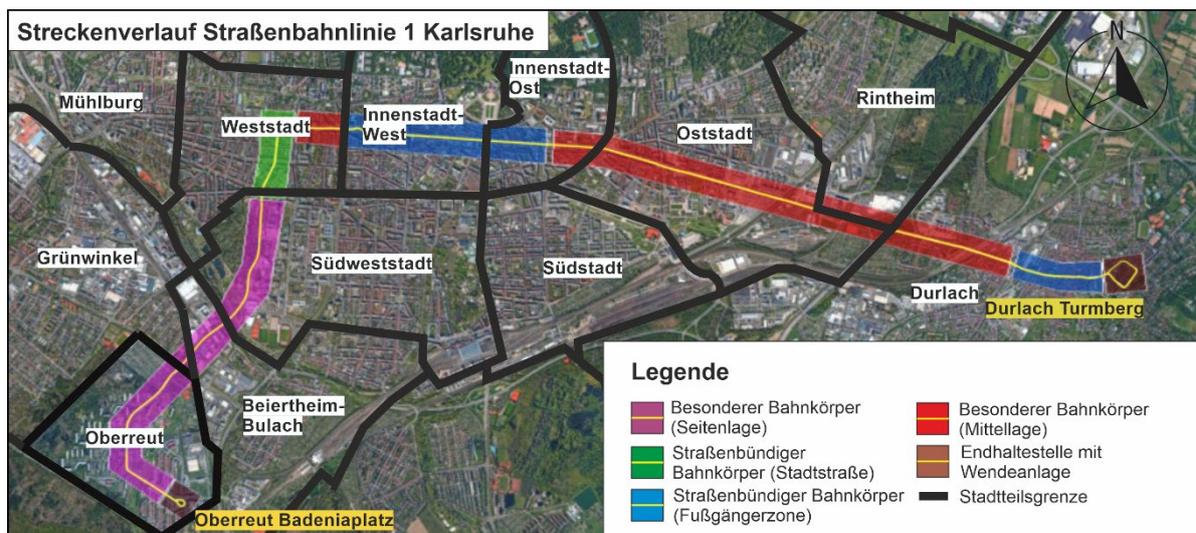


Abbildung 5-2: Unterteilung der ehemaligen Straßenbahnlinie 1 in typische Netzabschnitte

Zwischen der Haltestelle Weinbrennerplatz und der Haltestelle Schillerstraße verläuft die ehemalige Linie 1 auf einem straßenbündigen Bahnkörper einer Stadtstraße. Dieser weist in seinem Verlauf mehrere Knotenpunkte mit anderen Stadtstraßen auf. Zwischen den Haltestellen Sophienstraße und Schillerstraße ist die Strecke aufgrund der engen Wohnbebauung nur eingleisig, weshalb in diesem Streckenabschnitt kein Begegnungsverkehr möglich ist. Für die Simulation stellt dieser Streckenabschnitt damit einen potenziellen Flaschenhals dar. Der Streckenzug ab der Haltestelle Schillerstraße bis zum Kaiserplatz ist als besonderer Bahnkörper in Mittellage ausgeführt. Ein größerer Kreuzungspunkt besteht dabei nur mit der Reinhold-Frank-Straße. In ihrem weiteren Verlauf führte die Linie 1 bis zur Haltestelle Kronenplatz durch die Kaiserstraße, welche einen straßenbündigen Bahnkörper in Form einer Fußgängerzone darstellt. Zwi-

schen den Haltestellen Kronenplatz und Durlach Auer Str./Dr. Willmar Schwabe nutzt die ehemalige Linie 1 einen besonderen Bahnkörper in Mittellage, welcher u. a. niveaugleiche Kreuzungspunkte mit der Kapellenstraße, der Georg-Friedrich-Straße/Wolfartsweierer Straße und eine niveaufreie Kreuzung mit dem Ostring aufweist. Beim verbleibenden Streckenabschnitt durch die Durlacher Innenstadt handelt es sich wiederum um einen straßenbündigen Bahnkörper durch eine Fußgängerzone.

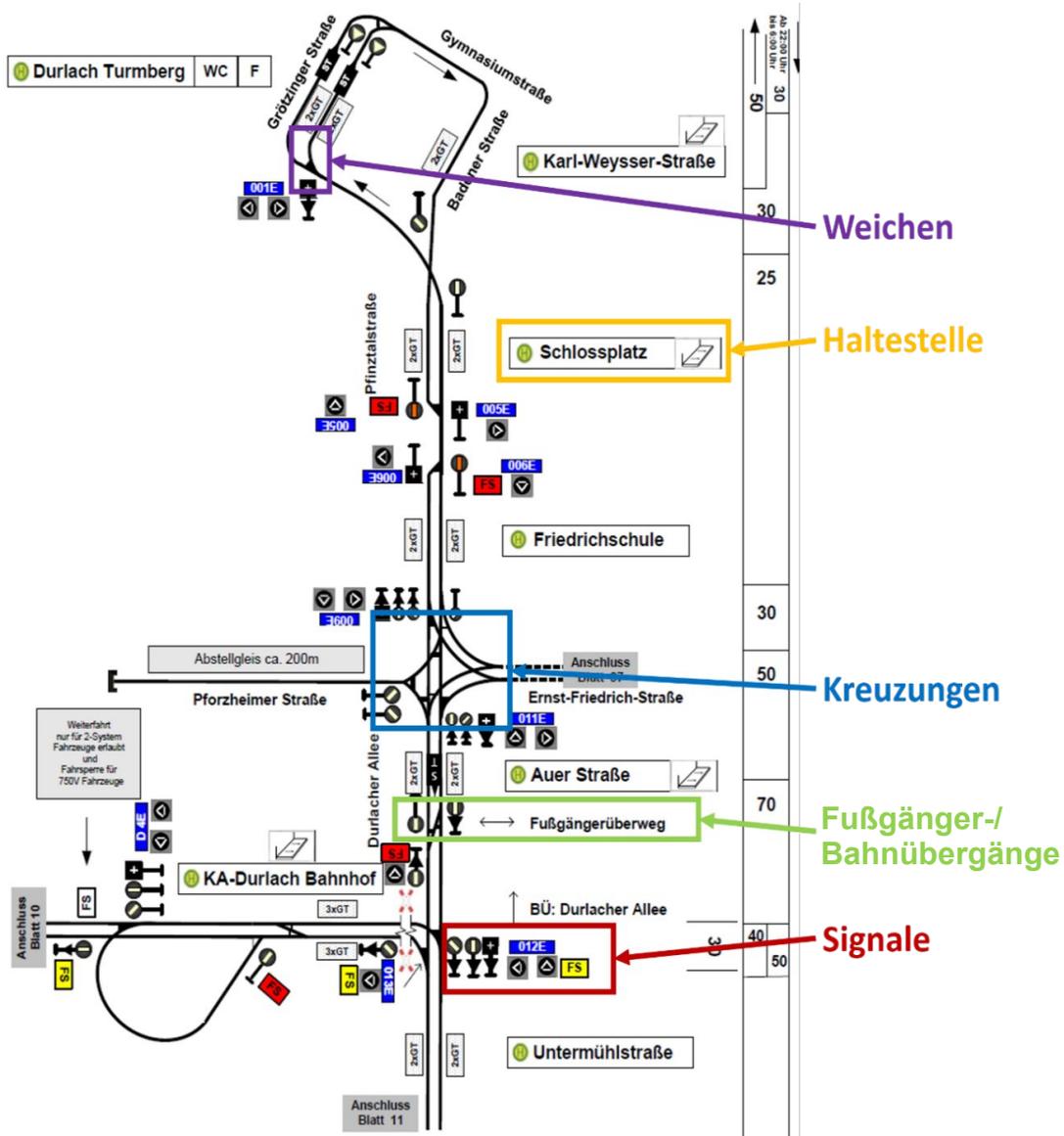


Abbildung 5-3: Grafische Analyse eines Teilschnitts der Linie 1, Karlsruhe

Für die Simulation der Linie 1 in OpenTrack ist, über die bisher dargestellte Analyse hinaus, eine Detailanalyse der Streckeninfrastruktur notwendig, um die typischen Netzabschnitte identifizieren und beschreiben zu können sowie in der Folge die genauen Simulationsparameter ermitteln zu können. Hierbei werden die einzelnen auf der Strecke vorhandenen Fahr-, Abfertigungs-, Geschwindigkeits-, Schutz-, Schalt-, Weichen-, Sondersignale usw. in grafischer Form über den Streckenverlauf hinweg aufbereitet. Ebenfalls in die Grafik integriert werden die Straßen- und Haltestellennamen sowie die einzelnen Geschwindigkeitsbereiche.

In Abbildung 5-3 ist die grafische Analyse des durch Durlach verlaufenden Streckenabschnitts der Linie 1 dargestellt. Die grafische Darstellung der Linie 1 ermöglicht eine schnelle Orientierung und ist eine wichtige Hilfestellung für die Simulation in OpenTrack. Sie zeigt auf, wie sich das Gesamtsystem Straßenbahn in der Praxis darstellt. Die quantitativ bereits ermittelten Betriebssituationen werden verortet, wodurch Ansatzpunkte für den Einsatz von Automatisierungstechnologie offenbart werden. Neben der grafischen erfolgt eine tabellarische Analyse für die Linie 1 (siehe Tabelle A-10). In dieser wird zwischen dem Ist-Betrieb und dem zukünftigen Betrieb mit automatisierten Straßenbahnen, in Tabelle A-10 sowie im Folgenden als autoTram-Betrieb bezeichnet, unterschieden. Dem Ist-Betrieb werden Bestandteile bzw. Informationen zugeordnet, auf welche der Einsatz von Automatisierungstechnologien keinen Einfluss hat. Hierzu gehören u.a. die Verortung der Haltestellen, die Länge der Gleisabschnitte zwischen Knoten, die Gleisanzahl, die zulässige Höchstgeschwindigkeit laut dem Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VzG), die Anzahl verkehrender Linien und Informationen zur Straße. Unter dem autoTram-Betrieb werden hingegen Aufgaben im Straßenbahnverkehr sowie Einsatz-Technologien aufgeführt. Die Aufgaben im Straßenbahnverkehr unterteilen sich in Knoten (Haltestellen, Kreuzungen, Fußgänger-/Bahnübergänge) und Kanten (Wendeanlagen, straßenbündiger oder besonderer Bahnkörper, unabhängiger Bahnkörper). Bei der Einsatz-Technologie wird zwischen LSA-Steuergerät, Weichen-Funkgerät, Funkgeräten für Fußgänger-/Bahnübergängen, Sensorik für die Umgebungswahrnehmung und bahnsteigseitiger Sensorik unterschieden. Die Gleisabschnitte zwischen den Knoten werden in der tabellarischen Analyse typischen Netzabschnitten zugeordnet.

Zusammen ermöglichen die grafische und die tabellarische Analyse der Linie 1 die Verortung des Einsatzes von Automatisierungstechnologien. Damit kann deren Einsatz entsprechend der Szenarien, auf welche im Folgenden noch genauer eingegangen wird, in OpenTrack simuliert werden.

5.2.1.2 Ableitung typischer Netzabschnitten und Betriebssituationen

Auf Grundlage der vorhergehenden Analyse auf Basis der verkehrlichen Rahmenbedingungen des Karlsruher Liniennetzes, sowie im Vergleich mit anderen Straßenbahnnetzen, werden die folgenden typischen Netzabschnitten identifiziert und im Folgenden unterschieden:

- Besonderer Bahnkörper (Seitenlage)
- Besonderer Bahnkörper (Mittellage)
- Straßenbündiger Bahnkörper (Stadtstraße)
- Straßenbündiger Bahnkörper (Fußgängerzone)
- Endhaltestelle mit Wendeanlage

Die Unterteilung von Straßenbahnstrecken in typische Netzabschnitte ermöglicht es, die Wirkungen verschiedener Automatisierungstechnologien für einzelne Straßenbahnstrecken anhand deren Aufbau besser abschätzen zu können. Die Wirkungen der Automatisierungstechnologien werden für die fünf Kategorien von typischen Netzabschnitten mittels Simulationen dabei jeweils separat bewertet.

Wie bei den typischen Netzabschnitten werden auch bei den Betriebssituationen fünf Kategorien unterschieden:

- Bewerkstelligen von Signalen
- Bewerkstelligen von Haltestellen
- Bewerkstelligen von Fußgänger-/Bahnübergängen
- Bewerkstelligen von Weichen
- Bewerkstelligen von Kreuzungen

Relevant ist die Unterscheidung dieser Betriebssituationen vor allem für die Untersuchung verschiedener Szenarien. So kann die Wirkung des Einsatzes bzw. der Verbreitung einzelner Technologien abgeschätzt werden.

Nachfolgend erfolgt eine detaillierte Analyse der Infrastruktur der ehemaligen Karlsruher Straßenbahnlinie 1 hinsichtlich der typischen Netzabschnitte und Betriebssituationen. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick darüber, wie sich die typischen Netzabschnitte anteilmäßig auf die ehemalige Linie 1 verteilen und welche maximale Streckengeschwindigkeit auf diesen jeweils zulässig ist. Den größten Anteil nehmen besondere Bahnkörper ein, auf denen eine maximale Streckengeschwindigkeit von 60 km/h gilt. Die Verteilung der identifizierten typischen Netzabschnitte ist in etwa vergleichbar mit jener der weiteren Straßenbahnlinien im Stadtgebiet Karlsruhe.

TABELLE 5-1: AUFTEILUNG TYPISCHE NETZABSCHNITTE LINIE 1

Typische Netzabschnitte	zurückgelegte Bahnstrecke	Streckengeschwindigkeit
Endhaltestelle mit Wendeanlage	6 %	40 [km/h]
Straßenbündiger Bahnkörper (Fußgängerzone)	17 %	25 [km/h]
Besonderer Bahnkörper (Mittellage)	44 %	60 [km/h]
Besonderer Bahnkörper (Seitenlage)	27 %	60 [km/h]
Straßenbündiger Bahnkörper (Stadtstraße)	5 %	30 [km/h]

Die Ermittlung typischer Betriebssituationen findet sich in der nachfolgenden Tabelle 5-2 wieder. Sie verdeutlicht, dass sich die Betriebssituationen nicht gleichmäßig auf die typischen Netzabschnitte verteilen. So gibt es Netzabschnitte, in denen Betriebssituationen überhaupt nicht auftreten. Es liegt damit also nahe, dass der Einsatz von Technologien zur Steuerung von Betriebssituationen, mit unterschiedlichen Wirkungen für den Betrieb auf den einzelnen typischen Netzabschnitten verbunden sein wird.

TABELLE 5-2: BETRIEBSSITUATION PRO TYPISCHEM NETZABSCHNITT LINIE 1

Betriebssituation	Typische Netzabschnitte (Anzahl)					Total	Betriebs-situation je Kilometer
	Endhaltestelle mit Wendeanlage	Straßenbündiger Bahnkörper (Fußgängerzone)	Besonderer Bahnkörper (Mittellage)	Besonderer Bahnkörper (Seitenlage)	Straßenbündiger Bahnkörper		
Bewerkstelligen von Signalen	1	6	19	9	4	39	3
Bewerkstelligen von Haltestellen	3	6	7	8	2	26	2
Bewerkstelligen von Fußgänger-/ Bahnübergängen	1	0	15	8	1	25	2
Bewerkstelligen von Weichen	0	4	13	2	5	24	2
Bewerkstelligen von Kreuzungen	0	0	5	1	2	8	1
Anteil Bahnstrecke (%)	6	17	44	27	5		
Ø Streckengeschwindigkeit (km/h)	40	25	60	60	30		

5.3 Szenariendefinition

Zur Entwicklung von Szenarien werden im aktuellen Netzbetrieb zunächst Störungen bzw. Situationen identifiziert, bei welchen es häufig zu Zeitverlusten und damit Verspätungen kommt. Um einem unterschiedlichen Technologiestand bzw. der teilweisen Einführung von Automatisierungstechnologie gerecht zu werden, ist die Definition verschiedener Szenarien vorgesehen. Dazu werden Investitionskonzepte in Automatisierungstechniken betrachtet, welche die Störungen adressieren und intelligent vermeiden sollen. Die Szenarien beziehen sich nicht direkt auf die Marktdurchdringung oder unterschiedliche Automatisierungsstufen, sondern auf den gezielten Einsatz bestimmter Automatisierungstechnologien. Unterschieden wird zwischen folgenden Szenarien:

- Szenario 1a: Einbruchsverspätung
- Szenario 1b: Stationsverspätung
- Szenario 1c: Störungen an Kreuzungen
- Szenario 2: Fahrstrategie

Durch die Unterscheidung der Szenarien lässt sich das Potenzial einzelner Automatisierungstechnologien für den Straßenbahnverkehr bestimmen. Die einzelnen Szenarien werden im Weiteren noch näher vorgestellt. Allgemein beziehen sich die Investitionskonzepte, welche durch die Szenarien wiedergegeben werden, auf die Ausrüstung einer Linie im Netz und der auf dieser Linie eingesetzten Fahrzeuge mit Automatisierungstechnologie.

Um die Potenziale durch den Einsatz von Automatisierungstechnologien quantifizieren zu können, werden die festgelegten Szenarien mit der Simulationssoftware OpenTrack simuliert. Das Simulationswerkzeug OpenTrack, welches die Simulation von Eisenbahn- bzw. Straßenbahnnetzen ermöglicht, ist aus dem Forschungsprojekt „Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen“ des Institutes für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich hervorgegangen [113]. Simuliert wird das ganze Karlsruher Straßenbahnnetz. Die Investitionen in die Linien und zugehörige Fahrzeuge ergeben ein Investitionspaket, welches sinnvolle Vorteile generieren kann und welches entsprechend hier betrachtet wird. Eine weitere Auflösung in Teilinvestitionen, also einzelne Fahrzeug- bzw. Automatisierungskomponenten oder einzelne Streckenelemente, wird nicht betrachtet. Bei den Investitionen wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die Komponenten als Stand der Technik verfügbar sind und keine Forschungs- und Entwicklungskosten projektspezifisch zu erbringen sind.

Es werden Szenarien betrachtet, die im Rahmen eines vom Aufgabenträger im Wesentlichen vorgegebenen Betriebsprogramms zu einer Verbesserung der Leistungskennzahlen in der Betriebsdurchführung (Reisezeit, Störungsfreiheit) führen. Nicht betrachtet werden:

- Investitionen in eine Kapazitätssteigerung,
- Investitionen in innovative Angebote oder Dienste,
- der Verzicht auf Fahrpersonal.

Investitionen in eine Kapazitätssteigerung sind oft von den örtlichen Verhältnissen geprägt. So kann beispielsweise in einem Streckenabschnitt ein Kapazitätsengpass vorliegen. Nur wenn in einem Abschnitt der Bedarf für eine Fahrtenhäufigkeit größer ist als die aktuelle Leistungsfähigkeit, würde dieses Merkmal wirtschaftlich relevant. In diesem Fall könnten Investitionen in vergleichsweise kurze Abschnitte ein verbessertes Angebot im Netz eröffnen. Für einen nachhaltig störungsfreien Betrieb bei einem erhöhten Kapazitätsbedarf wäre eine Alternative zur Automatisierung der Streckenausbau. Ob durch Automatisierungstechniken eine Kapazitätssteigerung leistbar ist, hängt auch von den konkreten Bedingungen ab. Etwa, ob sich Takte überlagernder Linien betrieblich geeignet harmonisieren lassen, so dass sich leis-

tungsfähige gleichförmige Zugfolgezeiten ergeben. Dies ließe sich aber schwer verallgemeinern, so dass Untersuchungen im Einzelfall erforderlich werden und hier kein entsprechendes typisches Szenario gebildet werden kann.

Zu innovativen Angeboten besteht noch gesonderter Forschungsbedarf. Automatisierungstechniken können perspektivisch auch neue Angebotsformen eröffnen, etwa On-Demand-Dienste in Schwachverkehrszeiten. Die Bewertung des Mehrwertes, wenn Fahrpersonal den Führerstand verlassen und andere Aufgaben wahrnehmen kann, steht ebenfalls noch aus. Das Fahrpersonal könnte in diesem Fall in der Interaktion mit Fahrgästen z. B. den Fahrgastwechsel persönlich unterstützen. Eine bessere Verfügbarkeit von Betriebsdaten in Echtzeit würde einen Mehrwert für die Anschlusssicherung bieten. Die genannten Aspekte sind keine Schwerpunkte dieser Untersuchung, welche sich mit der Automatisierung des Linienverkehrs im Kernbereich des Fahrbetriebs befasst.

Zum Verzicht auf Fahrpersonal ist auch kein Szenario entwickelt worden. Einerseits bestehen kurzfristig noch keine sachlichen (Technologieverfügbarkeit) und rechtlichen Grundlagen für einen fahrerlosen Betrieb, andererseits steht die Entlastung und Unterstützung des Fahrpersonals in kritischen Situationen im Vordergrund. Die Automatisierung wird damit als Assistenz begriffen, welche im Zusammenspiel von Fahrpersonal und Technischeinsatz einen reibungslosen Betrieb ermöglicht. Auch in den anderen Szenarien werden Effizienzgewinne erzielt, die z. B. durch den Entfall von Störgrößen das Fahrpersonal entlasten und Umlaufzeiten für Fahrzeuge und das Fahrpersonal verkürzen können.

Die Basis für die Simulation der Szenarien bilden die Ergebnisse der Analyse zu den Automatisierungs- und Vernetzungspotenzialen verschiedener Technologien. Zunächst soll eine Übersicht zu den Betriebsbereichen bzw. Betriebsorten und den mit diesen für den Straßenbahnbetriebsdienst jeweils verbundenen Hauptaufgaben verdeutlichen, welche Automatisierungstechnologien hier zukünftig übernehmen könnten (siehe Tabelle 5-3).

TABELLE 5-3: BETRIEBSBEREICHE UND -ORTE IM STRASSENBAHNVERKEHR UND DAMIT VERBUNDENE HAUPTAUFGABEN

Betriebsbereich/-ort	Hauptaufgaben
Depot, Rangierbahnhof, Endhaltestelle	Wartungs- und Instandhaltungsprozesse, Abrüsten und Abstellen, Aufrüsten und Inbetriebnahme, Kommunikation mit Betriebshofmanagement, Rangierprozesse, Hinderniserkennung
Haltestellen	Einleitung Haltevorgang, präzises Anhalten, sicheres und effektives Abfertigen, Durchführen und Überwachen des Fahrgastwechsels, Hinderniserkennung
Bahnübergänge	Interaktion mit Sicherungssystemen oder Bewerkstelligung von Sicherung basierend auf Sicht, Hinderniserkennung
Kreuzungen	Berücksichtigung von Verkehrsregeln, Verkehrszeichen und Signalen, Hinderniserkennung
Tunnel	Interaktion mit Sicherungssystemen bei nicht einsehbarem Bremsweg, Berücksichtigung von Signalen und Verkehrszeichen, Hinderniserkennung

Betriebsbereich/-ort	Hauptaufgaben
Straßenbündiger oder besonderer Bahnkörper	Hinderniserkennung und Risikoeinschätzung, Abstandhalten zu anderen Straßenbahnfahrzeugen oder anderen Verkehrsteilnehmern, Einhalten des Geschwindigkeitsprofils, situationsabhängige Fahrzeugsteuerung, Berücksichtigung von Signalen und Verkehrszeichen, Beachtung der Straßenverkehrsordnung (bei straßenbündigem Bahnkörper), Einstellen des Fahrweges, Reaktion auf Not- und Ausnahmesituationen
Unabhängiger Bahnkörper	Fahrt nach Vorgabe von Zugsicherungssystemen, Reaktion auf Not- und Ausnahmesituationen
Gesamter Betriebsbereich	Kommunikation und Interaktion mit Leitzentrale, Werkstatt, Passagieren, anderen Fahrzeugführern oder Verkehrsteilnehmern

Entsprechend der definierten Szenarien wird der Einsatz von Automatisierungstechnologien für bestimmte Betriebsbereiche bzw. Betriebsorte für die Simulation in OpenTrack angenommen. Die Simulation des Einsatzes von Automatisierungstechnologie erfolgt dort durch die Änderung einzelner Parameter. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in der Simulation auf diese Weise lediglich eine Annäherung an die zu erwartenden Wirkungen durch den Einsatz der Automatisierungstechnologien erfolgen kann. Hierzu werden entsprechende Annahmen getroffen, welche sich aus der Funktionsweise und dem Einsatzspektrum verschiedener Automatisierungstechnologien ergeben und auf dem heutigen Stand des Wissens beruhen.

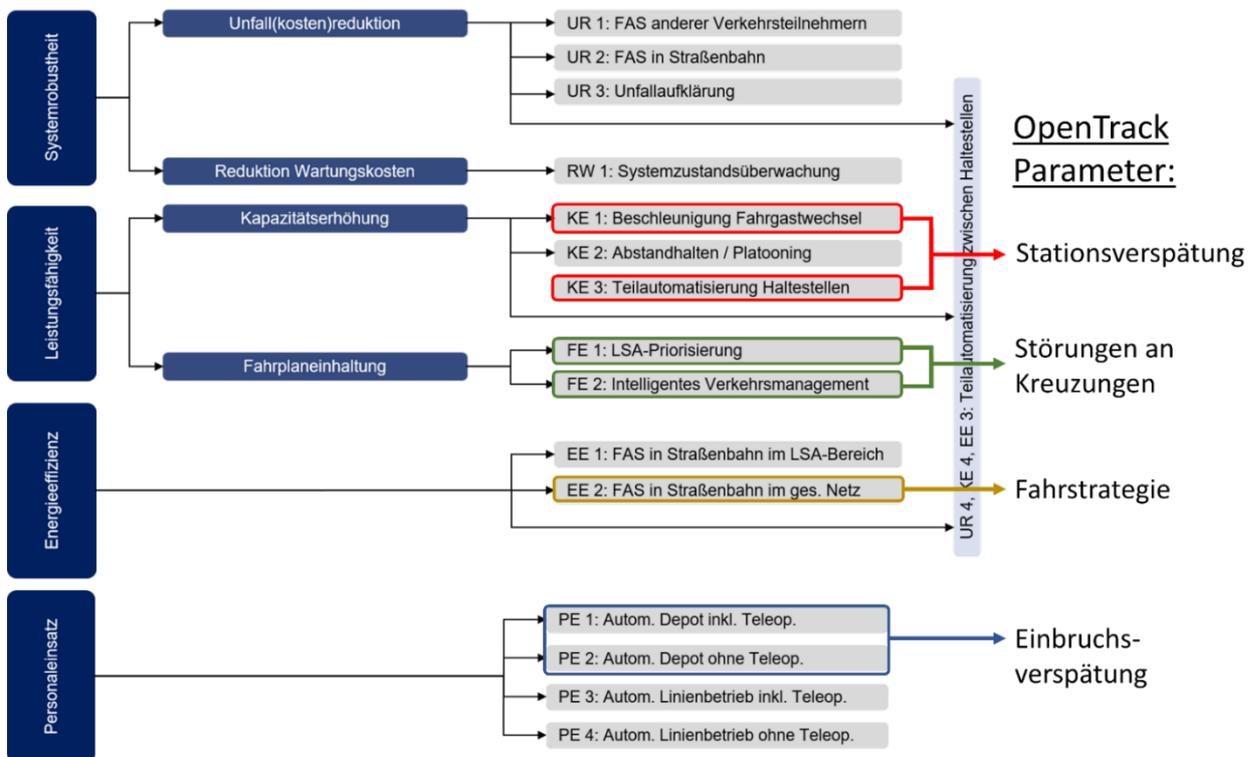


Abbildung 5-4: Technologische Lösungskonzepte für die Simulation von Automatisierungsszenarien im gesamten Netz

In Abbildung 5-4 wird der Zusammenhang zwischen den technologischen Lösungskonzepten und der Simulation der Szenarien in OpenTrack hergestellt. Für das Szenario der Einbruchsverspätung wird eine Automatisierung des Depots bzw. der Wendevorgänge betrachtet. Im Szenario der Stationsverspätung kommen Technologien zur Beschleunigung des Fahrgastwechsels und zur Teilautomatisierung von Haltestellen zum Einsatz. Das Szenario Störungen an Kreuzungen umfasst LSA-Priorisierungen sowie ein intelligentes Verkehrsmanagement. Beim Szenario Fahrstrategie wird der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen im gesamten Karlsruher Straßenbahnnetz angenommen.

Für den Netzaufbau zur Simulation der Linie 1 in OpenTrack wird auf folgende Streckendaten zurückgegriffen:

- Höchstgeschwindigkeiten aus der Sammlung der betrieblichen Vorschriften (SbV)
- Teilstreckenlängen zwischen Haltestellen aus Katasterplan und Luftbildern
- Signalpositionen entsprechend SbV und mit Hilfe des Katasterplans sowie Luftbildern

Diese Daten wurden bei der Detailanalyse der Infrastruktur bereits aufbereitet und können nun für den Modellaufbau in OpenTrack und die Simulation des Ist-Zustandes verwendet werden. Die Daten zum Betrieb werden durch die Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK) und die Albtal-Verkehrs-Gesellschaft zur Verfügung gestellt. Ein Großteil der beispielhaften Daten zum Betriebsablauf entstammen dabei dem ITCS (Stand 03/2012). Außerdem werden Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Messstraßenbahn“ des KIT FAST (Teilinstitut für Bahnsystemtechnik) und der VBK für den Modellaufbau und dessen Kalibrierung verwendet (Stand 02/2021). Für die Simulation des Betriebsablaufes werden u. a. folgende Daten verwendet:

- Reale Fahrplandaten und Verspätungsstatistiken
- Messdaten zu Beschleunigungs- und Bremsvorgängen
- GPS-Daten
- Daten zu Signalen, Ampeln und Verkehrsdaten
- Energieflussdaten
- Praktische Erkenntnisse und Erfahrungen des Fahrpersonals zur Sicherstellung des Praxisbezugs

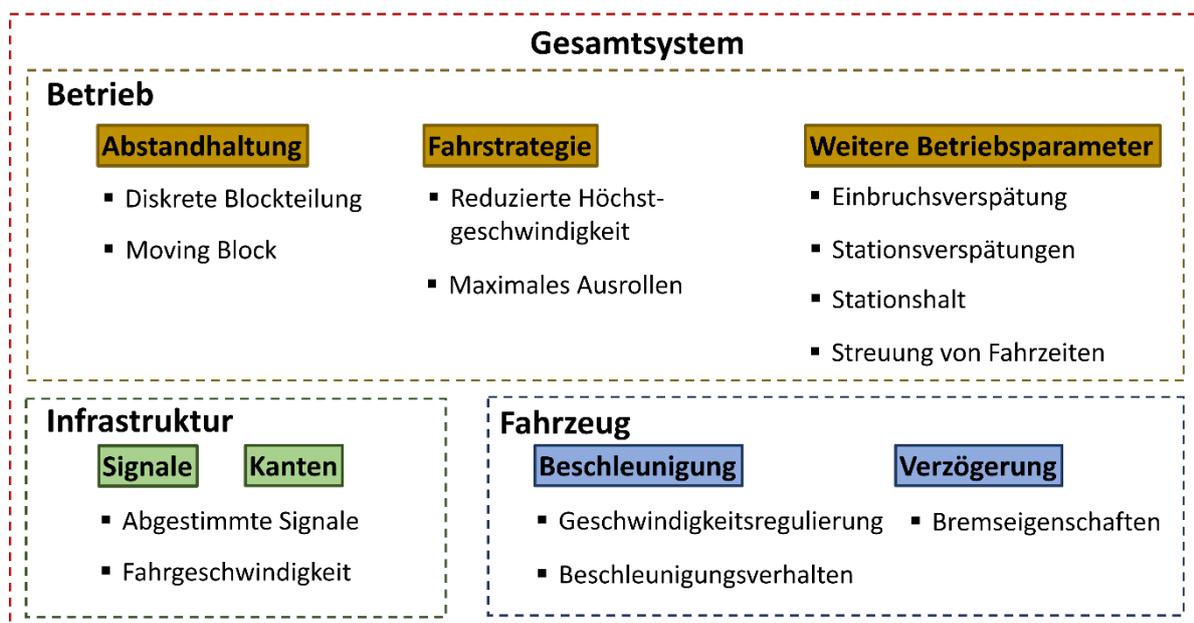


Abbildung 5-5: Übersicht der Einflussparameter zur Umsetzung der Automatisierungsszenarien in OpenTrack

Bei der Umsetzung der Automatisierungsszenarien in OpenTrack ist das Gesamtsystem Straßenbahn bestehend aus Betrieb, Infrastruktur und Fahrzeug zu betrachten (vgl. Abbildung 5-5). Zum Einsatz kommen für die Simulation der Szenarien in OpenTrack verschiedene Verteilungsfunktionen. Mit ihnen kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Wertebereiche festgelegt werden. Im Folgenden werden die untersuchten Szenarien beschrieben, insbesondere welche Grundannahmen und Daten ihnen zugrunde liegen. Um den maximalen Rahmen von Optimierungspotenzialen aufzuzeigen, wurden im Folgenden Best-Case-Szenarien angenommen.

5.3.1 Szenario 1a: Einbruchsverspätung

In Szenario 1a wird eine Reduktion der Einbruchsverspätungen durch die Einführung von Automatisierungstechnologie auf 0 Sekunden angenommen (Best-Case-Annahme). So würde beispielsweise ein vollautomatisiertes Straßenbahndepot ermöglichen, zeitintensive Rangierprozesse ohne Fahrpersonal durchführen zu können. Bei Einführung der entsprechenden Technologie, könnten an Wendeschleifen, Fahrzeuge automatisiert und ohne Anwesenheit von Fahrpersonal die Wende durchführen. Das Fahrpersonal könnte das Fahrzeug somit an der Endhaltestelle verlassen und die Zeit während des Rangier- oder Wendevorgangs für menschliche Bedürfnisse, wie etwa einen Toilettengang oder für gesetzlich vorgeschriebene Ruhepausen nutzen. Dies würde zum einen eine Entlastung für das Fahrpersonal darstellen, zum anderen wäre damit auch eine pünktlichere Bereitstellung der Fahrzeuge garantiert. Diese ergibt sich daraus, dass dem Fahrpersonal, auch bei verspäteter Ankunft an einer Endhaltestelle, durch den automatisierten Rangier- oder Wendevorgang, ausreichend Zeit für die bereits angesprochenen Bedürfnisse verbleibt. Hier ist der Vollständigkeit halber noch festzuhalten, dass grundsätzlich auch Pausenzeitregelungen für das Fahrpersonal eine Rolle spielen, welche hier allerdings keine Beachtung finden. Müsste das Fahrpersonal den Rangier- oder Wendevorgang, wie aktuell die Regel, selbst durchführen, könnte daraus eine verspätete Abfahrt an der Anfangshaltestelle resultieren. Auf dem Betriebshof der Verkehrsbetriebe Potsdam wird, im vom BMDV geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekt AStriD (Autonome Straßenbahn im Depot), bereits die Umsetzung eines digitalen Betriebshofs auf Basis einer autonom fahrenden Tram untersucht.

Bei der technologischen Ausstattung der Fahrzeuge für autonome Rangier- und Wendevorgänge ist grundsätzlich davon auszugehen, dass durch Automatisierungstechnologien auch im weiteren Netz Verspätungen reduziert werden. So erhöhen die Automatisierungstechnologien, gegenüber den heute gängigen Fahrerassistenzsystemen zur Kollisionsvermeidung (FAS), den Schutz vor Unfällen durch Straßenbahnfahrzeuge. Unfälle mit Straßenbahnen als Hauptverursacher sowie dadurch verursachte Verspätungen werden daher, mit der Einführung von Automatisierungstechnologie für automatisierte Wendevorgänge, abnehmen.

Für die Umsetzung von Szenario 1a in OpenTrack wird zunächst im Ohne-Fall pro Zugkategorie eine Verteilung für die Einbruchsverspätung definiert. Diese basiert auf den ITCS-Daten der betrachteten Linie 1 und der weiteren Karlsruher Straßenbahnlinien. In der Software OpenTrack steht für die Definition der Einbruchsverspätung ein entsprechender Parameter „Einbruchsverspätung“ zur Verfügung. Für das hier untersuchte Szenario wird, gemäß des eingangs beschriebenen Best-Case-Ansatzes, die Annahme getroffen, dass die Straßenbahnen durch den Einsatz von automatisierten Wendeschleifen zukünftig ohne Verspätungen an der Starthaltestelle starten. Die Einbruchsverspätungen betragen damit 0 Sekunden.

5.3.2 Szenario 1b: Stationsverspätung

Szenario 1b bezieht sich auf Stationsverspätungen. Diese nehmen in diesem Szenario durch den Einsatz von Automatisierungstechnologien ab, welche den Haltevorgang optimieren. So ermöglichen die Automatisierungstechnologien beispielsweise ein präziseres Halten an einem definierten Punkt des Bahnsteiges. In Kombination mit entsprechenden Bodenmarkierungen am Bahnsteig wird dadurch eine gezieltere

Fahrgastlenkung ermöglicht. Eine Option wäre in diesem Zusammenhang beispielsweise auch, die am Bahnsteig wartenden Fahrgäste über die Auslastung der einzelnen Fahrzeugbereiche zu informieren. So könnten diese sich bereits vor der Einfahrt des Fahrzeuges entsprechend auf die Einstiegsbereiche verteilen. Außerdem könnte der Fahrgastwechsel dadurch beschleunigt werden, dass bestimmte Türen nur für den Einstieg und andere nur für den Ausstieg freigegeben werden.

In Anlehnung an bereits in Betrieb befindliche autonome U-Bahnverkehre, wird hier unterstellt, dass die automatisierten Straßenbahnfahrzeuge ihre Daten ständig untereinander austauschen und so die Sicherheitsabstände zwischen den Bahnen kleiner werden können. Dies ermöglicht, zumindest in Spitzenzeiten, eine höhere Auslastung des Netzes, einen höheren Takt und eine gesteigerte Pünktlichkeit [1, 114].

In OpenTrack wird für die Simulation von Szenario 1b die Wahrscheinlichkeit einer Stationsverspätung sowie eine Obergrenze für eine Verspätung nach einem Stationshalt in Sekunden festgelegt. Außerdem wird pro Zugkategorie festgelegt, inwieweit die geplante Haltezeit an Stationen variiert, abhängig davon ob dieser verfrüht, pünktlich oder verspätet in der Haltestelle eingetroffen ist. Dies hängt auch mit dem Beschleunigungswert zusammen. Dieser wird dahingehend unterschieden, ob der Zug pünktlich verkehrt oder mit einer Verspätung belegt ist. So wird während der Simulation bei jedem Stationshalt bzw. jeder Stationsdurchfahrt die Ist-Zeit mit der Soll-Zeit verglichen und entschieden, welches Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsverhalten der Zug erhält. Ein Beschleunigungswert von 95 % bedeutet etwa, dass 95 % des technisch möglichen Beschleunigungswertes des Fahrzeuges verwendet werden. Es bedeutet gleichzeitig aber auch, dass die jeweils gültige Streckengeschwindigkeit nur zu 95 % ausgefahren wird. In der Simulation wird, basierend auf den ITCS-Daten, von der Annahme ausgegangen, dass die mittlere Haltezeit in der Innenstadt 27 Sekunden und außerhalb der Innenstadt 22 Sekunden beträgt. Für die statistische Verteilung je Haltestelle wird eine linkssteile Verteilungsfunktion hinterlegt [114].

In Abbildung 5-6 ist die als Bezugsgröße fungierende reale Haltezeitenverteilung an der Haltestelle Mühlburger Tor beispielhaft dargestellt, wie sie sich aus den zugrundeliegenden ITCS-Daten des Basisszenarios (Ohne-Fall) ablesen lässt.

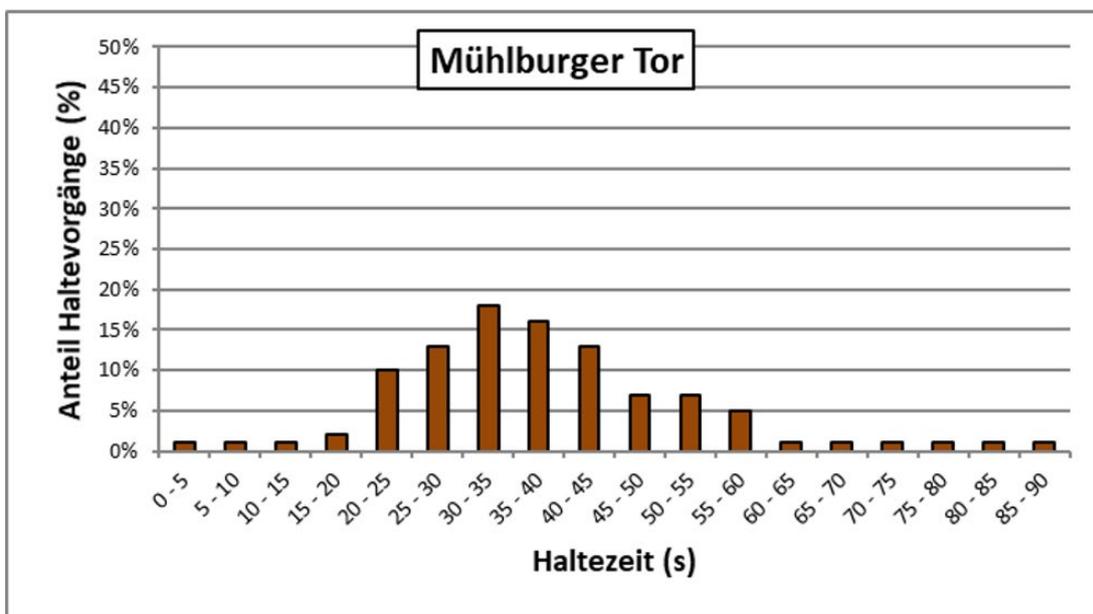


Abbildung 5-6: Reale Haltezeitenverteilung Haltestelle Mühlburger Tor

5.3.3 Szenario 1c: Störungen an Kreuzungen

In Szenario 1c werden durch den Einsatz von Automatisierungstechnologien Störungen an Kreuzungen reduziert bzw. vermieden. Zielsetzung ist es, Straßenbahnen bei Ankunft am Knotenpunkt unmittelbar die Freigabe zum Passieren des Knotenpunktes geben zu können. Hierfür wird V2X-Kommunikation verwendet, welche die Kommunikation zwischen den Straßenbahnen und den anderen Fahrzeugen und Signalgebern ermöglicht. Damit wird eine verbesserte ÖPNV-Priorisierung an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten erzielt. Bereits in der Annäherungsphase an einen Knotenpunkt kann der genaue Zeitpunkt der Freigabe zwischen der Verkehrssteuerung und der Automatisierungstechnologie in der Straßenbahn abgestimmt werden, sodass die Annäherungsgeschwindigkeit der Straßenbahn optimal auf den Freigabezeitpunkt abgestimmt werden kann. Dies führt zu einem flüssigeren Fahrvorgang, wodurch Abbremsvorgänge bis zum Stand der Fahrzeuge und damit Beschleunigungsvorgänge aus dem Stand heraus reduziert werden. Dies sowie die grundsätzliche Reduktion der Wartezeiten vor Signalgebern führt zu einer Reduktion der Fahrzeit. Störungen an Kreuzungen werden deutlich seltener auftreten.

Als technologische Lösungskonzepte werden in Szenario 1c eine LSA-Priorisierung sowie ein intelligentes Verkehrsmanagement angenommen. Für die Simulation werden im Prognosenullfall die Signale in OpenTrack als Ampel nachgebildet und der Ist-Zustand wird durch eine prozentuale Verteilung auf verschiedene Wartezeiten vor den Signalen simuliert. Im Planfall erhält die Straßenbahn das Fahrtsignal direkt bei Ankunft am Knotenpunkt. Die Verspätung an Knotenpunkten beträgt damit in der Regel 0 Sekunden. Wartezeiten können jedoch weiterhin durch den gegenseitigen Ausschluss von Fahrtbeziehungen am Knotenpunkt entstehen.

Die Szenarien der Leistungsfähigkeit umfassen als Output-Variablen in OpenTrack Fahrzeit, Durchschnittsgeschwindigkeit und Kapazität.

5.3.4 Szenario 2: Fahrstrategie

Während sich der Einsatz der Automatisierungstechnologien in den Szenarien 1a bis 1c auf die Verbesserung der Fahrplanstabilität bzw. Reisezeiteinsparungen bezog und damit auf eine Angebotsoptimierung abzielte, steht in Szenario 2 mit der Fahrstrategie die Energiebedarfsreduktion im Blickpunkt. Automatisierungstechnologien ermöglichen eine situationsangepasste Fahrzeugregelung. Dabei wird ein energieeffizienter und komfortabler Fahrstil als Ziel verfolgt. In sicherheitskritischen oder unübersichtlichen Situationen wird die Fahrgeschwindigkeit reduziert. Insgesamt resultiert daraus ein gleichmäßiger Fahrvorgang, was eine Reduzierung der Brems- und Beschleunigungsvorgänge bedeutet. Neben der Einsparung von Energie wird dadurch eine Verschleißreduktion erreicht. Für die situationsangepasste Fahrzeugregelung spielt die Kommunikation zwischen dem Fahrzeug, der Signalsteuerung und anderen Fahrzeugen (V2X-Kommunikation) eine wesentliche Rolle. Das sich daraus ergebende Potenzial zur Energieeinsparung wird in diesem Szenario beurteilt.

Für die Simulation in OpenTrack wird die Annahme getroffen, dass ein flächendeckender Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (FAS) in Straßenbahnen im gesamten Netz erfolgt. Der Fahrvorgang wird dabei, gegenüber dem Nullfall, durch die FAS situationsspezifischer gesteuert. So wird durch die Variation der Zeitspanne zwischen dem Bremsvorgang und der Beschleunigung ein gleichmäßigeres Fahren ermöglicht. Außerdem werden Bremsvorgänge durch vermehrtes Ausrollen reduziert, was den Energiebedarf ebenfalls senkt.

Beim Szenario der energetischen Effizienz stellt der Energiebedarf für den Zugkraftbedarf die Ausgangsgröße der Simulation dar.

5.4 Ergebnisse der Betriebssimulationen

Im mithilfe der vorhandenen Ist-Daten kalibrierten OpenTrack-Modell werden die verschiedenen Szenarien simuliert. Je Linie und Fahrtrichtung werden ca. 45 Fahrten simuliert, um eine ausreichend große und damit auch belastbare Datengrundlage zu haben. Dabei wird sowohl die Wirkung der einzelnen Szenarien separiert voneinander, als auch deren Gesamtwirkung betrachtet.

In Abbildung 5-7 ist zusammenfassend das Ergebnis der Szenarien der Leistungsfähigkeit für die Straßenbahnlinie 1 in Fahrtrichtung Oberreut grafisch dargestellt. Wie man erkennen kann, bildet das OpenTrack-Ist-Modell das aus den realen Betriebsdaten entnommene Fahrzeitprofil gut ab. Die Differenz zwischen der tatsächlichen Ist-Fahrzeit (31:09 min) und der im OpenTrack-Modell simulierten Ist-Fahrzeit (31:20 min) beträgt lediglich 11 Sekunden. Die beiden Graphen stimmen dabei im Fahrzeitprofil über den gesamten Linienvverlauf nahezu überein. Dabei besteht eine Abweichung zum eigentlichen Soll-Fahrzeitprofil. Wie das OpenTrack AutoTram-Fahrzeitprofil zeigt, können unter der Annahme des Einsatzes von Automatisierungstechnologien deutliche Fahrzeiteinsparungen erzielt werden. Diese ergeben sich im Linienvverlauf hauptsächlich zwischen der Haltestelle Tullastraße/VBK und der Haltestelle Mühlburger Tor und damit im Innenstadtbereich.

Für die Gegenrichtung (Fahrtrichtung Durlach) ergibt sich ein ähnliches Bild, wie Abbildung 5-8 zeigt. Auch hier ergeben sich die Fahrzeiteinsparungen bei Verwendung von Automatisierungstechnologie hauptsächlich im Innenstadtbereich. Die Differenzen zwischen den Fahrzeitprofilen sind vergleichbar mit denen in der Fahrtrichtung Oberreut.

Betrachtet man die einzelnen Szenarien der Leistungsfähigkeit genauer, können für die Straßenbahnlinie 1 in Fahrtrichtung Oberreut für alle drei Szenarien Fahrzeitgewinne durch den Einsatz von Automatisierungstechnologie gegenüber den Ist-Fahrzeiten erzielt werden (siehe Tabelle 5-4). Diese fallen dabei für die angenommenen Varianten der Haltezeitenverteilung beim Szenario der Stationsverspätung in der Regel höher aus als bei den Szenarien Einbruchsverspätung und Störungen an Kreuzungen. So liegt die Fahrzeiteinsparung für das Szenario Stationsverspätung bei 9,0 %, während für die Szenarien Einbruchsverspätung und Störungen an Kreuzungen Fahrzeitreduktionen von 6,2 % und 6,0 % erzielt werden. Entsprechendes gilt für die Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit. Auch hier wird der größte positive Effekt für das Szenario Stationsverspätung erzielt (8,7 %). Bei den Szenarien Einbruchsverspätung und Störungen an Kreuzungen liegen die Zunahmen der Durchschnittsgeschwindigkeiten bei 5,7 % und 5,6 %.

Für das die energetische Effizienz abdeckende Szenario der Fahrstrategie kann eine Energieverbrauchsreduktion von 10,1 % für die Linie 1 in Fahrtrichtung Oberreut erreicht werden. Dabei reduziert sich die Fahrzeit um 9,0 % und die Durchschnittsgeschwindigkeit erhöht sich um 8,7 %. Für die übrigen Szenarien werden Energieverbrauchsreduktionen zwischen 6,1 % und 6,8 % erzielt.

Für die Gegenrichtung der Linie 1 (Fahrtrichtung Durlach) ergibt sich ein ähnliches Bild (vgl. Tabelle 5 5). Ein nennenswerter Unterschied ergibt sich jedoch für das Szenario der energetischen Effizienz. Die Reduktion des Energiebedarfs ist für dieses Szenario zwar am größten (-11,1 %), allerdings ist annähernd keine Fahrzeitreduktion und keine Geschwindigkeitszunahme zu verzeichnen. Dies ist damit zu erklären, dass für die Untersuchung der Energieeffizienz, im Gegensatz zu den Szenarien zur Untersuchung der Effizienzsteigerung, ein Fahrplan vorgegeben wurde, den es galt einzuhalten unter bestmöglicher Energieausnutzung. Ziel dieses Szenarios war keine Fahrplanoptimierung, daher war der Fahrplan eine Inputgröße für die Simulation.

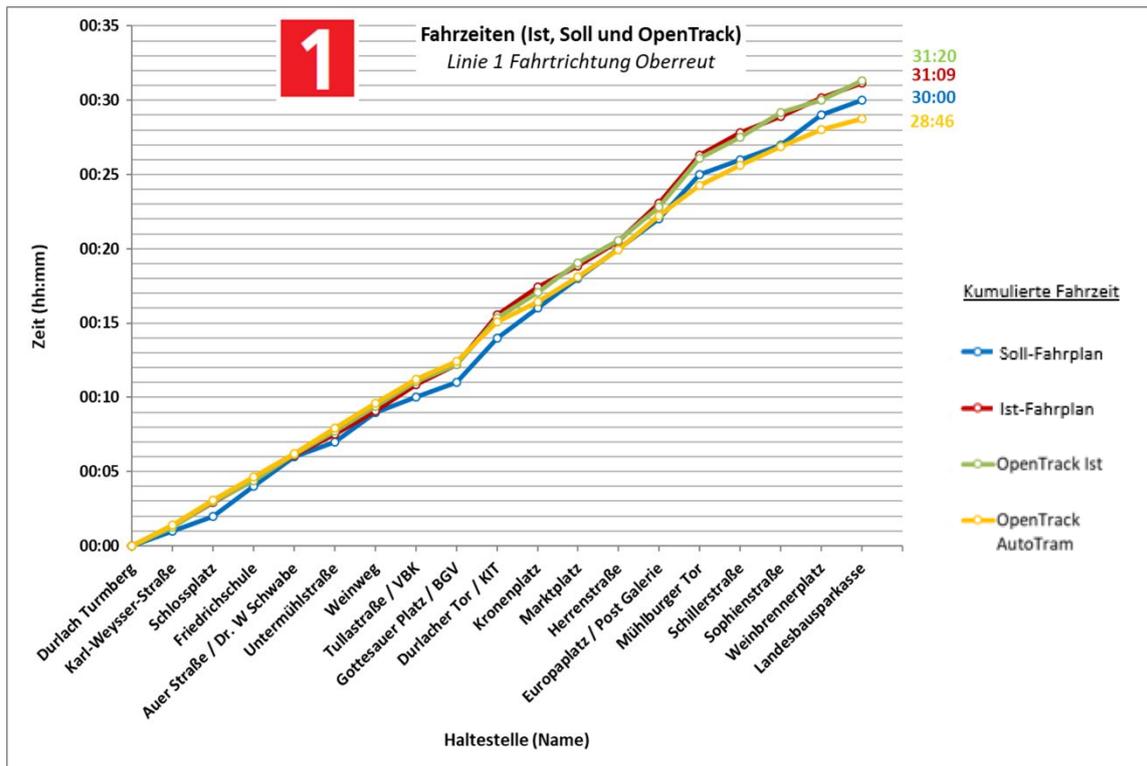


Abbildung 5-7: Gegenüberstellung Fahrzeitprofile Straßenbahnlinie 1 in Fahrtrichtung Oberreut

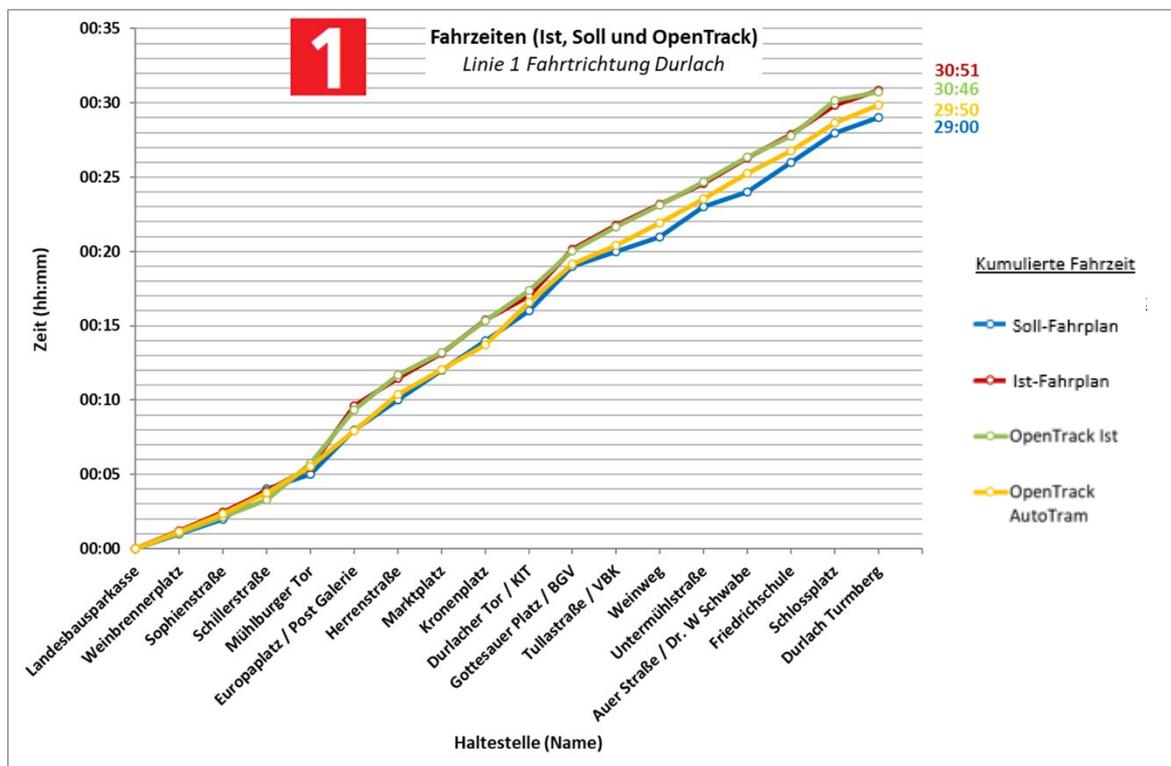


Abbildung 5-8: Gegenüberstellung Fahrzeitprofile Straßenbahnlinie 1 in Fahrtrichtung Durlach

TABELLE 5-4: ERGEBNISSE SIMULATION SZENARIEN LINIE 1 FAHRTRICHTUNG OBERREUT

Szenario	Fahrzeit		Geschwindigkeit		Energiebedarf (am Rad)	
	mm:ss	Δ Ref. (%)	(km/h)	Δ Ref. (%)	(MJ)	Δ Ref. (%)
Ohne-Fall (Referenz)	31:20		16,7		148	
1. Szenarien Effizienzsteigerung						
1a: Einbruchsverspätung	29:24	-6,2 %	17,3	+5,7 %	139	-6,1 %
1b: Stationsverspätung	28:30	-9,0 %	17,8	+8,7 %	138	-6,8 %
1c: Störungen an Kreuzungen	29:27	-6,0 %	17,3	+5,6 %	139	-6,1 %
2. Szenario energetische Effizienz						
2: Fahrstrategie	28:30	-9,0 %	17,8	+8,7 %	133	-10,1 %

TABELLE 5-5: ERGEBNISSE SIMULATION SZENARIEN LINIE 1 FAHRTRICHTUNG DURLACH

Szenario	Fahrzeit		Geschwindigkeit		Energiebedarf (am Rad)	
	mm:ss	Δ Ref. (%)	(km/h)	Δ Ref. (%)	(MJ)	Δ Ref. (%)
Ohne-Fall (Referenz)	30:46		16,4		144	
1: Szenarien Effizienzsteigerung						
1a: Einbruchsverspätung	29:38	-3,7 %	17,1	+4,3 %	137	-4,9 %
1b: Stationsverspätung	28:44	-6,6 %	17,6	+7,3 %	136	-5,6 %
1c: Störungen an Kreuzungen	29:53	-2,9 %	16,9	+3,0 %	137	-4,9 %
2: Szenario Energetische Effizienz						
2: Fahrstrategie	30:54	+0,4 %	16,4	-0,0 %	128	-11,1 %

Die Durchschnittswerte der Simulation für alle sechs Karlsruher Straßenbahnlinien zeigen mit Fahrzeiteinsparungen zwischen 10,0 % und 11,8 % sowie mit Geschwindigkeitszunahmen zwischen 11,2 % und 13,6 % noch deutlich größere Effekte durch die Automatisierung auf (siehe Tabelle 5-6). Dies erklärt sich damit, dass durch die optimierte Fahrplanteue aller Linien, aufgrund der Einführung von Automatisierungstechnologien, Netzeffekte eintreten. Das Verhältnis der Verteilung der Werte auf die einzelnen Szenarien entspricht dabei dem bei der Linie 1. Dies ist auch der Fall bei der Energiebedarfsreduktion, wobei die Energiebedarfsreduktion in Szenario 2 über den Durchschnitt aller Straßenbahnlinien hinweg betrachtet geringer ausfällt, als wenn man nur die Straßenbahnlinie 1 betrachtet.

TABELLE 5-6: ERGEBNISSE SIMULATION SZENARIEN FÜR ALLE SECHS STRASSENBAHNLINIEN

Szenario	Fahrzeit		Geschwindigkeit		Energiebedarf (am Rad)	
	mm:ss	Δ Ref. (%)	(km/h)	Δ Ref. (%)	(MJ)	Δ Ref. (%)
Ohne-Fall (Referenz)	31:34		16,9		134,2	
1: Szenarien Effizienzsteigerung						
1a: Einbruchsverspätung	28:25	-10,0 %	18,8	+11,2 %	127,5	-5,0 %
1b: Stationsverspätung	27:50	-11,8 %	19,2	+13,6 %	126,7	-5,6 %
1c: Störungen an Kreuzungen	28:21	-10,2 %	18,8	+11,2 %	126,9	-5,4 %
2: Szenario energetische Effizienz						
2: Fahrstrategie	29:48	-5,6 %	17,9	+5,9 %	124,3	-7,4 %

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass der Einsatz von Automatisierungstechnologie im Straßenbahnbetrieb quantifizierbare Potenziale für die Erhöhung der Leistungsfähigkeit und die energetische Effizienz bietet. Diese müssen allerdings für einen konkreten Anwendungsfall individuell analysiert werden. Insbesondere müssen dann auch Daten zur Verfügung stehen, welche Automatisierungstechnologie welchen quantitativen Vorteil mit sich bringen.

5.5 Wirtschaftliche Potenziale

5.5.1 Methodik zur Abschätzung der wirtschaftlichen Effekte

Nachfolgend werden die wirtschaftlichen Potenziale der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Automatisierungsszenarien grob abgeschätzt. Die Abschätzung stellt weder eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Sinne von § 7 der Bundeshaushaltsordnung (BHO), noch eine vollständige betriebliche Investitionsrechnung dar, sondern soll vielmehr eine erste Einschätzung liefern, welches wirtschaftliche Potenzial der Einsatz von Automatisierungstechnologien im Straßenbahnbetrieb bieten kann.

Ausgangspunkt der Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Automatisierungstechnologien im Straßenbahnbetrieb sind die in 5.4 dargestellten Veränderungen der durchschnittlichen Fahrzeiten und Energieverbräuche der sechs simulierten Straßenbahnlinien der Karlsruher Verkehrsbetriebe (VBK).

Die aus der Veränderung der Fahrzeit und der Energieverbräuche zu erwartenden Nutzen werden den Investitionskosten gegenübergestellt. Der Nutzen-Kosten-Quotient und der Nettobarwert geben Auskunft darüber, ob die in den Szenarien unterstellten Investitionen wirtschaftlich sinnvoll sind oder nicht.

5.5.1.1 Nutzen

Unter der Annahme, dass die ermittelten Fahrzeiteinsparungen zu Anpassungen von Fahr- und Dienstplänen führen, ergeben sich Reisezeiteinsparungen für die Passagiere sowie kürzere Arbeitszeiten für das Fahrpersonal. Einsparungen beim Stromverbrauch schlagen sich in niedrigeren Energiekosten und geringeren Emissionen von CO₂ und Luftschadstoffen durch die Energieerzeugung nieder. Ferner ist bei einer

Reisezeitverkürzung im öffentlichen Verkehr mit einer Nachfrageverlagerung vom Pkw auf die Straßenbahn zu rechnen, was wiederum zu geringeren Pkw-Betriebskosten, einer Abnahme der externen Kosten³ durch vermiedene Emissionen von CO₂ und Luftschadstoffen durch den Pkw-Verkehr sowie zusätzlichen Fahrscheinerlösen des Straßenbahnbetreibers führt.

Das Potenzial dieser unterschiedlichen Nutzenkomponenten wird sowohl aus volkswirtschaftlicher als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht (aus der Perspektive des Straßenbahnbetriebs) abgeschätzt. Tabelle 5-7 gibt einen Überblick über die berücksichtigten Nutzenvariablen.

TABELLE 5-7: BERÜCKSICHTIGTE NUTZENVARIABLEN

Betrachtung	Variable
Volkswirtschaftlich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reisezeit Passagiere ▪ Arbeitszeit des Fahrpersonals ▪ Energiekosten ▪ Zusätzliche Fahrscheinerlöse ▪ Betriebskosten Pkw ▪ Externe Effekte (CO₂, Luftschadstoffe) durch Änderung der Verkehrsmittelwahl und Energieverbrauch
Betriebswirtschaftlich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeitszeit des Fahrpersonals ▪ Energiekosten ▪ Zusätzliche Fahrscheinerlöse

Der Nutzen N für eine Nutzenvariable i in Bezug auf das Automatisierungsszenario j N_i^j , wird über die Kosteneinsparung im Vergleich zum Referenzfall quantifiziert:

$$N_i^j = C_i^{Ref} - C_i^j$$

C_i^{Ref} Kosten C für Nutzenkomponente i im Referenzfall (ohne Automatisierungsfunktionen)

C_i^j Kosten C für Nutzenkomponente i im Automatisierungsszenario j

Zur Berechnung der aggregierten Reisezeiten im Referenzfall wird zunächst die mittlere Reisegeschwindigkeit auf den sechs Straßenbahn-Linien der Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK) ermittelt. Mit den Daten der VBK über die durchschnittliche Fahrtlänge von Straßenbahnpassagieren und dem jährlichen Verkehrsaufkommen im Straßenbahnbetrieb [116] wird die jährliche Gesamtfahrzeit aller Straßenbahnpassagiere abgeschätzt. Die Fahrzeit der Straßenbahnfahrer wird über die Betriebsleistung und die mittlere Reisegeschwindigkeit ermittelt. Auf diese Fahrzeiten werden die prozentualen Fahrzeiteinsparungen für die einzelnen Automatisierungsszenarien angewandt, und mit Werten aus der Standardisierten Bewertung [117] monetarisiert. Für die Abschätzung der Fahrzeiteinsparungen für Passagiere wurde die Annahme getroffen, dass sich die im Simulationsmodell ermittelten Fahrzeitverkürzungen in vollem Umfang für Fahrzeiteinsparungen im Fahrplan verwenden lassen. Ferner wurde die Annahme getroffen, dass die ermittelten Fahrzeiteinsparungen in gleichem Umfang zu Arbeitszeiteinsparungen beim Fahrpersonal führen.

Um die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieerzeugung abzuschätzen, werden die durch das Simulationsmodell ermittelten Szenario-spezifischen Energieverbräuche verwendet. Zur Bestimmung der externen Kosten durch die Emission von Luftschadstoffen werden die externen Kosten aus der BVWP [117]

³ Externe Kosten sind Kosten, die nicht vom Verursacher, sondern von unbeteiligten Dritten getragen werden müssen.

zugrunde gelegt. Die CO₂-Emissionen werden über den Emissionsfaktor der BVWP abgeschätzt und mit dem in der aktuellen UBA-Studie [119] vorgeschlagenen CO₂-Preis bewertet. Die Energiekosten für den Straßenbahnbetreiber werden mit dem Kostensatz der BVWP sowie der Standardisierten Bewertung⁴ [117] berechnet.

Eine grobe Abschätzung der Auswirkung kürzerer Reisezeiten der Straßenbahn auf den Modal Split wird über Nachfrageelastizitäten vorgenommen. Mithilfe von Nachfrageelastizitäten können auf einfache Art und Weise Nachfrageveränderungen aufgrund von Veränderungen von Einflussgrößen abgeleitet werden. Der für diese Aufgabe relevante Zusammenhang lässt sich wie folgt darstellen:

$$\frac{dN}{N} = E(t) * \frac{dt}{t}$$

mit

$\frac{dN}{N}$ Prozentuale Veränderung der Nachfrage für das Verkehrsmittel Straßenbahn

$E(t)$ Elastizität der Nachfrage für das Verkehrsmittel Straßenbahn für die Einflussgröße Fahrzeit der Straßenbahn

$\frac{dt}{t}$ Prozentuale Veränderung der Fahrzeit des Verkehrsmittels Straßenbahn

In der Meta-Analyse im Rahmen des EU-Projekts HIGH-TOOL wurden folgende mittlere Reisezeitelastizitäten im Personenverkehr ermittelt [119]: -0,94 in Bezug auf die Verkehrsleistung, und -0,78 in Bezug auf das Verkehrsaufkommen. Ferner finden sich in der Literatur Elastizitätswerte für einzelne Nahverkehrsstrecken in der Schweiz: -0,7 für die Forchbahn (Region Zürich) [120, 121] und -0,31 für die Lausanne-Echallens-Bercher-Bahn (ebenda). In den Niederlanden wurde eine Elastizität der Bahn-Reisezeit in Bezug auf die Verkehrsleistung mit der Bahn von -0,68 kurzfristig und von -1,61 langfristig ermittelt (Referenzzeitpunkt: Abendspitzen) ([122] in: [122]).

Unter Berücksichtigung dieser Werte aus der Literatur wird für die Abschätzung der Auswirkung einer Reisezeitveränderung auf das Verkehrsaufkommen der Straßenbahn eine Elastizität von -0,5 zugrunde gelegt. Dieser Wert bewegt sich im Rahmen der Ergebnisse aus der Literatur, spiegelt aber eine eher konservative Verhaltensänderung wider. Auf längerfristige Sicht sind auch stärkere Nachfrageänderungen im Bereich des Möglichen. Es sei darauf hingewiesen, dass der Ansatz zur Abschätzung der Auswirkung auf die Verkehrsmittelwahl über Elastizitäten ein grobes Verfahren darstellt, bei dem spezifische Charakteristika des Karlsruher Verkehrssystems nicht berücksichtigt werden. Dennoch ist die Methode für eine ungefähre Abschätzung von Veränderungen der Verkehrsmittelwahl ein valides Verfahren im Rahmen der hier durchgeführten Potenzialanalyse.

Mithilfe dieser Elastizität wird ein Nachfragezuwachs von 2,9-5,9 % für die Straßenbahn ermittelt, wobei die Annahme getroffen wird, dass dieser mit dem bestehenden Angebot bewältigt werden kann, d.h. weder zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden noch die Bedienfrequenz erhöht wird. Für die Zwecke einer überschlägigen Abschätzung im Rahmen dieser Potenzialanalyse wird ferner angenommen, dass sich der Nachfragezuwachs durch Umsteiger vom Pkw auf die Straßenbahn erklärt, und induzierter Verkehr auf den vorwiegend kurzen innerstädtischen Relationen nur eine untergeordnete Rolle spielt. Somit werden der Rückgang des Pkw-Verkehrs sowie die resultierende Verringerung von Emissionen von CO₂, Luft-

⁴ Hier handelt es sich um die zum Zeitpunkt der Bearbeitung verfügbare Version der Standardisierten Bewertung. Im Juli 2022 wurde eine neue Verfahrensanleitung zu Standardisierten Bewertung veröffentlicht.

schadstoffen und Betriebskosten des Pkw-Verkehrs abgeschätzt. Schließlich lassen sich über den durchschnittlichen Fahrscheinerlös pro Straßenbahnpassagier die zusätzlichen Erlöse des Straßenbahnbetreibers berechnen.

Die wichtigsten Annahmen, die für die Quantifizierung und Monetarisierung der Nutzenkomponenten verwendet werden, sind in Tabelle 5-8 zusammengefasst.

TABELLE 5-8: MONETARISIERUNG DER NUTZENKOMPONENTEN

Variable	Wert	Referenz
Zeitkosten Passagier	4,83 €/h	BVWP [117]
Kosten des Fahrpersonals	50 €/h	Standardisierte Bewertung [117]
Strompreis	0,12 €/kWh	Standardisierte Bewertung (ebenda)
Betriebskosten Pkw	0,22 €/Fzg-km	Standardisierte Bewertung (ebenda)
CO₂-Emissionsfaktor für Stromerzeugung	414 g/kWh	Standardisierte Bewertung (ebenda)
CO₂-Emissionsfaktor Pkw	127 g CO ₂ /Fzg-km	Standardisierte Bewertung (ebenda)
Externe Kosten		
CO₂	680 €/t CO ₂	UBA [119]
Luftschadstoffe Energieerzeugung	0,96 ct/kWh	Standardisierte Bewertung [117]
Luftschadstoffe Pkw	0,4 ct/Fzg-km	Standardisierte Bewertung (ebenda)

5.5.1.2 Kosten

Zur Ermittlung der Kosten wurden Internetrecherchen vorgenommen und Interviews mit Experten aus der Praxis und aus Forschungs- und Modellprojekten geführt. Für manche Komponenten (wie beispielsweise Sensorik und OBUs) liegen bereits marktreife Produkte vor, allerdings für andere Anwendungsbereiche (beispielsweise aus [70]). Da es überwiegend um erwartete Marktpreise von Zukunftstechnologien ging, die heute am Markt noch nicht beobachtbar sind, waren die Interviews besonders wichtig. Neben Informationen über die Kosten bereits heute eingesetzter Assistenzsysteme wurden die zu erwartenden Kosten aus den gesammelten abgegebenen Schätzungen der Experten abgeleitet. Dementsprechend ist einzuräumen, dass die Kostenschätzungen hohen Unsicherheiten unterliegen.

Die Kosten wurden für die Bereiche Fahrzeug, Infrastruktur und Zentrale ermittelt. Sie umfassen sowohl laufende Kosten als auch Kosten für Investitionsgüter. Kosten für die Entwicklung von Technologien wurden nicht berücksichtigt. Als Basis für die Kosten des Fahrzeugs wurde ein neu zu beschaffender, moderner Triebwagen angenommen, wobei als Grundlage für Schätzungen ein NET-2012 Stadtbahn-Triebzug der Serie Vossloh Citylink diente (für technische Details siehe [124]). Zur Ermittlung der benötigten Quantitäten (Anzahl Sensoren usw.) wurden die in Kapitel 2 und 3 beschriebenen Versuchsprojekte sowie die Expertise der Projektpartner des KIT-FAST herangezogen.

Eine Übersicht über benötigte Quantitäten von Ausrüstungspaketen pro Szenario und Kosten befindet sich im Anhang in Tabelle A-7 (Fahrzeug), Tabelle A-8 (Infrastruktur), und Tabelle A-9 (Zentrale). Eine Zusammenfassung der undiskontierten Investitionskosten pro Szenario ist aus Tabelle 5-9 ersichtlich.

TABELLE 5-9: ÜBERSICHT ÜBER DIE INVESTITIONSKOSTEN (IN MIO. €)

Kostenkomponente	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 1c	Szenario 2
Fahrzeug	33,22	34,29	12,77	33,18
Infrastruktur	11,84	23,10	10,00	10,79
Zentrale	0,02	1,19	1,17	1,17
Summe	45,08 Mio. €	58,58 Mio. €	23,94 Mio. €	45,14 Mio. €

5.5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der volks- und betriebswirtschaftlichen Analyse werden sowohl über den Nettobarwert (NBW), als auch über den Nutzen-Kosten-Quotienten (NKQ) ausgegeben. Während der NBW die Differenz zwischen den Investitionskosten und den ermittelten Nutzen darstellt, vermittelt der NKQ das Verhältnis zwischen Nutzen und Investitionskosten. Die Wirtschaftlichkeit ist gegeben, falls der NBW einen positiven Wert annimmt bzw. der NKQ einen Wert größer als 1.

Für die Lebensdauer der Investitionsgüter wird ein Zeitraum von 12 Jahren angenommen, welcher sich an den Abschreibungsdauern für Fernmeldeanlagen, Leitsysteme, und Telekommunikationsanlagen in der AfA (Absetzung für Abnutzung) des Bundesministeriums der Finanzen [125] sowie der Nutzungsdauer für die ortsfeste Infrastruktur in der Standardisierten Bewertung [117] orientiert. Die jährlichen Investitionskosten werden über einen Annuitätenfaktor bestimmt, der sich aus der Lebensdauer (12 Jahre) sowie dem angenommenen Kalkulationszinssatz (3 % p.a.) ergibt. Der den Berechnungen unterlegte Diskontsatz beträgt dem in der Standardisierten Bewertung vorgeschlagenen Zinssatz von 1,7 % p.a. [117].

5.5.2.1 Volkswirtschaftliche Sicht

Die Ergebnisse der Potenzialabschätzung zeigen, dass die Automatisierungsszenarien unter den beschriebenen Annahmen aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sind. Am besten schneidet das Automatisierungsszenario 1b ab, gefolgt von Szenario 1c, 1a und Szenario 2.

Allen Szenarien gemeinsam ist die mit Abstand wichtigste Nutzenkomponente Fahrzeiteinsparung der Straßenbahnpassagiere. An zweiter und dritter Stelle folgen zusätzliche Fahrscheinerlöse des Straßenbahnbetreibers bzw. verringerte Pkw-Betriebskosten. An vierter Stelle stehen die Nutzen durch Einsparungen beim Fahrpersonal, gefolgt von verringerten externen Kosten durch CO₂-Emissionen und Einsparung von Energiekosten. Nutzen durch verringerte Emissionen von Luftschadstoffen spielen eine vergleichsweise kleine Rolle. Die Zusammensetzungen der volkswirtschaftlichen Nutzen für die einzelnen Szenarien sind in Abbildung 5-9 dargestellt.

Die einzelnen Bestandteile der volkswirtschaftlichen Potenzialanalyse sind in Abbildung 5-10 zusammengefasst, während die diskontierten Gesamtnutzen und -kosten in Abbildung 5-11 dargestellt sind.

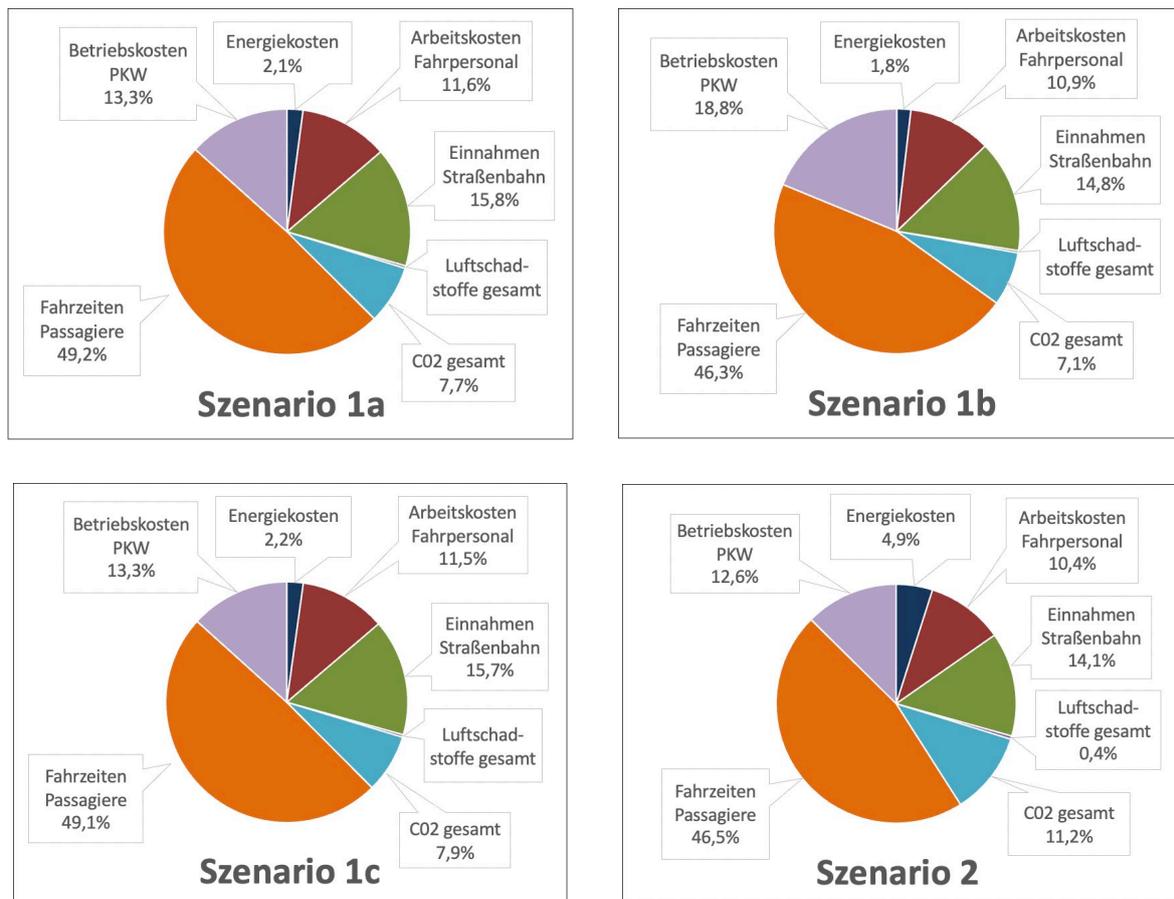


Abbildung 5-9: Volkswirtschaftlicher Nutzen der untersuchten Szenarien

	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 1c	Szenario 2
Investitionskosten	-55,1 Mio. €	-71,6 Mio. €	-29,2 Mio. €	-55,1 Mio. €
Laufende Kosten	-1,2 Mio. €	-6,3 Mio. €	-7,8 Mio. €	-7,6 Mio. €
Restwert der Investitionen	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €
Projektkosten diskontiert	-56,3 Mio. €	-77,9 Mio. €	-37,0 Mio. €	-62,7 Mio. €
Fahrzeit Passagiere	100,6 Mio. €	120,4 Mio. €	103,7 Mio. €	56,9 Mio. €
Betriebskosten PKW	27,2 Mio. €	48,8 Mio. €	28,0 Mio. €	15,4 Mio. €
Einnahmen Straßenbahn	32,3 Mio. €	38,5 Mio. €	33,0 Mio. €	17,3 Mio. €
Arbeitskosten Fahrpersonal	23,8 Mio. €	28,3 Mio. €	24,3 Mio. €	12,7 Mio. €
CO ₂ gesamt	15,8 Mio. €	18,6 Mio. €	16,6 Mio. €	13,7 Mio. €
Energiekosten	4,2 Mio. €	4,8 Mio. €	4,6 Mio. €	6,0 Mio. €
Luftschadstoffe gesamt	0,7 Mio. €	0,8 Mio. €	0,7 Mio. €	0,5 Mio. €
Projektnutzen diskontiert	204,5 Mio. €	260,1 Mio. €	210,9 Mio. €	122,5 Mio. €
Nettoarwert	148,2 Mio. €	182,2 Mio. €	173,9 Mio. €	59,8 Mio. €
Kosten-Nutzen-Quotient	3,63	3,34	5,70	1,95

Szenario 1a: Einbruchsverspätung

Szenario 1b: Stationsverspätung

Szenario 1c: Störungen an Kreuzungen

Szenario 2: Fahrstrategie

Abbildung 5-10: Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Potenzialabschätzung

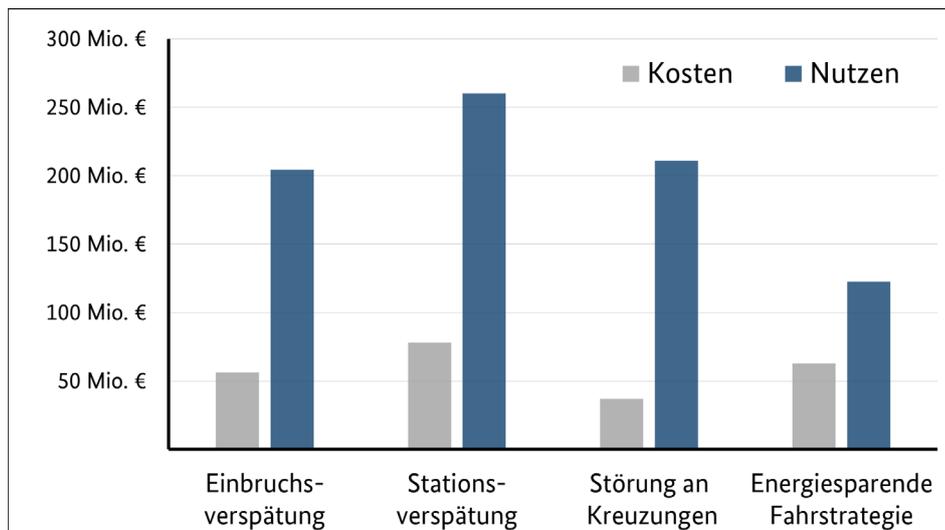


Abbildung 5-11: Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Potenzialabschätzung

5.5.2.2 Betriebswirtschaftliche Sicht

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht (Sicht des Straßenbahnbetriebs) zeigt die Potenzialanalyse positive Ergebnisse für die Szenarien 1a und 1c, wohingegen in den Szenarien 1b und 2 die Investitionskosten höher als der betriebliche Nutzen sind. In allen Szenarien stellen die Einnahmen durch zusätzliche Fahrserlöse die wichtigste Nutzenkomponente dar, gefolgt von den Arbeitskosten für Straßenbahnfahrpersonal und den Energiekosten (vgl. Abbildung 5-12).

Abbildung 5-13 vermittelt einen Überblick über die Resultate der Potenzialanalyse aus betriebswirtschaftlicher Sicht, während Abbildung 5-14 die diskontierten Nutzen und Kosten gegenüber stellt.

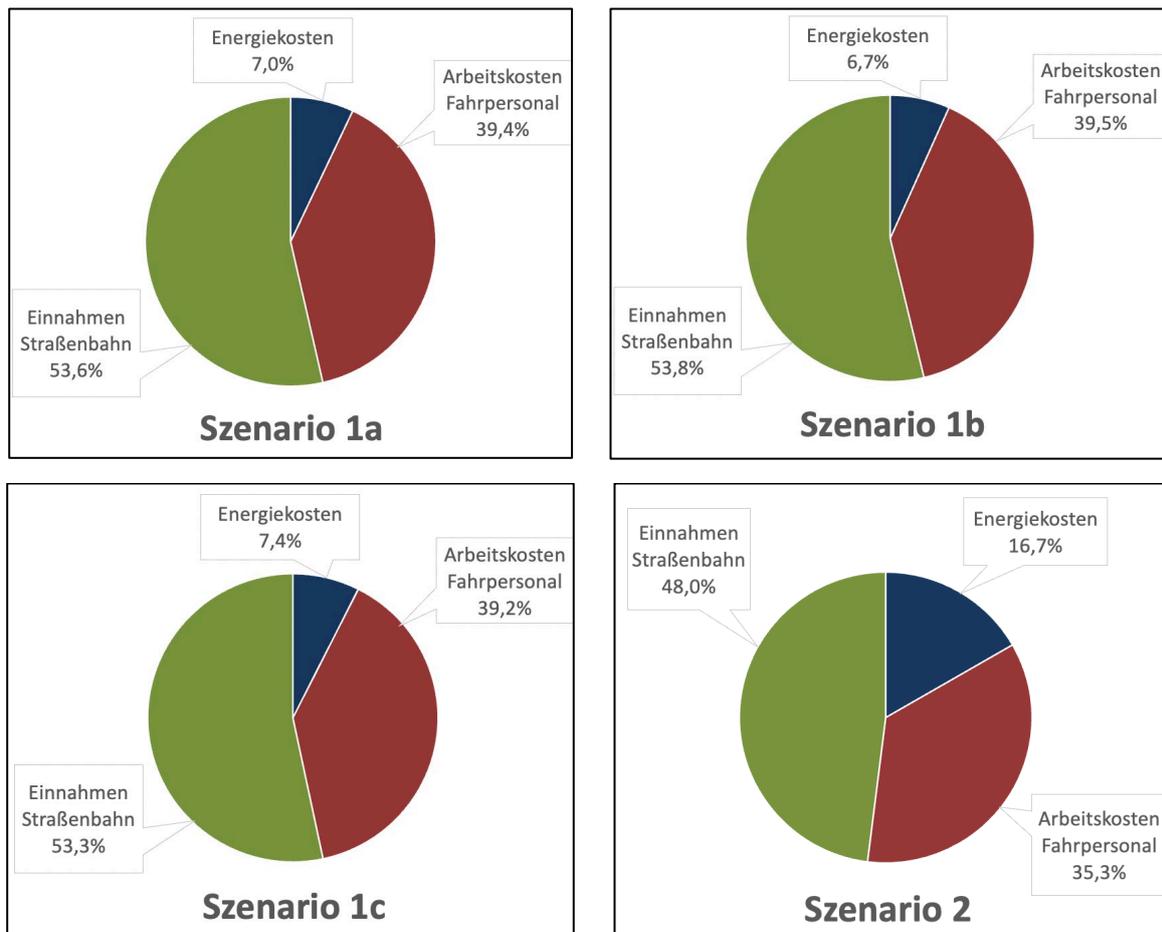


Abbildung 5-12: Zusammensetzung der betriebswirtschaftlichen Nutzen

	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 1c	Szenario 2
Investitionskosten	-55,1 Mio. €	-71,6 Mio. €	-29,2 Mio. €	-55,1 Mio. €
Laufende Kosten	-1,2 Mio. €	-6,3 Mio. €	-7,8 Mio. €	-7,6 Mio. €
Restwert der Investitionen	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €
Projektkosten diskontiert	-56,3 Mio. €	-77,9 Mio. €	-37,0 Mio. €	-62,7 Mio. €
Einnahmen Straßenbahn	32,3 Mio. €	38,5 Mio. €	33,0 Mio. €	17,3 Mio. €
Arbeitskosten Fahrpersonal	23,8 Mio. €	28,3 Mio. €	24,3 Mio. €	12,7 Mio. €
Energiekosten	4,2 Mio. €	4,8 Mio. €	4,6 Mio. €	6,0 Mio. €
Projektutzen diskontiert	60,3 Mio. €	71,6 Mio. €	61,9 Mio. €	36,0 Mio. €
Nettoarwert	4,0 Mio. €	-6,3 Mio. €	24,9 Mio. €	-26,7 Mio. €
Kosten-Nutzen-Quotient	1,07	0,92	1,67	0,57

Szenario 1a: Einbruchsverspätung

Szenario 1b: Stationsverspätung

Szenario 1c: Störungen an Kreuzungen

Szenario 2: Fahrstrategie

Abbildung 5-13: Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Potenzialabschätzung

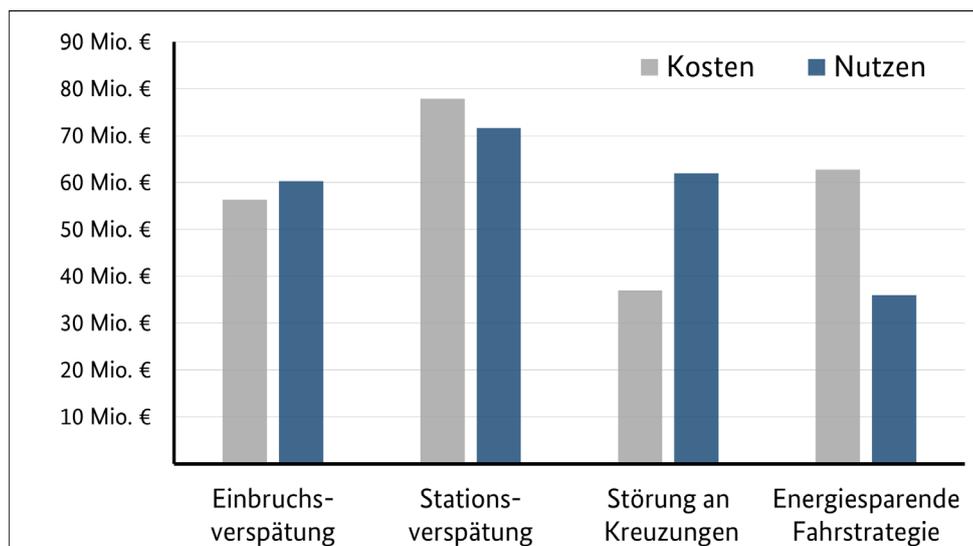


Abbildung 5-14: Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Potenzialabschätzung

5.5.2.3 Sensitivitätsanalysen

Um einen Einblick zu erhalten, inwieweit die erhaltenen Ergebnisse abhängig sind von getroffenen Annahmen und Modellergebnissen, wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse einige Berechnungseingaben variiert. Zunächst wird untersucht, inwieweit sich veränderte Ausgabegrößen des Simulationsmodells auf das wirtschaftliche Potenzial auswirken, indem analysiert wird, welchen Einfluss um 50 % und 20 % niedrigere bzw. um 10 % höhere Fahrzeiteinsparungen, sowie um 20 % und 10 % niedrigere bzw. um 10 % höhere Energieeinsparung haben:

- Fahrzeiteinsparung -50 %
- Fahrzeiteinsparung -20 %
- Fahrzeiteinsparung +10 %
- Energieeinsparung -20 %
- Energieeinsparung -10 %
- Energieeinsparung +10 %

Ferner werden die aus den oben genannten Referenzen verwendeten Kostensätze bzgl. Energieverbrauch und CO₂-Preis variiert:

- Energiepreis +50 %
- Energiepreis +100 %
- CO₂-Preis -20 % (nur relevant für volkswirtschaftliche Betrachtung)
- CO₂-Preis +20 % (nur relevant für volkswirtschaftliche Betrachtung)

Schließlich werden die Investitionskosten sowie die durchschnittliche Lebensdauer der Investitionen modifiziert:

- Investitionskosten -10 %
- Investitionskosten +20 %
- Investitionskosten +50 %
- Lebensdauer der technischen Komponenten: 8 Jahre

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen sind im Anhang in Abbildung A-1 für die volkswirtschaftliche, und in Abbildung A-2 für die betriebswirtschaftliche Potenzialanalyse zusammengefasst. In den Diagrammen wird für jedes Szenario der Referenzwert ganz links dargestellt, wobei die Balken die Nettobarwerte und die Punkte die Nutzen-Kosten-Quotienten repräsentieren. Rechts von den Referenzwerten befinden sich die Ergebnisse unter Berücksichtigung der veränderten Eingabegrößen.

In der volkswirtschaftlichen Betrachtung bleiben die Ergebnisse für alle Veränderungen im positiven Bereich. Die mit Abstand stärkste Auswirkung hat die Verringerung der Fahrzeiteinsparung um 50 %, gefolgt von einer Verringerung der Lebensdauer der technischen Ausrüstung von zwölf auf acht Jahre.

Die Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Betrachtung zeigen die höchsten Sensitivitäten bezüglich verringerten Fahrzeiteinsparungen, höheren Investitionskosten und einer kürzeren Lebensdauer der Investition. Für Szenario 1a führen um 50 % oder 20 % niedrigere Fahrzeiteinsparungen, um 20 % oder 50 % höhere Investitionskosten sowie eine auf acht Jahre verkürzte Lebensdauer dazu, dass die Investitionen betriebswirtschaftlich nicht mehr sinnvoll sind. Szenario 1b erreicht knapp die Wirtschaftlichkeitsschwelle, wenn die Fahrzeiteinsparungen 10 % höher, oder die Investitionskosten um 10 % niedriger liegen. In Szenario 1c bleibt das Ergebnis positiv, sofern sich die Fahrzeiteinsparung nicht um 50 % verringert. In Szenario 2 ist die Wirtschaftlichkeit unter allen Modifikationen nicht gegeben.

5.5.3 Hochskalierung der Ergebnisse auf Deutschland

Die Frage ob, und in welchem Umfang Automatisierungstechnologien im Straßenbahnbetrieb zur Anwendung kommen, hängt von zahlreichen spezifischen Eigenschaften des Straßenbahnbetriebs in der jeweiligen Stadt ab. Die Hochskalierung der für die Straßenbahnlinien der Karlsruher Verkehrsbetriebe ermittelten Effekte ist daher mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet, und dient primär dem Zweck, ein ungefähres wirtschaftliches Potenzial für die Implementierung von Automatisierungsszenarien im Straßenbahnbetrieb für ganz Deutschland überschlägig abzuleiten.

Da die Anwendung von Automatisierungstechnologien im Straßenbahnbetrieb möglicherweise von der Art der in den einzelnen Städten vorhandenen Straßenbahninfrastruktur abhängt, wurden die deutschen Städte mit Straßenbahnbetrieb gemäß der Statistik des VDV [126] zunächst in folgende Untergruppen aufgeteilt⁵:

- Städte mit unabhängigem Straßenbahnkörper (25 Städte)
- Städte mit unabhängigem oder besonderem Straßenbahnkörper (32 Städte)
- Alle Städte mit Straßenbahn (48 Städte)

Um die für die Straßenbahnlinien der Karlsruher Verkehrsbetriebe ermittelten Effekte auf diese Gruppen der Städte grob zu extrapolieren, werden die für Karlsruhe ermittelten volkswirtschaftlichen Nutzen über die Verkehrsnachfrage, und die Investitionskosten über die Straßenbahnnetzlänge extrapoliert. Hierzu wird die Statistik des VDV [126] verwendet, in der sowohl das Verkehrsaufkommen als auch die Netzlänge auf Stadtebene hinterlegt sind.

Das volkswirtschaftliche Nutzungspotenzial über die 12-jährige Lebensdauer der technischen Infrastruktur ist in Abbildung 5-15 dargestellt, während Abbildung 5-16 die Summe der extrapolierten Kosten (Investitionskosten und laufende Kosten) zeigt.

⁵ Die zweite Kategorie der Städte umfasst auch die Städte der ersten Kategorie, und die dritte Kategorie auch die der zweiten.

Die Ergebnisse der Extrapolation zeigen das hohe volkswirtschaftliche Nutzenpotenzial der Anwendung von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbetrieb – für alle Städte mit Straßenbahnbetrieb je nach Szenario zwischen rund 6,0 und 12,8 Mrd. €, bei vergleichsweise moderaten Kosten zwischen rund 2,3 und 4,3 Mrd. €.

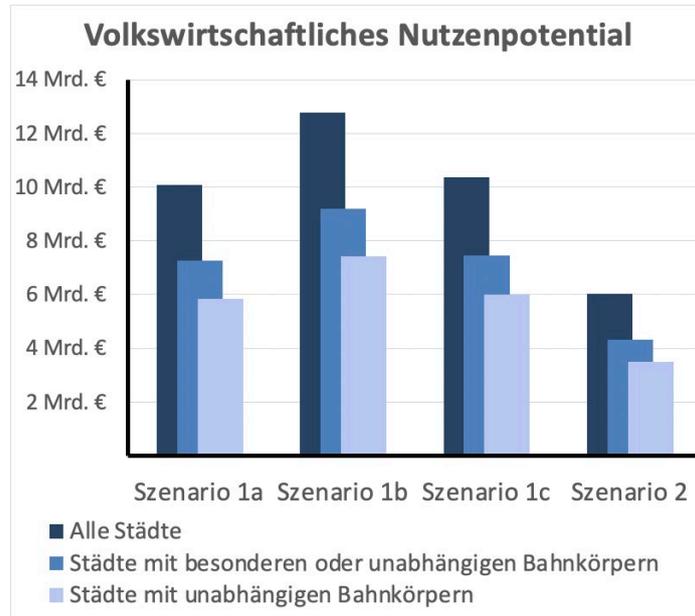


Abbildung 5-15: Volkswirtschaftliches Nutzenpotenzial von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbereich in Deutschland

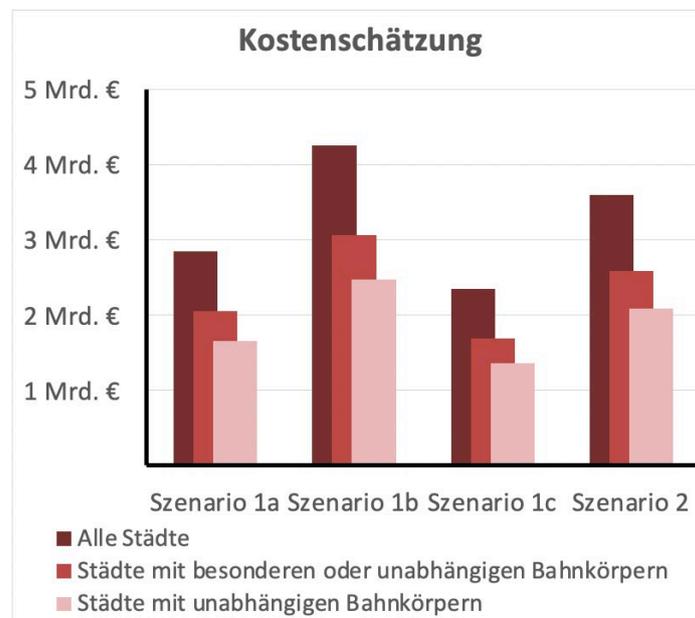


Abbildung 5-16: Extrapolierte Investitionskosten für Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbereich in Deutschland

5.5.4 Grobabschätzung der Veränderung von Unfallkosten

Unabhängig von den im Rahmen der Szenarien untersuchten Nutzenkomponenten kann erwartet werden, dass die Vollautomatisierung im Straßenbahnbetrieb zu einer Reduktion jener Unfälle führt, die in einem Fehlverhalten des Fahrpersonals begründet liegen. Im Rahmen einer Grobabschätzung soll eine erste Orientierungsgröße ermittelt werden, um das Potenzial einer Anwendung von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbetrieb aufzuzeigen.

Dazu wurden zunächst Unfallstatistiken betrachtet. Tabelle 5-10 zeigt eine bisher unveröffentlichte Auflistung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) über die Anzahl der Unfälle mit Straßenbahn als Hauptverursacher im Jahr 2019. Diese Unfälle führten zu vier Getöteten, sowie 43 Schwer- und 30 Leichtverletzten.

TABELLE 5-10: UNFALLURSACHEN MIT STRASSENBAHN ALS HAUPTVERURSACHER, 2019⁶

	Unfälle mit Getöteten	Unfälle mit Schwerverletz- ten	Unfälle mit Leichtverletzten
Vorfahrt, Vorrang	1	5	23
Abstand	0	3	21
Falsches Verhalten ggü. Fußgängern	3	3	15
Geschwindigkeit	1	3	10
Ruhender Verkehr	0	0	7
Technischer Mangel	0	0	5
Überholen	0	0	0
Ein- und Anfahren	0	0	0
Anderer Fehler der Fahrzeugführer	0	25	135

Mehrfachnennungen möglich

Unter der Annahme, dass alle Unfälle mit der Straßenbahn als Hauptverursacher durch Automatisierungsfunktionen vermieden werden können, lässt sich mithilfe der Kostenwerte für Getötete sowie Schwer- und Leichtverletzte aus der BVWP [117] das volkswirtschaftliche Potenzial abschätzen, welches durch die Vermeidung von Personenschäden jährlich gehoben werden kann (siehe Tabelle 5-11). Durch die Vermeidung der Unfälle mit Getöteten sowie Schwer- und Leichtverletzten, bei denen die Straßenbahn als Hauptverursacher gilt, ergibt sich für die Unfallzahlen des Jahres 2019 ein Einsparungspotenzial von jährlich rund 27,8 Mio. €. Dieser Wert spiegelt allerdings nur das Ergebnis einer groben Abschätzung wider. Einerseits gibt diese Schätzungen eine untere Schranke des Potenzials an, da Sachschäden aufgrund fehlender Daten keinen Eingang in die Abschätzung finden konnten. Andererseits werden durch die Automatisierung zusätzliche Unfallursachen relevant (z. B. Cyber-Attacken), deren Schadenspotenziale im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet wurden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass im Straßenbahnbetrieb Situationen auftreten, die zwangsläufig zu Unfällen führen, und welche weder durch das

⁶ Unveröffentlichte Daten der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2022, Az: BASt-U2s-05/2022

Fahrpersonal, noch durch Automatisierungstechnologien vermieden werden können. Andererseits könnten Automatisierungstechnologien auch noch größere Potenziale haben als die Vermeidung von Unfällen mit Hauptverursacher Straßenbahn: Denn wenn Dritte fehlerhaft handeln, könnten Automatisierungstechnologien die Reaktionszeiten verkürzen und damit auch die Unfallhäufigkeit bei Fehlverhalten Dritter reduzieren.

TABELLE 5-11: VOLKSWIRTSCHAFTLICHES NUTZENPOTENZIAL DURCH DEN WEGFALL VON UNFÄLLEN MIT STRASSENBAHN ALS HAUPTVERURSACHER

Gruppe	Wert (in Mio. € p.a.)
Getötete	9,9
Schwerverletzte	12,4
Leichtverletzte	5,5
Summe	27,8

5.6 Zwischenfazit: Die Potenziale von Vernetzung und Automatisierung

Die Ergebnisse der Potenzialabschätzung zeigen, dass die Automatisierungsszenarien unter den beschriebenen Annahmen aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sind. Die für alle Szenarien wichtigste Nutzenkomponente ist die Fahrzeiteinsparung der Straßenbahnpassagiere. An zweiter und dritter Stelle folgen zusätzliche Fahrscheinerlöse des Straßenbahnbetreibers bzw. verringerte Pkw-Betriebskosten.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht zeigt die Potenzialanalyse positive Ergebnisse für die Szenarien Einbruchsverspätung (1a) und Störung an Kreuzungen (1c), wohingegen in den Szenarien Stationsverspätung (1b) und energiesparende Fahrstrategie (2) die Investitionskosten höher als der betriebliche Nutzen sind. In allen Szenarien stellen die Einnahmen durch zusätzliche Fahrscheinerlöse die wichtigste Nutzenkomponente dar, gefolgt von den Arbeitskosten für Straßenbahnfahrpersonal und Energiekosten.

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass die untersuchten Automatisierungsszenarien für den Straßenbahnbetrieb durchaus wirtschaftliches Potenzial haben. Da Reisezeiteinsparungen für Passagiere sowie die Verringerung externer Effekte, wie die Emission von Treibhausgasen und Luftschadstoffen, ausschließlich in der volkswirtschaftlichen Betrachtung Berücksichtigung finden, ist das Potenzial aus volkswirtschaftlicher Sicht deutlich höher als aus betriebswirtschaftlicher Perspektive.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass einzelne zugrundeliegende Annahmen bzw. Simulationsergebnisse mit Unsicherheiten behaftet sind, namentlich die Höhe der Reisezeiteinsparungen, welche den bedeutendsten Nutzenbeitrag liefern, sowie die Höhe der Investitionskosten und die Lebensdauer der technischen Ausstattung. Solche Unsicherheiten wurden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen aufgegriffen. In der volkswirtschaftlichen Betrachtung bleiben die Ergebnisse für alle in den Sensitivitätsuntersuchungen untersuchten Modifikationen im positiven Bereich.

Vertiefende Analysen zu Wirkungen und Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Anwendungsfälle sind empfehlenswert, um die anwendungsfallspezifischen Wirkungen von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbetrieb genauer abzubilden. Weitergehende Analysen von Automatisierungs-

funktionen auf betriebliche Abläufe sowie Auswirkungen auf das Angebotsniveau ermöglichen eine detailliertere Betrachtung der wirtschaftlichen Implikationen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf, um die Wirkungen von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbetrieb auf die Verkehrssicherheit fundierter abzuschätzen und anwendungsfallsspezifische Wirkungen von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbetrieb genauer abzubilden.

6 Zukünftige Marktstruktur des Straßenbahnsektors

Die Straßenbahnbranche besteht aus vielen Akteuren, die teilweise aufeinander angewiesen sind (z. B. die Hersteller und die Nutzer von Straßenbahnsystemen) und teilweise miteinander konkurrieren. Die Verbreitung von Vernetzung und Automatisierung wird die Branche verändern. In diesem Kapitel werden einige grundlegende Vorüberlegungen zur künftigen Struktur der Branche angestellt. Dies gibt den Rahmen, in dem im anschließenden Kapitel 7 die Herausforderungen, Lösungswege und Akteure für die Verbreitung der einzelnen Querschnittstechnologien von Vernetzung und Automatisierung betrachtet werden.

6.1 Begriffsklärung: technische und wirtschaftliche Schnittstellen

Der zentrale Begriff der „Schnittstelle“ hat eine doppelte Bedeutung, eine technische und eine wirtschaftliche:

Technische Schnittstellen bestehen zwischen allen technischen Komponenten, die klar zu unterscheiden sind und zusammen funktionieren sollen. So müssen Sensoren, Aktoren und Soft- und Hardwarekomponenten der intelligenten Datenverarbeitung durch Übertragungs- und Datenschnittstellen miteinander verbunden werden. Hinzu kommen die Kommunikationsschnittstellen zwischen Komponenten im Fahrzeug und in der Außenwelt (Vernetzung mit infrastrukturseitigen Komponenten, einer Zentrale oder dem allgemeinen Internet) sowie auch – in erweitertem Begriffsverständnis – die Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI: human-machine interfaces) zu allen beteiligten Menschen in und um das Fahrzeug (Fahrer, Fahrgäste, andere Verkehrsteilnehmer).

Wirtschaftliche Schnittstellen bestehen zwischen verschiedenen Produzenten oder Betreibern von Komponenten, welche in ein und demselben Straßenbahnsystem eingesetzt werden. Eine gut etablierte wirtschaftliche Schnittstelle erlaubt die freie Kombination der Komponenten, die beiderseits der Schnittstelle von verschiedenen Herstellern angeboten werden, zu unterschiedlichen Gesamtsystemen, und deren Einsatz durch die verschiedenen Betreiber. Dies setzt eine normierte Gestaltung der entsprechenden technischen Schnittstellen voraus, während für die vielen anderen technischen Schnittstellen, die nicht mit wirtschaftlichen Schnittstellen koinzidieren, der Normierungsbedarf geringer ist. Aus dem Alltag sind viele Beispiele wirtschaftlicher Schnittstellen in funktionierenden Gesamtsystemen bekannt: die Schnittstelle zwischen den Mobilfunkanbietern und den Herstellern von Mobilfunkgeräten; die Schnittstelle zwischen den Herstellern von Computern, Betriebssystemen und Anwendungsprogrammen; die Schnittstelle zwischen Herstellern und Betreibern von Straßenbahninfrastrukturen (Gleise etc.) und den Herstellern und Betreibern von Straßenbahnfahrzeugen.

Wenn wirtschaftliche Schnittstellen etabliert sind, setzen sie für die Akteure wichtige Orientierungen, aber auch Grenzen. Dies hat Vor- und Nachteile. Die wichtigsten Vorteile der Schaffung etablierter wirtschaftlicher Schnittstellen können – abstrakt gesehen – wie folgt genannt werden:

- Verschiedene Komponenten können zu unterschiedlichen Gesamtsystemen kombiniert werden.
- Preis- und Innovationswettbewerb können schon auf der Ebene der einzelnen Komponenten aktiv werden und nicht nur auf der Ebene des Gesamtsystems. Dies impliziert oft eine erhöhte Wettbewerbsintensität, Innovation und Produktvielfalt auf der Ebene der einzelnen Komponenten.

- Auf der Ebene einzelner Komponenten können von den Herstellern oder Betreibern aber auch Skalenerträge realisiert werden, ohne dass dies gleich zu einer Marktkonzentration für das Gesamtsystem führt.

Die wichtigsten Vorteile integrierter Wirtschaftsstrukturen, also ohne etablierte wirtschaftliche Schnittstellen, sind:

- Etablierte wirtschaftliche Schnittstellen sind statisch und können sich nur langsam weiterentwickeln. Sie können daher noch lange nach ihrer technischen Veraltung fortwirken und die Entwicklung hemmen.
- Die Passung von Komponenten kann in sorgfältig gestalteten Gesamtsystemen eines Herstellers manchmal besser gestaltet werden, als mit einer allgemein etablierten Schnittstelle möglich ist.
- Hersteller und Betreiber integrierter Systeme können über die Ebenen hinweg Synergien bei der Innovation und Entwicklung realisieren (economies of scope), die bei fix vorgegebenen Schnittstellen möglicherweise nicht mehr gehoben werden können.

In verschiedener Sektoren der Wirtschaft trifft man verschiedene Lösungen an. Bei Desktop-PCs sind Hardware- und Softwarekomponenten verschiedener Hersteller zu einem Gesamtsystem variabel verknüpfbar. Bei Laptops und Handys werden hingegen kompakte Produkte angeboten, die von einem einzigen Hersteller selbst hergestellt oder als Systemintegrator auf strikter Zulieferbasis zusammengestellt werden. Ähnlich ist es auch in der Pkw-Branche (Systemintegratoren „OEMs“). Die Existenz einer wirtschaftlichen Schnittstelle schließt nicht aus, dass einzelne Unternehmen auch mehrere Komponenten herstellen und als integrierte Lösungen am Markt anbieten.

Während für zukünftige (teil-)automatisierte Straßenbahnsysteme die relevanten *technischen* Schnittstellen schon heute identifiziert werden können (siehe beispielsweise Kapitel 3.2.6.4), ist dies für *wirtschaftliche* Schnittstellen nicht ohne weiteres möglich. Die Etablierung wirtschaftlicher Schnittstellen hängt von den Entscheidungen der relevanten Akteure (einschließlich regulatorischer Instanzen) ab. Diese Entscheidungen ergeben sich im Zusammenspiel der Akteure; sie können sich evolutionär ergeben oder auch von einzelnen Akteuren dominant gesteuert werden. Dabei sind die wichtigsten Akteure und ihre Hauptrollen historisch oder aus anderen Sachzwängen vorgegeben, so insbesondere die Rollenverteilung zwischen den Anwendern (Verkehrsunternehmen und Kommunalverwaltungen) auf der einen und der Industrie auf der anderen Seite. Gewisse Rekonfigurationen der Akteursstruktur im Zusammenhang mit der Vernetzung/Automatisierung sind zwar insbesondere im industriellen Bereich denkbar, doch werden die grundsätzlichen Rollen bestehen bleiben.

Dieser Bericht befasst sich unter anderem mit der Gestaltung wirtschaftlicher Schnittstellen und dem Umgang mit ihnen. Ein wesentlicher Aspekt besteht dabei in der Normierung der technischen Schnittstellen bei den neuen Technologien, welche den anvisierten oder vorhandenen wirtschaftlichen Schnittstellen zugrunde liegen. Diese technischen Normierungen werden daher genauer betrachtet.

6.2 Fahrerloses Fahren: Verortung der Hauptkomponente für die Fahrzeugfeinsteuerung

Für das fahrerlose Fahren ist zu klären, wo die Hauptkomponente der Fahrzeugfeinsteuerung verortet werden soll. Mit „Fahrzeugfeinsteuerung“ ist die situative Reaktion auf verkehrliche Ereignisse in unmittelbarer Nähe des Fahrzeugs gemeint, z. B. Bewegung eines anderen Fahrzeugs auf einer Kreuzung; ein

Fußgänger, der die Straße mit den Gleisen überquert; Personen, die sich unregelmäßig in einer Fußgängerzone bewegen, in der auch die Straßenbahn operiert. Diese Situationen zu kontrollieren ist bisher die Hauptaufgabe des Fahrzeugführers.⁷

Die Herausforderungen der Fahrzeugfeinsteuerung hängen stark von den verkehrlichen Situationen ab, in denen eine Straßenbahn betrieben wird. Im Folgenden soll illustrativ zwischen drei Klassen von Verkehrssituationen unterschieden werden:⁸

- Einfache Verkehrssituationen:
Keine oder nur sehr wenige (und dann stark kontrollierbare) Interaktionen mit anderen Verkehrsträgern oder Personen. Beispiele: Unabhängige Bahnkörper, besondere Bahnkörper mit sehr wenigen Kreuzungspunkten mit dem normalen Verkehr, Betriebshöfe.
- Komplexe Verkehrssituationen:
Bewegung auf öffentlichen Straßen mit einem überschaubaren Verkehrsgeschehen. Insgesamt wenig Verkehr, und die Fußgänger und Softmodes⁹ sind von den Gleisen meistens separiert und queren diese nur an wenigen und gut geregelten Punkten (besondere oder straßenbündige Bahnkörper mit wenigen Interaktionen mit dem normalen Verkehr).
- Hochkomplexe Verkehrssituationen:
Hochfrequente und unübersichtliche Verkehrssituationen wie verkehrsreiche Kreuzungen oder belebte Fußgängerzonen (straßenbündige Bahnkörper).

Automatische Systeme der Fahrzeugfeinsteuerung verbinden in der Regel sowohl infrastrukturseitige Komponenten als auch fahrzeugseitige Komponenten (wie Sensoren und Rechner), doch wird es eine regelnde Hauptkomponente geben, die entweder in der Infrastruktur oder im Fahrzeug selbst verortet ist. Beispiele für eine Fahrzeugfeinsteuerung mit infrastrukturseitigem Schwerpunkt sind die sog. CBTC-Systeme (Communication Based Train Control) oder „ATO over ETCS“-Systeme, die für einfache Verkehrssituationen wie den U-Bahnbetrieb bereits heute verfügbar sind und eingesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2.2). Die fahrzeugseitige Fahrzeugfeinsteuerung entspricht am meisten der allgemeinen Vorstellung von „automatisierten Fahrzeugen“.

Hochkomplexe Verkehrssituationen erfordern eine umfassende Umgebungserkennung mit Intentionsschätzung hinsichtlich des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer und eine schnelle und adäquate Reaktion auf viele verschiedene Ereignisse, insb. bei Unvorhersehbarkeiten oder Störfällen (siehe Kapitel 3.1.1 sowie 3.1.2). Ob dies auf dem Wege der Teleoperation von einem Menschen in der Betriebszentrale geleistet werden kann, ist schon fraglich. Für das automatisierte Fahren in hochkomplexen Verkehrssituationen kann jedoch die Hauptkomponente der Fahrzeugfeinsteuerung nicht in der Infrastruktur liegen, sondern ist im Fahrzeug zu verorten, wie nun dargelegt wird.

⁷ Allgemein beginnt die Steuerung eines Straßenbahnfahrzeugs mit der Erstellung des Fahrplans. Sodann kann ein Fahrzeug in einer vernetzten Welt aktuelle steuerungsrelevante Informationen bekommen (Störfallmanagement; zum Beispiel Informationen über den Ausfall einer Weiche oder die Sperrung einer Strecke aufgrund eines Unfalls). Am Ende ist die Fahrzeugfeinsteuerung notwendig, die auf der Wahrnehmung des unmittelbaren Umfeldes beruht. In der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges entspricht die Fahrzeugfeinsteuerung weitgehend der Ebene der Fahrzeugführung, teilweise auch der Fahrzeugstabilisierung; siehe [129]

⁸ Eine exakte Differenzierung von Verkehrssituationen unterschiedlicher Komplexitätsgrade, die auch für Zulassungs- und Zertifizierungen automatisierter Systeme tragfähig ist, muss von den hierfür zuständigen Gremien erarbeitet werden.

⁹ Softmodes: Fahrräder, E-Bikes, Scooter u.ä.

In hochkomplexen Verkehrssituationen müssen viele Sensordaten in Echtzeit sinnvoll verarbeitet, also fusioniert und vor allem interpretiert und in Steuerungsbefehle umgesetzt werden. Dies setzt höchste Anforderungen an die technischen Komponenten und Schnittstellen: große Datenmengen, hohe Datenraten, geringe Latenz und hohe Verlässlichkeit der Übertragung sind gefordert. Die wichtigsten Informationen über hochkomplexe Verkehrssituationen beziehen sich auf die unmittelbare Umgebung und die Dynamik des Fahrzeugs und werden daher von den fahrzeugseitigen Sensoren bereitgestellt. Da zudem auch die Steuerungsgeräte (Aktoren der Lenkung und Beschleunigung) im Fahrzeug verortet sind, muss auch die intelligente Datenverarbeitung im Fahrzeug verortet sein, so dass Übertragungswege kurz sind und Kabelverbindungen genutzt werden können.¹⁰

Im Folgenden wird die intelligente Datenverarbeitung im Fahrzeug illustrativ als „Bordcomputer“ bezeichnet, womit jedoch die ganze Architektur aus Software- und Hardwarekomponenten der Fahrzeugfeinsteuerung gemeint ist (siehe Abbildung 6-1). In einem automatisierten Fahrzeug wird sie vermutlich aus mehreren verteilten Rechnern bestehen und auch Datenvorverarbeitungen direkt bei den Sensoren umfassen.

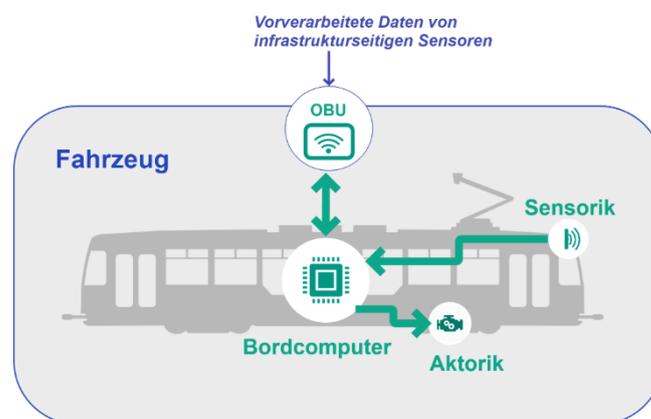


Abbildung 6-1: Verortung der Kernfunktionen der Automatisierung im Fahrzeug

Hinsichtlich der Marktstruktur für zukünftige Systeme des automatisierten Fahrens auch für hochkomplexe Verkehrssituationen ist davon auszugehen, dass einige Unternehmen kompakte Systeme der Fahrzeugfeinsteuerung entwickeln, die die gesamte Bordcomputer-Architektur einschließlich der fahrzeugseitigen Sensoren aus einem Guss umfassen. Die beschriebenen hohen Anforderungen an die Datenverarbeitung und die Tatsache, dass sich die Steuerungssysteme noch längere Zeit in der Weiterentwicklung befinden werden, sprechen dafür, dass sich bis auf Weiteres keine etablierten wirtschaftlichen Schnittstellen zwischen denjenigen Komponenten herausbilden, die innerhalb des Fahrzeugs der automatisierten Fahrzeugfeinsteuerung dienen. Ein Verkehrsunternehmen oder ein Fahrzeughersteller wird daher zum Beispiel nicht damit rechnen können, Steuerungssysteme von einem Hersteller mit fahrzeugseitigen Sensoren anderer Hersteller beliebig kombinieren zu können.¹¹

¹⁰ Funkverbindungen sind meistens etwas langsamer und auch störanfälliger. Zudem sprechen auch Gründe der Datensicherheit gegen die Nutzung von Funkverbindungen für die massenhafte Übertragung von Sensordaten.

¹¹ Hingegen werden einige Anbieter von Steuerungssystemen durchaus auch Geräte anderer Hersteller in ihren Systemen fest kombinieren.

Eine zukünftige Fahrzeugfeinststeuerung wird ergänzend auch durch externe, infrastrukturseitige Sensordaten und Steuerungsleistungen unterstützt werden (automatisiertes und *vernetztes* Fahren). Diese infrastrukturseitige Unterstützung sollte jedoch durch technisch standardisierte und wirtschaftliche Schnittstellen von dem kompakten fahrzeugseitigen Steuerungssystem abgetrennt werden.

Für weniger anspruchsvolle Verkehrssituationen ist eine Steuerung von Seiten der Infrastruktur aus denkbar und teilweise schon Realität. Gerade ältere Straßenbahnfahrzeuge, die nur zu hohen Kosten mit den nötigen Steuerungskomponenten ausgerüstet werden können, können auf diese Weise an einigen Funktionen des (teil-)automatisierten Betriebs teilhaben. Tabelle 6-1 fasst die Möglichkeiten der fahrerlosen Fahrzeugfeinststeuerung in den verschiedenen Verkehrssituationen, aktuell und in Zukunft, zusammen. Die Begriffe „infrastrukturseitige Steuerung“ bzw. „fahrzeugseitig Steuerung“ beziehen sich auf die Verortung der Hauptkomponente der sicherheitsrelevanten Fahrzeugfeinststeuerung.

TABELLE 6-1: MÖGLICHKEITEN DER FAHRERLOSEN FAHRZEUGFEINSTEUERUNG IN VERSCHIEDENEN VERKEHRSSITUATIONEN, AKTUELL UND IN ZUKUNFT.

Verkehrssituation	Infrastrukturseitige Steuerung	Fahrzeugseitige Steuerung	Teleoperation
Einfach	Aktuell im Einsatz in baulich abgetrennten Bereichen des Bahnkörpers (CBTC, ATO over ETCS)	Aktuell technisch möglich, aber noch in der Entwicklung	Aktuell technisch möglich, aber noch in der Entwicklung
Komplex	Aktuell nur unterstützend möglich, weitere Funktions-übernahme ungewiss	Aktuell nur unterstützend möglich, weitere Funktions-übernahme technisch möglich	Übernahme technisch möglich, aber noch in der Entwicklung
Hochkomplex¹²	Aktuell nur unterstützend möglich, weitere Funktions-übernahme nicht möglich	Aktuell nur unterstützend möglich, weitere Funktions-übernahme langfristig möglich	Umsetzbarkeit ungewiss

Dass die Hauptkomponenten einer automatisierten Fahrzeugfeinststeuerung im Fahrzeug selbst verortet sein müssen (Bordcomputer-Architektur), gilt also nur für den Fall, dass auch hochkomplexe Verkehrssituationen fahrerlos bewerkstelligt werden sollen. Ob auch Teleoperation auf diesen Stand gebracht werden kann, ist im Moment noch nicht zu beurteilen. Begnügt man sich jedoch mit fahrerlosem Fahren in einfachen und moderat komplexen Verkehrssituationen, so kann zukünftig die Fahrzeugfeinststeuerung auch infrastrukturseitig oder per Teleoperation erfolgen.

¹² Durch Geschwindigkeitsreduktion und Warnsignalisierung der Straßenbahnfahrzeuge können hochkomplexe Situationen auf komplexe reduziert werden. Das wird der verkehrlichen Situation aber in den meisten Fällen gerade nicht gerecht. Eine solche Lösung mag in Einzelfällen trotzdem sinnvoll sein, wird aber an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

6.3 Branchenstruktur vernetzter und automatisierter Straßenbahnsysteme

Die beiden wichtigsten Akteursgruppen für die Technologieentwicklung von Straßenbahnsystemen sind die Anwender auf der einen Seite und die Industrie auf der anderen Seite (vgl. Abbildung 6-2).

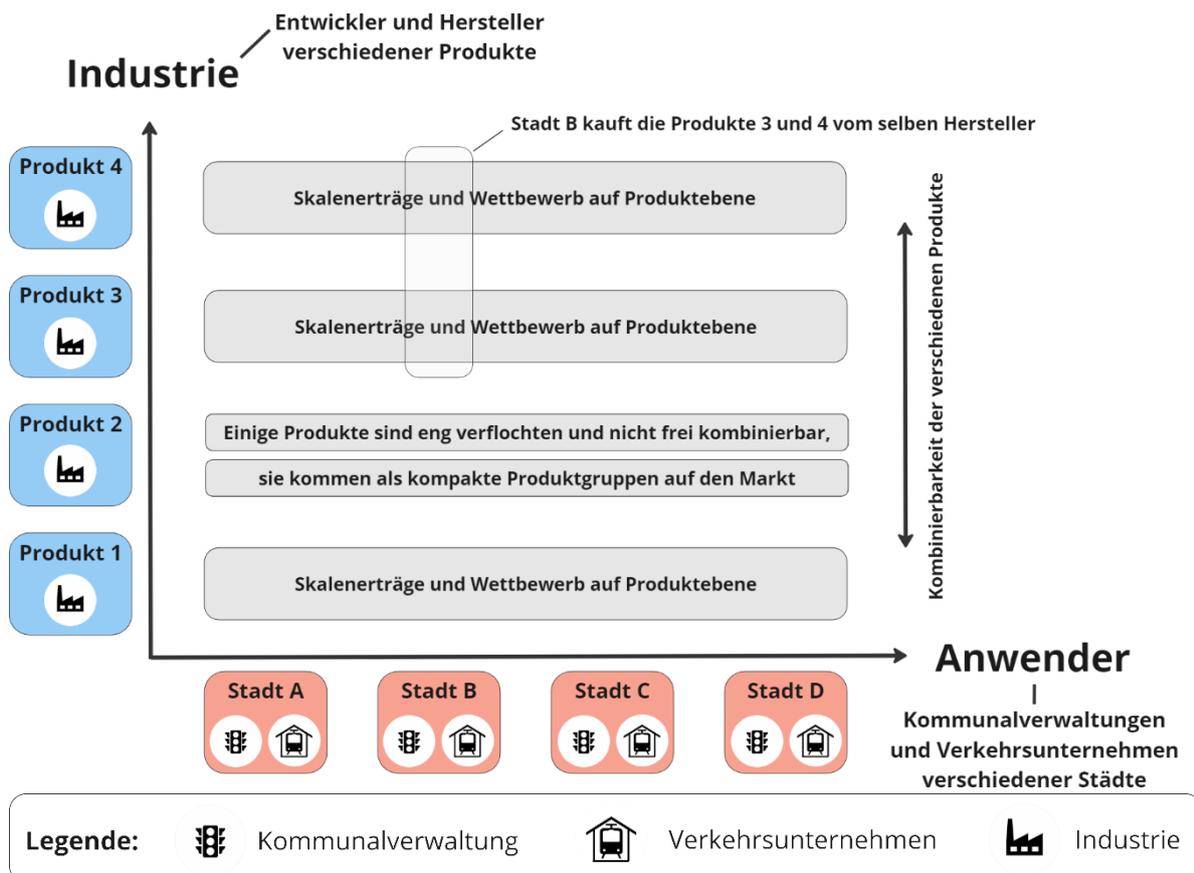


Abbildung 6-2: Abhängigkeiten zwischen Anwendern und Industrie

Die Gruppe der Anwender besteht aus den Verkehrsunternehmen, die Straßenbahnen betreiben, und den Kommunalverwaltungen (hier im breiten Sinne verstanden, inkl. Gemeinderat / Stadtregierung, Finanzverwaltung, Verwaltung für Wirtschaft und Verkehr, Bauverwaltung mit Tiefbauamt). In Abbildung 6-2 steht jede Box entlang der horizontalen Achse für eine andere Stadt oder Kommune. Auf der jeweiligen kommunalen Ebene sind das Verkehrsunternehmen und die Kommunalverwaltung in der Regel miteinander verbunden (was allerdings nicht ausschließt, dass es zwischen ihnen zu Reibungsverlusten kommen kann). Der Betrieb der Infrastruktur wird meistens vom Verkehrsunternehmen übernommen, doch gibt es Ausnahmen (zum Beispiel Hannover) und insbesondere entscheidet die Kommunalverwaltung über größere Änderungen an der Infrastruktur, da sie diese finanzieren muss.

Die Industrie besteht aus den Entwicklern und Herstellern der verschiedenen Komponenten des Straßenbahnsystems. In Abbildung 6-2 steht jede Box entlang der vertikalen Achse für eine Kategorie von Produktherstellern und -entwicklern; zum Beispiel: Fahrzeughersteller, Hersteller von Infrastrukturelementen, Hersteller von Sensoren und Steuerungstechnologie, Hersteller und Betreiber von Kommunikations-

technologien usw. Auch auf Seiten der Industrie kann es integrierte Varianten geben, also zum Beispiel Hersteller von sowohl Fahrzeugen als auch Infrastrukturelementen (in der Abbildung das Beispiel der Produkte 3 und 4, die von Stadt B gekauft werden). In der Regel sind die Produkte (auch 3 und 4) jedoch frei kombinierbar. Abweichend davon zeigt die Abbildung mit Produkt 2 eine Produktgruppe, die aus fest verknüpften Komponenten besteht, so wie dies oben für die Bordrechner-Architektur beschrieben wurde.

Es gibt jedoch keine Integration zwischen den Anwendern und der Industrie. Die Trennung zwischen diesen beiden Akteursgruppen ist grundlegend und sinnvoll. Während die Industrie vielen verschiedenen unabhängigen Anwendern (nämlich in den verschiedenen Kommunen) gegenübersteht, müssen auch die Anwender bei wesentlichen Komponenten des Straßenbahnsystems unabhängige und wettbewerbliche Anbieter vorfinden können. Die Branchenstruktur der Industrie sollte daher einige wirtschaftliche Schnittstellen aufweisen, so dass in vertikaler Hinsicht eine Angebotsvielfalt entsteht; zugleich sollte in jedem Teilsegment in horizontaler Hinsicht Konkurrenz herrschen. Kommunen würden von einer Vernetzung und Automatisierung Abstand nehmen, wenn diese zwangsläufig mit einer dauerhaften Bindung an nur einen einzigen Anbieter für große Investitions- und Re-Investitionsvolumina einhergehen würde.

Auch auf Seiten der Industrie wollen sich viele Unternehmen auf ein Kerngeschäft konzentrieren und dort Skalenerträge realisieren und ihre Entwicklungskosten amortisieren können. Das geht nur, wenn die entsprechenden wirtschaftlichen Schnittstellen etabliert sind und die angrenzenden Marktsegmente ebenfalls von Unternehmen besetzt sind, die dort spezialisierte Komponenten anbieten.

Daher sollte es zwischen den Herstellern der wesentlichen Produktgruppen wirtschaftliche Schnittstellen geben, so dass die Anwender bei umfangreicheren Neubeschaffungen mindestens die folgenden Komponenten unterschiedlicher Hersteller frei miteinander kombinieren können:

- Fahrzeuge
- Fahrerassistenzsysteme oder Systeme der Fahrzeugsteuerung für automatisiertes Fahren (kompakte Systeme aus Bordcomputer und fahrzeugseitiger Sensorik)
- Infrastrukturseitige Sensorik
- Lichtsignalanlagen
- Vernetzungs- und Kommunikationssysteme

Beispielsweise sollte ein Verkehrsunternehmen bei der Bestellung einer größeren Anzahl neuer Fahrzeuge mit dem Fahrzeughersteller vereinbaren können, dass das Fahrzeugfeinsteuerungssystem eines bestimmten (anderen) Herstellers, samt der dafür vorgesehenen Sensoren an den dafür vorgesehenen Stellen eingebaut wird. Da es sich um eine umfangreiche Neubestellung handelt, erscheint dies technisch unproblematisch. Die wirtschaftliche Schnittstelle zu den Fahrzeugherstellern funktioniert also.

In Hinblick auf das fahrerlose Fahren ist es als vorteilhaft einzuschätzen, dass die Systeme der Fahrzeugfeinsteuerung, die auch hochkomplexe Verkehrssituationen meistern können, im Fahrzeug selbst verortet sein müssen. Das erlaubt, ihre technischen Schnittstellen zur Außenwelt zu standardisieren und als freie wirtschaftliche Schnittstellen zu gestalten. Allerdings ist dafür zu sorgen, dass diese Standardisierung auch wirklich erfolgt. So weisen [110] darauf hin: „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 entgegen gewirkt werden.“

Noch größer ist die Herausforderung bei Systemen der Fahrzeugfeinsteuerung mit infrastrukturseitigem Schwerpunkt. Wenn in einer Kommune ein proprietäres CBTC-System eingesetzt wird, bei dem sowohl infrastruktur- als auch fahrzeugseitige Elemente vom Systemanbieter ausgewählt werden, sind die An-

wender auf lange Zeit an diesen einen Systemanbieter gebunden. Wenn es hierbei nur um einzelne Verkehrslinien geht, ist dies unproblematisch, aber großflächig oder gar bundesweit ist eine solche Konstellation nicht zu empfehlen.

Grundsätzlich gilt daher: Alle infrastruktureitigen Komponenten vernetzter und automatisierter Straßenbahnsysteme sollten kompatibel mit allen fahrzeugseitigen Komponenten sein (wirtschaftliche Schnittstellen). Denn das Verbauen infrastruktureitiger Komponenten ist langwierig und teuer. Eine Kommune, die Fahrzeuge mit Vernetzungs- oder Automatisierungssystemen von unterschiedlichen Herstellern betreibt, kann deshalb nicht die infrastruktureitigen Komponenten des Straßenbahnsystems verdoppeln oder austauschen.

Auch Vernetzungs- und Kommunikationssysteme sollten so gestaltet werden, dass Subsysteme gewechselt und unterschiedlich kombiniert werden können. Ein Subsystemwechsel kann allerdings auch hier nur sukzessive geschehen, so dass in der Phase eines Wechsels eine (begrenzte und überschaubare) Durchmischung verschiedener Subsysteme möglich sein muss. Denn auch Straßenbahnfahrzeuge sind sehr langlebig und teuer, und auch Umrüstungen sind teuer, da Vernetzungs- und Kommunikationssysteme aus einer großen Zahl von Komponenten bestehen. Ein Systemwechsel kann daher nur sukzessive geschehen, vorzugsweise im Rahmen von Neubeschaffungen oder ohnehin anstehenden Grundüberholungen.

7 Herausforderungen und Lösungswege für die einzelnen Querschnittstechnologien

7.1 Vorbemerkungen zu Hemmnissen und Akteuren

In diesem Kapitel werden Herausforderungen und Hemmnisse für einen breiteren Einsatz vernetzter und automatisierter Straßenbahnsysteme diskutiert. Herausforderungen und Hemmnisse können unterschiedlicher Art sein:

- Bedarf für Technologieentwicklungen
- Finanzierungsbedarf
- Normierungsbedarf
- Zulassungsbedarf

Die Etablierung der angestrebten wirtschaftlichen Schnittstellen und Branchenstruktur, die im vorigen Abschnitt skizziert wurden, kann sich aus verschiedenen Gründen verzögern. Wenn die Technologie noch in Entwicklung befindlich ist, können wichtige technische Schnittstellen noch nicht normiert werden. Dann können sich auch darauf beruhende wirtschaftliche Schnittstellen nicht etablieren. Damit fehlen aber Rahmenbedingungen für notwendige Investitionen. Unternehmen, welche die benötigten Produkte herstellen, treten nicht am Markt auf. Dies gilt erst recht, wenn Zulassungen und Zertifizierungen für neuartige Produkte nicht vorliegen oder gar die Zulassungskriterien unklar und die Zulassungsprozesse inadäquat sind.

Um diese Hemmnisse im aktuellen, frühen Entwicklungsstadium zu überwinden, können und sollen integrierte Lösungen angeboten werden, die noch nicht die wirtschaftlichen Schnittstellen aufweisen müssen (und können), die langfristig am Markt erwünscht sind. Allerdings droht die Entwicklung dann in In-sellösungen und unerwünschte Marktkonstellationen hineinzulaufen. Sollten vernetzte und automatisierte Straßenbahnsysteme in einer Weise auf den Markt treten, dass sie nur zum Preis der Aufgabe wesentlicher wirtschaftlicher Schnittstellen realisierbar erscheinen, dann wird dies ihre Verbreitung behindern. Denn die Anwender werden sich nicht auf Dauer und in beträchtlichem Umfang von einzelnen Unternehmen abhängig machen wollen. Um dies zu verhindern, sollten solche frühen integrierten Lösungen später ggf. umgestaltet werden und normierte Standards, die sich dann entwickelt haben, einhalten. Alternativ können die bei den Pionierunternehmen entwickelten technischen Schnittstellen offengelegt und zum Standard verallgemeinert werden. Am besten bringen sich die Pionierunternehmen in die Normungsgremien aktiv mit ein.

Die Herausforderungen und Hemmnisse, Akteure und Lösungswege werden im Folgenden in Hinblick auf die wesentlichen Komponenten vernetzter und automatisierter Straßenbahnsysteme diskutiert. Dabei werden zunächst die Vernetzungstechnologien, die systembedingt stark miteinander zusammenhängen, und sodann die Fahrzeugsteuerungstechnologien (assistiertes und automatisiertes Fahren) betrachtet, wobei klar ist, dass auch letztere mit einer Vernetzung einhergehen werden. In Anknüpfung an die frühere Abbildung 6-2 gibt die Abbildung 7-1 einen vollständigeren Überblick über die verschiedenen Akteursgruppen, die zu betrachten sind.

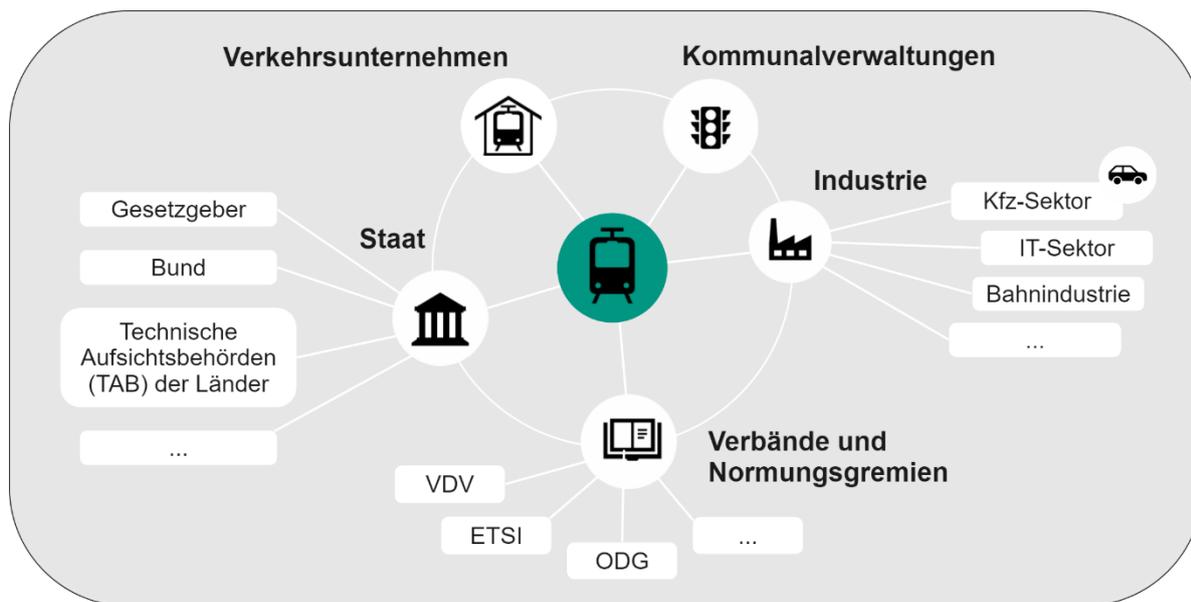


Abbildung 7-1: Die relevanten Akteursgruppen

7.2 Vernetzungstechnologien

7.2.1 Einleitung

Konzepte und Entwicklungen für die Vernetzung des gesamten Verkehrssektors entwickeln sich sehr dynamisch und werden in naher Zukunft Realität werden. Sie werden unter den Begriffen V2X-Kommunikation oder C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) gefasst. Grundlegende Entwicklungen werden vom oder für den Pkw-Sektor vorgenommen. Es ist jedoch wichtig, dass auch der öffentliche Verkehr frühzeitig daran teilnimmt.

In diesem Kapitel werden das benötigte Kommunikationssystem und die möglichen Anwendungen der V2X-Kommunikation diskutiert, die für den Straßenbahnsektor besondere Bedeutung haben. Die Abschnitte zu den einzelnen Technologien sind einheitlich gegliedert: Zunächst werden die Technologien kurz beschrieben. Dann werden die „Herausforderungen und Hemmnisse“ ihrer weiteren Entwicklung und Verbreitung genannt. Im Anschluss wird unter „Akteure und Lösungswege“ beschrieben, wie eine Lösung aussehen könnte und wer sie voranbringen sollte.

Die einzelnen Kommunen werden entscheiden, welche dieser Anwendungen sie vorrangig entwickeln wollen, und dementsprechend auch unterschiedliche Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des zugrundeliegenden Kommunikationssystems stellen.

7.2.2 Kommunikationssystem

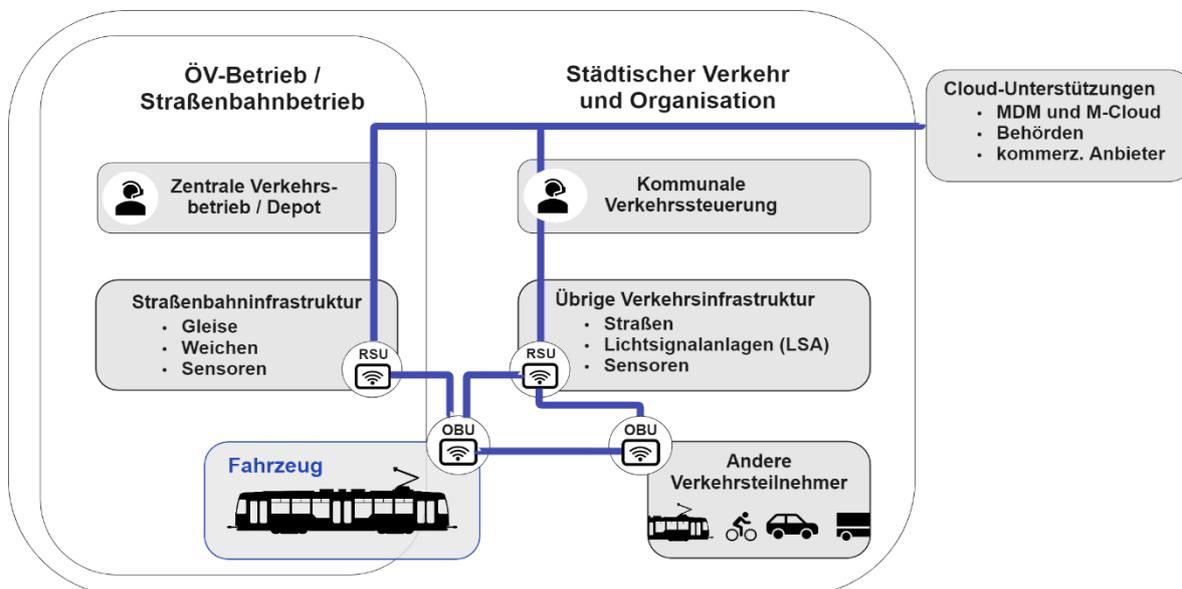


Abbildung 7-2: Kommunikationssystem mit relevanten Akteuren - Systemillustration

Grundlage des vernetzten und auch des automatisierten Fahrens von Straßenbahnen ist ein leistungsfähiges Kommunikationssystem. Abbildung 7-2 illustriert die wichtigsten Einheiten, die miteinander kommunizieren sollen:¹³

- die Straßenbahnfahrzeuge,
- die Elemente der Straßenbahninfrastruktur (Weichen, Sensoren) und der allgemeinen Verkehrsinfrastruktur (Lichtsignalanlagen, Sensoren),
- die Zentralen des Verkehrsbetriebs (Depot) und des kommunalen Verkehrsmanagements,
- die Verkehrsdatenbanken in der Cloud,
- andere Verkehrsteilnehmer.

Die wichtigsten Bestandteile des Kommunikationssystems sind:¹⁴

- Kommunikationsinfrastruktur: Onboard Units (OBU) in den Fahrzeugen und Roadside Units (RSU) an der Straßenbahninfrastruktur und die allgemeine Verkehrsinfrastruktur¹⁵, zudem Glasfaser für die Kommunikation zwischen festen Objekten an der Straßenbahn- oder Verkehrsinfrastruktur und in den Zentralen.

¹³ In diesem Abschnitt geht es vorrangig um die Kommunikation zwischen Komponenten des technischen Gesamtsystems, wie zum Beispiel dem Fahrzeug und einem Computer in der Zentrale. Mit inbegriffen ist auch die Kommunikation zwischen einem Fahrzeugführer und einer Person in der Zentrale, weil diese Personen sicherlich dieselben Kommunikationssysteme nutzen werden. Hingegen ist die Interaktion des Fahrzeugführers mit dem Fahrzeug selbst nicht inbegriffen; dies ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle. Auch die Kommunikation zwischen Komponenten der Fahrzeugfeinsteuerung, die innerhalb des Fahrzeugs verbaut sind, ist nicht inbegriffen; siehe hierzu Abschnitt 6.2.

¹⁴ Siehe dazu ausführlich Kapitel 2.3.

¹⁵ An dieser Stelle muss zwischen drei verschiedenen Infrastrukturen unterschieden werden: der Straßenbahn- und der allgemeinen Verkehrsinfrastruktur einerseits und der Kommunikationsinfrastruktur andererseits.

- Funktechnologie: Diese umfasst den Funkstandard und die Frequenzbänder. Moderne Funktechnologien basieren auf WLAN (z. B. IST-G5) oder Mobilfunk (LTE-V2X oder NR-V2X).
- Datenaustauschformate: „Sprache“, in der die Geräte und die Anwendungsprogramme miteinander kommunizieren, z. B. CAM, SPAT und OCIT.

7.2.2.1 Herausforderungen und Hemmnisse

Die Kommunikationsschnittstellen zwischen Fahrzeugen, Infrastrukturelementen und Betriebszentrale(n) koinzidieren mit wichtigen wirtschaftlichen Schnittstellen und sollten daher standardisiert werden, um eine Marktentwicklung zu ermöglichen.

Zugleich muss das Kommunikationssystem leistungsfähig und sicher sein. Somit gibt es grundsätzlich ein Spannungsverhältnis zwischen Modernität und Standardisierung des Kommunikationssystems. Straßenbahnen haben eine lange Lebensdauer, und ein Austausch des Kommunikationssystems ist teuer, da viele Komponenten betroffen sind. Eine bundesweite Vereinheitlichung der Kommunikationssysteme aller Städte wird daher lange brauchen. Neu eingeführte Kommunikationssysteme müssen eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufweisen und nach ihrer Einführung eine Weiterentwicklung unter Wahrung von Rückwärtskompatibilität ermöglichen. Stark veraltete Standards müssen hingegen ohne Rückwärtskompatibilität überwunden werden. Die konkreten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit in einer Kommune hängen von dem angestrebten Vernetzungs- oder Automatisierungsgrad ab. Wenn z. B. Teleoperation in verkehrsreichen Situationen angestrebt wird, muss das Kommunikationssystem eine entsprechende Bandbreite ermöglichen, latenzarm und zuverlässig sein.

Wie im Kapitel 2.3.3 am Beispiel des Projekts VERONIKA beschrieben wurde, bietet die schrittweise Umstellung vom aktuellen Bake-Funk-System (Analogfunk) hin zu zukunftsfähigen V2X-Technologien große Potenziale. Auch werden die vom Analogfunk genutzten Frequenzen für diesen vermutlich auf längere Sicht nicht mehr zur Verfügung stehen. Daher ist die Etablierung von V2X-Kommunikation entweder auf einem fortgeschrittenen WLAN-Standard (ITS-G5, basierend auf IEEE 802.11p) oder auf einem 5G-Mobilfunkstandard (NR-V2X Sidelink) erstrebenswert und sollte sukzessive umgesetzt werden.

Ein Hemmnis bei der Etablierung von V2X stellt allerdings die fehlende Festlegung auf eine dieser beiden Kommunikationstechnologien dar. Derzeit ist unklar, ob in Zukunft via WLAN oder Mobilfunk kommuniziert wird. Auch unter den Pkw-Herstellern herrscht Uneinigkeit, wobei die Unsicherheit durch die ausbleibende Entscheidung des Delegated Act der europäischen Kommission von 08/2019 verstärkt wurde [127]. In [110] wird davon ausgegangen, dass „das Marktgeschehen die entsprechenden Technologien treiben und vermutlich auch final bestimmen wird“. Der Straßenbahnsektor kann und sollte sich in die aktuelle Diskussion einbringen, es ist jedoch davon auszugehen, dass andere, größere Player die Entwicklung bestimmen werden.

Drei Aspekte von Kommunikationssystemen seien angesprochen, bei denen (abgesehen von den anfallenden Kosten) *keine* grundlegenden Hemmnisse bestehen, da ausreichende Lösungsmöglichkeiten bereits bestehen oder aktuell erarbeitet werden:

- **Eigene Funknetze:** Bisher bevorzugen viele Verkehrsunternehmen ein eigenes Netz, welches von den Mobilfunkbetreibern unabhängig ist. Doch kann sich dies ändern, wenn mit den Mobilfunkbetreibern gute Erfahrungen gemacht werden. Die großen Mobilfunkunternehmen bieten auch an, unabhängige 5G-Netze für Anwender (sog. Campusnetze) zu errichten und zu betreiben.
- **Datenaustauschformate:** Wichtig ist, dass die Datenaustauschformate an den Schnittstellen zwischen Fahrzeug, Infrastrukturkomponenten und Zentralen vereinheitlicht werden. Die aktuellen Datenaustauschformate sind von der gewählten Kommunikationstechnologie unabhängig. Sie

sollten verschiedenen Ansprüchen gerecht werden können und zugleich Anforderungen zur Daten- und Systemsicherheit (Security) erfüllen. Hier gibt es schon viele Vereinheitlichungen und zuständige Gremien, die gleich unter „Akteure und Lösungswege“ genannt werden.

- **Kommunikationsinfrastruktur:** Die Glasfaserinfrastruktur zur An- und Verbindung der infrastrukturseitigen Sensor- und Funkelemente sowie zu den Zentralen ist den jeweiligen Anforderungen entsprechend ggf. auszubauen. Glasfaser ist schnell, sicher und seine Nutzung spart knappe Funkfrequenzen. Für Elemente der Kommunikationsinfrastruktur wie OBU und RSU sind Mindeststandards der Leistung (Latenz, Durchsatz) zu setzen. OBU und RSU, die mehrere Kommunikationstechnologien nutzen können, werden zeitnah am Markt erhältlich sein.

Für die Entwicklung des automatisierten Fahrens in hochkomplexen Verkehrssituationen wurde festgehalten (Abschnitt 6.2), dass die Hauptkomponenten der Fahrzeugfeinsteuerung im Fahrzeug selbst als kompaktes System aus Rechnern (Bordcomputer) und fahrzeugseitigen Sensoren von einzelnen Herstellern oder Systemintegratoren angeboten werden. Umso wichtiger ist die Standardisierung der Schnittstellen dieses kompakten Systems zur Außenwelt. Dies beginnt bereits mit der Schnittstelle zwischen Bordcomputer und OBU im Fahrzeug, betrifft aber insbesondere die Schnittstellen zur Infrastruktur und zur Betriebszentrale. Diese technischen Schnittstellen sind zu normieren, damit sie sich als wirtschaftliche Schnittstellen etablieren können. Es sollte möglich sein, dass unter Umständen Fahrzeugfeinsteuerungssysteme unterschiedlicher Hersteller auf ein und demselben Straßennetz parallel eingesetzt werden können (siehe Abschnitt 6.3).

Eine Konsequenz ist, dass für infrastrukturseitige Sensoren sowohl Mindeststandards für deren Leistung (z. B. Geschwindigkeit der Signalvorverarbeitung) als auch Höchstgrenzen für die von ihnen übermittelten Datenmengen zu setzen sind, welche sich an den Leistungsdaten der Kommunikationstechnologien und den Erfordernissen der Echtzeitsteuerung orientieren. Sensordaten, die der Fahrerassistenz dienen oder eine automatisierte Fahrzeugfeinsteuerung unterstützen sollen (zum Beispiel eine infrastrukturseitige Einsicht in einen Kreuzungsbereich), müssen das Fahrzeug sehr schnell erreichen und dürfen daher bei gegebener Auslegung der Kommunikationsinfrastruktur nicht zu hohe Datenmengen umfassen. Das bedeutet, dass solche Sensordaten zu einem gewissen Grad beim Sensor vorverarbeitet werden müssen, und hierfür sind technische Standards zu entwickeln, an denen sich in der langen Sicht alle Anbieter von Systemen der Fahrerassistenz oder der Fahrzeugfeinsteuerung zu orientieren haben, damit die etablierte wirtschaftliche Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Infrastruktur nicht durchbrochen wird. Hierbei handelt es sich allerdings um ein technologisches Entwicklungsthema, bei dem eine baldige Standardisierung noch nicht zu erwarten ist.

7.2.2.2 Akteure und Lösungswege

Es sollte ein zukunftsfähiger Lösungsraum für Kommunikationstechnologien und Datenaustauschformate formuliert werden (technische Standards oder Mindeststandards). Diese Vorgaben wurden und werden von den Normungsorganisationen European Telecommunications Standards Institute (ETSI – TC ITS), International Organization for Standardization (ISO - Technisches Komitee TC 204) und Comité Européen de Normalisation (CEN - Technisches Komitee TC 278) ausgearbeitet [128]. Bisher sind engagierte Kommunen in Pilotprojekten sowie die Automobilindustrie die Treiber bei der Einführung von V2X. Dabei wird oftmals vor allem die Vernetzung der Pkw berücksichtigt. Kooperative intelligente Verkehrssysteme bieten jedoch gerade für den ÖPNV, insbesondere Straßenbahnen, große Potenziale.

Auch wenn die verwendete V2X-Kommunikationstechnologie voraussichtlich an anderer Stelle entschieden wird, sollten sich sowohl die Kommunalverwaltungen als auch die Verkehrsbetriebe frühzeitig in weitere Normierungsprozesse einbringen. Dies kann in den oben genannten Gremien direkt geschehen, ist aber auch über Interessengruppen wie beispielsweise im Rahmen der C-ITS Deployment Group, einem

Verband von Stakeholdern aus Industrie und Behörden, der Plattform C-Roads oder dem Infrastrukturbetreiberverband Open Traffic Systems City Association (OCA) möglich. Dabei ist neben dem Engagement einzelner Akteure auch ein gemeinsames Auftreten beispielsweise durch den VDV denkbar, um den Interessen des Straßenbahnsektors mehr Gewicht zu verleihen.

Für die zügige Umsetzung von vernetzten Straßenbahnen ist die Einrichtung einer eigenen VDV-Arbeitsgruppe empfehlenswert, die sich ausschließlich mit der Automatisierung und Vernetzung des Straßenbahnsektors beschäftigt. Eine der ersten Tätigkeiten könnte die ständige Überprüfung der aktuellen V2X-Entwicklungen und deren Relevanz für den Straßenbahnsektor sein. So können gebündelt Interessen vertreten werden und unerwünschten Entwicklungen möglicherweise entgegengewirkt werden. Diese Arbeitsgruppe könnte zudem im ständigen Austausch mit einer entsprechenden Stelle beim Bundesverkehrsministerium, die möglicherweise auch erst noch geschaffen werden muss, stehen.

Bei der Eingrenzung der zukunftsfähigen Kommunikationsinfrastrukturen und -technologien (möglichst auf WLAN-Standard oder 5G-Mobilfunkstandard basierend) ist bereits jetzt Handlungsbedarf gegeben. Ein Branchenverband wie der VDV sollte hier bald erste Empfehlungen geben und auch auf die Bedeutung möglichst einheitlicher Lösungen hinweisen. Bei der konkreten Auswahl der Kommunikationstechnologie auf kommunaler Ebene sollten sich die Kommunalverwaltungen und die Verkehrsbetriebe eng abstimmen.

Gesetzliche Standardisierungen sollten jedoch vermieden, sondern diese (Teil-)Standardisierungen den Verbänden und Akteuren überlassen werden. Da die Verbreitung vernetzter und automatisierter Fahrfunktionen bei Straßenbahnen sicherlich von staatlicher Förderung abhängig sein wird, kann die Durchsetzung der von den Verbänden empfohlenen Standards auch auf diesem Wege erfolgen. Dies gilt allerdings nicht für die rechtlichen Anforderungen, welche es auf staatlicher Ebene klar zu definieren gilt. So sollte der Staat bei der IT-Sicherheit aktiv werden, wie es beispielsweise das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) bei der Mitentwicklung eines PKI Registrierungsverfahrens getan hat (vgl. zu PKI Abschnitt 3.2.4.3). Zudem wurde das beteiligte Unternehmen ESCRYPT als (Pilot) PKI Betreiber beauftragt [129]. Für die deutschlandweite Umsetzung von V2X ist die Schaffung einer zentralen PKI essentiell. Diese könnte aus den laufenden Pilotprojekten hervorgehen.

Für sehr anspruchsvolle und noch in der Entwicklung befindliche Themen (wie die angesprochene Notwendigkeit einer Einigung auf Vorverarbeitungsgrade infrastruktureitiger Sensordaten) können derzeit vermutlich noch keine verbindlichen Standards gesetzt werden. Hier ist Forschung notwendig, die z. B. vom Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF), dem Bundesforschungsministerium (BMBF) oder dem in Gründung befindlichen Deutschen Zentrum Mobilität der Zukunft (DZM) unterstützt werden kann.

Die bestehende und voraussichtlich noch einige Zeit anhaltende Unsicherheit über die Frage, ob in Zukunft bei V2X via ITS-G5 oder 5G-Mobilfunk-Sidelink kommuniziert wird, könnte angesichts der hohen Kosten einer Umstellung bei den Kommunen zu Verzögerungen bei der Modernisierung ihrer Kommunikationssysteme führen. Die Modernisierung der Kommunikationssysteme ist jedoch Grundvoraussetzung für Fortschritte bei allen anderen Vernetzungsthemen. Um sie zu beschleunigen, könnte der Bund ein Förderprogramm in Aussicht stellen.

Die Gefahr, in Hinblick auf weitere Entwicklungen bei V2X eine falsche Entscheidung zu treffen, ist gegeben, sollte aber nicht zu hoch eingeschätzt werden. Zum Beispiel gibt es Adapterlösungen. Bald kommen Funkelemente (RSU und OBU) auf den Markt, die sowohl im WLAN- als auch im Mobilfunkstandard kom-

munizieren und dabei auch Daten von einem Standard in den anderen übersetzen können.¹⁶ Außerdem verwenden die Verkehrsbetriebe für ihren eigenen Bereich ohnehin gerne eigene Kommunikationsnetze, die von den übrigen V2X-Netzen separiert sind. In nächster Zeit sollte die Frage genauer untersucht werden, wie groß oder klein die wirtschaftlichen Risiken sind, wenn eine Kommune für ihren Straßenbahnbetrieb, den ÖPNV und intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen auf einen Standard setzt, der nicht mit dem späteren V2X-Standard übereinstimmt. Dabei sollten auch Hinweise gegeben werden, wie diese Risiken minimiert werden können. Die von ETSI definierten Datenaustauschformate sind grundsätzlich technologieunabhängig definiert. Wenn die Anwendungssysteme so gestaltet werden, dass sie grundsätzlich mit beiden Kommunikationssystemen arbeiten können, reduzieren sich die Kosten eines späteren Wechsels deutlich. Abbildung 7-3 fasst die potenziellen Hemmnisse, Lösungswege und beteiligten Akteure zusammen.

Herausforderungen	Lösungswege	Beteiligte Akteure
<ul style="list-style-type: none"> • Kosten der Umstellung • Fehlende Entscheidung für eine Technologie (WLAN ITS-G5 vs. 5G) oder eine hinreichende Kompatibilität • Ungewissheit über die tatsächlichen Anforderungen • Große Unterschiede zwischen den Kommunen 	<ul style="list-style-type: none"> • WLAN oder 5G-basiert? <ul style="list-style-type: none"> • Beobachtung der Entwicklung im Kfz-Bereich • Festlegung auf eine Technologie? • Multifunktionsysteme? • Technologieunabhängige Datenaustauschformate • Modernisierungsanreize: <ul style="list-style-type: none"> • Fördermaßnahmen • Darstellung der Bedeutung für eine Marktentwicklung 	<ul style="list-style-type: none">  Verkehrsbetriebe  Kommunalverwaltungen  Industrie  Staat und Gesetzgeber  Normungsgremien  Kfz-Sektor

Abbildung 7-3: Kommunikationssystem - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure

7.2.3 Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen

Die intelligente, situative Verkehrssteuerung von Straßenbahnen unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Verkehrssituation ist ein Aspekt der V2X-Vernetzung und sollte im Kontext einer allgemeinen Verkehrssteuerung, welche alle Verkehrsteilnehmer umfasst, von den Kommunalverwaltungen federführend organisiert werden. Im Vordergrund aktueller Bestrebungen steht dabei die intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA), um unter besonderer Berücksichtigung und Priorisierung des ÖPNV den gesamten Verkehrsfluss zu verbessern.

Abbildung 7-4 illustriert die Komponenten und die vielfältigen Vernetzungsbeziehungen, die ein solches System für den Straßenbahnsektor erfordert.

Straßenbahnen können von einer intelligenten LSA-Steuerung in verschiedener Hinsicht profitieren. Zu nennen sind die Reduzierung von Verlustzeiten während der Fahrt an LSA und damit verbundene Reisezeitverkürzungen und Effizienzsteigerungen. In der Folge ergeben sich Möglichkeiten von Taktverdichtungen sowie auch Komfortgewinne und Energieeinsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise. Solche Effizienzsteigerungen wurden in Kapitel 5 genauer untersucht.

¹⁶ Allerdings verzögert dies die Übertragungsgeschwindigkeit und beansprucht die knappen Frequenzen zusätzlich. Siehe Abschnitt 3.2.6.4.

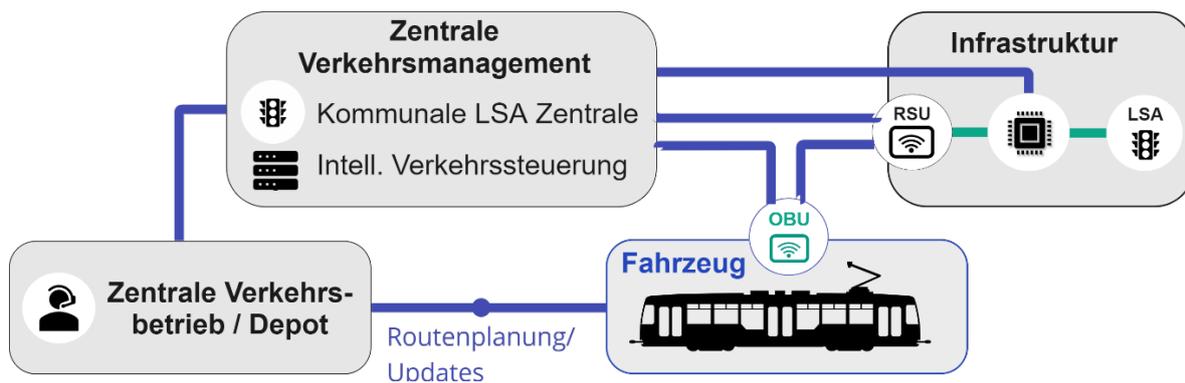


Abbildung 7-4: Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen (LSA) - Systemillustration

7.2.3.1 Herausforderungen und Hemmnisse

Die hohen Investitionskosten stellen die größte Herausforderung für die Einführung einer intelligenten Verkehrssteuerung dar. Jede LSA muss mit einer Steuerungs- und einer Funkeinheit (RSU), möglicherweise auch mit Sensoren zur Messung der Verkehrsaktivität und mit einem Glasfaseranschluss für die Verbindung zur Zentrale oder zu anderen infrastrukturseitigen Komponenten ausgerüstet werden. In einem voll entwickelten System beruht die Verkehrssteuerung auf einer guten V2X-Vernetzung einschließlich digitaler Karten und wird mit Hilfe eines teilautomatisierten Systems aus einer Steuerungszentrale der Kommunalverwaltung heraus durchgeführt.

Bisher existiert keine einheitliche Schnittstelle zwischen der Steuerungs- und der Funkeinheit an der LSA. Eine weitere Herausforderung stellt derzeit die mangelnde Technologiereife dar. Für verkehrabhängig gesteuerte LSA ist derzeit die Prognosegenauigkeit der Verkehrsströme unzureichend, so dass auch die davon abhängigen Grünphasen der LSA, die einen gleichmäßigen Verkehrsablauf ermöglichen, nicht verlässlich an die Verkehrsteilnehmer zurückgespielt werden können. Die zukünftige Vernetzung der verschiedenen LSA sowie dieser mit den Fahrzeugen eröffnet hohes Optimierungspotenzial, erfordert aber auch komplexe Echtzeitalgorithmen zur Lösung dieser Optimierungsprobleme. Von den Systemen sind Auswahlentscheidungen zu treffen, die eine Priorisierung und Verlässlichkeit des ÖPNV sicherstellen. Wie in [110] erläutert, handelt es sich dabei um multikriterielle Optimierungsprobleme, deren konkrete Lösungen auch vom politischen Leitbild abhängen.

Perspektivisch ist zudem wichtig, dass LSA-Signale auch per Funk in verbindlicher Weise an die Verkehrsteilnehmer übermittelt werden. Neben dieser rechtlichen Frage stellen sich Fragen der Kompetenzverteilung in den Kommunen. Eine allgemeine Verkehrssteuerung obliegt der Kommunalverwaltung, nicht den Verkehrsbetrieben. Hingegen wird die Steuerung der Fahrwege von der Straßenbahnverkehrsbetrieben bzw. -fahrern selbst vorgenommen. Wenn Bahnübergänge der Vollbahn auch von der Straßenbahn genutzt werden, ist hierfür das örtlichen Eisenbahninfrastrukturunternehmen zuständig. Für diese Interaktionen sind sinnvolle Lösungen der Kooperation zwischen den Akteuren zu entwickeln.

7.2.3.2 Akteure und Lösungswege

Zur Entwicklung der Lösungsalgorithmen für das multikriterielle, interdependente Optimierungsproblem der situativen Verkehrssteuerung sind weitere Forschungsprojekte durchzuführen. Zielparameter wie beispielsweise Treibhausgasemissionen oder Reisezeiten können auf kommunaler oder sogar bundesweiter politischer Ebene vorgegeben werden. Die Straßenbahn sollte als nachhaltiges Verkehrsmittel mit hoher Kapazität sehr hoch priorisiert werden. Allerdings ist man nicht auf eine perfekte, hochkomplexe Gesamt-

lösung angewiesen. Mit Teiloptimierungen an neuralgischen Verkehrsknotenpunkten und deren wichtigsten Zuführungen lässt sich bereits viel erreichen. Es ist zu erwarten, dass Weiterentwicklungen direkt praktisch umgesetzt werden. Neben methodisch ausgerichteten Forschungsprojekten sollten daher auch jetzt schon praktische Modellprojekte gefördert werden, wie es aktuell in Kassel der Fall ist.

Der wichtigste Akteur für die Umsetzung einer vernetzten LSA-Steuerung und die entsprechende Ausstattung der LSA ist die Kommunalverwaltung (insb. die Verwaltung Verkehr und die Bauverwaltung mit dem Tiefbauamt). Sie betreibt auch die LSA-Zentrale. Parallel dazu müssen die Verkehrsbetriebe ihre Fahrzeugflotte mit den entsprechenden OBU ausrüsten, die mit den LSA und der LSA-Zentrale kommunizieren und dem Fahrer oder Fahrzeugsteuerungssystem die Informationen von der LSA zur Verfügung stellen.

In Abschnitt 3.2.7 wird der Verband führender Signalbaufirmen und der daraus entstandene OCIT Standard vorgestellt. Dieser Standard zur Kommunikation von LSA mit der zentralen Ebene sollte nicht nur deutschlandweit verwendet, sondern auch in seiner Funktion erweitert werden. In [59] werden beispielsweise Möglichkeiten zum Übertragen von Verkehrszeichen, PKI-Zertifikaten sowie weiteren bestehenden Protokollen (insb. ETSI-Objekte) empfohlen.

Das Zusammenspiel von Kommunalverwaltung und Verkehrsbetrieb ist sinnvoll zu gestalten. Solange die Fahrzeug-LSA-Kommunikation nur im Nahbereich zwischen einzelnen LSA und den gerade in der Nähe befindlichen Fahrzeugen abläuft, sollte die Straßenbahn sich nicht nur bei der LSA anmelden, sondern auch gleichzeitig ihre gewünschte Fahrtrichtung übermitteln (vgl. CAM-Nachrichten in Abschnitt 2.3.2). Dies erfordert vom Verkehrsbetrieb, dass der tagesaktuelle Fahrplan im Bordcomputer der Straßenbahn gespeichert wird. Wenn hingegen ein zentrales LSA-Steuerungssystem existiert, sollte der Verkehrsbetrieb Fahrplan und aktuelle Fahrplanänderungen direkt an die LSA-Zentrale übermitteln können und dazu auch verpflichtet werden. Ferner sollten die einzelnen Fahrzeuge im Verkehrsgeschehen ihre aktuelle Position und somit auch ihre Abweichungen vom Fahrplan mitteilen.

In Hinblick auf die hohen Kosten bei gleichzeitig langen Lebensdauern von Lichtsignalanlagen ist es sinnvoll, sukzessive neue LSA auszustatten. Die daraus resultierenden möglicherweise langen Übergangszeiten erfordern einen Mischbetrieb, der in [110] näher erläutert wird. Dieser geht von zwei Stufen aus, wobei in der ersten die Fahrzeuge Informationen über ihre Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung (via CAM-Nachrichten) an die LSA senden, ohne dass bestehende Systeme angepasst werden müssen. In der zweiten Stufe, die als Zielsystem definiert wurde, wird ein Rückkanal von den LSA zum Fahrzeug ermöglicht. Die Umsetzung erfordert jedoch eine Veränderung in LSA-Steuerung, Steuerungslogik, Planungstools der Verkehrsunternehmen und der Bordrechner, was den Aufwand erhöht. Abbildung 7-5 zeigt die in dem genannten Bericht vorgeschlagene Roadmap zur Umsetzung der beiden Stufen in einer Kommune, die einen gleichzeitigen Beginn, aber eine spätere Zusammenführung von Hard- bzw. Softwareentwicklungen vorschlägt.

Rechtlich ist zu klären, dass LSA-Signale und Verkehrsschilder auch per Funk in verbindlicher Weise an die Verkehrsteilnehmer übermittelt werden können. Zudem ist die Kompetenzverteilung in den Kommunen zu klären und ggf. umzugestalten. Die allgemeine Verkehrssteuerung durch LSA in einer Stadt obliegt der Kommunalverwaltung. Im Falle einer stärker integrativen Verkehrssteuerung aus einer Verkehrszentrale heraus müssen die bisherigen Kompetenzen der Straßenbahnverkehrsbetriebe und -fahrer zur Steuerung ihrer Fahrwege möglicherweise etwas eingeschränkt oder jedenfalls stärker in die allgemeine Verkehrssteuerung eingebettet werden. Bei diesen Themen wird es sicherlich in den einzelnen Kommunen unterschiedliche Lösungen geben, die sich auch im Zeitablauf entwickeln oder ändern können. Es wäre hilfreich, wenn ein Branchenverband (zum Beispiel der VDV oder die FGSV) Vorschläge und Leitlinien zur Gestaltung der innerkommunalen Kompetenzverteilung entwickeln könnte.

Abbildung 7-6 fasst die potenziellen Hemmnisse, Lösungswege und beteiligten Akteure zusammen.

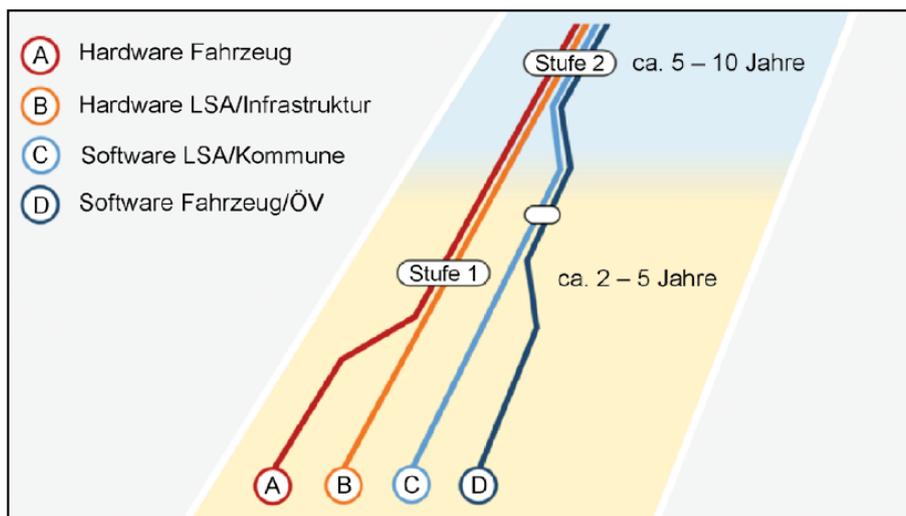


Abbildung 7-5: Handlungsempfehlung/Roadmap für C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung [110]

Herausforderungen	Lösungswege	Beteiligte Akteure
<ul style="list-style-type: none"> • Teure und langwierige Infrastrukturinvestitionen • Unklare Zuständigkeitsgrenzen • LSA-Prognosen noch zu unzuverlässig 	<ul style="list-style-type: none"> • Forschungs- und Modellprojekte mit städtischen Versuchsfeldern • Förderung beim Ausbau • Sukzessive Ausstattung neuer LSA mit Kommunikationstechnik • Klärung der Zuständigkeiten zwischen Kommunalverwaltungen und Verkehrsbetrieben • Weiterentwicklung der OCIT-Kommunikationsstandards • Zulassung der elektronischen Übertragung von LSA-Signalen für Verkehrsbetriebe 	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsbetriebe Kommunalverwaltungen Industrie LSA-Hersteller Staat und Gesetzgeber Normungsgremien OCIT Kfz-Sektor

Abbildung 7-6: Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen (LSA) - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure

7.2.4 Digitale Karten

Systeme der Vernetzung und Automatisierung erfordern eine klare Verortung der Fahrzeuge in ihrer Umgebung. Die Datenbank, in der die Umgebungsinformationen hinterlegt sind, wird „digitale Karte“ genannt. Bisher existieren noch keine digitalen Karten, oder allenfalls in rudimentärer, nicht standardisierter Form. Digitale Karten können verschiedene Detaillierungsgrade aufweisen und sehr unterschiedliche Objekte abbilden.

Beispiele sind:

- Streckenführung, Infrastrukturelemente und verkehrlich relevanten Punkte wie Kreuzungen und Haltestellen
- Verkehrsregelungen und Baustellen
- Alle festen Objekte, die von einer Sensorik im Fahrzeug entlang der Strecke wahrgenommen werden, mit Genauigkeit im Zentimeterbereich.
- Hochdynamische Daten: von aktuellen Wetterbedingungen über Staus bis hin zu beweglichen Einzelobjekten

Wirklich notwendig sind die relativ statischen Basisinformationen, während die hochdynamischen Daten als zukünftige Erweiterungen zu begreifen sind. Abbildung 7-7 illustriert die zentrale Bedeutung der digitalen Karten für die Vernetzung.

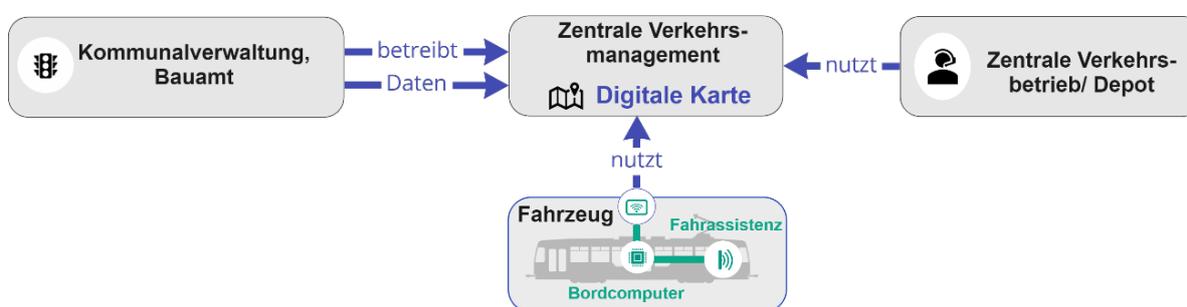


Abbildung 7-7: Digitale Karten - Systemillustration

Neben einem modernen Kommunikationssystem bilden digitale Karten eine weitere wichtige Grundlage für die Entwicklung des vernetzten und automatisierten Fahrens. Beispielsweise wird bei Fahrerassistenzsystemen, die eine energieeffiziente Fahrweise berechnen, eine digitale Karte benötigt, um das aktuelle Verkehrsgeschehen abzubilden. Digitale Karten sind auch eine unverzichtbare Unterstützung für das automatisierte Fahren. In diesem Kontext sollten digitale Karten alle festen Objekte enthalten, die von der Sensorik entlang der Strecke wahrgenommen werden, um die Interpretation dieser Sensordaten zu vereinfachen.

7.2.4.1 Herausforderungen und Hemmnisse

Die Technologie für die Erstellung digitaler Karten existiert. Es handelt sich also weniger um Technologieentwicklung als um Konzept- und Produktentwicklung. Derzeit gibt es aber noch keine einheitlichen Vorgaben, welche Objekte eine digitale Karte üblicherweise enthalten soll und welche Datenstrukturen hierfür gewählt werden sollen. Wenn diese Fragen geklärt sind, wird die erstmalige Erstellung einer verlässlichen digitalen Karte für eine Stadt einen gewissen, aber überschaubaren Anfangsaufwand erfordern. Sodann bedarf es Prozesse und Technologien, um die digitalen Karte aktuell zu halten.

Von großer Bedeutung ist eine Vereinheitlichung und Standardisierung digitaler Karten, damit andere Systeme, die diese Karten nutzen (z. B. Fahrerassistenz-, Flottenmanagement- oder Fahrzeugfeinsteuerungssysteme), in jeder Stadt anschlussfähig sind. Eine digitale Karte entspricht einem örtlichen „Betriebssystem“ für Straßenbahninfrastruktur-Software. Analog zu Computersoftware wird auch solche Verkehrs-Anwendungssoftware nur dann entwickelt, wenn es weitverbreitete, einheitliche Betriebssysteme gibt, auf denen sie eingesetzt werden kann. Standardisierung ist auch deshalb wichtig, weil Fahrzeuge und Steuerungskomponenten von verschiedenen Herstellern in der gleichen Stadt miteinander kommunizieren sollen.

7.2.4.2 Akteure und Lösungswege

Da die Entwicklung und Nutzung digitaler Karten noch in den Anfängen stecken, kann eine Standardisierung heute noch nicht erfolgen. Sie sollte aber schon fest in den Blick genommen werden. Dabei ist es naheliegend, dass die gleichen Normierungsgremien, die für die Etablierung möglichst einheitlicher Kommunikationsstandards zuständig sind, aufgrund der großen Überschneidungen auch die Standardisierung digitaler Karten übernehmen. Beispielsweise hat das ETSI als ersten Schritt einen in Abschnitt 3.2.4 näher beschriebenen technischen Bericht zu digitalen Karten erstellt.

Digitale Karten für Straßenbahnsysteme weisen eine deutlich geringere Komplexität als die für andere Straßenfahrzeuge auf, da Straßenbahnen nur auf wenigen und statischen Strecken fahren. Daher ist die initiale Erstellung einer digitalen Karte viel schneller realisierbar. Aus den genannten Gründen ist jedoch auch für den Straßenbahnsektor eine Standardisierung wichtig. Daher hat hier der Straßenbahnsektor die Möglichkeit, die Entwicklung aktiv mitzugestalten. Voraussetzung dafür ist, dass die Standardisierung nicht zu hohe Anforderungen an die Komplexität stellt, sondern eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Karten erlaubt.

Die Standardisierung der Inhalte und der Datenstruktur digitaler Karten sollte daher in verschiedenen Schichten erfolgen, sodass digitale Karten für unterschiedliche Anforderungen erstellt werden können und unnötig hochtechnisierte und damit komplizierte Lösungen vermieden werden können. Jede digitale Karte sollte um neue Aspekte oder Schichten erweiterbar sein. Dann könnte ein Anwendungssystem, welches die digitale Karte nutzen will, angeben, welche der standardisierten Schichten der digitalen Karte es als Systemvoraussetzung benötigt. Als Kunden der Anwendungssysteme treten die Kommunalverwaltungen und Verkehrsbetriebe auf. Nicht jede Stadt benötigt alle denkbaren Aspekte einer digitalen Karte. Je nach gewünschtem Anwendungsfall sollte eine Stadt individuell prüfen, welche der standardisierten Schichten einer digitalen Karte sie benötigt. Die technischen Standards für digitale Karten sollten somit auch die Grundlage für wirtschaftliche Schnittstellen bilden. In Zukunft sollten spezialisierte, konkurrierende Unternehmen den einzelnen Städten anbieten, eine digitale Karte der gewünschten Schichten nach den geltenden Standards für sie zu erstellen und zu pflegen.

Die Kommunalverwaltungen und Verkehrsbetriebe sind zu verpflichten, relevante Daten zur Verfügung zu stellen. Hierfür ist ggf. ein Rechtsrahmen zu schaffen, der auch die Datensicherheit berücksichtigt. Neben den Grunddaten zur Infrastruktur und zum Jahresfahrplan sind auch aktuelle, offizielle Daten (Baustellen, aktuelle Änderungen von Verkehrsregeln oder Fahrplänen) einzubeziehen. Die in solchen „offiziellen Schichten“ einer digitalen Karte enthaltenen Informationen (z. B. Straßenschilder) sollen dann auch für die Verkehrsteilnehmer rechtlich verlässlich sein. Hierfür sind ggf. rechtliche Anpassungen vorzunehmen.

Wenn digitale Karten zusätzlich um hochaktuelle, situative Informationen – möglicherweise in Echtzeit – erweiterbar sein sollen, muss dies in automatisierter Form geschehen, z. B. durch direkte Verarbeitung von Sensordaten der Fahrzeuge oder von infrastrukturseitigen Sensoren. Hier gibt es einen Trade-off zwischen der Schnelligkeit und Automatisierung von Informationsergänzungen einerseits und der Notwendigkeit, die Informationen auf Richtigkeit und Relevanz zu prüfen, andererseits. Das soll hier nicht vertieft werden. Es soll nur angedeutet werden, dass sich die verschiedenen Schichten einer digitalen Karte auch auf Informationen mit unterschiedlicher Verlässlichkeit beziehen können und dass die spezialisierten Unternehmen, die digitale Karten erstellen und pflegen, dann auch die automatisierte Aktualisierung überwachen und betreuen und ggf. mit Validierungsschritten versehen sollten.

Abbildung 7-8 fasst die potenziellen Hemmnisse, Lösungswege und beteiligten Akteure zusammen.

Herausforderungen	Lösungswege	Beteiligte Akteure
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Standardisierung der Datenstrukturen • Fehlende Dienstleister, die digitale • Erstellung und Pflege der Karten • Bereitstellung der Grunddaten • Zertifizierung, Datenschutz und Sicherheit • Technologie der automatischen Aktualisierung mit aktuellen Verkehrsdaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Standardisierung der Datenstrukturen für verschiedene Zwecke / Schichten • Förderprogramme und städtische Versuchsfelder • Definition der Sicherheitsanforderungen • Pflicht zum Bereitstellen von Informationen (Verkehrszeichen, Baustellen, ...) • Ausweitung der Mobilithek-Nutzung 	<ul style="list-style-type: none">  Verkehrsbetriebe  Kommunalverwaltungen  Industrie  Staat und Gesetzgeber  Normungsgremien  Kfz-Sektor

Abbildung 7-8: Digitale Karten - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure

7.2.5 Anwendungssysteme der Vernetzung

Auf der Grundlage moderner, leistungsfähiger Kommunikationssysteme und digitaler Karten sind weitere moderne Anwendungssysteme möglich. Beispielsweise können Fahrgastinformationssysteme so weiterentwickelt werden, dass Fahrgäste an Haltepunkten oder im Internet sehr verlässliche Informationen über Ankunfts- und Fahrzeit der einzelnen Straßenbahnen erhalten. Auf Basis einer Sensorik im Fahrzeug können auch Informationen über den Auslastungsgrad und die aktuelle Verteilung der Fahrgäste in der nächsten Straßenbahn generiert werden. Am Bahnsteig wartende Fahrgäste können sich dann schon passend positionieren, so dass der Fahrgastwechsel beschleunigt wird (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die Leistungsfähigkeit der Fahrerassistenzsysteme kann in Zukunft stark durch Vernetzung erhöht werden, indem mehr Informationen für die Entscheidungsfindung zugänglich sind. Im Flotten- und Personaleinsatzmanagement könnte dies beispielsweise bei Störfällen unterstützen. Auf Basis einer Sensorik können zudem wertvolle Zustands- und Wartungsdaten über Fahrzeug und Infrastruktur generiert und in entsprechenden Softwaresystemen genutzt werden.

Bei diesen Anwendungsfällen handelt es sich um Produktentwicklungen, die aktuell technologisch möglich sind. Die Systeme können von den Verkehrsbetrieben angeschafft werden, ggf. unter Einbeziehung der Kommunalverwaltungen. Abgesehen von den Entwicklungskosten der Systeme sind keine weiteren Hemmnisse zu nennen. Vielmehr ist damit zu rechnen, dass sich der Markt für solche Systeme entwickelt, sobald viele Kommunen entschieden haben, die Grundvoraussetzungen dafür (Kommunikationssysteme und digitale Karten) zu schaffen. Lediglich eine gewisse Forschungsförderung für die Entwicklung komplexer Anwendungssysteme könnte ins Auge gefasst werden (zum Beispiel im Rahmen von mFund des BMDV), da sich die Skalenerträge einer breiten Nutzung erst langsam realisieren werden.

Anwendungssysteme der beschriebenen Art sollten im Idealfall wirtschaftliche Schnittstellen zu den übrigen Vernetzungssystemen aufweisen, so dass sie frei kombinierbar sind. Allerdings sind auch kompakte, integrierte Systeme denkbar, die von Drittunternehmen zusammen mit den digitalen Karten angeboten, gepflegt und möglicherweise betrieben werden.

7.3 Fahrzeugsteuerungstechnologien

7.3.1 Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme stellen eine wichtige Entwicklungsstufe der Vernetzung und Automatisierung von Straßenbahnsystemen dar, da sie mit begrenzten technologischen Anforderungen bereits sehr nutzbringend sein können. Zu nennen sind insbesondere Notfall- und Aufmerksamkeits-Assistenten, mit denen die Unfallkosten signifikant gesenkt werden können und auch ein ruhigeres Fahrverhalten (energiesparend und angenehmer für die Fahrgäste) induziert werden kann. Diese sind heutzutage bereits am Markt verfügbar, hängen nicht von einer Vernetzung ab und können für verschiedene Nutzungen weiterentwickelt werden. Andere Assistenten, die die Vernetzung und auch die digitalen Karten nutzen, können den Fahrzeugführer über die Verkehrssituation und eine verkehrsangepasste Fahrweise informieren (navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe). Dies wird in besonderem Maße energiesparend und angenehmer für die Fahrgäste sein und kann auch eine Lärmreduktion für die Anwohner ermöglichen.

Die Technologieentwicklung der Fahrerassistenzsysteme und ihre Implementierung und Verbreitung in der Praxis schreitet stetig voran. Städte, die hiermit vorangehen, fördern durch ihre Erfahrungen und Erfolge die weitere Verbreitung. Dies kann durch Fördermaßnahmen unterstützt werden. Herausforderungen und Hemmnisse sind in diesem Zusammenhang nicht zu nennen. Im Gegenteil: die Nützlichkeit der Fahrerassistenzsysteme stellt einen Anknüpfungspunkt dar, um die Modernisierung der Straßenbahnsysteme in Richtung auf Sensorik, Digitalisierung, Vernetzung, digitale Karten und Automatisierung voranzubringen. Allerdings ist darauf zu achten, die Fahrer nicht mit Assistenzinformationen zu überfrachten.

Die entscheidenden Akteure für den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen sind die Verkehrsunternehmen. In dem Maße, wie Elemente der Vernetzung bei der Fahrerassistenz Eingang finden, ist die Kooperation der Kommunalverwaltungen erforderlich. Die Industrie ist bei der Fahrerassistenz bereits heute in der Lage, alles zu entwickeln und zu liefern, was nachgefragt wird.

7.3.2 Teleoperation

Die Teleoperation von Straßenbahnfahrzeugen ist eng mit deren Automatisierung verbunden, einerseits als Übergangstechnologie und andererseits als Rückfallebene. Die Funktion der Rückfallebene wird langfristig erforderlich sein. Auch wenn vollautomatisierte Straßenbahnsysteme Realität geworden sind, benötigen sie für den Fall, dass die Steuerungssysteme ausfallen oder schwer identifizierbare Hindernisse die Weiterfahrt verhindern, die Fähigkeit, per Teleoperation in kritischen Verkehrssituationen unterstützt oder ggf. manövriert werden zu können.

Die Funktion als Übergangstechnologie kann schon weit vorher relevant werden. So kann Teleoperation eingesetzt werden, um in einfachen Verkehrssituationen, so insbesondere im Depot oder auf Wendeschleifen, den Fahrer zu ersetzen und ihm damit zum Beispiel eine Pause zu ermöglichen. Teleoperation als Übergangstechnologie kann aber auch eingesetzt werden, um ein ansonsten automatisiert fahrendes Fahrzeug durch komplexe und vielleicht auch hochkomplexe Verkehrssituationen zu manövrieren.

Abbildung 7-9 illustriert die Komponenten und Vernetzungsbeziehungen für Teleoperation.

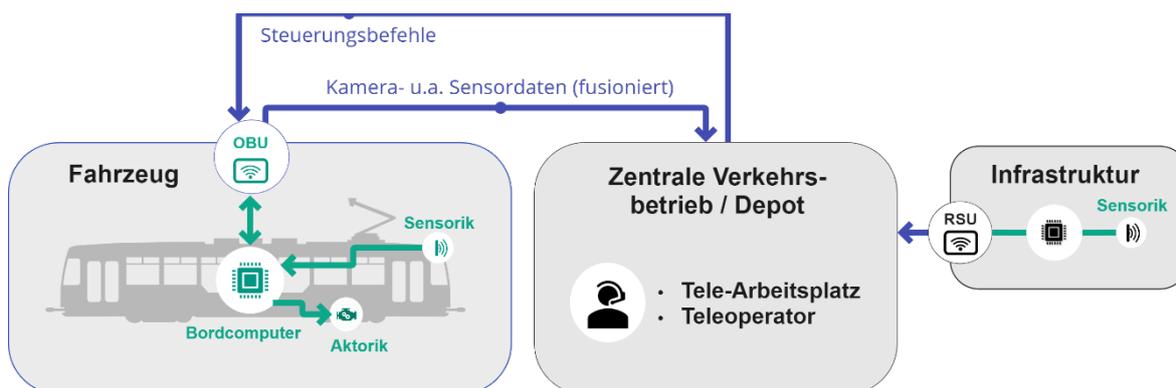


Abbildung 7-9: Teleoperation - Systemillustration

7.3.2.1 Herausforderungen und Hemmnisse

Die Technologie der Teleoperation ist für den Straßenbahnsektor zu entwickeln. Dabei kann die Straßenbahn stark von den Entwicklungen der Vollbahn profitieren. Beispielhaft zu nennen sind der weltweit erste via 5G-teleoperierte Zug „Lucy“ von Thales und Vodafone [130] und die Abteilung Human Factors des Instituts für Verkehrssystemtechnik des DLR, welche die Rolle des Menschen als Train Operator und dessen Arbeitsplatz erforscht [131].

An diese Entwicklungen anknüpfend scheint die Straßenbahn ein besonders geeignetes Anwendungsfeld zu sein, um die Teleoperation auch für die Fahrt im freien Straßenverkehr zu entwickeln. Sie stellt durch die immer wiederkehrenden und einfachen Fahrbewegungen auf einem begrenzten Netz einen relativ einfachen Anwendungsfall dar, die Fahrzeuge bieten ausreichende Stromversorgung und viel Platz zur Anbringung von Sensoren und es existiert bereits eine zentrale Organisation (Betriebszentrale), von der die Teleoperation ausgeführt werden kann. Hingegen wird im Kfz-Bereich die Entwicklung vermutlich zunächst darauf beschränkt werden, ein Fahrzeug per Teleoperation langsam an den Straßenrand fahren zu können (Teleoperation als sehr beschränkte Rückfalloption). Auch bei Bussen stellt Teleoperation schon deutlich höhere Herausforderungen als bei Straßenbahnen. Daher erscheinen Straßenbahnen als besonders interessanter und geeigneter Fall für die Entwicklung von sowohl einfachen als auch anspruchsvollen Formen der Teleoperation.

Die technologischen Voraussetzungen für Teleoperation existieren. Aber praktisch einsetzbare Systeme, einschließlich der Teleoperations-Arbeitsplätze und -Ausbildung gibt es noch nicht. Wenn vorgesehen ist, teilautonome Fahrzeuge durch komplexe Verkehrssituationen zu manövrieren, muss die Kommunikationsinfrastruktur für die Echtzeitübertragung ausreichend leistungsfähig und verlässlich sein und adäquate Sensorik im Fahrzeug (und vielleicht in der Umgebung) installiert werden.

Normierungsfragen spielen bei der Teleoperation eine untergeordnete Rolle. Doch wäre für die Einrichtung der Betriebszentralen und für eine einheitliche Ausbildung von Teleoperatoren eine gewisse Vereinheitlichung der Teleoperations-Arbeitsplätze sowie der Auswahl und Positionierung wichtiger Sensoren im Fahrzeug sinnvoll. Wichtiger sind rechtliche Fragen und Zertifizierungsfragen für den sicheren Teleoperationsbetrieb im Stadtverkehr. Für Pkw wurde Teleoperation rechtlich sehr restriktiv behandelt. Straßenbahnen weisen bessere Voraussetzungen für einen sicheren Betrieb der Teleoperation auf, so dass hier eine rechtliche Öffnung eher möglich erscheint.

7.3.2.2 Akteure und Lösungswege

Die Technologie und Praxis der Teleoperation kann in einem ersten Schritt für den Einsatz auf den Betriebshöfen entwickelt werden, wie im aktuellen Projekt ASTRID. Auch in diesem Kontext müssen jedoch für den praktischen Einsatz die rechtlichen Grundlagen der Betriebssicherheit geschaffen werden. Auf der Grundlage von praktischen Erfahrungen im Kontext der Betriebshöfe, sollten zur Schaffung der weitergehenden praktischen und rechtlichen Voraussetzungen Forschungs- und Modellprojekte aufgesetzt werden, in denen Anwender und Industrie in enger Zusammenarbeit mit dem VDV und den Zulassungsbehörden die Voraussetzungen für „sicheres teleoperiertes Fahren im Stadtverkehr“ ausarbeiten können (siehe dazu auch Kapitel 7.3.3). In solchen Projekten können auch Leitlinien für die Gestaltung von Teleoperations-Arbeitsplätzen formuliert werden.

Abbildung 7-10 fasst die potenziellen Hemmnisse, Lösungswege und beteiligten Akteure zusammen.

Herausforderungen	Lösungswege	Beteiligte Akteure
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende rechtliche Voraussetzungen und praktische Sicherheitsanforderungen • Entwicklung praxistauglicher Teleoperationssysteme • Bisher fehlende Marktentwicklung • Technische Voraussetzungen, je nach Anwendungsfall: Kommunikationssystem (Latenz, Zuverlässigkeit), Sensorik 	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung eines Rechtsrahmens für die Teleoperation • Weitere Forschung zur technischen Ausstattung und zur Praxis der Teleoperation (Realbetrieb), um rechtliche Voraussetzungen und Zertifizierung zu ermöglichen • Umsetzung zuerst in einfachen Betriebsbereichen (z. B. Depot) • Standardisierung eines Teleoperator-Arbeitsplatzes 	<ul style="list-style-type: none">  Verkehrsbetriebe  Kommunalverwaltungen  Industrie  Staat und Gesetzgeber  Normungsgremien  Kfz-Sektor

Abbildung 7-10: Teleoperation - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure

7.3.3 Automatisiertes Fahren

Die großen Vorteile des fahrerlosen, automatisierten Fahrens ergeben sich aus den Einsparungen von Personalkosten und der Überwindung von Restriktionen des Personaleinsatzes (Arbeitszeiten, Personaleinsatzplanung usw.) und den sich damit eröffnenden Möglichkeiten der Taktverdichtung und -verlängerung in die Tagesrandzeiten sowie der Einbeziehung der City-Logistik. Angesichts des sich voraussichtlich weiter verschärfenden Fahrer- und Nachwuchsmangels kann die Einführung des automatisierten Fahrens schon bald notwendig werden.

Wie in Abschnitt 6.2 dargestellt wurde, können an das automatisierte Fahren unterschiedliche Ansprüche gestellt werden. Wenn lediglich einfache Verkehrssituationen fahrerlos gemeistert werden sollen, können heute schon infrastrukturseitige Feinsteuerungssysteme (z. B. CBTC-Systeme) eingesetzt werden. Wenn hingegen auch hochkomplexe Verkehrssituationen zu meistern sind, kann dies nur durch fahrzeugseitige Feinsteuerungssysteme (Bordcomputer-Architektur) bewerkstelligt werden, die aktuell mit dieser Leistungsfähigkeit noch nicht existieren.

7.3.3.1 Herausforderungen und Hemmnisse

Für das Fernziel des vollautomatisierten Fahrens auch in hochkomplexen Verkehrssituationen besteht die technologische Hauptaufgabe der nächsten zehn bis zwanzig Jahre darin, die Fähigkeit der Umgebungserkennung, der Intentionsschätzung über andere Verkehrsteilnehmer und der situativen Fahrzeugfeinsteuerung zu entwickeln. Dies ist Technologieentwicklung auf höchstem Niveau, die für den Straßenbahnsektor allein nicht geleistet werden kann, auch nicht für den öffentlichen Verkehr insgesamt. Vielmehr wird sie in der Wissenschaft und in großen Unternehmen der Robotik, des Kfz-Sektors u.a. geleistet und muss dann für den Straßenbahnsektor sukzessive übernommen und adaptiert werden (sog. „carry-over“).

Für die Automatisierung von Straßenbahnen bedeutet das, dass gegebenenfalls auf Technologieentwicklungen aus anderen Sektoren gewartet werden muss. Im Anschluss besteht die Aufgabe darin, diese Technologien für den Straßenbahnsektor zu ertüchtigen, so dass die Adaption gelingt. Hier bieten Straßenbahnen jedoch einen besonderen Vorteil, da das sog. „silent testing“, bei dem ein Fahrzeugfeinsteuerungssystem im Realbetrieb trainiert werden kann, bei ihnen aufgrund der relativ wenigen und kontrollierten Fahrsituationen wesentlich einfacher und erfolgversprechender ist als bei Kfz.¹⁷

Zusätzlich sind einige Spezialentwicklungen vorzunehmen, die nur den öffentlichen Verkehr (z. B. Berücksichtigung von Fahrgästen, die nicht angeschnallt sitzen) oder die Straßenbahnen im Besonderen (z. B. Einbeziehung der Weichensteuerung) betreffen. Hier scheinen aber die Hürden nicht besonders hoch zu sein, da diese Themen schon heute gut gelöst sind und gute Anknüpfungspunkte für automatisierte Systeme bieten. Allerdings stellen sich mit dem Wegfall der Fahrer noch weitere Herausforderungen. Neben der reinen Fahrtätigkeit erfüllen sie auch die Aufgaben der Fahrinsassenkommunikation, Fahrzeugwartung und Notfallbewältigung. Mit dem Wegfall des Fahrpersonals müssen Lösungen gefunden werden, diese Aufgaben zu technisieren, an anderer Stelle (z. B. vor Fahrtbeginn im Betriebshof) oder auf anderem Wege (z. B. Kommunikation mit der Leitstelle) zu lösen.

Neben der reinen Technologieentwicklung ist die Frage zu lösen, unter welchen Bedingungen den automatisierten Systemen vertraut werden kann, so dass sie für den Einsatz im öffentlichen, nicht abgegrenzten Straßenraum zugelassen werden können. Der aktuelle rechtliche Rahmen hierzu und der bestehende Anpassungsbedarf werden in Kapitel 8 noch genauer betrachtet. Die Zulassungs- und Zertifizierungsfragen werden weltweit für den Pkw-Sektor angegangen. Dort sind sie allerdings besonders schwer zu lösen. Für Straßenbahnen ist die Problemstellung grundsätzlich etwas einfacher. Hier erfolgen Fahrzeugbewegung nur auf relativ wenigen und genau verorteten Gleisen, dabei viele einfache oder nur mäßig komplexe Verkehrssituationen. Andernorts gibt es Möglichkeiten der Komplexitätsreduktion durch entsprechende Umgestaltung von Verkehrssituationen sowie die Rückfallebene der Teleoperation als Unterstützung in komplexen Verkehrssituationen. Zudem kann auch das erwähnte „silent testing“ direkt für den Zertifizierungsprozess genutzt werden. Daher kann es durchaus sein, dass der Straßenbahnsektor bei der praktischen Realisierung des automatisierten Fahrens im offenen Straßenraum vorangeht. Um diese Chance zu nutzen, müssen jedoch die gesetzlichen Grundlagen und die Zertifizierungsprozesse direkt für den Straßenbahnsektor entwickelt werden, was insbesondere heißt, dass zunächst Zertifizierungskriterien zu entwickeln sind: Welche Genauigkeits- und Verlässlichkeitsniveaus werden verlangt? Wie werden sie gemessen? Welche Unfallrisiken können akzeptiert werden? (siehe dazu Kapitel 8)

¹⁷ Beim „silent testing“ werden hypothetische Entscheidungen eines Fahrzeugfeinsteuerungssystems mit den tatsächlichen Entscheidungen eines Fahrzeugführers im Realbetrieb verglichen und können dann bewertet werden. Diese Methode wird aktuell im Forschungsprojekt MAAS der TU Darmstadt bei Straßenbahnen praktiziert.

Da die Fähigkeit der fahrerseitigen Fahrzeugfeinsteuerung in hochkomplexen Verkehrssituationen erst langfristig entwickelt werden kann und von anderen Wirtschaftssektoren abhängt, können andere Optionen des fahrerlosen Fahrens als interessante Zwischenlösungen erscheinen. Die existierenden Feinsteuerungssysteme mit infrastrukturseitigem Schwerpunkt (z. B. CBTC-Systeme) können prinzipiell weiterentwickelt werden, um auch komplexere (aber nicht hochkomplexe) Verkehrssituationen im allgemeinen Straßenraum meistern zu können. Als kompakte, sowohl infrastruktur- als auch fahrerseitige Komponenten umfassende, proprietäre Systeme weisen sie allerdings den zusätzlichen Nachteil auf, dass die Anwender dann riskieren, sich von einem Anbieter abhängig zu machen.¹⁸ In der Praxis wird sich daher die Frage stellen, wieweit diese Zwischenlösungen entwickelt und ausgebaut werden sollen. Wie weit soll man bei ihnen gehen, um immer komplexere Verkehrssituationen zu meistern? Wann sollte man diese Pfade abbrechen und auf die hochleistungsfähige, fahrerseitige Lösung setzen und ggf. auf entsprechende Technologieentwicklungen aus dem Pkw-Sektor warten? Viele Ausbauten, die für die Zwischenlösungen vorgenommen werden (insb. Vernetzungstechnologien), werden auch nach einem Übergang zur fahrerseitigen Lösung nicht obsolet werden, sondern weiterhin sinnvoll einsetzbar sein.

7.3.3.2 Akteure und Lösungswege

Abbildung 7-11¹⁹ illustriert die beiden zentralen Problemfelder für die Entwicklung und Realisierung des automatisierten Fahrens: auf der linken Seite die Herausforderungen der Technologieentwicklung, auf der rechten diejenigen der Zulassung und Zertifizierung.

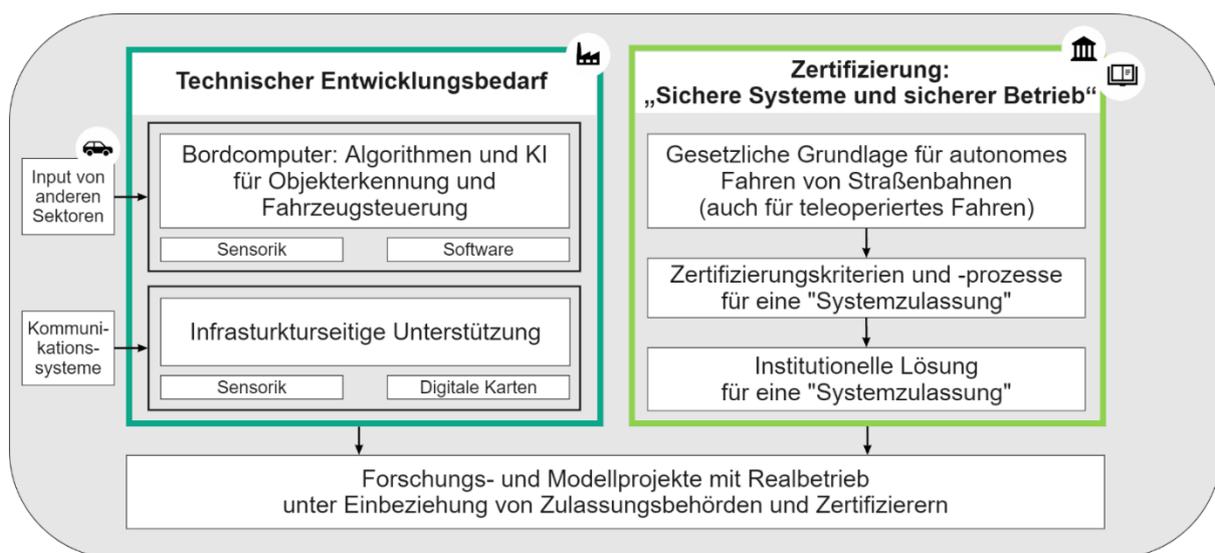


Abbildung 7-11: Automatisiertes Fahren - Herausforderungen, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure

Die grundlegenden Technologieentwicklungen für das automatisierte Fahren werden von der Industrie mit einer Anwendungsperspektive auf insb. den Pkw-Sektor betrieben. Aufgrund der beschriebenen frühzeitigen Umsetzungsperspektive des automatisierten Fahrens bei Straßenbahnen – und den damit verbundenen Vorteilen – sollte zügig die Übertragung und Anwendung dieser Technologien für den Straßenbahnsektor erfolgen. Parallel sind ergänzende Spezialentwicklungen für diejenigen Fragestellungen

¹⁸ Hingegen werden CBTC-Systeme auch in Zukunft für einzelne Strecken, die vom allgemeinen Verkehr und auch vom übrigen Straßenbahnsystem gut abgetrennt sind, als kostengünstige Lösungen interessant bleiben.

¹⁹ Die Symbole für die Akteure wurden in Abbildung 7-1 eingeführt.

notwendig, die beim Straßenbahnsektor zusätzlich auftauchen. Dies sollte mit Forschungs- und Modellprojekten gefördert werden. Bei Letzteren sollte es sich um kombinierte Modellprojekte für das vernetzte und automatisierte Fahren handeln, da Automatisierung durch eine Vernetzung (insb. digitale Karten) stark unterstützt wird. Für die Projektfinanzierung können auf Seiten des Bundes das Verkehrs- und das Forschungsministerium (BMDV und BMBWF), das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) sowie das in Gründung befindliche Deutsche Zentrum für Mobilität der Zukunft (DZM) aktiv werden. Auch die EU sollte hierzu aktiv werden und eigene Projekte finanzieren, zum Beispiel im Rahmen von Shift2Rail.

Für die Zulassung und Zertifizierung des automatisierten Fahrens (rechter Teil der Abbildung 7-11) sind zunächst die gesetzlichen Grundlagen zu schaffen. Dies betrifft vor allem die Zertifizierungskriterien, -prozesse und -institutionen. Inwieweit in den bestehenden Gesetzen bereits Regelungen hierzu getroffen werden, wird in Kapitel 8 analysiert. In Deutschland sind die Technischen Aufsichtsbehörden (TAB) der einzelnen Bundesländer für Genehmigungen von Straßenbahnsystemen zuständig. Es kann jedoch weder erwartet werden, noch wäre es ratsam, dass jede einzelne TAB Zertifizierungskriterien und -prozesse für die neuartigen automatisierten Steuerungssysteme selbst entwickelt. Anzustreben wäre vielmehr eine Art einheitliche „Systemzulassung“ für diese Systeme, welche dann von den TAB als Grundlage für die örtlichen Genehmigungen dienen kann. Es sollten abgestufte Systemzulassungen der Fahrzeugfeinsteuersysteme für Verkehrssituationen unterschiedlicher Komplexitätsgrade eingeführt werden.

Für eine solche „Systemzulassung“ ist ein geeigneter institutioneller Rahmen zu entwickeln. Hierzu gibt es drei Optionen:

- Gründung einer neuen Behörde oder Beauftragung einer existierenden Behörde auf Bundes- oder EU-Ebene.
- Auswahl und Mittel- sowie Kompetenzausstattung einer existierenden Technischen Aufsichtsbehörde der Länder, um Zertifizierungen von Fahrzeugfeinsteuersystemen stellvertretend für alle anderen TAB durchführen zu können.
- Etablierung von Zertifizierungskriterien und -standards durch nicht-behördliche Gremie der Industrie und Verbände, mit dem Ziel der Aufnahme als „allgemein anerkannten Regeln der Technik“.

Die Entwicklung der Zertifizierungskriterien und -prozesse sollte im Rahmen von anwendungsorientierten Forschungsprojekten geschehen, bei denen neben der Industrie und den Anwendern (Verkehrsunternehmen und Kommunalverwaltungen), auch die Genehmigungsbehörden und Zertifizierer beteiligt sind. Die Finanzierung dieser Projekte sollte durch den Bund oder die EU koordiniert werden.

8 Rechtlicher Anpassungsbedarf

8.1 Notwendigkeit

Bei der Betrachtung des rechtlichen Anpassungsbedarfes besteht das Ziel darin, die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen aufzuzeigen und daraus Handlungserfordernisse für die Ermöglichung eines Einsatzes von Automatisierungstechnologie im Straßenbahnbereich abzuleiten. Es geht dabei nicht darum, konkrete Gesetzesvorschläge zu erarbeiten. Diese Aufgabe obliegt dem Gesetzgeber. Vielmehr soll dem Gesetzgeber im Rahmen der Roadmap eine Hilfestellung gegeben werden, an welchen Stellen Ansatzpunkte für eine rechtliche Regelung eines automatisierten Straßenbahnbetriebs bestehen. Die rechtliche Regelung des automatisierten Straßenbahnbetriebs ist ein komplexes Thema. Sie betrifft u. a. Dimensionen des sicheren Betriebs im Straßenraum und auf der Schiene, der Standardisierung von Technologien und Produkten sowie innovativer digitaler Methoden und Fähigkeiten. Es bestehen für diese diversen Themenfelder Regelungen und Regelungsansätze auf gesetzlicher und nicht gesetzlicher Normungsebene im nationalen oder europäischen Rahmen.

In Bezug auf die bereits bestehenden Regelungen stellt sich die Frage, welcher rechtliche Rahmen notwendig ist, um eine breitere Anwendung von Automatisierungstechnologie zu ermöglichen. Nur wenn durch entsprechende Normen und einen Standardisierungskatalog ein Rahmen bezüglich der technischen Anforderungen an automatisierte Straßenbahnfahrzeuge definiert wird, besteht für die Unternehmen ein Anreiz über die Entwicklung von Prototypen hinaus in den entsprechenden Markt einzusteigen. Dieser Anreiz ergibt sich durch die damit einhergehende Sicherheit, dass ein den Anforderungen entsprechendes Produkt vom Unternehmen vermarktet und von potenziellen Kunden eingesetzt werden kann. Außerdem wird so der Wettbewerb zwischen verschiedenen Herstellern gefördert, was die Preise für notwendige Komponenten an Fahrzeugen und der Infrastruktur für einen automatisierten Straßenbahnbetrieb senkt und damit den Einsatz von Automatisierungstechnologie für Betreiber von Straßenbahnen attraktiver macht.

Eine der Herausforderungen Regelwerksfestsetzung besteht dabei darin, für einen stabilen Rechtsrahmen zu sorgen. Dies bedingt beispielsweise die Festlegung von Sicherheitsanforderungen, um Hersteller in die Lage zu versetzen, Produkte mit sicherheitsrelevanten Funktionen anbieten und zulassen zu können. Außerdem wird eine Regelung benötigt, welche die dauerhafte Verfügbarkeit der Ressource „Vernetzung“ sicherstellt. Diese könnte sich entweder auf die physikalische Verfügbarkeit (Frequenzen), die funktionale Verfügbarkeit (Übertragungsprotokolle) oder sogar auf beides beziehen. Es gilt sicherzustellen, dass Systeme zukünftig auch ersetzt und erneuert werden können. Anforderungen sind auch für die Qualität digitaler Karten zur Übermittlung rechtlich verbindlicher standardisierter Informationen notwendig. Der Einsatz künstlicher Intelligenz für die verantwortliche Bewertung bestimmter Situationen muss in Verbindung mit einer Sensorik eingesetzt werden können. Die andere Herausforderung besteht in der rechtlichen Regelung eines fahrerlosen Betriebs. In dieser Hinsicht gibt es rechtliche Fragestellungen zu den Voraussetzungen und der Übertragung der Haftung eines Fahrers auf technische Systeme sowie die dafür verantwortlichen Personen.

Nachfolgend wird der Fokus der Betrachtung zunächst auf die Regelungen des Straßenbahnbetriebs gelegt. Anschließend wird ein grober Überblick zu den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen des automatisierten Fahrens im Kraftfahrzeug- und Eisenbahnverkehr gegeben. In der Folge werden die Anforderungen an einen Rechtsrahmen für einen automatisierten Straßenbahnbetrieb definiert. Auf diesen Anforderungen aufbauend wird im Weiteren dargestellt, an welchen Stellen für den Gesetzgeber Ansatzpunkte für die Regelung eines automatisierten Straßenbahnbetriebs bestehen. In diesem Zusammenhang wird die Übertragbarkeit der Regelungen für den Kraftfahrzeugverkehr auf den Straßenbahnverkehr hin

untersucht. Anschließend wird der erforderliche Prozess aufgezeigt, um die bestehenden Regelungslücken zu schließen. Hierbei steht u. a. die Frage nach den Zuständigkeiten im Vordergrund. Die Ergebnisse fließen in die Roadmap ein, welche den im Straßenbahnsektor beteiligten Akteuren und der Politik für einen 10-jährigen Zeitraum Empfehlungen zur Überwindung der identifizierten ökonomischen und rechtlichen Hindernisse zur Verfügung stellt. Abschließend erfolgt eine Auflistung von Anforderungen in Form von Herausforderungen, welche rechtlich zu regeln sind.

In Abbildung 8-1 ist der bestehende grundsätzliche Regelungsrahmen für die Verkehrsträger Straße und Schiene sowie als Schnittmenge für den Personenverkehr dargestellt. Im Folgenden werden die in der Grafik aufgeführten Gesetze und Verordnungen hinsichtlich ihrer Regelungen und einer Anwendung für einen automatisierten Straßenbahnbetrieb näher betrachtet.

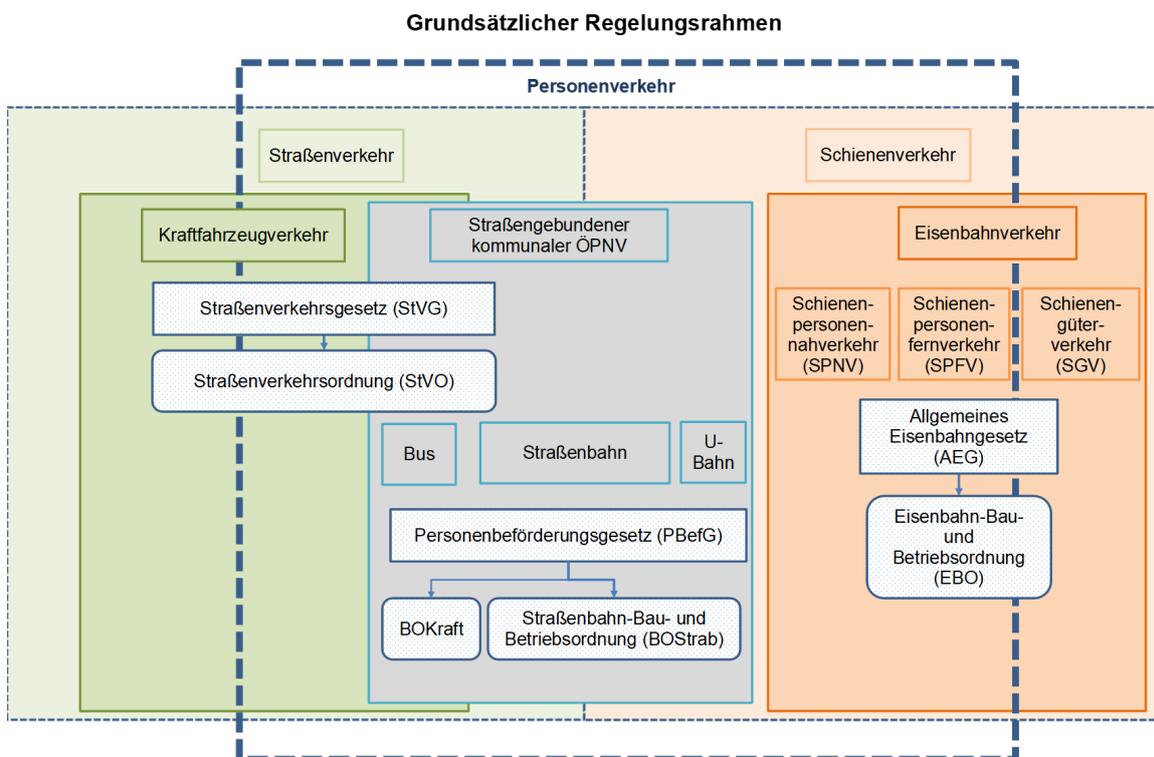


Abbildung 8-1: Übersicht grundsätzlicher Regelungsrahmen

8.2 Aktueller Rechtsrahmen im Straßenbahnverkehr

8.2.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die gesetzliche Grundlage für den Straßenbahnverkehr bildet in Deutschland das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) [132]. Es bildet die Basis für die Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) [8], in welcher die Durchführung von Straßenbahnverkehr geregelt ist. Die BOStrab ist eine Rechtsverordnung entsprechend § 57 des PBefG, welche die erforderlichen Vorschriften für die Sicherheit und Ordnung des Straßenbahnverkehrs regelt. Deren Umsetzung ist Aufgabe der örtlichen Behörden und Verkehrsunternehmen. Grundsätzlich wird in der BOStrab zwischen straßenabhängigen Bahnen und unabhängigen Bahnen unterschieden. Da straßenabhängige Bahnen den öffentlichen Straßenraum nutzen, haben sie sich

mit ihren baulichen und betrieblichen Einrichtungen sowie in ihrer Betriebsweise dem Straßenverkehr anzupassen. In § 55 Abs. 1 (BOStrab) ist die Teilnahme von Straßenbahnen am Straßenverkehr niedergeschrieben. Straßenverkehrsrechtliche Vorschriften sind somit auf Straßenbahnen anwendbar. Einschränkungen bestehen allerdings dann, wenn Vorschriften nur für Kraftfahrzeuge gelten. Straßenbahnen bedürfen nach § 1 des StVG keiner straßenverkehrsrechtlichen Zulassung, da sich dieser Paragraph ausschließlich auf Kraftfahrzeuge bezieht.

Ein fahrerloser Betrieb ist nach § 53 BOStrab bei straßenabhängigen Bahnen bisher nicht vorgesehen. Bislang ist unter § 53 Abs. 1 der BOStrab geregelt, dass jeder Zug während der Fahrt mit einem streckenkundigen Fahrzeugführer besetzt sein muss. Ein fahrerloser Betrieb ist aktuell unter bestimmten Voraussetzungen nur für unabhängige Bahnen zulässig. Dabei handelt es sich um Bahnen, welche „durch ihre Bauart oder Lage auf der gesamten Streckenlänge vom Straßenverkehr oder anderen Verkehrssystemen getrennt“ (§ 1 Abs. 2 BOStrab) sind.

Nach § 53 Abs. 2 „[...] brauchen Züge unabhängiger Bahnen nicht mit Fahrzeugführern besetzt zu sein, wenn

1. Anlagen und Einrichtungen für selbständigen Fahrbetrieb vorhanden sind, die den Forderungen des § 22 entsprechen und nach § 52 Abs. 3 überwacht werden;
2. regelmäßig überprüft wird, dass der lichte Raum des Gleises von Personen und von sicherungstechnisch nicht erfassbaren Hindernissen frei ist;
3. Entgleisungen unmittelbar im System erkannt werden und eine geeignete Beeinflussung der Zugsteuerung erfolgt;
4. zwischen den Fahrgästen und einer Betriebsstelle Sprechmöglichkeit besteht und
5. die Fahrgäste im Notfall unverzüglich gerettet werden können.“

Bei Straßenbahnen, die keine unabhängigen Bahnen sind, ist der Verzicht auf einen Fahrzeugführer derzeit rechtlich grundsätzlich nicht zulässig. Ausnahmen kann die Technische Aufsichtsbehörde nach § 6 BOStrab nur in Einzelfällen zulassen, etwa in besonders definierten Fallkonstellationen mit entsprechend begründetem Sicherheitsnachweis oder im Rahmen einer besonders überwachten Erprobung, z. B. in Form von Pilotprojekten. § 6 der BOStrab ermöglicht jedoch keine generelle Ausnahmeregelung von der Pflicht zur Besetzung der Fahrzeuge mit Fahrpersonal. Ein Einsatz von Automatisierungstechniken ist im Übrigen nach allgemein anerkannten Regeln der Technik zulässig. Dabei müssen die grundlegenden Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.

Für den Fall eines Fahrbetriebs ohne Fahrzeugführer werden in der BOStrab einige weitere Regelungen getroffen. Nach § 16 Abs. 6 muss bei „Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer [...] durch Einfriedungen oder auf andere Weise das unbefugte Betreten, Befahren oder Benutzen des Bahnkörpers verhindert sein.“ Diese und weitere Regelungen wurden bereits in Kapitel 2.2.2 aufgeführt. Sie gehen insgesamt davon aus, dass für den automatisierten Betrieb unabhängiger Bahnen Fahrzeuge eingesetzt werden, welche keine Fähigkeiten zur intelligenten Teilnahme am Straßenverkehr haben. Besonders die Pflicht zur Einfriedung verdeutlicht dies.

8.2.2 Nicht gesetzliches technisches Regelwerk

Die BOStrab verweist in § 2 über die unmittelbaren Regelungen der BOStrab hinaus auf „allgemein anerkannte Regeln der Technik“. Dieser unbestimmte Rechtsbegriff wird im Handbuch der Rechtsförmlichkeit des Bundesministeriums der Justiz (BMJ) folgendermaßen beschrieben:

„Allgemein anerkannte Regeln der Technik sind schriftlich fixierte oder mündlich überlieferte technische Festlegungen für Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach herrschender Auffassung der

beteiligten Kreise (Fachleute, Anwender, Verbraucherinnen und Verbraucher und öffentliche Hand) geeignet sind das gesetzlich vorgegebene Ziel zu erreichen und die sich in der Praxis allgemein bewährt haben oder deren Bewährung nach herrschender Auffassung in überschaubarer Zeit bevorsteht.“ [133]

Das bedeutet, dass bestimmte Regelwerke, wie z. B. DIN-Normen, eine Vermutungswirkung entfalten können, dass sie regelmäßig als allgemein anerkannte Regeln der Technik angesehen werden können. In der Vergangenheit wurden verschiedene Festlegungen in den Technischen Regeln Straßenbahn (TRStrab) zusammengestellt und einem möglichst einvernehmlichen Votum eines Bund-Länder-Fachausschusses zugeführt. Wesentliche Fachkreise wie Verkehrsunternehmen und technische Aufsichtsbehörden wurden bei deren Aufstellung einbezogen. Es gibt mehrere Technische Regeln für Straßenbahnen, z. B. für elektrische Anlagen (TRStrab EA) [134], Signal- und Zugsicherungsanlagen (TRStrab SIG) [135], Zulassung und Abnahme (TRStrab SIG ZA) [136] oder für Bremsen (TRStrab Br) [137].

Aktuell erfolgt eine Bearbeitung von technischen Regelwerken unter der für DIN-Regelwerke üblichen Beteiligung der interessierten Kreise und der Öffentlichkeit, insbesondere im Arbeitsausschuss 19 des DIN-FSF (Städtische Schienenbahnen). Auch der VDV erstellt vielfältige Schriften zu regelungsbedürftigen Sachverhalten bei Verkehrsunternehmen, die u. a. den Betriebsleitern den Erlass von Betriebsvorschriften nach § 8 Abs. 2 und 3 BOStrab erleichtern und bestimmte Vorgehensweisen vereinheitlichen.

Allgemein anerkannte Regeln der Technik konkretisieren die Grundanforderungen der BOStrab. Eine Abweichung von allgemein anerkannten Regeln der Technik ist gemäß § 2 Abs. 2 BOStrab möglich, wenn mindestens die gleiche Sicherheit gewährleistet wird. Diese Vorschrift ist eine Innovationsklausel, die eine Anwendung von innovativen Techniken im Einzelfall auch ohne Änderung von Vorschriften ermöglicht, wenn das bewährte Sicherheitsniveau gewahrt bleibt. Bei allgemein anerkannten Regeln der Technik findet, anders als bei harmonisierten Normen oder direktem Bezug von Rechtsvorschriften auf Normen, kein allgemeiner behördlicher Erlass statt, welche Vorschriften generell zu Grunde zu legen sind. Neben klaren Regelungsinhalten, etwa bei technischen Normen, besteht die Möglichkeit, mit Verwaltungsvorschriften oder Verwaltungsakten oder im Rahmen einer Antragsstellung das anwendbare Regelwerk klar zu bezeichnen (§ 5 Abs. 1 Satz 2 BOStrab und § 62 Abs. 2 Satz 2 BOStrab).

Nur für den Anwendungsbereich der unabhängigen Bahnen in § 53 Abs. 2 BOStrab werden grundlegende Sicherheitsanforderungen beschrieben, die eine Voraussetzung für eine Ausnahme vom Fahrzeugführerprinzip in § 53 Abs. 1 erlauben. Die Technischen Regeln für den Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer (TRStrab FOF) [138] beschreiben im Hinblick auf diese Möglichkeit der BOStrab technische Regeln für den Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer. Sie gelten nur für unabhängige Bahnen nach § 1 Abs. 2 Nr. 2 der BOStrab. Diese müssen einen Bahnkörper ohne Bahnübergänge, einen Sicherheitsraum nach § 19 BOStrab neben jedem Gleis und Zugang zu einem barrierefreien Bahnsteig und Fahrgastein- und -ausstiege ohne Trittstufen aufweisen. Abweichungen hiervon sind wiederum möglich, wenn mindestens die gleiche Sicherheit gewährleistet ist. In den TRStrab FOF werden folgende Bereiche für unabhängige Bahnen geregelt:

- Überprüfung des lichten Raumes
- Betrieb (insb. Störfallregelungen: Stillsetzen des Fahrbetriebs, Abschalten der Fahrspannung, Konzepte für die Bergung von Fahrgästen)
- Bahnkörper
- Haltestellen
- Fahrzeuge (Türen für den Fahrgastwechsel, Abschaltseinrichtungen)

Eine Bedeutung für die Regelung des Straßenbahnverkehrs haben auch europäische Normen. Auf Ebene der Europäischen Union besteht, u. a. aus Gründen des einheitlichen europäischen Binnenmarktes für Produkte und Dienstleistungen, ein Interesse an einer Standardisierung. Die europäischen Normungsgremien setzen sich zusammen aus CEN (Europäisches Komitee für Normung), CENELEC (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) und ETSI (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen).

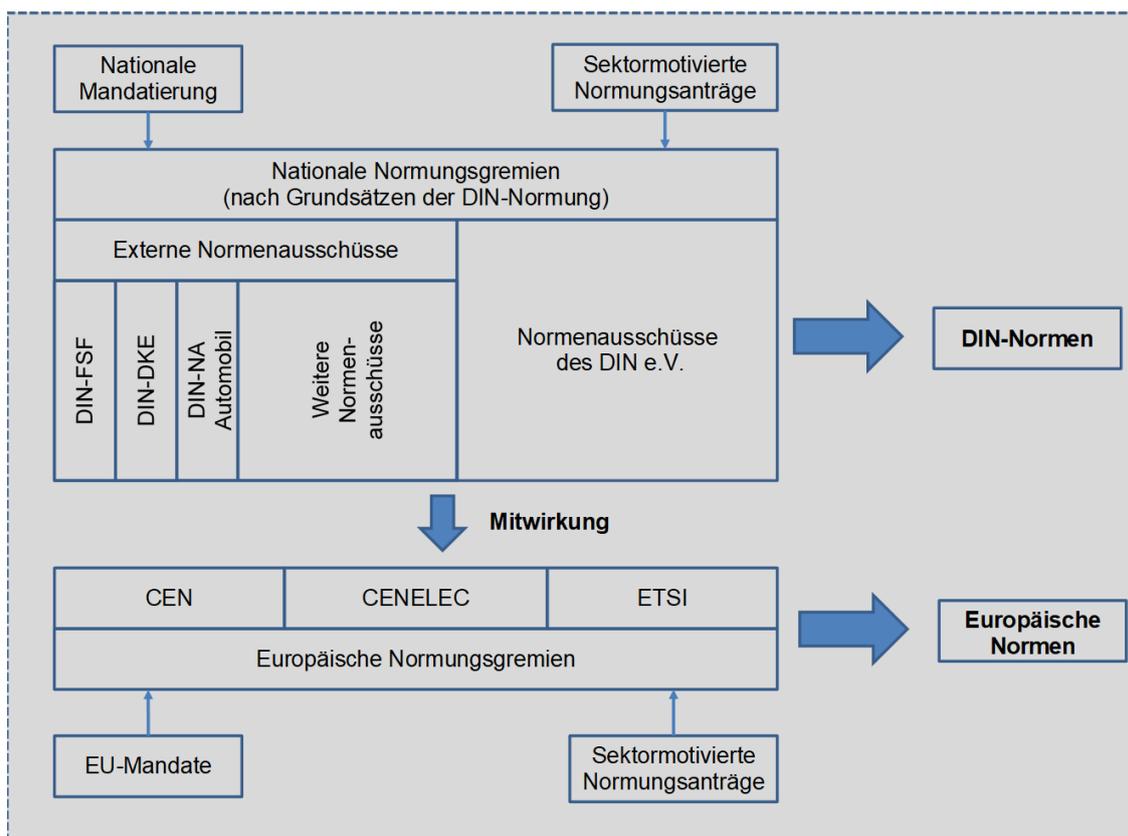


Abbildung 8-2: Übersicht zur grundsätzlichen Aufstellung technischer Regeln

Der grundsätzliche Aufstellungsprozess technischer Regeln wie Normen oder Richtlinien auf europäischer und nationaler Ebene ist in Abbildung 8-2 dargestellt. Die Aufstellung technischer Regeln kann dabei beispielsweise durch eine Mandatierung oder durch einen sektormotivierten Antrag erfolgen. Im Straßenbahnbereich hatte die Europäische Kommission mit einem Planungs- und Normungsauftrag an die europäischen Normungsgremien auf dem Gebiet des Schienenverkehrs vom 4. Februar 2011 (Mandate M/486) die Initiative ergriffen und in Abstimmung mit den beteiligten Kreisen in den Normungsgremien ein Normungsprogramm ausarbeiten lassen. Dieses enthält eine Liste vorrangig zu bearbeitender Normungsgegenstände. Zum damaligen Zeitpunkt war in der Eisenbahn-Interoperabilitätsrichtlinie 2008/57/EG eine Ausnahme-Option für Straßenbahnen vorgesehen, was im Umkehrschluss eine Geltung der EU-Richtlinie im Fall ohne Nutzung der Ausnahme-Option bedeutet hätte. Für Deutschland wurde die Ausnahme-Option zur Geltung der Richtlinie mit § 65 des PBefG rechtlich festgestellt. Nachdem die Richtlinie 2016/797/EU, welche die Richtlinie 2008/57/EG ersetzt hat, eine Geltung für Straßenbahnen generell nicht mehr vorsah, ist das Mandat M486 von der EU-Kommission nicht weiterverfolgt oder aktualisiert worden.

Unbeschadet davon bleibt, dass nach der generellen Verfasstheit der Normung in Europa in Bereichen ohne harmonisierte Normen angestrebt wird, Normen zur freiwilligen Anwendung auf europäischer Ebene festzulegen, um den einheitlichen europäischen Binnenmarkt durch einheitliche technische Standards zu erleichtern. Normungsarbeiten bei CEN, CENELEC und ETSI im Bereich städtischer Schienenbahnen können auf freiwilliger Basis weiterverfolgt werden. Entsprechende Normungsvorhaben sind veröffentlicht worden.

Auf nationaler Ebene erfolgt die Normung nach Grundsätzen des DIN. Die Normungsarbeit ist in Normungsausschüssen organisiert, die eine Normung in bestimmten fachlich abgegrenzten Bereichen verfolgen. Für Straßenbahnen ist insbesondere der DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge

(FSF) zu nennen. Mit seinem Arbeitsausschuss 19 bearbeitet er die Normung für städtische Schienenbahnen. Beim DIN FSF handelt es sich um einen externen Normenausschuss, welcher die Aufgabe hat, die Normungsarbeit für die Gebiete Schienenfahrzeuge, Schienenverkehrsnetze und Bahnbetrieb durchzuführen und die deutschen Interessen in den europäischen und internationalen Normungsgremien zu vertreten. Der Normenausschuss steht allen interessierten Kreisen offen. In der DIN 820 [139], welche die Grundsätze der Normungsarbeit in der DIN regelt, werden als interessierte Kreise u. a. Anwender, Behörden, Hochschulen, Handel, industrielle Hersteller, Prüfinstitute, Sachverständige, Verbände und Verbraucher benannt. Anwendungsfelder für die Normung werden insbesondere in der Wirtschaft, Wissenschaft, Technik und Verwaltung gesehen. In § 6 Abs. 1 Satz 2 zum DIN-Vertrag ist der Abbau technischer Handelshemmnisse als Ziel festgeschrieben. Die deutsche Industrienormung DIN wirkt daher verstärkt und mit einer klaren Priorität an europäischen Normungsprojekten mit. Die erarbeiteten Normen sollen als allgemein anerkannte Regeln der Technik genutzt werden.

Die geltenden Normen und technischen Regelwerke werden fortlaufend durch Facharbeitskreise überarbeitet, um sie an veränderte Rahmenbedingungen, wie neue Fahrzeuge, Infrastrukturänderungen oder Neuerungen im Betrieb, anzupassen. Strukturell können dabei Defizite bestehen, da bestimmte Technikbereiche nicht oder nicht ausreichend vernetzt betrachtet werden. Für den Bereich Straßenbahnautomatisierung sollte ein konsistenter Satz an Normen bestehen. Eine qualitativ hochwertige Normung könnte man z. B. durch aktive Mitwirkung, durch Werbung zu aktiver Mitwirkung, durch finanzielle Budgets oder die Abordnung von Fachleuten in die Normung erzielen. Unterstützt werden könnte der Prozess durch die Definition von Arbeitsaufträgen zum Entwurf und zur Abstimmung von Fach-Schriftstücken als Beitrag für Normen sowie durch Projektförderung, Projektfinanzierung oder institutionelle Förderung.

8.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Anforderungen im Verkehrsbereich für einen automatisierten Betrieb

8.3.1 Kraftfahrzeugverkehr

Die Grundlagen für den Betrieb autonomer Kraftfahrzeuge sind im Straßenverkehrsgesetz (StVG) [140] festgehalten. Das StVG wurde um Regelungen für den Betrieb von Kraftfahrzeugen mit hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktion ergänzt. Das Gesetz zum autonomen Fahren, welches § 1a des StVG neu gefasst hatte, ist am 28. Juli 2021 in Kraft getreten. Im Folgenden wird ein Einblick in die Regelungen des StVG zum autonomen Fahren gegeben.

Nach § 1a Abs. 1 ist der „Betrieb eines Kraftfahrzeuges mittels hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktion [...] zulässig, wenn die Funktion bestimmungsgemäß verwendet wird.“ Dabei müssen u.a. folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die technische Ausrüstung muss jederzeit durch den Fahrzeugführer manuell übersteuerbar oder deaktivierbar sein.
- Die Erforderlichkeit der eigenständigen Fahrzeugsteuerung durch den Fahrzeugführer muss erkannt werden.
- Der Fahrzeugführer muss das Erfordernis der eigenhändigen Fahrzeugsteuerung mit ausreichender Zeitreserve vor der Abgabe der Fahrzeugsteuerung an ihn mitgeteilt bekommen.

Als Fahrzeugführer zählt dabei „auch derjenige, der eine hoch- oder vollautomatisierte Fahrfunktion [...] aktiviert und zur Fahrzeugsteuerung verwendet, auch wenn er [...] das Fahrzeug nicht eigenhändig steuert.“ (§ 1a Abs. 4).

Nach § 1b Abs. 1 (StVG) darf sich der Fahrzeugführer vom Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugsteuerung abwenden, wenn er dabei derart wahrnehmungsbereit bleibt, dass er den in Abs. 2 geregelten Pflichten jederzeit nachkommen kann. Demnach ist der Fahrzeugführer verpflichtet, die Fahrzeugsteuerung unverzüglich zu übernehmen, wenn das hoch- oder vollautomatisierte System ihn dazu auffordert oder wenn er erkennt oder erkennen muss, dass die Voraussetzungen für eine bestimmungsgemäße Verwendung der hoch- oder vollautomatisierten Fahrfunktionen nicht mehr vorliegen.

In § 1e (StVG) ist unter Abs. 1 geregelt, wann der Betrieb eines Kraftfahrzeugs mittels autonomer Fahrfunktion zulässig ist. Dabei sind nach Abs. 2 u.a. folgende Anforderungen an die technische Ausrüstung von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion vorgesehen:

- Das Kfz muss die Fahraufgabe innerhalb des festgelegten Betriebsbereiches selbständig bewältigen können.
- Die autonome Fahrfunktion muss den Verkehrsvorschriften selbständig entsprechen können.
- Das Fahrzeug muss über ein System zur Unfallvermeidung verfügen. Bei einer unvermeidbaren alternativen Schädigung genießt das menschliche Leben die höchste Priorität. Über das Menschenleben hinaus erfolgt keine weitere Gewichtung anhand persönlicher Merkmale.
- Die autonome Fahrfunktion muss ihre Systemgrenzen erkennen und bei Bedarf das Kfz in einen risikominimalen Zustand versetzen können.
- Sie muss ein von der technischen Aufsicht vorgegebenes Fahrmanöver überprüfen und das Kfz bei einer durch das Manöver bedingten Gefährdung von am Verkehr teilnehmenden oder unbeteiligten Personen in einen risikominimalen Zustand versetzen. Bei der technischen Aufsicht handelt es sich um eine externe Zentrale, welche die ordnungsgemäße Funktion von autonomen Fahrzeugen überwacht und bei Bedarf in deren Steuerung eingreifen kann.
- Sie muss eine Beeinträchtigung ihrer Funktionalität der technischen Aufsicht sofort anzeigen.
- Sie muss immer durch die technische Aufsicht oder Fahrzeuginsassen deaktiviert werden können.
- Sie hat über eine ausreichend stabile und vor unautorisierten Eingriffen geschützte Funkverbindung, insbesondere zur technischen Aufsicht, zu verfügen. Sollte die Funkverbindung abbrechen oder darauf unerlaubt zugegriffen werden, ist das Kfz selbständig in einen risikominimalen Zustand zu versetzen.

§ 1f des StVG regelt die Pflichten der Beteiligten beim Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion. Zu diesen zählen der Fahrzeughalter, die technische Aufsicht und der Fahrzeughersteller. Die technische Aufsicht muss:

- Die autonome Fahrfunktion unverzüglich deaktivieren, wenn dies durch das Fahrzeugsystem angezeigt wird.
- Signale der technischen Ausrüstung zum eigenen Funktionsstatus bewerten und gegebenenfalls erforderliche Maßnahmen zur Verkehrssicherung einleiten.
- Unverzüglich Kontakt mit den Insassen des Kfz herstellen und die zur Verkehrssicherung notwendigen Maßnahmen einleiten, wenn das Kfz in den risikominimalen Zustand versetzt wird.

Der Fahrzeughersteller wiederum muss sicherstellen und nachweisen, dass die elektronische und elektrische Architektur vor Angriffen gesichert ist und zudem eine für das autonome Fahren ausreichend sichere Funkverbindung nachweisen.

Das StVG regelt grundsätzlich den Straßenverkehr. In § 1a trifft das StVG allerdings nur Regelungen für Kraftfahrzeuge, Straßenbahnen bleiben außen vor. Regelungen für die autonome Teilnahme von Straßenbahnen am Straßenverkehr trifft das StVG bislang nicht. Es könnte geprüft werden, ob man den Anwendungsbereich der Regelungen auch auf Straßenbahnen erweitert, welche am Straßenverkehr teilnehmen. Alternativ könnte man eine analoge Regelung auch für Straßenbahnen vorsehen. Das Fahren auf Sicht, welches bei Straßenbahnen auf oberirdischen Strecken bis zu einer Geschwindigkeit von 70 km/h zulässig ist (vgl. § 49 Abs. 2 BOStrab), ähnelt bei grundlegenden Merkmalen dem Betrieb autonomer Kraftfahrzeuge, auch wenn Besonderheiten wie etwa Bremsfähigkeit und Spurführung zu berücksichtigen wären. Für das Fahren auf unabhängigem Bahnkörper bzw. bei Strecken mit Zugsicherungssystemen, könnte für Straßenbahnen eine analoge Regelung zum fahrerlosen Fahren bei unabhängigen Bahnen (§ 53 BOStrab) geprüft werden. Allerdings ist nicht alleine die technische Anforderung zur sicheren Bewältigung von Fahraufgaben für eine Übertragbarkeit von Regelungen relevant, sondern auch die Frage, ob vergleichbare Regelungen zur Verantwortung und Haftung, etwa im Falle des Ausfalls oder Versagens technischer Systeme, zur Anwendung kommen könnten.

Die Umsetzung des Betriebs automatisierter bzw. autonomer Kraftfahrzeuge wird durch die „Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften“ geregelt.

8.3.2 Eisenbahnverkehr

Die gesetzliche Grundlage für den Eisenbahnverkehr bildet das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG). Der Betrieb von Eisenbahnen wird über die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) geregelt. In der EBO ist beispielsweise festgelegt, dass „Signalen am Fahrweg (entsprechende) Anzeigen im Führerraum gleichgestellt (sind)“ (§ 14 Abs. 1 (EBO)). Von Relevanz ist dies hauptsächlich, um den Verzicht auf Außensignale bei einer Zugbeeinflussung im European Train Control System (ETCS) Level 2 oder höher zu ermöglichen. Grundsätzlich ist im Eisenbahnbetrieb für die Fahrt im Geschwindigkeitsbereich über 50 km/h eine Zugbeeinflussung vorgeschrieben. „Strecken, auf denen mehr als 160 km/h zugelassen sind, müssen mit Zugbeeinflussung ausgerüstet sein, durch die ein Zug selbsttätig zum Halten gebracht und außerdem geführt werden kann.“ § 15 Abs. 3 (EBO). Mit der Punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB) und der Linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB) sind im Eisenbahnverkehr damit längst Automatisierungstechnologien zur Erhöhung der Sicherheit gesetzlich vorgeschrieben und im Einsatz.

8.3.3 Anforderungen an einen Rechtsrahmen

Der VDV hat im Jahr 2020 ein Positionspapier veröffentlicht, welches sich mit „Eckpunkte(n) zum Rechtsrahmen für einen vollautomatisierten und fahrerlosen Level 4 Betrieb im öffentlichen Verkehr“ [141] beschäftigt. Das Positionspapier wurde vom VDV als Stellungnahme auf den zum Zeitpunkt der Veröffentlichung in Kürze zu erwartenden Erlass des Gesetzes zum autonomen Fahren im Kfz-Bereich erstellt. Es bezieht sich wesentlich auf das autonome Fahren im Straßenverkehr und gibt dort Hinweise zum Betrieb im öffentlichen Verkehr. Im Positionspapier werden Anforderungen an einen Rechtsrahmen für Level 4 ÖV genannt. In der folgenden Tabelle 8-1 werden die im Positionspapier genannten Punkte und zugehörige Handlungserfordernisse kurz dargestellt.

Die vom VDV genannten Herausforderungen beziehen sich auf einen vollautomatisierten und fahrerlosen Level 4 Betrieb im öffentlichen Straßenverkehr. Der ÖV-Betrieb mit Straßenbahnen ist dabei nicht eingeschlossen. Da hinsichtlich eines autonomen bzw. automatisierten ÖV-Betriebs mit Bussen oder anderen Kraftfahrzeugen die gleichen rechtlichen Fragestellungen auftreten, geben die genannten Punkte auch für den Straßenbahnbetrieb sehr gut wieder, wo noch rechtlicher Regelungsbedarf besteht und welche Ansatzpunkte es hierfür gibt. Ausgenommen hiervon ist der Punkt „BOKraft-Anpassung für den fahrerlosen ÖPNV-Betrieb“. Dieser bezieht sich ausschließlich auf die Beförderung von Fahrgästen mit Kraft-

TABELLE 8-1: ZUSAMMENFASSUNG DER STANDPUNKTE DES VDV ZU DEN ANFORDERUNGEN AN EINEN RECHTSRAHMEN FÜR LEVEL 4 ÖV

Thema	Anforderungen
Genehmigung und Zulassung von Kraftfahrzeugen mit autonomen Fahrfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung eines Rechtsrahmens für Zulassung und Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomen Fahrfunktionen im ÖV außerhalb der Ausnahmenvorschriften ▪ Berücksichtigung der jeweiligen Umgebungsbedingungen ▪ Technischer Anforderungskatalog zum Leistungsumfang der Fahrzeuge
ÖV-Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomen Fahrfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwindung Fahrzeugführerprinzip ▪ Vorschrift zur technische Ausrüstung für den Betrieb normieren ▪ technische, funktionale und betriebliche Anforderungen per Verordnung regeln
Neue Erprobungsgenehmigung, Sondertatbestand für „Versuchsfahrzeuge und Versuchskonzepte“	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zentrale Erprobungsgenehmigung für Fahrzeuge, welche noch nicht sämtliche Anforderungen des technischen Anforderungskatalogs erfüllen
Verantwortliche und am Betrieb beteiligte Personen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausgleich Wegfall des Fahrzeugführers durch eine Rechtsfigur in Form einer betrieblich-technischen Aufsicht mit klaren Verantwortlichkeiten, Anforderungen und Qualifikationen
Fähigkeiten und Pflichten der betrieblich-technischen Aufsicht	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übernahme Fahrzeugsteuerung durch betrieblich-technische Aufsicht bei Störungen ▪ Voraussetzungen und Anforderungen für teleoperierten Betrieb per Fernsteuerung
Fahrzeugdaten: Datenzüge und betrieblich-technische Integration	<ul style="list-style-type: none"> ▪ einfacher Zugang zu system- und betriebsrelevanten Fahrzeugdaten ▪ Verpflichtung zur unentgeltlichen Überlassung von system- und betriebsrelevanten Fahrzeugdaten durch die Fahrzeughersteller
Software-Aktualisierungen und Betriebserlaubnis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierungssysteme vor Cyberrisiken schützen ▪ Gewährleistung Automatisierungssysteme durch Hersteller
Erweiterte Halterpflichten hinsichtlich Sicherheit und Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Fahrzeughalter verpflichten, erweiterte Anforderungen und Pflichten bezüglich der technischen Überwachung, Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge und der dazugehörigen Dokumentation zu übernehmen ▪ tägliche Selbstprüfung des Fahrzeugs und Testbetrieb der Fahrfunktionen im autonomen Betriebsmodus
Verzicht auf fahrgastseitige Verpflichtungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wahrnehmung der sonstigen Verkehrspflichten durch die Betreiber
BOKraft-Anpassung für den fahrerlosen ÖPNV-Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erstellung eines eigenen Anforderungs- und Pflichtenkatalogs für die Beförderung von Fahrgästen mit fahrerlosen Kraftfahrzeugen

fahrzeugen oder Obussen und liegt damit außerhalb der Regelung des Straßenbahnverkehrs (vgl. § 1 Abs. 1 BOKraft). Hervorzuheben ist für den Straßenbahnbereich die Notwendigkeit der Festlegung eines technischen Anforderungskataloges an automatisierte/autonome Fahrzeuge, welcher das erforderliche Leistungsspektrum definiert. Für die Automatisierungstechnologie selbst sind Normen zu setzen, um den Wettbewerb für deren Herstellung zu fördern. Fehlende Normen können bei der Entwicklung von Automatisierungstechnologie die Preise in die Höhe treiben und stehen damit einem breiten Einsatz entgegen. Wie vom VDV für die BOKraft gefordert, könnte auch die BOStrab für die Ermöglichung eines fahrerlosen Betriebes angepasst und erweitert werden.

Wie in der Richtlinie 2010/40 der EU „zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern“ [142] unter Abs. 7 für die Einführung von IVS gefordert, sollten auch für die Einführung von Automatisierungstechnologie im Straßenbahnbetrieb in der gesamten Union Spezifikationen und Normen mit detaillierten Bestimmungen und Verfahren definiert werden. Deren Vereinbarkeit mit festgelegten Grundsätzen ist vorab von der EU-Kommission zu prüfen. Ob Abs. 7 auch den Straßenbahnbereich umfasst, geht aus der Richtlinie 2010/40 der EU nicht explizit hervor. Für den Rechtsrahmen relevant ist die Frage, wer die erforderlichen Maßnahmen festlegt und koordiniert.

Des Weiteren werden in der EU-Richtlinie 2010/40 u. a. Vorgaben zum Datenschutz oder zur Nutzung von Ortungstechnologien gemacht. Entsprechende Regelungen auf EU-Ebene sind auch für die Einführung automatisierten/autonomen Fahrens notwendig. Die Frage der Standards für die Datenübertragung in intelligenten Verkehrssystemen sollte an geeigneter Stelle auch für Straßenbahnen verfolgt werden. Hierzu sind die dazu erforderlichen Arbeitspakete zu adressieren, welche die IVS-Richtlinie umsetzen. Eine formale Umsetzung der Richtlinie in Deutschland ist mit dem IVS-Gesetz erfolgt. Ein offener Punkt sind die Abläufe der Mitwirkungsprozesse zur Erstellung der Spezifikationen oder Normen für den Straßenbahnbereich.

8.4 Ansatzpunkte zur Regelung eines automatisierten Straßenbahnbetriebs

8.4.1 Grundlegende Fragestellungen

Die im Kapitel 8.3 vorgestellten aktuellen rechtlichen Regelungen zum automatisierten Fahren bilden eine mögliche Basis für die Regelung eines automatisierten/autonomen Straßenbahnverkehrs. So verkehren Straßenbahnen, wie der Kraftfahrzeugverkehr, im Straßenraum, womit für sie vergleichbare Rahmenbedingungen vorliegen. Im StVG werden bereits Fragestellungen zum automatisierten bzw. autonomen Fahren, beispielsweise zur Verkehrssicherheit oder zur Sicherheit der Funkverbindung, adressiert. Auch die im Zuge der Systemgrenzen genannten Regelungen lassen sich auf den Straßenbahnbereich übertragen. So müsste auch für diesen u. a. geregelt werden, wie und in welchen Fällen das System zum automatisierten/autonomen Fahren die Steuerungsaufgabe an die technische Aufsicht bzw. einen Fahrzeugführer übergibt oder wann eine automatisierte/autonome Straßenbahn in den risikominimalen Zustand zu wechseln hat.

Wie genau die Verwendung bestehender rechtlicher Regelungen für den Straßenbahnverkehr stattfinden kann, gilt es zu diskutieren. Grundsätzlich existieren zwei denkbare Wege, bestehende rechtliche Regelungen, etwa aus dem Kfz-Bereich, auf den Straßenbahnbereich zu übertragen:

1. Die straßenverkehrsrechtlichen Regelungen werden auf den Straßenbahnverkehr ausgeweitet. Viele Regelungen des StVG, speziell die Regelungen der StVO, welche das StVG umsetzt, gelten nicht nur für Kraftfahrzeuge, sondern für Fahrzeuge allgemein. Eine Einengung der Regelungen des StVG auf Kraftfahrzeuge könnte aufgehoben und die Geltung der Regelungen auf den Straßenbahnbetrieb im Straßenverkehr ausgeweitet werden. § 55 Abs. 1 Satz 1 der BOStrab stellt klar, dass für Straßenbahnen im dort geregelten Fall die Rechtsvorschriften zur Teilnahme am Straßenverkehr zur Anwendung kommen. Satz 2 konkretisiert dies nochmals für das Verhalten des Fahrpersonals, ohne dass die Geltung des Satzes 1 zur Anwendbarkeit straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften nur auf diesen Fall beschränkt wäre. Sachverhalte zu Straßenbahnen könnten auch straßenverkehrsrechtlich geregelt werden.
2. Straßenverkehrsrechtliche Regelungen werden in einer anderen (straßenbahnspezifischen) Vorschrift für anwendbar erklärt, die Regelungen inhaltsgleich übernommen oder von den Verkehrsbetrieben und technischen Aufsichtsbehörden als allgemein anerkannte Regeln der Technik angewandt.

Der Betrieb von fahrerlosen Straßenbahnen außerhalb des Straßenverkehrs müsste in der BOStrab geregelt werden. Die Anforderungen, wann nach § 53 BOStrab auf einen Fahrzeugführer verzichtet werden kann, könnte zunächst im Sinne des § 2 Abs. 2 über den Nachweis gleicher Sicherheit verfolgt werden. Die grundlegenden Anforderungen könnten dabei allgemein gefasst sein. So wäre ein fahrerloser Betrieb zulässig, wenn die Bedingungen der §§ 1a bis 1l des StVG erfüllt sind. Alternativ wäre ein Katalog, z. B. analog § 53 Abs. 2 der BOStrab möglich.

Eine rechtliche Regelung zur Übergabe der Verantwortlichkeit des Fahrpersonals an eine technische Aufsicht im Sinne des StVG wäre sowohl in straßenverkehrsrechtlichen als auch in personenbeförderungsrechtlichen Rechtsvorschriften zu prüfen. Dabei ist das Vorhandensein der technischen Voraussetzungen zur Einhaltung der straßenverkehrsrechtlichen Bestimmungen erforderlich. Bei Rechtsvorschriften für eine Datenübertragung für intelligente und vernetzte Verkehrssysteme im Stadtverkehr könnte eine Regelung auf Grundlage von Gesetzen wie dem Intelligenten Verkehrssysteme Gesetz (IVSG) erfolgen.

Eine Verordnung über den Betrieb automatisierter/autonomer Straßenbahnen müsste über die genannten Themenbereiche hinaus weitere spezifische Themenstellungen eines automatisierten Straßenbahnverkehrs adressieren. Hierfür ist die Frage zu klären, in welchen Bereichen aktuell noch Bedarf für eine Regelung besteht. Werden Bereiche bereits an anderer Stelle hinreichend geregelt oder ist eine Regelung nicht angemessen oder zielführend, kann auf eine separate Regelung verzichtet werden. Ist eine Regelung notwendig gilt es zu klären, ob sich die Problemstellung in Eigenverantwortung regeln lässt, also z. B. über DIN-Normen, Betriebsanweisungen oder Produktsicherheits-Regeln. Grundlegende Anforderungen bzw. Fragestellungen, welche es für einen fahrerlosen Betrieb von Straßenbahnen zu klären gilt, ergeben sich u. a. für die Themenbereiche:

- Fahrgastwechsel/Verhalten der Fahrgäste (z. B. Umgang mit Blockieren der Türen)
- Barrierefreiheit
- Betriebsabwicklung bei Störungen und Umleitungen (z. B. Weichen- oder Türstörung)
- Konfliktverhalten/Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmenden
- Erkennen von Hindernissen
- Vorausschauende Bewertung von Ereignissen
- Realisierbare Taktichte
- Fahrzeugverhalten bei Unfallschäden (z. B. Beschädigung Sensorik)
- Betriebslenkung und Disponierung (z. B. durch Fernbedienung aus der Leitstelle, Teleoperation)
- Softwareschutz/Datenschutz

Die genannten Fragestellungen sind nicht nur für einen autonomen Straßenbahnverkehr, sondern auch für einen autonomen Busverkehr relevant. Es erscheint daher sinnvoll, Regelungen zu einem autonomen ÖPNV für Straßenbahnen und Busse verkehrsmittelübergreifend vorzunehmen. Auf der EU-Ebene gilt es zu analysieren, welche Standards europaweit verbindlich für den Straßenbahnbereich bzw. ÖPNV geregelt werden müssen, damit Hersteller und Verkehrsunternehmen nachhaltig in Kommunikationssysteme zu intelligenter und vernetzter Fahrzeug-Infrastrukturkommunikation investieren können.

8.4.2 Ansatzpunkte zur Regelung eines automatisierten Straßenbahnbetriebs in der BOStrab

Anhand einiger Beispiele wird nachfolgend diskutiert, welche Ansatzpunkte zur Regelung eines automatisierten Straßenbahnbetriebs die BOStrab bietet bzw. welche Regelungslücken vorhanden sind. In Abbildung 8-3 werden für die diskutierten Ansatzpunkte in der BOStrab Beispiele für Querschnittstechnologien angeführt und diese hinsichtlich ihres Anwendungsbereiches verortet. Es zeigt sich, dass die Automatisierungstechnologien auch für andere Verkehrsmittel von großer Relevanz sind und eine unabhängig voneinander entwickelte Regelung der Anforderungen und deren Einsatzes daher wenig sinnvoll erscheint.

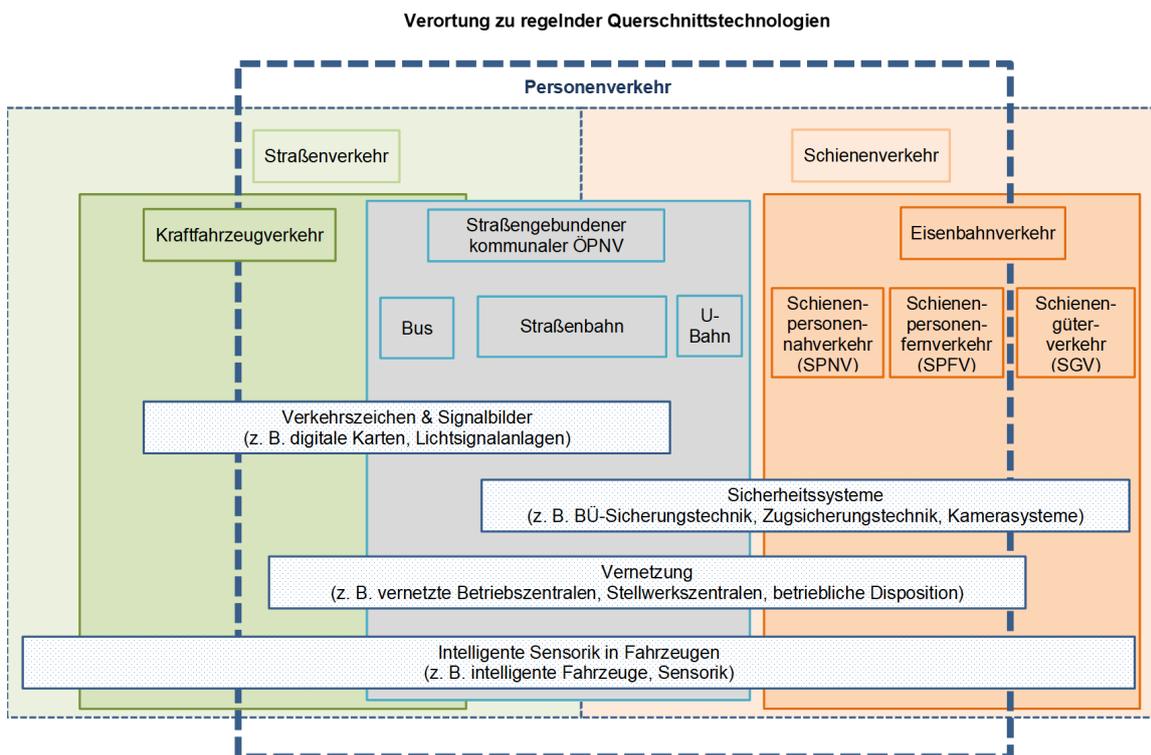


Abbildung 8-3: Verortung der Beispiele zu regelnder Querschnittstechnologien

8.4.2.1 Verkehrszeichen & Signalbilder

Für einen automatisierten Betrieb von Straßenbahnen fehlt unter dem Bereich „Betriebsanlagen“ bisher ein Hinweis, wie zukünftig mit Signalanlagen umzugehen ist. Die StVO lässt eine Übermittlung von Verkehrszeichen oder Signalbildern bislang ausschließlich über Schilder, Markierungen oder Lichtzeichen zu. In der BOStrab selbst scheint eine digitale Übermittlung von Verkehrszeichen oder Signalbildern hingegen einfacher regelbar zu sein, auch ohne eine entsprechende Rechtsänderung vornehmen zu müssen. So

ist in § 51 Abs. 1 (BOStrab) die Rede von Signalen im erforderlichen Umfang. Es wäre entsprechend klarzustellen, ob dieser erforderliche Umfang geringer wird, wenn Aufträge bzw. Signale sicher digital übertragen werden. Mögliche Wege wären hier die Führerstandssignalisierung oder unmittelbare Steuerungsinformationen für ein Fahrzeug. Notwendig wäre dabei der Nachweis gleicher Sicherheit gegenüber einer Signalbild-Erkennung durch Fahrpersonal entsprechend § 2 Abs. 2 BOStrab, wenn man den § 51 Abs. 2 BOStrab genauso restriktiv auslegen würde, wie den § 45 Abs. 4 der StVO. Die StVO verlangt bisher bei der Teilnahme am Straßenverkehr die Erkennung der Verkehrszeichen und ggf. Lichtzeichen. Beim Einsatz autonomer Fahrzeuge könnte dies durch Kameras erfolgen. Vorstellbar wäre in der StVO eine Rechtsänderung beim Nachweis der sicheren Signalübertragung auf anderem Wege, z. B. über Funk. Die rechtliche Voraussetzung zur amtlichen verkehrsbehördlichen Anordnung über digitale Karten oder über digitale Funkübertragung bei dynamischen Daten besteht in der StVO bisher nicht. Speziell für den ÖPNV im Linienverkehr wären Ausnahmen denkbar. Ein ÖPNV-Unternehmen kann Fahrzeuge so ausstatten, dass die Fahrzeuge amtliche Zeichen z. B. über digitale Karten erkennen. Für den räumlich begrenzten Linienweg von Straßenbahnen könnten alle amtlichen Verkehrszeichen in eine digitale Karte eingetragen werden. Eine wichtige Voraussetzung der Nutzung digitaler Karten ist die Sicherstellung deren Aktualität. Bei kurzfristigen punktuellen Änderungen der Verkehrslenkung, z. B. in Folge eines Unfalls, bei einem Feuerwehreinsatz oder einer kurzfristig erforderlichen Baustelle sowie bei einer Verkehrsregelung durch die Polizei dürfte dies schwierig werden. Für solche Fälle müsste eine Rückfallebene geschaffen werden. Außerdem wäre ein rechtzeitiges Erkennen von Ausnahmesituationen durch autonome Fahrzeuge erforderlich, um die Rückfallebene bei Bedarf automatisch zu aktivieren. In Bezug auf die Nutzung digitaler Karten könnte geprüft werden, ob straßenverkehrsrechtlich ÖPNV-spezifische Regelungen getroffen werden können.

Es stellt sich die Frage, wie die automatisierten Straßenbahnen ihre Informationen künftig beziehen sollen und ob sie über ein System verfügen müssen, welches Signale oder auch Verkehrszeichen erkennen und die durch diese transportierten Informationen verarbeiten und umsetzen kann. Zugsicherungssysteme bieten bereits heute die Grundlagen, um Signale qualifiziert an Straßenbahnfahrzeuge zu übertragen und sie dort anzuzeigen. Mittels einer Betriebsanweisung kann ein Betriebsleiter die sichere digitale Übermittlung von Signalbegriffen regeln. Für den StVO-Bereich ist die Zulässigkeit der redundanten digitalen Übermittlung von bestimmten Zeichen oder Signalen zu ermitteln. Mit den Verkehrsbehörden, den Bau- lastträgern und den Straßenverkehrsteilnehmern sind mindestens drei verschiedene Rechtspersonen mit Schnittstellen involviert, bei welchen rechtliche Schnittstellenregelungen ggf. notwendig wären.

8.4.2.2 Sicherheitssysteme

Im Abschnitt „Fahrzeuge“ der BOStrab sind Ergänzungen beim Thema unbeabsichtigte Zugtrennungen (§ 36 Abs. 9) und Fahrgast-Notbremsung (§ 36 Abs. 10) erforderlich. Ergänzungs- bzw. Änderungsbedarf gibt es auch bezüglich des Themas Fahrsteuerung. Hierzu wird in der BOStrab bisher gefordert, dass „Personenfahrzeuge [...] eine Sicherheitsfahrerschaltung haben (müssen), die bei Ausfall des Fahrzeugführers eine Bremsung bis zum Stillstand bewirkt“ (§ 38 Abs. 2). Für einen automatisierten Betrieb ist ein Sicherheitstool vorzuschreiben, welches bei Ausfall des automatischen Systems das Fahrzeug bis zum Stillstand abbremst. Inwieweit ein solches bereits in der Sicherheitsarchitektur einer automatisierten Straßenbahn eingeschlossen ist, gilt es im Rahmen einer Risikoanalyse zu betrachten. Beim Abschnitt „Betrieb“ ist das Fahren auf Sicht (§ 49 Abs. 1) ein wichtiger Punkt. Das Sichtfeld des Fahrzeugführers wird beim automatisierten Fahren durch das Sichtfeld von Kameras ersetzt und die menschliche Wahrnehmung durch die automatisierte Verarbeitung der Kamerabilder und Messwerte von Sensoren. Es sind für das Automatisierungssystem genaue Vorgaben zu definieren, wie es sich in welcher Situation der Annäherung zu verhalten hat. Hierbei gilt es auch die Frage zu klären, welche Fähigkeiten zur Intentionsschätzung die künstliche Intelligenz haben muss.

8.4.2.3 Betriebsbedienstete

Genauer zu definieren ist der Einsatz von Betriebsbediensteten. Bislang wird gefordert, dass „Betriebsanlagen oder Fahrzeuge, die ganz oder teilweise selbsttätig arbeiten oder fernbedient werden, [...] im Rahmen der betrieblichen Erfordernisse von Betriebsbediensteten auf einwandfreie Funktion überwacht werden (müssen)“. Die Teilnahme am Straßenverkehr ist für automatisierte Straßenbahnen bisher nicht gestattet. Hierfür müsste § 55 „Teilnahme am Straßenverkehr“ geändert werden. Alternativ bestünde die Möglichkeit, die Teilnahme von automatisierten Straßenbahnen am Straßenverkehr im StVG zuzulassen. Ob in diesem Fall eine Ausnahme von § 55 Abs. 1 Satz 2 zu regeln wäre, müsste geklärt werden.

Ein grundlegender, für einen automatisierten Straßenbahnbetrieb zu regelnder Punkt, ist das „Besetzen der Züge mit Fahrbediensteten“ (§ 53). Alle Straßenbahnen sind, bis auf unabhängige Bahnen unter bestimmten Voraussetzungen, mit einem streckenkundigen Fahrzeugführer zu besetzen. Eine Neuregelung bzw. Auflösung des Fahrzeugführerprinzips für automatisierte Straßenbahnen ist grundsätzlich notwendig, um einen wirtschaftlichen automatisierten Betrieb ermöglichen zu können. Hier sind Regelungen erforderlich, welche über die Ausnahmenregelung (§ 6) der BOStrab hinausgehen. Dies gilt auch bereits, um die in Kapitel 5 mittels einer Betriebssimulation ermittelten wirtschaftlichen Potenziale einer Automatisierung bei Verbleib des Fahrpersonals auf dem Fahrzeug freisetzen zu können.

8.4.3 Ansatzpunkte PBefG

Das PBefG ist das Stammgesetz der BOStrab. Die erforderlichen Ausführungsvorschriften nach § 57 Abs. 3 sind in der BOStrab, einer Rechtsverordnung zur Konkretisierung der Regelungsbereiche des PBefG, gefasst. Das PBefG regelt damit den Genehmigungsprozess und die Voraussetzungen, unter welchen Verkehrsunternehmen gewerbsmäßig Fahrgäste befördern dürfen. Dem Automatisierungsprozess von Straßenbahnen steht es dabei nicht entgegen. Wichtig wäre eine Analyse, ob die Ermächtigung zu den Rechtsverordnungen in § 57 des PBefG ausreichend ist, um die notwendigen Regelungen in der BOStrab treffen zu können.

Es gilt zu klären, ob Anforderungen an die zuverlässige vernetzte Übertragung von Informationen in intelligenten Verkehrssystemen allgemein geregelt werden können oder müssen, damit sich einheitliche Schnittstellen bei Lieferanten von Fahrzeugsystemen und Infrastruktursystemen herausbilden können. Im Straßenbahnbereich besteht bereits die Inbetriebnahmegenehmigung nach § 62 BOStrab, innerhalb derer die Sicherheitsnachweise geprüft werden. In Einzelfällen besteht durch § 6 der BOStrab die Möglichkeit, von den Vorschriften dieser Verordnung abzuweichen. Dabei ist die Genehmigung durch die Technische Aufsichtsbehörde notwendig.

8.4.4 Ansatzpunkte StVG

Wie bereits mehrfach angedeutet, bietet das StVG die Möglichkeit zur Ausweitung der bestehenden Regelungen für den autonomen Kraftfahrzeugverkehr auf den Straßenbahnverkehr. Geändert werden müsste hierfür § 1 Abs. 2 des StVG. Nach diesem gilt das Gesetz bislang nur für Kraftfahrzeuge, welche als Landfahrzeuge definiert sind, welche durch Maschinenkraft bewegt werden, ohne an Bahngleise gebunden zu sein. Nachfolgend wird der Frage nachgegangen, wie der Prozessablauf zur Fortschreibung der bestehenden Regelungen für einen automatisierten Straßenbahnbetrieb aussehen könnte. Möglich wären hierbei grundsätzlich zwei Ansätze. Entweder man beginnt mit speziellen Regelungen und erarbeitet darauf aufbauend einen generellen Regelungsrahmen, oder man legt zunächst einen Grundrahmen und ergänzt diesen anschließend um detaillierte Regelungen.

Des Weiteren ergeben sich bei der Regelfortschreibung für einen automatisierten Straßenbahnverkehr u. a. folgende Fragestellungen:

- Soll die Regelung auf europäischer oder nationaler Ebene erfolgen?
- Reichen eine Industrienorm oder eine Verbandsschrift (VDV) als Standardleistungskatalog für Bestellungen aus?
- Erfolgen Regelungen produktspezifisch für Querschnittstechnologien oder funktionspezifisch für Verkehrsfunktionen?
- Sollen Regelungen verkehrsträger-spezifisch oder verkehrsträger-übergreifend vorgenommen werden?
- Sollen bestehende Gesetze, Verordnungen und Normen angepasst oder neue Vorschriften erstellt werden?
- Welche Stakeholder wären durch neue Regelungen betroffen?

Mit der IVS-Richtlinie besteht bereits eine Richtlinie auf europäischer Ebene, welche den Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr regelt. Eine freiwillige europäische Normung über das Europäische Komitee für Normung (CEN) oder über das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) kann erfolgen, um einheitliche europäische Produktmärkte zu fördern. Auf nationaler Ebene haben die EU-Staaten, im Rahmen des von der EU-Richtlinie gegebenen Handlungsspielraumes, eigene Gesetze bzw. Verordnungen zur Nutzung von Automatisierungstechnologie im Straßenbahnverkehr aufzustellen. Dabei können sie, soweit es mit den Richtlinien der EU vereinbar ist, auch eigene Interessen und Ziele einfließen lassen. Auf nationaler Ebene könnte die BOStrab entsprechend für den automatisierten Betrieb von Straßenbahnen ergänzt bzw. geändert werden. Grundsätzlich bieten Straßenbahnen örtliche Verkehrsdienste an und stellen kommunalen Stadtverkehr mit Schnittstellen zur Straße dar. Es ist daher genau zu überlegen, welche Aspekte tatsächlich einer Regelung auf europäischer Ebene bedürfen. Außerdem gilt es eine Entscheidung dazu zu treffen, ob man in den IVS-Richtlinien spezifische Regelungen für Straßenbahnen konkretisiert oder ein separates Regelwerk für Straßenbahnen aufstellen möchte.

Mit der im Februar 2022 veröffentlichten „Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften“ [143] verfolgt das BMDV das Ziel, bis zur Harmonisierung der Regelungen auf EU-Ebene einen nationalen Rechtsrahmen mit geeigneten Bedingungen für die Einführung des Regelbetriebs mit automatisierten bzw. autonomen Kraftfahrzeugen auf der Straße zu schaffen. Sie setzt auf den Regelungen zum automatisierten Fahren im Straßenverkehrsgesetz an und regelt folgende Bereiche (§ 1 Abs. 2):

- Die Erteilung von Betriebserlaubnissen für Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion sowie von Genehmigungen für nachträglich aktivierbare automatisierte und autonome Fahrfunktionen.
- Die Genehmigung festgelegter Betriebsbereiche.
- Die Zulassung von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion zum Straßenverkehr.
- Die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion, mit aufgrund dieser Verordnung erteilter oder zu erteilender Betriebserlaubnis, sowie von nachträglich aktivierten automatisierten und autonomen Fahrfunktionen und Fahrzeugteilen.
- Die Anforderungen an und Pflichten für den Hersteller, den Halter und die Technische Aufsicht von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen und von Kraftfahrzeugen mit automatisierter oder autonomer Fahrfunktion nach § 1f des Straßenverkehrsgesetzes.

In Anlage I werden die Anforderungen an Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion definiert. Diese sind unterteilt in:

- Funktionale Anforderungen an Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion (Teil 1)
- Test- und Validierungsmethoden für Fahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion (Teil 2)
- Digitaler Datenspeicher (Teil 3)
- Anforderungen an Mensch-Maschine-Schnittstellen (Teil 4)
- Anforderungen an die Sicherheit im Bereich der Informationstechnologie (Teil 5)

Die weiteren Anlagen befassen sich mit der Datenspeicherung und den Dokumentationspflichten des Herstellers. Es ist die Frage zu klären, wie sich die Anforderungen aus dem Straßenbahnbereich hier integrieren lassen. Alternativ könnte man in Betracht ziehen, bestimmte Aspekte der Rechtsgrundlagen der Kfz-Welt auch für den Straßenbahnbereich in Kraft zu setzen, etwa für die Typgenehmigung von IVS-Systemen.

Der Unternehmer oder derjenige, auf den die Betriebsführung übertragen worden ist, muss gemäß § 3 Abs. 2 PBefG den Verkehr im eigenen Namen, unter eigener Verantwortung und für eigene Rechnung betreiben. In Ermangelung einer verkehrsrechtlich definierten Herstellerverantwortung obliegt die Verantwortung zur sicheren Inbetriebnahme von Straßenbahnen ebenfalls ihm. Hinsichtlich dieses Aspektes wäre bei einer autonomen bzw. automatisierten Straßenbahn abzustimmen, ob die Verantwortung für die Produktsicherheit stärker auf den Hersteller übertragen werden sollte. Schwerpunkte einer solchen Regelung wären weniger die materiellen Anforderungen als vielmehr Fragen zu Schnittstellen und Verantwortungen.

8.4.5 Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mehrere Optionen für die rechtliche Regelung eines automatisierten bzw. autonomen Straßenbahnverkehrs möglich erscheinen:

- Eigene Gesetzesgrundlage nach dem Vorbild des Gesetzes zum autonomen Fahren (StVG).
- Erweiterung des Anwendungsbereiches des Gesetzes zum autonomen Fahren auf Straßenbahnfahrzeuge.
- Übertragung der bestehenden Regelung des § 53 Abs. 2 der BOStrab zu unabhängigen Bahnen auch auf weitere Strecken mit nur sehr allgemeinen grundlegenden Anforderungen. Dabei erfolgt eine Übertragung der Verantwortung für Detailregelungen auf Betreiber und örtliche Aufsichtsbehörden. Grundlage bilden die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“, also Standardisierungsprozesse der Normung.
- Forderung nach einer Regelung auf europäischer Ebene.
- Durchführung einer generischen Risikoanalyse und anschließende Formulierung eines Anforderungskatalogs zur Begegnung der Risiken.
- Erstellen eines Anforderungskatalogs von Dritten. Dieser wird im Gesetzgebungsverfahren anschließend mit den Beteiligten abgestimmt (z. B. Aufsichtsbehörden der Länder, Betreiber, VDV und Industrie).

Ein zeitnaher Dialogprozess sollte vor allem hinsichtlich des aufgezeigten Themas der Standardisierung erfolgen. Außerdem gilt es, sich frühzeitig mit dem Thema der Vernetzungs-Ressourcen und dem Thema der Kommunikations-Schnittstellen zu befassen, um sich der sicherheitsrelevanten Vernetzung der Fahrzeuge anzunehmen. Der Dialogprozess könnte mittels der Durchführung von Pilotprojekten ergänzt und bereichert werden. In diesen werden Automatisierungs-Themen betrachtet und zusammen mit begleitenden Fachgremien konzipiert, um konkrete Standards zu entwickeln. Diese können später in Rechtsvorschriften oder nachhaltig wirksame Branchen-Standards einfließen.

9 Roadmap

9.1 Aufbau und Ziel der Roadmap

Zusammenfassend wird in diesem Kapitel eine Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren von Straßenbahnen in Deutschland gezeichnet. Zunächst werden zwei detaillierte Teil-Roadmaps gezeigt, von denen eine zum vernetzten und assistierten Fahren (mit Fahrer) und die andere zum automatisierten Fahren (ohne Fahrer) führt. Diese Teil-Roadmaps werden schließlich zu einer gemeinsamen Roadmap zusammengefasst. In der anschließenden Gesamtbetrachtung wird die Notwendigkeit der Entwicklung einer differenzierten Branchenstruktur mit den dafür nötigen wirtschaftlichen Schnittstellen betont. Die Herausforderungen und Treiber der Entwicklung werden zusammen mit einem allgemeinen Ausblick dargestellt. Abschließend wird der Handlungsbedarf für die Akteure der Branche und für die Politik zusammenfassend dargestellt.

9.2 Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren

In diesem Abschnitt werden Modernisierungswege betrachtet, bei denen der Fahrzeugführer durch technische Systeme unterstützt und entlastet, jedoch bis auf weiteres nicht ersetzt wird, sondern seine herkömmlichen Funktionen weiterhin ausführt. Abbildung 9-1²⁰ zeigt auf der rechten Seite Fahrerassistenzsysteme, rechts oben beginnend mit solchen, die bereits existieren und ohne Vernetzung auskommen. Daher sind sie voraussetzungslos möglich und können von den Verkehrsunternehmen ohne weitere Abstimmung mit anderen Akteuren eingeführt werden. Ihren Nutzen erhalten diese Fahrerassistenzsysteme vor allem durch die Vermeidung von Unfällen. Mit ihnen findet die Sensorik Eingang in das Fahrzeug. Auch die Grundlagen für die Zertifizierung von späteren, umfangreicheren Funktionen können an dieser Stelle geschaffen werden, indem die Leistungsanforderungen an die Sensorik gesetzt und validiert werden können.

Darunter werden in der Abbildung Fahrerassistenzsysteme genannt, die der Optimierung der Fahrweise dienen und daher mindestens auf einer Verortung des Fahrzeugs beruhen. Diese Verortung kann auf herkömmliche Art erfolgen. Daher können auch diese Assistenzsysteme von den Verkehrsunternehmen bereits jetzt eingeführt werden. Doch können diese Fahrerassistenzsysteme von einer modernen, leistungsfähigen Vernetzung mit digitalen Karten sehr stark profitieren, wie unten beschrieben wird.

Der linke Teil der Abbildung zeigt die Vernetzungstechnologien. Grundlage ist ein modernes Kommunikationssystem, dessen Bestandteile im linken oberen Bereich der Abbildung genannt werden. Die herkömmlichen Funksysteme sind für die Zwecke einer modernen Vernetzung auf Dauer nicht ausreichend (der bisherige Analogfunk wie z. B. Bake-Funk muss auch in absehbarer Zeit abgeschaltet werden, da die Frequenzen dann dafür nicht mehr zur Verfügung stehen werden). Ihr Ersatz ist in erster Linie eine Aufgabe der Kommunalverwaltungen, doch sollten die Verkehrsbetriebe mit eingebunden werden.

²⁰ Die Symbole für die Akteure wurden in Abbildung 7-1 eingeführt.

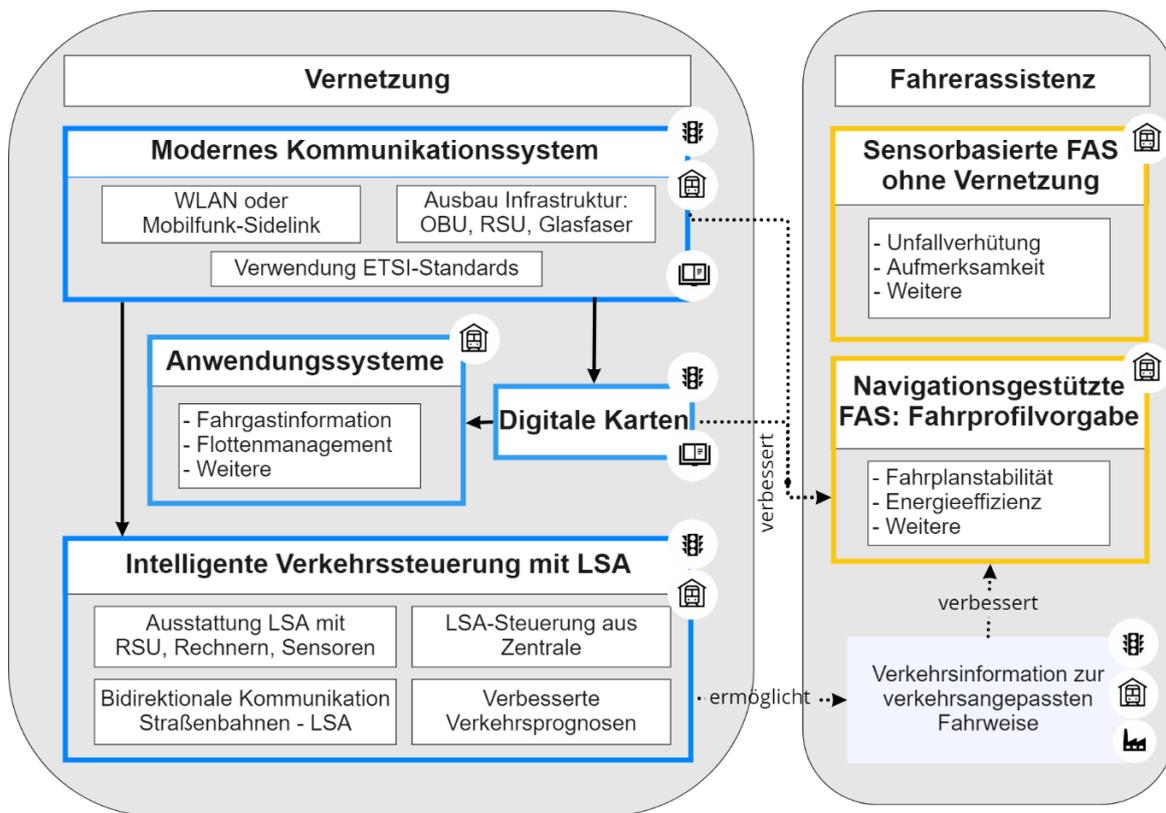


Abbildung 9-1: Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren

Ein modernes V2X-Kommunikationssystem beruht entweder auf einem WLAN- oder auf einem 4G/5G-Mobilfunkstandard (Sidelink). Zudem müssen Fahrzeuge und Infrastrukturen mit der notwendigen Kommunikationsinfrastruktur ausgestattet werden (OBU, RSU und ggf. Glasfaserverbindungen im Backbone). Die Elemente eines modernen Kommunikationssystems sind am Markt erhältlich. Eine Umstellung des Kommunikationssystems ist teuer und es wird einige Zeit dauern, bis die meisten Kommunen so weit sind. Der zukünftige Nutzen auch für andere Verkehrsteilnehmer, der durch die Einführung von C-ITS geschaffen wird, kann ein zusätzlicher Anreiz für die Einführung sein.

Das moderne Kommunikationssystem ist die Grundlage für digitale Karten (in Abbildung 9-1 mittig), in denen alle Infrastrukturelemente und das unmittelbare statische Umfeld der Strecken (einbiegende Straßen usw.) detailliert verzeichnet sind. Diese Basisversion der digitalen Karte, deren Kosten sich im Rahmen halten wird, kann je nach Bedarf durch weitere Objektschichten ergänzt werden. Die Erstellung der digitalen Karte wird von der jeweiligen Kommunalverwaltung im Einklang mit dem Verkehrsbetrieb organisiert oder angestoßen. Die Umsetzung und Pflege sollte von unabhängigen Firmen vorgenommen werden.

Auf der Grundlage des Kommunikationssystems und der digitalen Karten sind viele Anwendungen, wie z. B. digitale Flottenmanagement- und Fahrgastinformationssysteme in Echtzeit, möglich, die von den Verkehrsunternehmen eingeführt werden können (siehe Abbildung links). In der Folge können zum Beispiel wartende Fahrgäste an den Haltepunkten erfahren, wann ein Zug ankommt und wie voll er in welchen Bereichen ist, so dass sie sich schon auf dem Bahnsteig entsprechend positionieren können und der Fahrgastwechsel beschleunigt wird. Zudem erlaubt ein Echtzeit-Flottenmanagementsystem den Verkehrsbetrieben zum Beispiel ein deutlich besseres und schnelleres Störfallmanagement als heute. Weitere Anwendungen wie sensorbasierte Systeme zur Unterstützung des Wartung- und Instandhaltungsmanagements sind möglich.

Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen (LSA) wird im unteren, linken Teil der Abbildung 9-1 gezeigt. Sie wird von der Kommunalverwaltung finanziert und betrieben, um - im Idealfall - den gesamten städtischen Verkehr nach einem multikriteriellen Zielkatalog effizient zu steuern. Dieser Zielkatalog beinhaltet eine Priorisierung des ÖPNV und insb. der Straßenbahnen. Die Verkehrssteuerung beruht auf einer guten V2X-Vernetzung und wird mit Hilfe eines teilautomatisierten Systems aus einer Steuerungszentrale der Kommunalverwaltung heraus durchgeführt. Die LSA-Signale sollten nicht nur optisch, sondern auch direkt elektronisch an die Fahrzeuge (und auch an das Echtzeitflottenmanagement des Verkehrsbetriebs) übermittelt werden.

Dieser ideale Endzustand kann nur langfristig erreicht werden. Aufgrund der langen Lebensdauern und den hohen Kosten von LSA werden die einzelnen LSA erst nach und nach mit den benötigten Funk-, Sensor- und Rechnerkomponenten und ggf. Glasfaseranschlüssen ausgestattet. Dies sollte möglichst bei Gelegenheiten ohnehin anstehender Erneuerungen oder anderer Arbeiten an oder bei den LSA erfolgen. Die Verbesserung der Verkehrsprognosen und der Algorithmik für die interdependente Steuerung vieler LSA ist Technologieentwicklung auf hohem Niveau. Doch gibt es keinen Grund, mit der Ausrüstung der LSA zu warten. Auch mit existierender Technologie kann durch eine intelligente Steuerung einiger wichtiger LSA der Verkehrsfluss und insb. der ÖPNV beschleunigt werden.

Fortschritte bei Verkehrsprognosen an wichtigen Knotenpunkten ermöglichen auch den Einsatz von navigationsgestützten Fahrerassistenzsystemen, die dem Fahrer eine der Verkehrssituation angepasste Fahrweise vorschlagen können (in der Abbildung 9-1 dargestellt mit den gepunkteten Pfeile von der linken zur rechten Seite). Sie ermöglichen eine gleichmäßigere und somit energiesparendere Fahrt, die für die Fahrgäste angenehmer ist und zugleich eine erhöhte Durchschnittsgeschwindigkeit aufweist.

Die stärker umrandeten Kästen in Abbildung 9-1 stellen zukünftig eigenständige, durch wirtschaftliche Schnittstellen identifizierte Subsysteme der Vernetzung dar, welche jeweils von unabhängigen Firmen angeboten werden können.²¹ Damit dies möglich wird, sei abschließend der in den einzelnen Kapiteln beschriebene Normungs- und Standardisierungsbedarf bei den Grundlagen der Vernetzung hervorgehoben, welcher in der Abbildung nur durch das Symbol für Normungsgremien angedeutet ist:

- Kommunikationssysteme:
 - Beteiligung in den Standardisierungsgremien (ETSI, ISO, CEN u.a.) zur Einigung auf einheitliche Datenaustauschformate, um die Interoperabilität der verschiedenen Vernetzungssysteme und technischen Komponenten zu ermöglichen.
 - Festlegung von Leistungsstandards für Funkgeräte (Latenz, Reichweite und Durchsatz von OBU und RSU) und längerfristig auch für infrastrukturseitige Sensoren (Vorverarbeitung der Sensordaten zur Beschränkung der zu übermittelnden Datenmengen).
 - Etablierung europaweit einheitlicher Strukturen für die Cybersicherheit (PKI) der Verkehrsvernetzung (aller Verkehrsträger).
 - Wahl einer modernen Funktechnologie: WLAN oder Mobilfunk-Sidelink.
- Digitale Karten:
 - Definition einheitlicher Daten- und Objektstrukturen, um inkompatible Insellösungen zu vermeiden.

Eine Realisierung und Weiterentwicklung des vernetzten Fahrens bedarf ggf. angepasster Regelungen. Durch sichere Vorgehensweisen und ggf. Rechtsänderungen ist sicherzustellen, dass die Inhalte der „offiziellen Schichten“ einer digitalen Karte (zum Beispiel Verkehrsschilder) korrekt und vollständig sind und dass diese Informationen auch von den Fahrzeugführern als gültig und verlässlich verwendet werden können. Verlässlich sollten auch per Funk übertragene Zustandsdaten von LSA („fahren / nicht-fahren“) und ggf. die Inhalte von Verkehrsschildern (falls noch nicht in digitalen Karten enthalten) sein. Zudem

²¹ Mit Ausnahme der beiden Kästen zur Fahrerassistenz auf der rechten Seite, die oft eng verbunden sein werden.

muss die Gestaltung der innerkommunalen Kompetenzverteilung geregelt werden. Die allgemeine Verkehrssteuerung durch LSA obliegt den Kommunalverwaltungen. Im Falle einer stärker integrativen Verkehrssteuerung aus einer Verkehrszentrale heraus müssen die bisherigen Kompetenzen der Straßenbahnverkehrsbetriebe und -fahrer zur Steuerung ihrer Fahrwege möglicherweise etwas eingeschränkt oder jedenfalls stärker in die allgemeine Verkehrssteuerung eingebettet werden.

9.3 Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren

In diesem Abschnitt werden Modernisierungswege betrachtet, die darauf zielen, den Fahrzeugführer in einigen oder allen Verkehrssituationen zu ersetzen, so dass das Fahrzeug in diesen Situationen vollautomatisch gesteuert wird (Roadmap Teil 2). Abbildung 9-2²² zeigt in der zentralen Abfolge in der Mitte, rotumrandet, den wahrscheinlichen Entwicklungsweg von der Beherrschung einfacher bis zu hochkomplexen Verkehrssituationen, den das automatisierte Fahren bei Straßenbahnen nehmen wird. Die Pfeile links und rechts davon nennen die beiden zentralen Herausforderungen „Technologieentwicklung“ und „Zulassung und Zertifizierung“.

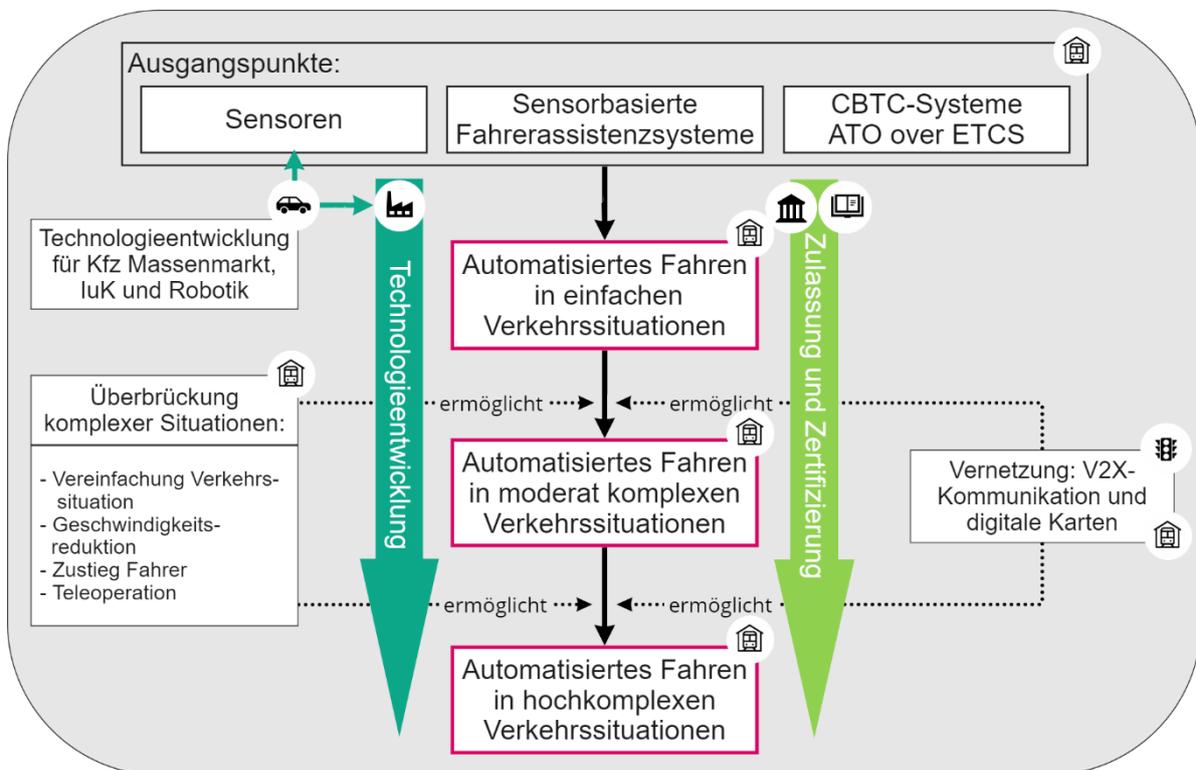


Abbildung 9-2: Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren

Der Balken darüber nennt die technologischen Ausgangspunkte, die bereits jetzt verfügbar sind. Die für das automatisierte Fahren benötigten Sensoren (Kameras, LIDAR usw.) sind bereits weit entwickelt und werden insb. für Anwendungen im Pkw-Sektor weiterentwickelt. Die CBTC-Systeme und „ATO über ETCS“-Systeme, mit denen Bahnen auf baulich völlig abgetrennter Infrastruktur (zum Beispiel U-Bahnen) schon heute vollautomatisiert fahren können. Bei CBTC kommen Sensor-, Vernetzungs- und dynamische Steuerungstechnologien zum Einsatz, allerdings ist die Hauptkomponente der Fahrzeugsteuerung in der

²² Die Symbole für die Akteure wurden in Abbildung 7-1 eingeführt.

Infrastruktur verortet. Für die Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens ist die Hauptkomponente in das Fahrzeug zu verlagern. Dies ist bereits jetzt bei den sensorbasierten Fahrerassistenzsystemen wie insb. Notfallassistenten der Fall. Mit ihnen kommen die Sensoren und die intelligente Datenverarbeitung zur Sensorfusion ins Fahrzeug, so dass sie als direkte Vorgänger des automatisierten Fahrens betrachtet werden können.

Die Hauptakteure für die Entwicklung des automatisierten Fahrens in der Praxis sind die öffentlichen Verkehrsunternehmen und die Kommunalverwaltungen, die dabei eng zusammenarbeiten. Die Abfolge in der Mitte der Abbildung 9-2 illustriert die sukzessive Entwicklung und Ausbreitung automatisierter Fahrfunktionen in der Praxis.

Die Umsetzung in einfachen Verkehrssituationen mit sehr wenigen und sehr gut kontrollierbaren Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern, wie Betriebshöfe oder bestimmte Wendeschleifen generiert bereits spürbaren Nutzen für die Verkehrsbetriebe (z. B. Pausen und Einsparung langer Fußwege auf dem Betriebshof für die Fahrerin). Für den Betriebshof bietet sich zudem eine Integration in weitergehende, vollautomatisierte Betriebshofmanagementsysteme an. Allerdings sind sich die Branchenexperten einig, dass der Einsatz im Betriebshof allein nicht ausreichen wird, um eine Automatisierung von Straßenbahnen wirtschaftlich zu tragen.²³ Wichtig ist daher eine baldige Nutzbarmachung der Automatisierung auch für moderat komplexe Verkehrssituationen, um Personalkosten einzusparen bzw. entstehenden Personal-mangel auszugleichen und gleichzeitig das Verkehrsangebot zu verbessern (Taktung, Tagesrandzeiten, Einbeziehung von bisher nicht wirtschaftlich anbindbaren Gebieten). In Frage kommen Überlandstrecken, kleine Gemeinden im Umland oder städtische Randbereiche, in denen wenige Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern auftreten.

Links und rechts der Abfolge zeigt die Abbildung wesentliche Unterstützungen für den Einsatz des automatisierten Fahrens in immer komplexeren Verkehrssituationen. Die Anforderungen an die automatische Steuerung bei der Überbrückung komplexer Situationen können durch gezielte Maßnahmen lokal reduziert werden, z. B. durch bauliche Maßnahmen, veränderte Verkehrsführungen oder -regelungen, (starke) Geschwindigkeitsreduktion und Warnsignalisierung der Fahrzeuge. Zudem gibt es immer die Option, dass in kritischen Abschnitten (zum Beispiel im Innenstadtbereich) ein Fahrer zusteigt, wenn dies mit einer sinnvollen Personaleinsatzplanung vereinbar ist. Die in Kapitel 7.2 erläuterten und in Abbildung 9-1 gezeigten Grundelemente einer Vernetzung - modernes Kommunikationssystem, digitale Karten und infrastruktureitige Sensoren - sind Voraussetzung für das hochentwickelte automatisierte Fahren. So sind die Systeme der Fahrzeugfeinsteuerung auf detaillierte digitale Karten und Informationen aus der Infrastruktur und einer Zentrale angewiesen. Auch die Teleoperation als eine Rückfallebene in komplexeren Verkehrssituationen erfordert eine leistungsfähige Funkvernetzung. Allerdings ist eine umfassende Vernetzung nicht im zeitlichen Sinn Voraussetzung für den Start einer Automatisierung. Vielmehr können sich beide Stränge gleichzeitig entwickeln.

Abbildung 9-2 endet mit dem Fernziel des automatisierten Fahrens auch in hochkomplexen Verkehrssituationen. Abschließend seien die zwei zentralen Herausforderungen (grüne Pfeile) genannt. Die Technologieentwicklung auf höchstem Niveau wird derzeit von großen Unternehmen und Wissenschaftsinstitutionen mit Fokus auf den Pkw-Sektor geleistet. Für den Straßenbahnsektor sind diese Entwicklungen zu übernehmen und anzupassen. Einige Zusatzfunktionalitäten, die nur bei Straßenbahnen benötigt werden, müssen genuin für sie entwickelt werden. Für die Zulassung und Zertifizierung der automatisierten Steuerungssysteme (wie auch der Teleoperation) sind die rechtlichen Grundlagen zu schaffen, die Zuständigkeiten zu regeln und die konkreten Kriterien und Prozesse zu entwickeln.

²³ Am Rande sei angemerkt, dass Systeme der automatisierten Fahrzeugfeinsteuerung auch das Potenzial für eine erweiterte Fahrerassistenz beinhalten, wenn auf den fahrerlosen Einsatz verzichtet werden muss.

9.4 Zusammenfassende Roadmap

9.4.1 Roadmap

Die Abbildung 9-3 fasst die wichtigsten Elemente der Teil-Roadmaps aus Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2 zu einer gemeinsamen Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren zusammen. Die Roadmap zeigt die drei Stränge Fahrerassistenz, Vernetzung und Automatisierung, die sich - bundesweit gesehen - parallel entwickeln und ineinandergreifend gegenseitig unterstützen werden. Einzelne Kommunen werden dabei den Schwerpunkt auf unterschiedliche Stränge oder Aspekte setzen. Einige besonders wichtige Querverbindungen zwischen den Strängen werden gezeigt, die bereits in der frühen Phase relevant sind. Für das automatisierte Fahren in komplexeren Situationen werden die meisten der zuvor genannten Entwicklungsschritte benötigt, so dass die Stränge hier zusammenführen.

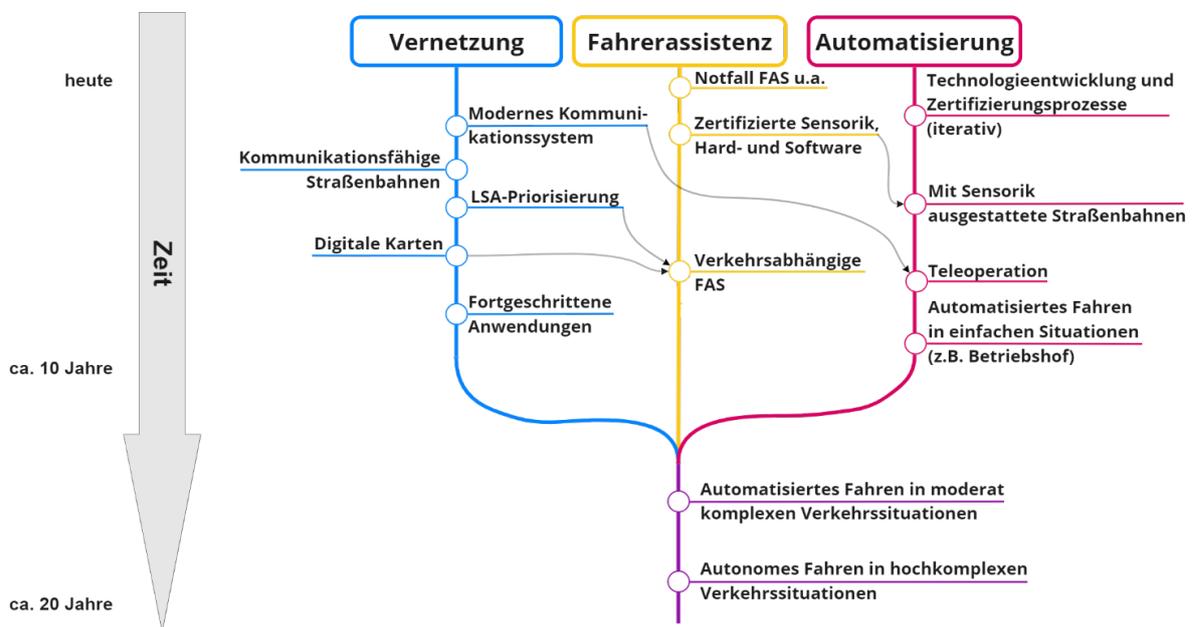


Abbildung 9-3: Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren

Im Unterschied zu den beiden Teil-Roadmaps, die stärker die logischen Verknüpfungen zwischen den Elementen abbilden, geht die Gesamt-Roadmap aus Abbildung 9-3 stärker auf den zu erwartenden zeitlichen Ablauf ein. Innerhalb der nächsten 10 Jahre sind in allen Bereichen Fortschritte bei der Technologieentwicklung und, wenn die notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden, auch der Verbreitung dieser Technologien zu erwarten. In ca. 20 Jahren könnten vernetzte und automatisierte Straßenbahnen zum Alltag gehören.

9.4.2 Zukünftige Branchenstruktur

Wenn die Entwicklung entlang der drei Stränge der Roadmap voranschreitet, sollten sich wirtschaftliche Schnittstellen herausbilden, welche es ermöglichen, Produkte verschiedener Hersteller zu kombinieren (ihnen liegen meistens normierte technische Schnittstellen zugrunde). Vor allem müssen die infrastrukturseitigen Elemente frei kombinierbar mit den fahrzeugseitigen Elementen sein. Dies wird in der Abbildung 9-3 nicht gezeigt. Anzustreben ist eine zukünftige differenzierte Branchenstruktur, bei der die Anwender (Kommunalverwaltungen und Verkehrsbetriebe) folgende Produkte oder Services von jeweils unabhängigen Anbietern erhalten und kombinieren können:

- Fahrzeuge,
- Fahrerassistenzsysteme oder Systeme der Fahrzeugsteuerung für automatisiertes Fahren (kompakte Systeme aus Bordcomputer und fahrzeugseitiger Sensorik),
- Infrastrukturseitige Sensorik,
- Funkelemente für Fahrzeuge (OBU) und Infrastruktur (RSU),
- Digitale Karten und ihre Pflege,
- Anwendungssysteme der Vernetzung, zum Beispiel zur Unterstützung des Fahrgast-, Flotten- oder Instandhaltungsmanagements,
- Systeme der Teleoperation,
- Lichtsignalanlagen,
- Systeme der intelligenten Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen.

Dabei wird es auch Unternehmen geben, die mehrere dieser Produkte aus einer Hand anbieten. Gerade in der Phase der Marktentstehung, während der die Normierung der zugrundeliegenden technischen Schnittstellen noch nicht erfolgt ist, werden integrierte Produkte diese fehlende Normierung überbrücken. Einige der oben gelisteten wirtschaftlichen Schnittstellen existieren schon seit langem. So können Fahrerassistenzsysteme verschiedener Hersteller in Fahrzeuge verschiedener anderer Hersteller eingebaut werden, insbesondere bei größeren Neuanschaffungen. Diese wirtschaftlichen Schnittstellen sind auch in Zukunft zu bewahren.

Sollten sich jedoch in der Folge die wirtschaftlichen Schnittstellen nicht entwickeln, dann kann dies die Verbreitung der Technologien hemmen. Anwender möchten sich nicht auf Dauer und in großem Umfang von einzelnen Anbietern abhängig machen. Viele Anbieter möchten sich auf ihre Kernkompetenzen beschränken und nur einige der Produkte entwickeln und herstellen oder ihren Betrieb anbieten. Dann ist es wichtig, dass die anderen, komplementären Produkte existieren und von anderen Unternehmen angeboten werden und dass die Schnittstellen verlässlich die Kombination ermöglichen.

9.4.3 Herausforderungen und Treiber

Die wichtigsten Hemmnisse und Herausforderungen, die auf dem Weg zum vernetzten und automatisierten Fahren zu überwinden sind können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Fehlende Standards:
 - Kommunikationssysteme
 - Digitale Karten
- Fehlende Zulassungen und Zertifizierungen:
 - Teleoperation
 - Automatisiertes Fahren
- Unzureichende Grundlagentechnologie:
 - Umfelderkennung und automatisiertes Fahren
 - Verkehrsprognosen und komplexe LSA-Steuerung
- Begrenzte Innovationskraft des Sektors:
 - Öffentlicher Sektor: Grundfinanzierung mit Fokus auf Tagesgeschäft, kein Marktdruck für Innovationen gegenüber ÖPNV-Wettbewerbern,
 - Begrenzte finanzielle und andere Ressourcen
 - Kein mit dem Kfz-Sektor vergleichbares Massengeschäft
 - Kommunaler Fokus der Marktakteure auf Betreiberseite, kein Systemführer für Erprobung und Zulassung bundesweiter Innovationen

Diesen Herausforderungen stehen folgende Treiber einer Modernisierung gegenüber:

- Aktueller und zu erwartender Problemdruck:
 - Drohender Entzug der Frequenzen des Analogfunks
 - Fahrer- und Nachwuchsmangel
 - Kosten von Personal, Energie, Unfällen und Störfällen
 - Steigende Anforderungen an die Qualität der Dienste: Taktverdichtung, Tagesrandzeiten, Anbindung von Gebieten, Nutzung für City-Logistik
 - Zukünftig starke Konkurrenz durch automatisierte Pkw
- Innovations- und Finanzkraft des Kfz-Sektors und anderer Sektoren generiert die nötigen Grundlagentechnologien
- Erfolge mit Teilschritten der Vernetzung und Automatisierung:
 - Fahrerassistenzsysteme
 - Verbesserte LSA-Steuerung
 - Gleichmäßigere Fahrt und beschleunigte Abläufe
 - Verbesserte Fahrgastinformation und Flottenmanagement
 - Automatisierung in einfachen Verkehrssituationen (Betriebshöfe etc.)
 - Automatisierung in moderat komplexen Verkehrssituationen (Überlandstrecken, Randbereiche etc.)
- Praktische Umsetzung des teleoperierten und automatisierten Fahrens bei Straßenbahnen einfacher als bei Kfz: mögliche Vorreiterrolle der Straßenbahn

Während noch einige Hürden zu nehmen sind, die den Weg zur vernetzten und automatisierten Straßenbahn erschweren, spricht vieles für eine Modernisierung deutscher Straßenbahnsysteme. Nur so kann ein nachhaltiger öffentlicher Nahverkehr langfristig attraktiv bleiben.

Es gibt bedeutende Treiber, die die Entwicklung in den kommenden Jahren forcieren werden. Doch sind noch notwendige Rahmenbedingungen durch den Staat und die Verbände und Normungsgremien zu schaffen. Die Anwender und Anbieter und ihre jeweiligen Verbände sollten sich zusammenfinden, um die Querschnittstechnologien und ihre technischen Schnittstellen zu definieren. Der Bund sollte Bereitschaft signalisieren, im Einklang mit der Branche kontinuierliche Aktivitäten für die Vernetzung und Automatisierung von Straßenbahnen zu entfalten. Gemeinsame Forschungsprojekte sind notwendig, um Zulassungskriterien und -prozesse und sodann ihre adäquaten rechtlichen Grundlagen zu schaffen. Auf dieser Grundlage können sich einheitliche Schnittstellen wirtschaftlicher Art etablieren, damit spezialisierte Entwickler und Dienstleister auf den Markt treten können und schließlich eine ausdifferenzierte und wettbewerbsfähig aufgestellte Branche entsteht.

Das System Straßenbahn kann aufgrund seiner besonderen Eigenschaften bei der praktischen Umsetzung von Teleoperation und Automatisierung teilweise sogar vorangehen. Dies kann auch positiv auf die Vernetzung und Automatisierung anderer Verkehrssysteme ausstrahlen. Um die hohen Kosten von Vernetzung, intelligenter Verkehrssteuerung und Automatisierung im Bereich des öffentlichen Verkehrs zu tragen, sind unterstützende Förderprogramme und Modellprojekte des Bundes zu erwägen. Bei einem sukzessiven Voranschreiten der Vernetzung und Automatisierung von Straßenbahnen können auf dem Weg bereits viele Potenziale nach und nach realisiert werden. Es gilt nun, die richtigen Rahmenbedingungen für die Einführung der Technologien zu schaffen und die aufgezeigten Herausforderungen zu meistern.

9.4.4 Handlungsempfehlungen

Die zentralen Herausforderungen, die in Kapitel 9.4.3 genannt werden, sind auf unzureichende Rahmenbedingungen zurückzuführen: fehlende Standards, unklare Zulassungsvoraussetzungen und mangelnde Finanzmittel für Innovationen. Um diese Hemmnisse zu überwinden, ist ein Zusammenwirken der relevanten Akteure gefordert. Es ergeben sich vier Handlungsfelder.

9.4.4.1 Normierung und Standardisierung durch Marktakteure

Hinsichtlich notwendiger Normierungen und technischer Empfehlungen wird den Branchenverbänden empfohlen, sich bei folgenden Themen gezielt einzubringen:

- Kommunikationssysteme:
 - Beteiligung in den Standardisierungsgremien (ETSI, ISO, CEN u.a.) zur Einigung auf einheitliche Datenaustauschformate, um die Interoperabilität der verschiedenen Vernetzungssysteme und technischen Komponenten zu ermöglichen.
 - Festlegung von Leistungsstandards für Funkgeräte (Latenz, Reichweite und Durchsatz von OBU und RSU) und längerfristig auch für infrastruktureitige Sensoren (Vorverarbeitung der Sensordaten zur Beschränkung der zu übermittelnden Datenmengen).
 - Etablierung europaweit einheitlicher Strukturen für die Cybersicherheit (PKI) der Verkehrsnetzwerke (aller Verkehrsträger).
 - Wahl einer modernen Funktechnologie: WLAN oder Mobilfunk-Sidelink.²⁴
- Digitale Karten:
 - Definition einheitlicher Daten- und Objektstrukturen, um inkompatible Insellösungen zu vermeiden.

Sinnvoll wäre die Einrichtung einer ständigen Arbeitsgruppe bei einem Branchenverband, die sich ausschließlich mit der Vernetzung und Automatisierung des Straßenbahnsektors beschäftigt und sich mit dem Bund und anderen Akteuren abstimmt.

9.4.4.2 Rechtsrahmen und behördliche Regelungen

Der Gesetzgeber, der Bund, die Normungsgremien, die Verbände und die Technische Aufsichtsbehörden sollten mögliche Anpassungen des Rechtsrahmens untersuchen und geeignete Zulassungs- und Zertifizierungsprozesse festlegen.

Das vernetzte und assistierte Fahren unter Beibehaltung des Fahrzeugführers - mit allen seinen bisherigen Aufgaben - wirft nur wenige rechtliche Fragen auf. Für folgende zwei Themen sind aber verbindliche Regelungen notwendig:

- Zugelassene Art und Weise der Übermittlung von Verkehrszeichen und Lichtsignalen an die Steuereinheit des automatisierten Fahrzeuges und den Fahrzeugführer: Digitale Übermittlung des Signals ergänzend zur optischen Erkennung durch den Menschen.
- Erarbeitung von Kriterien für rechtlich verlässliche Informationen in digitalen Karten.

Hingegen ist die rechtliche Regelung des automatisierten Straßenbahnbetriebs ein komplexeres Thema und erfordert Entscheidungen zur:

- Schaffung eines rechtlichen und institutionellen Rahmens für die Zulassung von automatisierten Straßenbahnen²⁵,
- und zur Entwicklung von „Systemzulassungen“ für Automatisierungssysteme, als Basis für die Zulassungen durch die Technischen Aufsichtsbehörden.

²⁴ Die Entscheidung, welcher Standard genutzt wird, sollte eine Modernisierung aber nicht aufhalten. Siehe dazu Abschnitt 4.1, darin insb. den „Exkurs: Funktechnologien“ (Abbildung 4-4).

²⁵ Die grundsätzlichen Optionen, wie dies realisiert werden könnte, wird in Abschnitt 5.4 dargestellt.

9.4.4.3 Bereitstellung finanzieller Mittel für den Innovationsaufwand

Bund und Länder sollten im Hinblick auf die erheblichen Mehrkosten einer erstmaligen Einführung neuer Technologien, die von einzelnen kommunalen Akteuren nicht getragen werden können, vermehrt Forschung und Modellprojekte zu Vernetzung und Fahrerassistenz im Straßenbahnbereich mit finanziellen Mitteln fördern. Dies kann einen Beitrag zur Entwicklung bundesweiter Erkenntnisse und Standards darstellen. Zudem sollten Normierungsempfehlungen der Verbände als Fördervoraussetzungen gelten. Inhaltliche Schwerpunkte sind hier:

- Kommunikationssysteme und digitale Karten
- intelligente Verkehrssteuerung durch LSA (z. B. im Bereich Prognosegenauigkeit und Lösungsalgorithmen für LSA-Schaltungen sowie Fahrempfehlungen an die Verkehrsteilnehmer).
- Automatisierung und Teleoperation (Modellprojekte im Realbetrieb, mit dem Ziel Zulassungskriterien zu entwickeln und zu verifizieren).

9.4.4.4 Kommunaler Abstimmungsbedarf hinsichtlich Investitionsstrategien in innovative zukunftssichere digitale Infrastrukturen

Öffentliche Verkehrsunternehmen und Kommunalverwaltungen sollten sich gemeinsam zu Verantwortlichkeiten und Kompetenzbereichen bei Beschaffung und Betrieb vernetzter Steuerungssysteme des städtischen Verkehrs abstimmen²⁶. Zuerst sollte das langfristige Ziel der Kommune und der Verkehrsunternehmen definiert werden, welches die Anforderungen an die technischen Systeme bestimmt: Wie leistungsfähig muss die Funktechnologie sein? Welche Glasfaseranbindungen und infrastrukturseitige Sensoren werden benötigt? Welche Schichten digitaler Karten werden benötigt? Aufgrund der hohen Investitionskosten wird der Ausbau von Vernetzung und Automatisierung sukzessive erfolgen müssen. Daher bedarf es eines Ausbau-Fahrplans, um zum Beispiel die Auswahl der mit neuen Komponenten auszustattenden Infrastrukturelemente und Fahrzeuge aufeinander abzustimmen.

²⁶ Spezielle Abstimmungsfragen hinsichtlich der intelligenten Verkehrssteuerung von LSA wurden in Abbildung 4-5, dargestellt.

10 Fazit

Für den Straßenbahnverkehr werden der **Sachstand** und die Entwicklungsperspektiven von Vernetzung und Automatisierung erstmals zusammenfassend analysiert. Hierfür sind eine Vielzahl an Literaturquellen und Berichte über Praxisbeispiele ausgewertet worden: Etwa aus benachbarten Bereichen wie dem Automobilbereich, bei U-Bahnen und Eisenbahnen. Für Straßenbahnen wird der aktuelle Sachstand zum vernetzten Fahren, zu Fahrerassistenzsystemen und der Teilautomatisierung dargestellt. Dies sind als Startpunkte auch die drei Säulen zur Entwicklung einer Roadmap: Als unterstützende **Fahrerassistenzsysteme** kommen etwa Kollisionsschutzassistenten unterschiedlicher Anbieter zunehmend zum Einsatz. Erste Modellprojekte beispielsweise das mittlerweile abgeschlossene mFund Vorhaben AStriD (Automatische Straßenbahn im Depot) setzen sich mit der **Teilautomatisierung** von Straßenbahnen auseinander. Auch zum **vernetzten Fahren** im öffentlichen Nahverkehr bestehen verschiedene Ansätze zur Integration von datenbasierten vernetzten Steuerungen, seien es Betriebsleitsysteme mit vernetzten Informationen für das Fahrpersonal oder Fahrzeug-Infrastruktur-Interaktionen, wie mit Lichtsignalanlagen im Projekt VERONIKA (Kassel).

Der Bericht **analysiert die Möglichkeiten der Querschnittstechnologien funktional**. Damit liefert er einen Überblick und fachlichen Einstieg in die technischen Potenziale von Sensorik, Vernetzungs- und Kommunikationstechnik und Automatisierungstechnik im Hinblick auf den Einsatz im Straßenbahnbereich. Aufbauend darauf wird für die Technologieentwicklung eine Roadmap skizziert. Diese Roadmap zeigt auf, dass bereits mit dem Einsatz von einfachen Automatisierungstechniken oder fokussierten Vernetzungsanwendungen oder Assistenzsystemen wirksame Verbesserungen im Praxiseinsatz erzielt werden. Entsprechende Investitionen können sukzessive zu funktional hoch automatisierten Systemen mit vielfältigen Fähigkeiten integriert werden, mit denen auch das Fahrpersonal sowohl in kritischen Situationen unterstützt sowie bei einfachen Standardaufgaben entlastet werden kann. Eine Entwicklung in Richtung fahrerloser Bahnen ist als Perspektive in der Roadmap aufgegriffen und es werden auch die Herausforderungen für die Zulassung eines fahrerlosen Fahrens erörtert und konkrete Schritte in dieser Richtung aufgezeigt. Gleichwohl zeigt die Bewertung, dass im aktuellen Sachstand ein großflächiger Einsatz **fahrerloser Systeme im Straßenverkehr** nicht konkret absehbar ist und über vsl. mehr als 10 Jahre noch wesentliche Teilfähigkeiten zu entwickeln wären.

Zu innovativen Teilfähigkeiten werden anhand eines Realdaten-Modells für das Karlsruher Straßennetz beispielhaft **Szenarien** entwickelt, die hinsichtlich **verkehrlicher Wirkungen und deren wirtschaftlicher Bewertung** analysiert werden. Dabei werden Investitionsstrategien modelliert, die mit Einsatz von spezifischen Sensoren, Vernetzungen und Steuerungen bestimmten betrieblichen Störquellen begegnen. Diese sind aus Verkehrsdaten real erhobene Kreuzungsverspätungen, Haltestellenverspätungen, Dispositionsverspätungen und nicht optimierte Fahrtverläufe (Bremsen/Beschleunigen). Das Ergebnis der Betriebssimulation zeigt bereits bei einem grundsätzlich als gegeben angenommenen Fahrplangerüst auf, dass die Vorteile zur Verbesserung des Betriebs (z. B. verbesserte Fahrplanstabilität und Fahrzeitverkürzungen) in einer betriebswirtschaftlichen Bewertung die Investitionskosten übersteigen können. Die ermittelten Vorteile einer volkswirtschaftlichen Bewertung mit den auf die Fahrgäste entfallenden wesentlichen Nutzen der Fahrzeitverkürzung bzw. Störungsvermeidung übersteigen die Investitionskosten in allen modellierten Szenarien wesentlich, oft um ein Vielfaches.

Nicht quantitativ bewertet wurden wirtschaftliche Effekte eines fahrerlosen Betriebs oder die Wirtschaftlichkeit von Ersatzinvestitions-Strategien bei Obsoleszenz bestehender Systeme durch innovative Systeme. Die Verhältnisse in den Verkehrsbetrieben hinsichtlich Investitionsumfang und erzielbarem Nutzen in konkreten Einsatzfeldern sind für den Rahmen dieser Analyse zu vielfältig und bedürfen individueller Bewertungen im Einzelfall. Zudem sind die Investitionskosten für die modellierten Szenarien - abgeleitet

von Erfahrungen aus anderen Investitionen - unter der Annahme geschätzt worden, dass innovative Systeme bereits als Stand der Technik und in relevanten Stückzahlen im Markt verfügbar sein werden.

Ausgehend von der aktuellen Situation werden die **Rahmenbedingungen, Hemmnisse und Treiber** hin zu einer breiten praxisgerechten, zukünftigen Entwicklung und Verbreitung dieser Technologien analysiert. Eine Herausforderung ist es, im vergleichsweise kleinteiligen kommunalen Straßenbahnmarkt die Innovationskraft für die Entwicklung und Implementierung neuer Standards zu schaffen. Angesichts der Konkurrenzsituation zu anderen Verkehrsträgern und des vorhandenen Problemdrucks sowie der technologischen Möglichkeiten scheint es mittelfristig unausweichlich, auch im Straßenbahnbereich die Potenziale moderner digitaler Vernetzung und Automatisierung zu nutzen, etwa zur Kostensenkung, zum Ersatz veralteter Techniken, zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Betriebs, zur Entlastung des Personals und zu verbesserter Datenverfügbarkeit zur Betriebssteuerung und Kundeninformation. Besonders aussichtsreich erscheint die Nutzung von Technologien, die im Kraftfahrzeugbereich entwickelt werden. Hier könnte der Straßenbahnbereich für eine Praxisanwendung des teleoperierten oder automatisierten Fahrens ggfs. sogar als Türöffner im kommunalen Verkehr dienen, weil ein Einsatz auf klar definierten Linien einfacher sein könnte als im Kfz-Bereich.

Mit **Handlungsempfehlungen in vier Bereichen** werden Hinweise für ein verkehrsbetriebeübergreifend abgestimmtes Vorgehen gegenüber den identifizierten Herausforderungen entwickelt:

- Es wird daher empfohlen, dass sich die Branchenverbände und Verkehrsunternehmen im Bereich der Normierung und Standardisierung gezielt in entsprechende Gremien einbringen und insbesondere wirtschaftliche Schnittstellen für effiziente Teil-Produktmärkte mitgestalten.
- Zudem sollten Gesetzgeber, Zulassungsbehörden und Verkehrsunternehmen einen geeigneten rechtlichen und institutionellen Rahmen für die Zulassung von Automatisierungstechnologien abstimmen.
- Darüber hinaus sollten Modell- und Pilotprojekte zur Automatisierung und Vernetzung im Straßenbahnbereich verstärkt finanziell gefördert werden.
- Zudem wird Akteuren im Bereich kommunaler Infrastrukturen / ÖPNV empfohlen, besser koordinierte Investitionsstrategien zur Bündelung von Teil-Investitionen und Ausschöpfung vernetzter Fähigkeiten im ÖPNV und kommunaler Verkehrssteuerung zu entwickeln.

Die nachhaltige Koordinierung der o.g. Lösungsansätze zur Automatisierung und Vernetzung von BOStrab-Bahnen könnte wirkungsvoll unterstützt werden durch **Bildung eines Kompetenznetzwerks**. Dies könnte mit Hilfe wissenschaftlicher Ressourcen aus weiteren Forschungsaktivitäten, z. B. mit Hilfe des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung gebildet werden. Auch hilfreich wäre die Bildung einer Arbeits- oder Steuerungsgruppe aus dem Sektor, z. B. als Behördenarbeitsgruppe oder bei einem Branchenverband, die strategische Themen zur Entwicklung und Erprobung von Fähigkeiten und Standards adressiert und verfolgt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wege zur Vernetzung und Automatisierung	10
Abbildung 2-1: Architektur von CBTC-Systemen	14
Abbildung 2-2: Ranking Fahrerassistenzsysteme durch Verkehrsunternehmen	19
Abbildung 2-3: V2X-Kommunikation	24
Abbildung 3-1: Grundfunktionen der Automatisierung	38
Abbildung 3-2: Querschnittstechnologien des automatisierten und vernetzten Fahrens	39
Abbildung 3-5: Vier-Schichten-Modell lokaler, digitaler Karten	50
Abbildung 3-8: Unterschiedliche Netzwerktypen und Kommunikationstechnologien	54
Abbildung 3-9: Methoden für die Koexistenz zweier Kommunikationstechnologien	59
Abbildung 3-10: Zeitmultiplexverfahren zur Gleichkanalkoexistenz unterschiedlicher Kommunikationstechnologien	60
Abbildung 3-12: Beispielhafte Darstellung einer Kommunikationsinfrastruktur	62
Abbildung 4-1: Umfrageergebnisse zum Thema Automatisierungspotenzial	67
Abbildung 4-2: Kategorisierung und Nomenklatur der Lösungskonzepte	69
Abbildung 4-3: Qualitative Bewertung der Lösungskonzepte anhand von Sicherheitsanforderungen und Technologiereife	78
Abbildung 5-1: Vorgehensweise der quantitativen Abschätzung der Effekte einer Automatisierung	86
Abbildung 5-2: Unterteilung der ehemaligen Straßenbahnlinie 1 in typische Netzabschnitte	87
Abbildung 5-3: Grafische Analyse eines Teilabschnitts der Linie 1, Karlsruhe	88
Abbildung 5-4: Technologische Lösungskonzepte für die Simulation von Automatisierungsszenarien im gesamten Netz	93
Abbildung 5-5: Übersicht der Einflussparameter zur Umsetzung der Automatisierungsszenarien in OpenTrack	94
Abbildung 5-6: Reale Haltezeitenverteilung Haltestelle Mühlburger Tor	96
Abbildung 5-7: Gegenüberstellung Fahrzeitprofile Straßenbahnlinie 1 (Fahrtrichtung Oberreut)	99
Abbildung 5-8: Gegenüberstellung Fahrzeitprofile Straßenbahnlinie 1 (Fahrtrichtung Durlach)	99
Abbildung 5-9: Volkswirtschaftlicher Nutzen der untersuchten Szenarien	106
Abbildung 5-10: Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Potenzialabschätzung	106
Abbildung 5-11: Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Potenzialabschätzung	107
Abbildung 5-12: Zusammensetzung der betriebswirtschaftlichen Nutzen	108
Abbildung 5-13: Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Potenzialabschätzung	108
Abbildung 5-14: Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Potenzialabschätzung	109
Abbildung 5-15: Volkswirtschaftliches Nutzenpotenzial von Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbereich in Deutschland	111

Abbildung 5-16: Extrapolierte Investitionskosten für Automatisierungsfunktionen im Straßenbahnbereich in Deutschland	111
Abbildung 6-1: Verortung der Kernfunktionen der Automatisierung im Fahrzeug	118
Abbildung 6-2: Abhängigkeiten zwischen Anwendern und Industrie	120
Abbildung 7-1: Die relevanten Akteursgruppen	124
Abbildung 7-2: Kommunikationssystem mit relevanten Akteuren - Systemillustration	125
Abbildung 7-3: Kommunikationssystem - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure	129
Abbildung 7-4: Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen (LSA) - Systemillustration	130
Abbildung 7-5: Handlungsempfehlung/Roadmap für C2X-basierte ÖPNV-Priorisierung	132
Abbildung 7-6: Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen (LSA) - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure	132
Abbildung 7-7: Digitale Karten - Systemillustration	133
Abbildung 7-8: Digitale Karten - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure	135
Abbildung 7-9: Teleoperation - Systemillustration	137
Abbildung 7-10: Teleoperation - Hemmnisse, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure	138
Abbildung 7-11: Automatisiertes Fahren - Herausforderungen, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure	140
Abbildung 8-1: Übersicht grundsätzlicher Regelungsrahmen	143
Abbildung 8-2: Übersicht zur grundsätzlichen Aufstellung technischer Regeln	146
Abbildung 8-3: Verortung der Beispiele zu regelnder Querschnittstechnologien	153
Abbildung 9-1: Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren	159
Abbildung 9-2: Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren	161
Abbildung 9-3: Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren	163
Abbildung A-1: Sensitivitätsanalysen – volkswirtschaftliche Potenzialabschätzung	208
Abbildung A-2: Sensitivitätsanalysen – betriebswirtschaftliche Potenzialabschätzung	209

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Automatisierungsgrade im Schienenverkehr	12
Tabelle 2-2:	Fahrerassistenzsysteme aus dem Automobilbereich	18
Tabelle 2-3:	Beispiele für standardisierte V2X-Nachrichtentypen.....	27
Tabelle 2-4:	Übersicht zu bisherigen Forschungsschwerpunkten automatisierter Straßenbahnen.....	31
Tabelle 3-1:	Hauptaufgaben des Straßenbahnbetriebs.....	35
Tabelle 3-2:	Funktionaler Vergleich Unterschiedlicher Sensortypen.....	42
Tabelle 3-3:	Funktionsweise und Charakterisierung von Lokalisierungsverfahren aus dem Schienenverkehr	44
Tabelle 3-5:	Zusammenfassung Methoden und Sensoren und deren Eignung für Straßenbahnautomatisierung.....	46
Tabelle 3-6:	Vergleich von LPWAN-Technologien.....	56
Tabelle 3-7:	Bewertung der Kommunikationstechnologien	57
Tabelle 3-8:	Optionen zur Realisierung von Interoperabilität	60
Tabelle 4-1:	Beispielhafte Beurteilung der Notwendigkeit von Querschnittstechnologien für die gewählten Konzepte	79
Tabelle 4-2:	Beispielhafte Bewertung der Möglichkeit einer Automatisierung anhand ausgewählter Lösungskonzepte.....	81
Tabelle 4-3:	Vergleich CBTC und automatisierte Straßenbahn hinsichtlich ATP, ATO und ATS	84
Tabelle 5-1:	Aufteilung typische Netzabschnitte Linie 1	90
Tabelle 5-2:	Betriebssituation pro typischem Netzabschnitt Linie 1.....	90
Tabelle 5-3:	Betriebsbereiche und -orte in Straßenbahnverkehr und damit verbundene Hauptaufgaben	92
Tabelle 5-4:	Ergebnisse Simulation Szenarien Linie 1 Fahrtrichtung Oberreut.....	100
Tabelle 5-5:	Ergebnisse Simulation Szenarien Linie 1 Fahrtrichtung Durlach	100
Tabelle 5-6:	Ergebnisse Simulation Szenarien für alle sechs Straßenbahnlinien	101
Tabelle 5-7:	Berücksichtigte Nutzenvariablen.....	102
Tabelle 5-8:	Monetarisierung der Nutzenkomponenten.....	104
Tabelle 5-9:	Übersicht über die Investitionskosten (in Mio. €).....	105
Tabelle 5-10:	Unfallursachen mit Strassenbahn als Hauptverursacher, 2019.....	112
Tabelle 5-11:	Volkswirtschaftliches Nutzungspotential durch den Wegfall von Unfällen mit Straßenbahn als Hauptverursacher.....	113
Tabelle 6-1:	Möglichkeiten der fahrerlosen Fahrzeugsteuerung in verschiedenen Verkehrssituationen, aktuell und in Zukunft.....	119
Tabelle E 8-1:	Zusammenfassung der Standpunkte des VDV zu den Anforderungen an einen Rechtsrahmen für Level 4 ÖV.....	150
Tabelle A-1:	Übersicht Literatur	195
Tabelle A-2:	Chancen, Herausforderungen und Anforderungen an unterschiedliche Anwendungsfelder automatisierter Funktionen	196
Tabelle A-3:	Beurteilung der Notwendigkeit von Querschnittstechnologien für alle untersuchten Lösungskonzepte (1/2).....	198

Tabelle A-4: Beurteilung der Notwendigkeit von Querschnittstechnologien für alle untersuchten Lösungskonzepte (2/2).....	200
Tabelle A-5: Bewertung der Lösungskonzepte (1/2).....	202
Tabelle A-6: Bewertung der Lösungskonzepte (2/2).....	203
Tabelle A-7: Technologiekosten Fahrzeug.....	204
Tabelle A-8: Technologiekosten Infrastruktur.....	205
Tabelle A-9: Technologiekosten Kommunikation und Betriebssteuerung-Zentrale.....	206
Tabelle A-10: Tabellarische Analyse Teilabschnitt Linie 1	207

Glossar

Begriff	Erklärung
Allokation	Zuweisung bestimmter Ressourcen
Bake-Funk-System	Bei dieser etwa 30 Jahre alten Technologie wird über eine streckenseitig ortsfeste Infrarotbake beim Überfahren ein Datensatz mit Ortsinformationen komkommender Meldepunkte an die Straßenbahn übertragen.
Broadcast	Nachrichtenformat
Cloud-basierte Dienste	Nutzung von Software und Diensten über das Internet
C-Roads Plattform	gemeinsame Initiative europäischer Mitgliedsstaaten und Straßenbetreiber zur Erprobung und Implementierung von C-ITS-Anwendungen darstellt
Groupcast	Nachrichtenformat
kooperative Fahrspurwechsel	Wechsel der Fahrspur in Abstimmung mit anderen Verkehrsteilnehmern
kooperatives Überholen	Überholen in Abstimmung mit anderen Verkehrsteilnehmern
Latenz	Zeitraum zwischen Ereignis und Eintreten einer Reaktion
listen-before-talk Mechanismus	Mit diesem Verfahren wird vor der Übertragung von Datenpaketen die Belegung des Funkkanals überprüft.
Objektdetektion, -tracking	Erfassung von Objekten
Odometrie	Wegmessung anhand der Daten des Vortriebsystems, im einfachsten Fall durch Radumdrehungszähler
Operator	Person, welche die Teleoperation durchführt
Perzeption	Informations- und Wahrnehmungsverarbeitung
Platooning	elektronische Deichsel
predictive maintenance	prädiktive (vorbeugende und zustandsorientierte) Instandhaltung
R09/16 Telegramm	standardisiertes Nachrichtenformat
Redundanz	zusätzliches Vorhandensein eines technischen Systems zur Erhöhung der Betriebssicherheit im Falle von Fehlern oder Ausfällen
Service Provider	Dienstanbieter
Sidelink Kommunikation	Diese ermöglicht die direkte Verbindung zwischen zwei Knoten ohne dass eine Verbindung zum Mobilfunknetz notwendig ist. Diese Art der Direktkommunikation wird beim LTE-V2X verwendet und über die sogenannte PC5 Schnittstelle realisiert.
Teleoperation	Übernahme der Fahrzeugführung bspw. durch einen Mitarbeiter in der Leitstelle
Trajektorie	zeitabhängiger Verlauf des Weges bzw. Beschreibung von diesem
Unicast	Nachrichtenformat

**Up-/Downlink
Kommunikation**

Damit wird die indirekte Verbindung zwischen zwei Knoten (z. B. zwei Fahrzeuge) über das Mobilfunknetz bewerkstelligt. Dabei kommuniziert ein Fahrzeug über die konventionelle Mobil-funkschnittstelle (sog. Uu Interface) mit der nächstgelegenen Mobilfunkzelle, die wiederum mit dem Zielfahrzeug vernetzt ist.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
3GPP	3 rd Generation Partnership Project	Weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien für die Standardisierung im Mobilfunk
4G	4.Generation	Mobilfunkstandard der 4. Generation, auch LTE genannt
5G	5. Generation	Mobilfunkstandard der 5. Generation, auch NR genannt
5GAA	5G Automotive Association	Globale, industrieübergreifende Organisation aus Unternehmen der Kfz- und Kommunikationsbranche
AfA	Absetzung für Abnutzung	Abschreibung
AStrID	Autonome Straßenbahn im Depot	Projekt in Potsdam
ATC	Automatic Train Control	Überbegriff für verschiedene Zugbeeinflussungssysteme (kann ATP, ATO und ATS beinhalten)
ATO	Automatic Train Operation	Automatischer Zugbetrieb mit unterschiedlichen Stufen der automatisierten Zugsteuerung
ATP	Automatic Train Protection	Automatische Zugbeeinflussung
ATS	Automatic Train Supervision	Automatische Zugüberwachung
AVG	Albtal-Verkehrs-Gesellschaft	
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	
BHO	Bundshaushaltsordnung	
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	
BMDV	Bundeministerium für Digitales und Verkehr	
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Bezeichnung des heutigen BMDV in den Jahren 2013 bis 2021
BOStrab	Verordnung über den Bau und Betrieb von Straßenbahnen	Kurzform: Straßenbahn-Bau und Betriebsordnung
BVWP	Bundesverkehrswegeplanung	
CA	Certification Authority	
CAM	Cooperative Awareness Message	Standardisierte V2X-Nachricht, enthält z. B. Daten zur Fahrzeugposition
CBTC	Communication Based Train Control	Überbegriff für Systeme zur Zugsicherung, die auf bidirektionaler Datenkommunikation zwischen Fahrzeugen und der Streckeninfrastruktur basieren

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
CCD	Charge-Coupled Device	lichtempfindliches elektronisches Bauteil für Kamerasensoren
Cellular-V2X	Cellular-Vehicle-to-X	Kommunikationstechnologie zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und einem anderen System (Everything) über Mobilfunk, hierzu zählt auch LTE-V2X und NR-V2X
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems	Oberbegriff für vernetzte und intelligente Verkehrssysteme
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor	Halbleiterbauelement für Kamerasensoren
COMPAS	Collision and Overspeed Monitoring and Prevention Assistance System	Fahrerassistenzsystem von Bombardier, Erweiterung von ODAS
CPM	Cooperative Perception Message	Standardisierte V2X-Nachricht, enthält Informationen über lokal detektierte Objekte
C-V2X	Cellular-Vehicle-to-X	siehe Cellular-V2X
DDoS	Distributed Denial of Service	Häufung von Kommunikationsanfragen im Kommunikationsnetz
DENM	Decentralized Environmental Notification Message	Standardisierte V2X-Nachricht, enthält z. B. Informationen zu Typ und Position von Gefahren auf der Straße
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung	Regeln zur Verarbeitung personenbezogener Daten
DSRC	dedicated short range communication	Abkürzung für amerikanischen Kommunikationsstandard nach IEEE 802.11p
DTC	Digital Train Control	digitales Zugsicherungssystem
DTO	Driverless Train Operation	Bezeichnung für GoA 3: fahrerloser Schienenverkehr
eMBB	enhanced Mobile BroadBand	verbesserte mobile Breitbandleistung
eMTC	Enhanced Machine Type Communication	Funkstandard, der den LPWANs zuzuordnen ist
ETCS	European Train Control System	Europäisch einheitlicher und interoperabler Standard für Zugsicherungssysteme
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Europäische Normungsgesellschaft für weltweit anwendbare Standards für Informations- und Kommunikationstechnologien
ETSI ITS-G5	European Telecommunications Standards Institute Intelligent Transport-System-Generation 5	Bezeichnung des in Europa geltenden Standards für V2X-Kommunikation über WLAN
EU	Europäische Union	
FAS	Fahrerassistenzsystem	Systeme zur Unterstützung des Fahrers bei der Fahraufgabe

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
GLOSA	Green Light Optimal Speed Advisory	Assistenzsystem zur Anzeige der Optimalgeschwindigkeit, um LSA beim Wechsel auf grün zu erreichen
GNSS	Global Navigation Satellite System	Technologie zur Ortung basierend auf Satellitendaten
GoA	Grade of Automation	Automatisierungsstufen des Schienenverkehrs (GoA 0 bis GoA 4)
GPS	Global Positioning System	Unterkategorie von GNSS
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Rail	Spezieller Funkstandard für Funkverbindungen im Schienenverkehr, basierend auf GSM (2G)
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz	
HD-Karte	High Definition Karte	hochpräzise digitale Landkarte
HMI	Human-Machine-Interface	Bezeichnung für jegliche Schnittstellen zwischen Menschen und Maschinen
I2V	Infrastructure-to-Vehicle	Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Weltweiter Berufsverband von Ingenieuren, Techniker, Wissenschaftlern und angrenzenden Berufen aus der Elektro- und Informationstechnik
IMU	Inertial Measurement Unit	Messeinheit bestehend aus Beschleunigungssensoren und Gyroskopen zur Bestimmung relativer Bewegungen
INS	Inertial Navigation System	Inertiales Navigationssystem bestehend aus Beschleunigungs- und Odometriesensoren
IoT	Internet of Things	
ITS	Intelligent Transport Systems and Services	Internationale Partnerschaft aus Forschung, Wirtschaft und Anwendung im Bereich der intelligenten Transportsysteme
ITS-G5	Intelligent Transport-System-Generation 5	siehe ETSI ITS-G5
KI	künstliche Intelligenz	englisch: Artificial Intelligence (AI)
KIT	Karlsruher Institut für Technologie	
KVV	Karlsruher Verkehrsverbund	
LDM	Local Dynamic Map	Lokale digitale Karte, die Informationen auf unterschiedlichen Ebene bereitstellt (permanent-statisch, temporär-statisch, geringfügig dynamisch und hochdynamisch)
LGPR	Localizing Ground Penetrating Radar	bodendurchdringende Radarsensoren
LIDAR	Light Detection and Ranging	Sensortechnologie basierend auf Laserstrahlung

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
LoRa	Long Range (Wide Area Network)	drahtloses Netzwerkprotokoll, LPWANs zuzuordnen
LoRa	Long Range (Wide Area Network)	Drahtloses Netzwerkprotokoll, LPWANs zuzuordnen
LPWAN	Low-Power Wide Area Network	Kommunikationsnetzwerk mit geringem Energieverbrauch, hoher Kapazität und Reichweite
LSA	Lichtsignalanlage	Ampelanlage
LStZ	Lichtsignalsteuerungszentrale	Zentrale Einrichtung zur Überwachung und Steuerung von LSA
LTE	Long Term Evolution	Mobilfunkstandard der 4. Generation
LTE-V2X	Long Term Evolution-Vehicle-to-X	siehe Cellular-V2X
MAAS	Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und zu Assistenzsystemen der Straßenbahn	Projekt in Darmstadt
MAC	Medium Access Control	Medienzugriffsteuerung, steuert den Zugriff auf eine gemeinsam genutzte Bitübertragungsschicht
MAP	Map Message	Standardisierte V2X-Nachricht, enthält Informationen zu Basisdaten der Infrastruktur
mCLOUD		offenes Datenportal des BMDV, geht im Laufe der Jahre 2022 und 2023 schrittweise in der Mobiltheke auf
MDM	Mobilitätsdatenmarktplatz	nationaler Zugangspunkt für Verkehrsinformationen in Deutschland, betrieben von der BAST
MDS	Mobility Data Space	europäischer Datenraum für den Bereich Mobilität
mMTC	massive Machine Type Communications	energieeffiziente Handhabung einer hohen Anzahl von Geräten
NAP	National Access Points	nationale Zugangspunkte
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	Funkstandard, der den LPWANs zuzuordnen ist
NBW	Nettobarwert	Differenz der auf die Gegenwart abgezinsten zu erwartenden Nutzen und den Kosten einer Investition
NKQ	Nutzen-Kosten-Quotient	Verhältnis zwischen den auf die Gegenwart abgezinsten zu erwartenden Nutzen und den Investitionskosten einer Maßnahme
NR	New Radio	Mobilfunkstandard der 5. Generation
NR-V2X	New Radio-Vehicle-to-X	Kommunikationstechnologie zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und einem anderen System (Everything) über 5G

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
NTO	Non-Automated	Bezeichnung für GoA 1: nicht automatisierter Schienenverkehr
OBU	On-Board-Unit	Kommunikationsgerät im Fahrzeug zur Realisierung von V2X-Funktionen
OCA	OpenTraffic Systems City Association e. V.	
OCIT	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems	Standardisierte Schnittstellen für Datenaustausch zwischen Elementen des Verkehrsmanagements
OCIT-C	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems - Center to Center	
OCIT-O	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems – Outstations	
ODAS	Obstacle Detection Assistance System	Fahrerassistenzsystem zur Kollisionsvermeidung von Bombardier
ODD	Operational Design Domain	Beschreibt die Rahmenbedingungen für den Betrieb von automatisierten Fahrzeugen
ODG	OCIT Developer Group	
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr	sämtliche Mobilitätssysteme zur Beförderung von Personen, welche für jeden (Öffentlichkeit) nutzbar sind
PAN	Personal Area Network	
PC5		Kommunikationsschnittstelle zur Sidelink-Kommunikation für Mobilfunk
PHY	Physical Layer	Physische Schnittstelle, Bitübertragungsschicht (z. B. Transceiver, Antennen, Verstärker)
PKI	Public Key Infrastructure	Authentifizierungs- und Zertifizierungssystem zur Absicherung von Kommunikationskanälen
Radar	Radio Detection and Ranging	Sensortechnologie basierend auf Radarwellen
RSU	Road-Side-Unit	Kommunikationsgerät in der Infrastruktur zur Realisierung von V2X-Funktionen
RSUZ	Road Side Unit-Zentrale	
RTK	Real Time Kinematik	Korrektur der Genauigkeit der geographischen Lokalisierung
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule	Technische Hochschule in Aachen
SAE	Society of Automotive Engineers	Gemeinnützige Standardisierungsorganisation für Mobilitätstechnologie

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Methode zur gleichzeitigen Kartierung der Umgebung und Lokalisierung in ebendieser
SPAT	Signal Phase and Timing Message	Standardisierte V2X-Nachricht, enthält Informationen zur Ampelphase
SRM		Priorisierungsanforderung von OBU
SSM		Anforderungsbestätigung durch RSU
STO	Semi-Automated	Bezeichnung für GoA 2: teilautomatisierter Schienenverkehr
TFCW	Train Forward Collision Warning System	Fahrerassistenzsystem zur Kollisionsvermeidung von Bosch
UITP	Union Internationale des Transports Publics (franz.)	Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications	Kommunikation mit hoher Zuverlässigkeit und niedriger Latenz
UTO	Unattended	Bezeichnung für GoA 4: unbemannter Schienenverkehr
Uu Interface		siehe Uu Schnittstelle
Uu Schnittstelle		konventionelle Mobilfunkschnittstelle zur Up- und Downlink-Kommunikation
V2I	Vehicle-to-Infrastructure	Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur
V2N	Vehicle-to-Network	Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Netzwerken, Clouds, Backends usw.
V2P	Vehicle-to-Pedestrian	Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Fußgängern oder Radfahrern
V2V	Vehicle-to-Vehicle	Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander
V2X	Vehicle-to-X, Vehicle-to-Everything	Oberbegriff für unterschiedliche Arten der Fahrzeugkommunikation
VBK	Verkehrsbetriebe Karlsruhe	
VDV	Verband deutscher Verkehrsunternehmen	
VERONIKA	Vernetzung von Fahrzeugen des ÖPNV mit verkehrabhängigen Lichtsignalanlagen auf Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS-G5	Projekt in Kassel
ViP	Verkehrsbetrieb Potsdam	
VRU	Vulnerable Road User	nichtmotorisierte/ungeschützte Verkehrsteilnehmer
WiFi	Wireless Fidelity	Markenbezeichnung für den drahtlosen WLAN-Standard IEEE 802.11

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
WLAN	Wireless Local Area Network	Drahtloses lokales Netzwerk, vergleichsweise geringe Reichweite aber hohe Datenraten und geringe Latenz
WLAN-V2X	Wireless Local Area Network-Vehicle-to-X	Kommunikationstechnologie zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und einem anderen System (Everything) über WLAN
TSP	Traffic Signal Priority Request	Steuerung der Lichtsignalanlage um Einsatzfahrzeugen Vorrang zu ermöglichen

Quellenverzeichnis

- [1] Allianz pro Schiene, 2016. Selbstfahrende Metros in Europa: Eine Milliarde Fahrgäste jedes Jahr [online]. [Zugriff am: 04.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/uebersicht-selbstfahrende-metros-europa/>
- [2] SAE International, 2021. SAE J3016, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles [online]. [Zugriff am: 02.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/
- [3] International Electrotechnical Commission, IEC 62267, Railway applications - Automated urban guided transport (AUGT) - Safety requirements [online]. [Zugriff am: 21.01.2022]. Verfügbar unter: <https://webstore.iec.ch/publication/6681>
- [4] L. Schnieder, 2020. Communications-Based Train Control (CBTC). Komponenten, Funktionen und Betrieb. Berlin: Springer Vieweg.
- [5] Digitales Nürnberg, Echtes Pionierstück: Nürnbergs automatische U-Bahn [online]. [Zugriff am: 05.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.nuernberg.de/internet/digitales_nuernberg/automatische_ubahn_nuernberg.html
- [6] C. Jehle, 2020. Der Traum vom automatisierten Transport [online]. [Zugriff am: 05.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/tp/features/Der-Traum-vom-automatisierten-Transport-4996679.html>
- [7] Tagesspiegel, 2019. BVG plant automatische U-Bahn: Neuer Versuch startet 2025 auf der U5 und U8 [online]. [Zugriff am: 05.08.2022]. Verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/berlin/bvg-plant-automatische-u-bahn-neuer-versuch-startet-2025-auf-der-u5-und-u8/24962772.html>
- [8] Bundesministerium der Justiz, 2019. Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab) [online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987/
- [9] UITP, 2019. World report on metro automation 2018 [online]. [Zugriff am: 05.08.2022]. Verfügbar unter: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf
- [10] J. Farooq, 2017. Performance Analysis and Evaluation of Advanced Designs for Radio Communication Systems for Communications-Based Train Control (CBTC) [online]. [Zugriff am: 05.08.2022]. Verfügbar unter: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/performance-analysis-and-evaluation-of-advanced-designs-for-radio>
- [11] IEEE, 2004. IEEE Standard 1474.1-2004 for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements [online]. Verfügbar unter: doi:10.1109/IEEESTD.2004.95746
- [12] Siemens Mobility GmbH, 2018. Trainguard MT - Optimal performance with the world's leading automatic train control system for mass transit [online]. [Zugriff am: 15.08.2021]. Verfügbar unter:

- <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab68c904-08fd-416c-8e28-60a18f8012af/smocbtctrainguardmten.pdf>
- [13] Thales Group, 2013. SelTrac CBTC - communications-based train control for urban rail [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/d7/asset/document/seltracr_cbtc_brochure.pdf
- [14] G. Hermes, N. Jagodzinski, M. Jelinski, K. Lisetska, C. Schindler und T. Siefer, 2018. Autonomes Fahren: Bewertung der Potenziale, Analyse bestehender Sicherheitsanforderungen und Prüfung der Übertragbarkeit auf das deutsche Eisenbahnsystem. Forschungsvorhaben 97.370/2016. Bonn.
- [15] Europäische Kommission, 2005. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament und den Rat über die Einführung des Europäischen Zugsicherungs-/Zugsteuerungs- und Signalgebungssystems ERTMS/ETCS, Brüssel.
- [16] Forschungs-Informationssystem für Mobilität und Verkehr, 2017. European Train Control System (ETCS) [online]. [Zugriff am: 22.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/322409/>
- [17] M. Wegener, 2008. European Train Control System (ETCS) [online]. [Zugriff am: 22.11.2021]. Verfügbar unter: <http://www.marco-wegener.de/technik/etcs.htm>
- [18] A. Wilkens, 2021. Zugsicherungssystem: 340 Streckenkilometer in Deutschland haben ETCS [online]. [Zugriff am: 22.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/news/Zugsicherungssystem-340-Streckenkilometer-in-Deutschland-haben-ETCS-6159728.html>
- [19] M. Villalba, September 2016. Pioneering ATO over ETCS Level 2, *Railway Gazette International*. S. 107-109, September 2016
- [20] G. Tasler und V. Knollmann, Einführung des hochautomatisierten Fahrens – auf dem Weg zum vollautomatischen Bahnbetrieb, *Signal + Draht*. Nr. 6/2018, S. 6-14.
- [21] Deutsche Bahn AG, Digitale S-Bahn Hamburg: Bald soll sie alleine fahren [online]. [Zugriff am: 22.11.2021]. Verfügbar unter: <https://digitale-schiene-deutschland.de/Digitale-S-Bahn-Hamburg>
- [22] S. Prawitz, Präzise lokalisierte Züge schaffen in Hamburg mehr Kapazität [online]. [Zugriff am: 22.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.egovernment-computing.de/praezise-lokalisierte-zuege-schaffen-in-hamburg-mehr-kapazitaet-a-988206/>
- [23] H.-S. Jung, M. Ruffer und C. Schindler, Fahrerassistenzsysteme für die Straßenbahn, *Der Nahverkehr*. Bd. 7+8, Nr. 36 (2018), S. 26-35.
- [24] Siemens Mobility GmbH, 2019. Präsentation: Auf dem Weg zur autonomen Tram [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a31b03ec-6326-4694-9b19-35fd6b21373b/presentation-uitp-autonome-tram-d.pdf>
- [25] Bosch Engineering, 2018. Kollisionswarnsystem für Stadt- und Straßenbahnen [online]. [Zugriff am: 19.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bosch-engineering.com/de/highlights/kollisionswarnsystem/>

- [26] Cognitive Pilot, Cognitive Tram Pilot [online]. [Zugriff am: 06.08.2021]. Verfügbar unter: <https://en.cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/>
- [27] L. Fel, C. Zinner, T. Kadiofsky, W. Pointner, J. Weichselbaum und C. Reisner, 2018. ODAS – An anti-collision assistance system for light rail vehicles and further development, *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, Wien*. 2018.
- [28] R. Katz und R. Schulz, 2013. Towards the development of a laserscanner-based collision avoidance system for trams, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2013*. Bd. 4, S. 725-729, 2013.
- [29] Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH, 2015. Weltweit erstes Fahrerassistenzsystem im Straßenbahn-Betrieb [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.vgffm.de/de/aktuellpresse/news/einzelsicht/weltweit-erstes-fahrerassistenzsystem-im-strassenbahn-betrieb/>
- [30] Bombardier Transportation, 2020. Bombardier liefert die erste neue FLEXITY-Niederflurstraßenbahn nach Duisburg [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: https://rail.bombardier.com/en/about-us/worldwide-presence/germany/de.html/bombardier/news/_2020/bt-20200911_bombardier-delivers-first-new-flexity-low-floor-tram/en0
- [31] Urban Transport Magazine, 2019. UITP: Bombardier stellt neues Assistenzsystem für Straßenbahnen vor [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.urban-transport-magazine.com/uitp-bombardier-stellt-neues-assistenzsystem-fuer-strassenbahnen-vor/>
- [32] Bombardier Transportation, 2019. Bombardier stellt neues innovatives Sicherheitssystem für Stadtbahnfahrzeuge auf dem UITP-Summit 2019 in Stockholm vor [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: https://rail.bombardier.com/en/about-us/worldwide-presence/germany/de.html/bombardier/news/2019/bt-20190610_bombardier-unveils-new-innovative-light-rail-vehicle/de
- [33] Siemens Mobility GmbH, 2018. Straßenbahn Avenio M startet Fahrgastbetrieb auf neuer Linie 2 in Ulm [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/strassenbahn-avenio-m-startet-fahrgastbetrieb-auf-neuer-linie-2-ulm>
- [34] Siemens Mobility GmbH, 2020. Siemens Mobility baut 109 Stadtbahnen für Düsseldorf und Duisburg [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-mobility-baut-109-stadtbahnen-fuer-duesseldorf-und-duisburg>
- [35] Siemens Mobility GmbH, 2020. Straßenbahn Avenio - Den Haag, Niederlande [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7c23264f-db87-451c-9cc7-87422c978e37/180309_avenio_datenblattdenhaagv020de.pdf
- [36] M. Hofmann, 2020. Siemens Mobility und VIP Potsdam auf dem Weg zur autonomen Tram, *bahn manager Magazin*. Nr. (02), 2020.

- [37] A. Palmer, A. Sema, W. Martens, P. Rudolph und W. Waizenegger, 2020. The Autonomous Siemens Tram, *IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transport Systems (ITSC)*, 2020. S. 1-6, 2020.
- [38] S. Berghaus, P. Quaet-Faslem und K. Weiß, 2020. Driver-vehicle collaboration Siemens Autonomous Tram [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: https://its-mobility.de/wp-content/uploads/Berghaus_Siemens_Rail-Human-Factors_2020.pdf
- [39] F. Muth, 2019. Automatisiertes Fahren im ÖPNV, *Der Nahverkehr*. Nr. (10), S. 27-34, 2019.
- [40] D. Höpffner und M. Hofmann, 2020. Teaching Trams to Drive - die Entwicklung vom assistierten zum autonomen Fahren [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.th-wildau.de/files/Transferservice/2020/Wissenschaftswoche/FoNeMo/01_Hoepffner.pdf
- [41] M. Hofmann, 2020. Trams das Fahren lehren. Auf dem Weg zur smarten, autonomen Straßenbahn, *Der Nahverkehr*. Nr. (12), S. 20-24, 2020.
- [42] Internationales Verkehrswesen, 2019. AStrid-Projekt „Autonome Straßenbahn im Depot“ startet [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/astrid-projekt-autonome-strassenbahn-im-depot-startet/>
- [43] M. Hofmann, 2021. Autonome Systeme im Straßenbahnbetriebshof - mFund Projekt AStriD, *Die Technik-Treffer! - Webinarreihe des VDV*, 2021.
- [44] Thales Group, 2019. Künstliche Intelligenz für die autonom fahrende Stadtbahn [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.thalesgroup.com/de/deutschland/news/kuenstliche-intelligenz-fuer-die-autonom-fahrende-stadtbahn>
- [45] Thales Group, 2018. Autonomes Fahren mit Stadtbahnen [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.thalesgroup.com/de/deutschland/press-release/autonomes-fahren-mit-stadtbahnen>
- [46] TU Darmstadt, 2019. Forschung für die Straßenbahn der Zukunft - Projekt MAAS untersucht Machbarkeit von Automatisierung und Teleoperation [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles_meldungen/archiv_2/2019/2019quartal2/neuesausdertueinzelansichtbreitespalte_231936.de.jsp
- [47] TU Darmstadt FZD, o. D.. Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsystemen der Straßenbahn - Anwendung von Assistenzsystemen in Straßenbahnen [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.fzd.tu-darmstadt.de/forschung/research_projects_fzd/maas_fzd/index.de.jsp
- [48] P. Pintscher, 2021. MAASBahn. Automation, Assistance Systems & Teleoperation of Trams, 5. *VDV-Zukunftskongress autonomes Fahren im ÖPNV*, 2021.
- [49] R. Protzmann, I. Radusch, A. Festtag, R. Fritzsche und M. Rehme, 2018. IV2X - Integrierte Betrachtung Fahrzeugkommunikation [online]. [Zugriff am: 10.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.testfeld-berlin.de/pdfs/iV2X%20Dokumentation%201.5.pdf>

- [50] A. Festag, 2015. Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. Nr. 132 (7), S. 409-416, 2015.
- [51] K. Kiela, V. Barzdenas, M. Jurgo, V. Macaitis, J. Rafanavicius, A. Vasjanov, L. Kladovcikov und R. Navickas, 2020. Review of V2X–IoT Standards and Frameworks for ITS Applications, *Applied Sciences*. Nr. 10 (12), S. 4314, 2020.
- [52] NGMN Alliance, 2018. V2X White Paper [online]. [Zugriff am: 15.08.2021]. Verfügbar unter: https://ngmn.org/wp-content/uploads/V2X_white_paper_v1_0-1.pdf
- [53] Europäische Kommission, 2020. Durchführungsbeschluss (EU) 2020/1426 der Kommission zur harmonisierten Nutzung von Funkfrequenzen im Frequenzband 5 875-5 935 MHz für sicherheitsbezogene Anwendungen intelligenter Verkehrssysteme (IVS) und zur Aufhebung der Entscheidung 2008/671/EG
- [54] M. Alonso Raposo et al., 2019. The future of road transport: Implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility. Luxemburg: Publications Office of the European Union
- [55] C-ROADS Germany, 2021. C-ITS Dienste [online]. [Zugriff am: 12.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.c-roads-germany.de/deutsch/c-its-dienste-1/>
- [56] M. Rondinone und A. Correa, 2018. TransAID - Definition of V2X message sets [online]. [Zugriff am: 15.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.transaid.eu/wp-content/uploads/2017/Deliverables/WP5/TransAID_D5.1_V2X-message-sets.pdf
- [57] N. Gath, J. Kathes, M. Kürschner, T. Schendzielorz und T. Ungerer, 2016. Leitfaden für die Einrichtung kooperativer Systeme auf öffentlicher Seite [online]. [Zugriff am: 15.08.2021]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1299273/1299273.pdf>
- [58] M. Neuner, A. Bauer, H. Grünfeld, V. Kanngießner, O. Koch, T. Miltner, R. Poppenborg, R. Thomas, O. Töpfer und J. Schappacher, 2020. Leitfaden zur Einführung kommunaler C-ITS Verkehrssysteme [online]. [Zugriff am: 15.08.2021]. Verfügbar unter: https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/Publications/DIKOVE_Leitfaden_01-00-00.pdf
- [59] C. Meirich, M. Grünhäuser, L. Strub, L. Pirl, L. Schubert, C. Wille, M. Dralle, J. Reisig, J. Brack, S. Weiß-Saoumi und A. Polze, 2020. Rail2X - Smart Services (Projektabschlussbericht). Schriftenreihe des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik, 2020.
- [60] M. Schäfer, R. Hoyer, E. Hepner, M. Wang, C. Zhao, L. Schneegans, V. Schmitt, K. Hartung, T. Miltner, M. Kugler, T. Weisheit und M. Mahler, 2020. VERONIKA - Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel. Abschlussbericht, Teil 1. Kassel.
- [61] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2021. Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel – VERONIKA [online]. [Zugriff am: 13.08.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/veronika.html>

- [62] R. Hoyer, T. Miltner, M. Schäfer und B. Noll, 2020. Vernetzung von Fahrzeugen des ÖPNV mit verkehrsunabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5, *Straßenverkehrstechnik*. Nr. (11), 2020.
- [63] Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH, 2022. Frankfurt MIND (+): Der ÖPNV von morgen: multimodal, intelligent, nachhaltig, digital [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://innovation.vgf-ffm.de/frankfurt-mind/>
- [64] Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH, 2022. Digital Train Control Frankfurt (DTC): Das Zugsicherungssystem von morgen [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://innovation.vgf-ffm.de/dtc/>
- [65] DZSF, 2021. Automatisierte Betriebsfunktionen von Straßenbahnfahrzeugen: Bewertung der Potenziale von Technologien zum vernetzten Fahren - 1. Expertenworkshop [online]. [Zugriff am: 01.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DZSF/Veroeffentlichungen/Weitere_Veroeffentlichungen/2021/2021-10-26_Workshop-Autom-Strassenbahn.html?nn=2208160
- [66] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2019. VDV-Schrift 191 - Fahrerassistenzsysteme (FAS) für Straßenbahnen zur Kollisionsvermeidung mit direkt im Fahrweg befindlichen Hindernissen, Köln.
- [67] M. Schmitz, C. Hessel und U. Stahlberg, 2019. Position Paper - Operation of Autonomous Tramways [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-position-paper-operation-of-autonomous-tramways-2019-08.pdf>
- [68] CAR 2 CAR Communication Consortium, 2020. C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems and Services - C-ITS Services [online]. [Zugriff am: 16.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.car-2-car.org/about-c-its/?L=-1#c133>
- [69] A. Mohammed, A. Amamou, F. Ayevide, S. Kelouwani, K. Agbossou und N. Zioui, 2020. The Perception System of Intelligent Ground Vehicles in All Weather Conditions: A Systematic Literature Review, *Sensors (Basel, Switzerland)*. Nr. 20 (22), S. 6532, 2020.
- [70] E. Marti, M. d. Miguel, F. Garcia und J. Perez, 2019. A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. Bd. 11, Nr. 4, S. 94-108, 2019.
- [71] F. Rosique, P. Navarro, C. Fernández und A. Padilla, 2019. A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research, *Sensors (Basel, Switzerland)*. Bd. 19, Nr. 3, S. 648-677, 2019.
- [72] P. Siwek, 2021. Analysis of microphone use for perception of autonomous vehicles, *5th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. S. 173-178, 2021.
- [73] T. Strang, F. Schubert, S. Thölert und R. Oberweis, 2008. Lokalisierungsverfahren. Oberpfaffenhofen-Wessling: DLR.

- [74] M. Bauer, 2003. Vermessung und Ortung mit Satelliten - GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Heidelberg: Wichmann.
- [75] S. Kuutti, S. Fallah, K. Katsaros, M. Dianati, F. Mccullough und A. Mouzakitis, 2018. A Survey of the State-of-the-Art Localization Techniques and Their Potentials for Autonomous Vehicle Applications, *IEEE Internet of Things Journal*. Bd. 2, Nr. 5, S. 829-846, 2018.
- [76] Y. Lu, H. Ma, E. Smart und H. Yu, 2021. Real-Time Performance-Focused Localization Techniques for Autonomous Vehicle: A Review, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. S. 1-19, 2021.
- [77] S. Houben, M. Neuhausen, M. Michael, R. Kesten, F. Mickler und F. Schuller, 2019. Park marking-based vehicle self-localization with a fisheye topview system, *Journal of Real-Time Image Processing*. Bd. 2, Nr. 16, 2019.
- [78] X. Du und K. Tan, 2016. Vision-based approach towards lane line detection and vehicle localization, *Machine Vision and Applications*. Bd. 2, Nr. 27, S. 175-191, 2016.
- [79] K. Yoneda, R. Yanase, M. Aldibaja, N. Suganuma und K. Sato, 2019. Mono-camera based vehicle localization using lidar intensity map for automated driving, *Artificial Life and Robotics*. Bd. 2, Nr. 24, S. 147-154, 2019.
- [80] H. Durrant-Whyte und T. Bailey, 2006. Simultaneous localization and mapping: part I, *IEEE Robotics & Automation Magazine*. Bd. 2, Nr. 13, S. 99-110, 2006.
- [81] M. Cornick, J. Koechling, B. Stanley und B. Zhang, 2016. Localizing Ground Penetrating RADAR: A Step Toward Robust Autonomous Ground Vehicle Localization, *Journal of Field Robotics*. Bd. 1, Nr. 33, S. 82-102, 2016.
- [82] Cohda Wireless, 2020. V2X-Locate: Location is Everything in V2X - Whitepaper [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://www.cohdawireless.com/wp-content/uploads/2020/11/V2X-Locate-White-Paper-Final-Nov-2020.pdf>
- [83] D. Hall und J. Llinas, 1997. An introduction to multisensor data fusion, *Proceedings of the IEEE*. Bd. 1, Nr. 85, S. 6-23, 1997.
- [84] M. Aeberhard und N. Kaempchen, 2011. High-Level Sensor Data Fusion Architecture for Vehicle Surround Environment Perception [online]. [Zugriff am: 15.04.2022]. Verfügbar unter: <https://innovation-mobility.com/wp-content/uploads/2021/03/2011WIT-High-LevelSensorDataFusionArchitectureforVehicleSurroundEnvironmentPerception.pdf>
- [85] J. Schreiner, 2020. Was ist Predictive Maintenance? Definition, Anwendung und Beispiele, *Industry of Things*. 2020.
- [86] D. Tsiktsiris, N. Dimitriou, A. Lalas, M. Dasygenis, K. Votis und D. Tzovaras, 2020. Real-Time Abnormal Event Detection for Enhanced Security in Autonomous Shuttles Mobility Infrastructures, *Sensors (Basel, Switzerland)*. Bd. 17, Nr. 20, 2020.

- [87] ETSI, 2011. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM); Rationale for and guidance on standardization. ETSI TR 102 863.
- [88] A. Dasenau, 2016. Automobile Systeme in der Automatisierung - Autonomes Fahren und Angriffssicherheit.
- [89] A. Rasouli und J. Tsotsos, 2020. Autonomous Vehicles That Interact With Pedestrians: A Survey of Theory and Practice, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Bd. 3, Nr. 21, S. 900-918, 2020.
- [90] T. Lagström und V. M. Lundgren, 2015. AVIP - Autonomous vehicles interaction with pedestrians [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/238401/238401.pdf>
- [91] A. Habibovic, V. Lundgren, J. Andersson, M. Klingegård, T. Lagström, A. Sirkka, J. Fagerlönn, C. Edgren, R. Fredriksson, S. Krupenia, D. Saluäär und P. Larsson, 2018. Communicating Intent of Automated Vehicles to Pedestrians, *Frontiers in Psychology*. Bd. 9, S. 1336, 2018.
- [92] Á. Knapp, A. Wippelhauser, D. Magyar und G. Gódor, 2020. An Overview of Current and Future Vehicular Communication Technologies, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. Bd. 4, Nr. 48, S. 341-348, 2020.
- [93] CAR 2 CAR Communication Consortium, 2021. White paper on ITS-G5 and Sidelink LTE-V2X Co-Channel Coexistence Mitigation Methods [online]. [Zugriff am: 15.11.2021]. Verfügbar unter: https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2091_Co-ChannelCoexistence_MitigationMethods_V1.0.pdf
- [94] B. Erdem, 2019. IEEE 802.11bd – A seamless evolutionary access layer for ITS-G5 / DSRC [online]. [Zugriff am: 15.11.2021]. Verfügbar unter: https://www.car-2-car.org/fileadmin/downloads/PDFs/car-2-car-journal/Journal_23_C2C-CC_Oct_2019_web.pdf
- [95] G. Naik, B. Choudhury und J.-M. Park, 2019. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications, *IEEE Access*. Nr. 7, S. 70169-70184, 2019.
- [96] Y. Li, L. Yang, S. Han, X. Wang und F.-Y. Wang, 2018. When LPWAN Meets ITS: Evaluation of Low Power Wide Area Networks for V2X Communications, *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. S. 473-478, 2018.
- [97] 5GAA Automotive Association, 2018. Position Paper: Coexistence of C-V2X and ITS-G5 at 5.9GHz [online]. [Zugriff am: 15.11.2021]. Verfügbar unter: <https://5gaa.org/content/uploads/2018/10/Position-Paper-ITG5.pdf>
- [98] ETSI, 2020. Intelligent Transport Systems (ITS); Pre-standardization study on ITS architecture; Part 2: Interoperability among heterogeneous ITS systems and backward compatibility. ETSI TR 103 576-2 [online]. [Zugriff am: 15.11.2021]. Verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/10357602/01.01.01_60/tr_10357602v010101p.pdf

- [99] ETSI, 2021. Intelligent Transport Systems (ITS): Pre-standardization study on co-channel co-existence between IEEE- and 3GPP- based ITS technologies in the 5 855 MHz - 5 925 MHz frequency band [online]. [Zugriff am: 15.11.2022]. Verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103700_103799/103766/01.01.01_60/tr_103766v010101p.pdf
- [100] 5GAA Automotive Association, 2020. Study of spectrum needs and safety related intelligent transportation systems - day 1 and advanced use cases [online]. [Zugriff am: 15.11.2022]. Verfügbar unter: https://5gaa.org/content/uploads/2021/10/5GAA_Day1_and_adv_Use_Cases_Spectrum_Needs_Study_V2.0.pdf
- [101] Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021. KIGLIS - Künstliche Intelligenz zur Optimierung von Glasfasernetzen in einer intelligenten Stadt [online]. [Zugriff am: 19.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/kiglis>
- [102] Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt), 2021. Mobilitäts Daten Marktplatz MDM - MDM Portal [online]. [Zugriff am: 19.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.mdm-portal.de/>
- [103] ODG, 2018. Funktionsspiegel OCIT-O Version 3.0 für Lichtsignalsteuergeräte [online]. [Zugriff am: 19.11.2021]. Verfügbar unter: https://www.ocit.org/media/ocit-o_funktionsspiegel_v3.0_a01.pdf
- [104] E. Bakaba und J. Ortlepp, 2019. Maßnahmen zur Reduzierung von Straßenbahnunfällen - Unfallforschung kompakt [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://www.udv.de/resource/blob/74792/d6740c7625a2d995212c2b02edc1f73e/56-massnahmen-zur-reduzierung-von-strassenbahnunfaellen-data.pdf>
- [105] R. Bogdanski und C. Cailliau, 2022. KEP und ÖPNV: Chance für die letzte Meile? Untersuchung zur Nutzung von öffentlichen Nahverkehrssystemen für den Pakettransport auf der letzten Meile. Berlin: Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V.
- [106] E. Gernant, B. Seelbach, J. Dungs, D. Schmidt, A. Hörmann, K.-O. Schocke und M. Peuker, 2021. Intermodale Logistikkette im urbanen Raum. Wie der Einsatz standardisierter Container die „letzte Meile“ optimiert. Bietigheim-Bissingen.
- [107] FZI Forschungszentrum Informatik, 2021. Verbundprojekt LogIKTram. Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasieren Gütertransport [online]. [Zugriff am: 04.08.2022]. Verfügbar unter: <https://logiktram.de/>
- [108] LFD Niedersachsen, 2020. Dashcams im Straßenverkehr [online]. [Zugriff am: 23.11.2021]. Verfügbar unter: https://lfd.niedersachsen.de/startseite/infothek/faqs_zur_ds_gvo/dashcams_im_strassenverkehr/dashcams-im-strassenverkehr-193497.html
- [109] M. Gay, J. Grimm, T. Otto, I. Partzsch, D. Gersdorf, F. Gierisch, S. Löwe und M. Schütze, 2022. Nutzung der C2X-basierten ÖV- Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten. Berichte der Bundesanstalt für Verkehrswesen.
- [110] Deutscher Bundestag, 2021. Bundestag nimmt Gesetz zum autonomen Fahren an [online]. [Zugriff am: 24.01.2022]. Verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2021/kw18-pa-verkehr-autonomes-fahren-835640>

- [111] Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH., 2021. Die VBK in Zahlen 2021. Geschäftsbericht 2021 der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH [online]. [Zugriff am: 24.01.2022]. Verfügbar unter: https://www.vbk.info/fileadmin/user_upload/vbk/Dateien/Unternehmen/vbk_geschaeftsbericht_21_webansicht.pdf
- [112] D. Hürlimann, 2002. Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen. ETH Zürich.
- [113] C. Henzler, 2017. So funktioniert die fahrerlose U-Bahn in Nürnberg [online]. [Zugriff am: 30.11.2022]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/bayern/verkehr-so-funktioniert-die-fahrerlose-u-bahn-in-nuernberg-1.3445130-0>
- [114] A. Binder, J. Krimmling und T. Albrecht, 2014. Mehrkriterielle Fahrplanbewertung und -optimierung unter Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften der Fahrgastwechselzeit, 24. *Verkehrswissenschaftliche Tage 2014, Dresden, 20.–21. März 2014*. 2014
- [115] Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH, 2020. Die VBK in Zahlen 2019. Geschäftsbericht 2019 der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
- [116] ITP Intraplan Consult GmbH, 2016. Standardisierte Bewertung von Verkehrsweegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr - Verfahrensanleitung. FE 70.893/2014.
- [117] A. Dahl, A. Kindl, C. Walther, D. Paufler-Mann, A. Roos, V. Waßmuth, F. Weinstock, H.-U. Mann und W. Röhling, 2016. Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 - FE-Projekt-Nr. 97.358/2015 für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München.
- [118] A. Matthey und B. Bünger, 2020. Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze [online]. [Zugriff am: 14.01.2022]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf
- [119] R. van Grol, M. de Bok, G. de Jong, G. van Eck, J. Ihrig, M. Kraft, E. Szimba, B. Mandel, O. Ivanova, H. Boonman, M. Chahim, R. Corthout, J. Purwanto, R. Smith, K. Laparidou, E. Helder, S. Grebe und A. Székely, 2016. Elasticities and Equations of the HIGH-TOOL Model (Final Version). HIGH-TOOL Deliverable D4.3.
- [120] Abay und Meyer, 1990. Analyse der Nachfrage im öffentlichen Personenverkehr, eine stated preference Studie. Zürich.
- [121] M. Vrtic, O. Meyer-Rühle, S. Rommerskirchen, P. Cerwenka und W. Stobbe, 2000. Sensitivitäten von Angebots- und Preisänderungen im Personenverkehr. Zürich: Forschungsauftrag 44/98 auf Auftrag der Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI).
- [122] J. van der Waard, 1990. Konzept Elasticiteiten Handboek. Rotterdam: Rijkswaterstaat, Dienstverkeerskunde.

- [123] Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH, 2014. Broschüre Citylink. Die Niederflur-Stadtbahn für Karlsruhe [online]. [Zugriff am: 15.04.2022]. Verfügbar unter: https://www.avg.info/fileadmin/user_upload/vbk/Dateien/Service/VBK_Broschuere_Citylink.pdf
- [124] Bundesministerium der Finanzen, 2000. AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV") [online]. [Zugriff am: 15.04.2022]. Verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weiter_e_Stuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html
- [125] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2020. Statistik 2019 [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2019.pdf>
- [126] GSMA Europe, 2019. EU Member States reject connected cars legislation after telecoms lobby [online]. [Zugriff am: 15.06.2022]. Verfügbar unter: <https://www.gsma.com/gsmaeurope/whats-new/eu-member-states-reject-connected-cars-legislation-after-telecoms-lobby/>
- [127] Forschungs-Informations-System (FIS), 2020. Normungsorganisationen für Intelligente Verkehrssysteme (ITS) [online]. [Zugriff am: 30.05.2022]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/422726/>
- [128] ESCRYPT, 2022. CAR 2 CAR: Pilot-PKI gemäß neuesten Sicherheitsstandards [online]. [Zugriff am: 28.05.2022]. Verfügbar unter: <https://www.escrypt.com/de/news-events/car-2-car-pilot-pki-gemaess-neuesten-sicherheitsstandards>
- [129] M. Ladwig, 2020. Autonome Züge: Mit 5G vom Test zur Wirklichkeit - V-Hub [online]. [Zugriff am: 28.05.2020]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/business/featured/digitale-vorreiter/referenzen/autonome-zuege-mit-5g-vom-test-zur-wirklichkeit/>
- [130] N. Brandenburger, H.-J. Hörmann, D. Stelling und A. Naumann, 2017. Tasks, skills, and competencies of future high-speed train drivers, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Bd. 10, Nr. 231, S. 1115-1122, 2017.
- [131] Bundesministerium der Justiz, 2023. Personenbeförderungsgesetz (PBefG) [online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/>
- [132] Bundesministerium der Justiz, 2008. Handbuch der Rechtsförmlichkeit [online]. Verfügbar unter: <https://hdr.bmj.de/vorwort.html>
- [133] BMVBS, 2011. Technische Regeln für Straßenbahnen, Elektrische Anlagen (TRStrab EA) [online]. [Zugriff am: 28.06.2022]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/technische-regeln-fuer-elektrische-anlagen-2011-05.pdf>
- [134] BMVI, 2015. Technische Regeln für Straßenbahnen, Signal- und Zugsicherungsanlagen (TRStrab SIG) [online].
- [135] BMVI, 2015. Technische Regeln für Straßenbahnen, Zulassung und Abnahme von Signal- und Zugsicherungsanlagen (TRStrab SIG ZA) [online].

- [136] BMVI, 2015. Technische Regeln für Straßenbahnen, Bemessung und Prüfung der Bremsen von Fahrzeugen (TRStrab Br) [online].
- [137] BMVI, 2014. Technische Regeln für Straßenbahnen, Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer (TRStrab FOF) [online].
- [138] DIN, Ausgabe: 2022-12. DIN 820-1: Normungsarbeit - Teil 1: Grundsätze [online]. [Zugriff am: 10.05.2023]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/din-norm/din-820-1-ausgabe-2022-12--189118>
- [139] Bundesministerium der Justiz, 2023. Straßenverkehrsgesetz (StVG) [online]. [Zugriff am: 10.05.2023]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/stvg/>
- [140] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2020. Eckpunkte zum Rechtsrahmen für einen vollautomatisierten und fahrerlosen Level 4 Betrieb im öffentlichen Verkehr [online]. [Zugriff am: 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/20201016-vdv-positionspapier-eckpunktepapier-fuer-rechtsrahmen-zum-autonomen-fahren-im-oev.pdf>
- [141] Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2010. Richtlinie 2010/40/EU zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern [online]. [Zugriff am: 28.06.2022]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:207:0001:0013:DE:PDF>
- [142] BMDV, 2022. Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften [online]. [Zugriff am: 28.06.2022]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/008-verordnung-automatisierte-autonome-fahrfunktion.pdf?__blob=publicationFile
- [143] DIN, 2011. DIN EN 50159, Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Sicherheitsrelevante Kommunikation in Übertragungssystemen [online].
- [144] A. Steingröver, 2018. Automatisiertes Fahren: Was können wir bei der Vollbahn von CBTC lernen? [online]. [Zugriff am: 09.08.2021]. Verfügbar unter: http://ifev.rz.tu-bs.de/SiT_SafetyinTransportation/SiT2018/Freigegeben_Steingroever.pdf
- [145] E. Donges, 2015. Fahrerverhaltensmodelle, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 17-26.

Anhang

Der Anhang enthält ergänzende Tabellen und Abbildungen (Anhang 1) sowie Steckbriefe zu Praxisbeispielen (Anhang 2), die folgenden Kapiteln des Berichts zugeordnet sind:

Zu Kapitel 2 (Stand der Automatisierung):

- **Tabelle A-1:** Übersicht Literaturquellen nach Dokumententyp und Thema
- **Anhang 2:** Steckbriefe: 18 Praxis-Beispiele in Übersichten

Zu Kapiteln 3 und 4 (Funktionale Analyse):

- **Tabelle A-2:** Merkmale in der funktionalen Analyse zu automatisierender Aufgaben
- **Tabellen A-3, A-4:** Technologiebedarf und Lösungskonzepte
- **Tabellen A-5, A-6:** Bewertung der Lösungskonzepte

Zu Kapitel 5 (Wirtschaftliche Modellierung):

- **Tabellen A-7, A-8, A-9:** Technologiekosten Fahrzeug, Infrastruktur, Kommunikation
- **Tabelle A-10:** Analyse Streckenmerkmale Linie 1 für das Simulationsmodell
- **Abbildungen A-1, A-2:** Grafiken zur Sensitivitätsanalyse der wirtschaftlichen Bewertung

Anhang 1: Tabellen

TABELLE A-1: ÜBERSICHT LITERATUR

Dokumententyp	Literaturquellen
Fachliteratur (Fachbücher, Fachartikel)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CBTC: [4] ▪ ETCS: [20, 21] ▪ Fahrerassistenzsysteme: [28, 29] ▪ Automatisierte Straßenbahn: [37, 38, 40, 42] ▪ Kommunikationstechnologie: [51, 52, 63, 92, 94, 95, 96] ▪ Sensorik und Algorithmen: [69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78] [79, 80, 81, 84, 85, 86]
Studien, (Projekt-)Berichte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierung im Schienenverkehr: [14, 9, 67] ▪ Fahrerassistenzsysteme: [24, 66] ▪ Fahrzeugkommunikation: [50, 53, 57, 60, 61, 93, 97, 98, 99, 100] ▪ Intelligente Transportsysteme (C-ITS): [58, 59]
Produkte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CBTC: [12, 13] ▪ Fahrerassistenzsysteme: [26, 27]
Webinare, Vorträge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierte Straßenbahn: [44, 49, 104]
Pressemitteilungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierte U-Bahn: [1, 5, 7] ▪ Automatisierte S-Bahn: [22] ▪ Fahrerassistenzsysteme: [30, 31, 32, 33, 34, 35, 62] ▪ Automatisierte Straßenbahn: [43, 45, 46, 47, 48]
Standards, Normen, Regelwerke, Beschlüsse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierungsstufen: [2, 3] ▪ BOStrab: [8] ▪ CBTC und ETCS: [11, 144, 16, 54]
Sonstige Internetquellen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CBTC und ETCS: [15, 17, 18, 19] ▪ Automatisierte Straßenbahn: [25, 39, 41] ▪ Intelligente Transportsysteme (C-ITS): [56, 68, 102]

TABELLE A-2: CHANCEN, HERAUSFORDERUNGEN UND ANFORDERUNGEN AN UNTERSCHIEDLICHE ANWENDUNGSFELDER AUTOMATISIERTER FUNKTIONEN

1. Fahrt auf straßenbündigem oder besonderen Bahnkörper				
Teilaufgaben	Grundfunktionen	Chancen	Herausforderungen	Anforderungen
1.1: Überprüfung / Sicherstellung der Fahrgewegfreiheit	<u>Erforderlich:</u> Umgebungswahrnehmung Lokalisierung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Umgebungserfassung durch vernetzungsbasierte, kooperative Perzeption (zusätzliche Redundanz) Sensor(-daten)fusion: Nutzung untersch. Sensortypen Nutzung der aufgezeichneten Sensordaten für Unfallaufklärung (eventbasierte Datenspeicherung) Nutzung von Warnsignalen zur Beeinflussung anderer Verkehrsteilnehmer 	<ul style="list-style-type: none"> Intentionsschätzung anderer Verkehrsteilnehmer Kreuzender VRUs Wetter und Belichtungsbedingungen Umgang mit aufgezeichneten, persönlichen Daten der Umgebung (Datenschutz) Verschmutzung oder Beschädigung von Sensoren Kosten für Kommunikationsinfrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Zuverlässigkeit bei schwierigen Wetter- und Umgebungsbedingungen Absicherung gegen Cyberangriffe Unterscheidung / Klassifizierung von Objekten zur besseren Einschätzung von Intentionen und Bewegungsmöglichkeiten Hohe Verfügbarkeit bei gleichzeitig hoher Sicherheit Berücksichtigung der DSGVO Ausbau der Infrastruktur mit Sensorik und Kommunikationstechnik an kritischen Stellen im Verkehrsraum Standardisierung der Komponenten zur Kostenreduktion
1.2: Erkennen und Interpretation von Signal- und Verkehrszeichen	<u>Erforderlich:</u> Umgebungswahrnehmung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> Ergänzend zur sensorbasierten Erkennung: Kommunikation von Signalen per Funk (zusätzliche Redundanz) 	<ul style="list-style-type: none"> Wetter und Belichtungsbedingungen Verdeckung, Verschmutzung, Beschädigung von Signalen oder Verkehrszeichen Kosten für Kommunikationsinfrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Zuverlässigkeit bei schwierigen Wetter- und Umgebungsbedingungen Absicherung gegen Cyberangriffe Sichtbarkeit und gute Qualität von Signalen und Verkehrszeichen Standardisierung der Komponenten zur Kostenreduktion
1.3: Positionsbestimmung im Schienennetz	<u>Erforderlich:</u> Lokalisierung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Redundanz durch Landmarken und/oder Vernetzung Digitale Kartierung der Bahninfrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Bei Lokalisierung mithilfe von optischen Sensoren: Datenschutz 	<ul style="list-style-type: none"> Präzise Lokalisierung auch ohne GNSS- oder Mobilfunkabdeckung Absicherung gegen Cyberangriffe Ausbau von GNSS- und Mobilfunkabdeckung
1.4: Situationsangepasste Fahrzeugregelung	<u>Erforderlich:</u> Umgebungswahrnehmung Lokalisierung Fahrzeugführung <u>Optional / förderlich:</u> Zustandsüberwachung Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> Energieeffizienter und komfortabler Fahrstil Überwachung der Geschwindigkeit durch Lokalisierung Reduktion der Geschwindigkeit in sicherheitskritischen oder unübersichtlichen Situationen Anpassung des Fahrstils basierend auf Informationen aus der Infrastruktur (z. B. Ampelphase) Verschleißreduktion 	<ul style="list-style-type: none"> Korrekte Interpretation der Umgebung und gewissenhafte Einschätzung des Kollisionsrisikos Betriebspunktoptimaler bzw. energieeffizienter Fahrstil nicht unbedingt optimal für Verkehrsführung Versicherungstechnische Fragen bei Unfällen Umgang mit Missbrauch durch Personen (z. B. absichtliches Betreten der Gleise) 	<ul style="list-style-type: none"> Einhalten der zul. Geschwindigkeit Berücksichtigung maximal zulässiger Quer- und Längsbeschleunigungsgrenzwerte Vorrangige Ausführung von Bremsbefehlen Einhalten eines ausreichenden Abstandes zu anderen Verkehrsteilnehmern Überwachung von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bremskurve Absicherung gegen Cyberangriffe Implementieren von Rückfallebenen (z. B. Teleoperation)
1.5: Bewerkstelligung von Kreuzungen und Bahnübergängen	<u>Erforderlich:</u> Umgebungswahrnehmung Lokalisierung Fahrzeugführung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> Unterstützung der fahrzeuginternen durch infrastrukturseitige Umgebungssensorik Kommunikation von Position und Geschwindigkeit an andere Straßenbahnen sowie nicht schienengebundene Fahrzeuge Übertragung von Signalphase an Straßenbahn Priorisierung des ÖPNV an LSA Intentionsmitteilung durch geeign. Schnittstellen 	<ul style="list-style-type: none"> Berücksichtigung von Vorfahrtsregeln Umgang mit Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer Lokale Überlastung der Direktkommunikation bei großem Verkehrsaufkommen 	<ul style="list-style-type: none"> Siehe 1.1 und 1.2 Sicherstellung der zuverlässigen Kommunikation
1.6: Überwachung technischer Systeme	<u>Erforderlich:</u> Zustandsüberwachung Vernetzung Lokalisierung Fahrzeugsteuerung	<ul style="list-style-type: none"> Vorrausschauende Planung von Wartungsintervallen Automatische Fehlerkompensation Kostenreduktion Reduktion von Betriebsstörungen Erweiterung auf Defektdetektion in Infrastruktur (durch fahrzeugseitige Sensorik) Bewertung der Betriebstauglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Sensorik und Software Zugriff auf Fahrzeugdaten 	<ul style="list-style-type: none"> Sicherheitsgerechtes Stillsetzen und Informieren von Leitstelle und Werkstatt bei sicherheitsrelevanten Defekten Möglichst geringe Anzahl von Fehldiagnosen zur Steigerung der Akzeptanz Zugriff auf fahrzeugseitige Daten Reaktion auf Defekte oder Fehlfunktionen im Sinne einer Anpassung des Fahrstils

Teilaufgaben	Grundfunktionen	Chancen	Herausforderungen	Anforderungen
1.7: Überwachung des Fahrzeuginnenraums	<u>Erforderlich:</u> Zustandsüberwachung Vernetzung Lokalisierung	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung von Innenraumsensorik zur Detektion von Vorfällen Automatische Zuschaltung von Leitstellenpersonal zur finalen Beurteilung und Einleitung von Maßnahmen bei Erkennen von Auffälligkeiten Schnelles Informieren von Verantwortlichen (z. B. Polizei, Notarzt) Nutzung der Daten aus Innenraum für weitere Funktionen des Verkehrsmanagements Erkennen von stehenden und sitzenden Insassen zur Bewertung des Verletzungsrisikos bei Kollision oder Bremsung Eventbasierte Speicherung von Daten zur Aufklärung von Vorfällen 	<ul style="list-style-type: none"> Datenschutz Komplexe Situationen und hohe Fahrgastdichten schwer für KI Fehlender Fahrzeugführer für unmittelbare Reaktion 	<ul style="list-style-type: none"> Möglichst unbemerkte Überwachung Möglichst reduzierte Detailtiefe zur Vermeidung von Datenschutzproblemen Implementierung interaktiver Funktionen über geeignete Schnittstellen im Fahrzeuginnenraum
2. Bewerkstellung von Haltestellen				
2.1: Einfahren und Halten	<u>Erforderlich:</u> Umgebungswahrnehmung Lokalisierung Fahrzeugführung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> Präzises Anhalten Intelligente Anpassung der Einfahrtreihenfolge anhand der individuellen Fahrplanlage unterschiedlicher Fahrzeuge Komfortabler Fahr- und Haltevorgang Erfassen der Fahrgastdichte am Bahnsteig und Bereitstellen der Informationen an Leitstelle (auch durch infrastrukturseitige Sensorik möglich) 	<ul style="list-style-type: none"> Zentimetergenaues Halten erhöht lokal Oberleitungsverschleiß (Stromzufuhr immer an derselben Stelle) Datenschutz, Umgang mit personenbezogenen Daten Sichere Einfahrt mit geringer Distanz zu VRUs 	<ul style="list-style-type: none"> Bzgl. Oberleitungsverschleiß: stochastische Verteilung der Haltepunkte oder lokale Verdickung der Leitung Vermeidung einer zu hohen Sensibilität der Automatisierung, da sonst aufgrund der Nähe zu Personen kein reibungsfreies Einfahren möglich ist
2.2: Durchführen und Überwachen des Fahrgastwechsels	<u>Erforderlich:</u> Zustandsüberwachung Umgebungswahrnehmung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> Infrastrukturseitige Bahnsteigüberwachung Vereinfachter Zutrieb für mobilitätseingeschränkte Personen durch präzises Halten Kontrollierter Zu- und Ausstieg durch Einbahnstraßensystem Anzeige der Fahrzeuginnenraumbesetzung am Bahnsteig zur Verbesserung und Beschleunigung des Fahrgastwechsels 	<ul style="list-style-type: none"> Haltezeitüberschreitungen durch Missbrauch (Türblocker) Fehlende menschliche Intuition bei Reaktion auf verspätete Fahrgäste 	<ul style="list-style-type: none"> Sichere Abfertigung: Stillstandserkennung, Erkennung Bahnsteig seitlich zum Fahrzeug, Absicherung gegen, Erkennen der vollständigen Türschließung Erkennen von Personen im Kupplungsbereich Erkennen verspätet ankommender Personen
2.3: Ausfahren	<u>Erforderlich:</u> Umgebungswahrnehmung Fahrzeugsteuerung Zustandserfassung <u>Optional / förderlich:</u> Vernetzung Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> Komfortabler Anfahrvorgang Verlängerung des Haltevorgangs, falls nächste Kreuzung aufgrund der Signalphase noch nicht befahrbar ist (aber auch keine weiteren Fahrzeuge an der Haltestelle blockiert werden) Anzeige der Intention zur Weiterfahrt über entsprechende Schnittstellen 	<ul style="list-style-type: none"> Umgang mit Missbrauch durch Personen 	<ul style="list-style-type: none"> Erkennen des abgeschlossenen Fahrgastwechsels Erkennen der vollständigen Türschließung
3. Umgang mit Ausnahmesituationen				
-	<u>Erforderlich:</u> Vernetzung Zustandsüberwachung Interaktion Lokalisierung Fahrzeugführung <u>Optional / förderlich:</u> Umgebungswahrnehmung	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierte Erstellung eines Berichts zum Systemzustand und zur Ausnahmesituation mithilfe von Umgebungssensorik und Zustandssensorik und Übermittlung an Leitzentrale oder andere Verantwortliche (z. B. Feuerwehr, Notarzt, Polizei) 	<ul style="list-style-type: none"> Türöffnen muss von Gefahrensituation abhängig gemacht werden Fehlende direkte Anleitung durch Fahrzeugführer Funkverbindung bspw. im Tunnelbereich Akzeptanz Fehlende Befolgung von Anweisungen aus Leitzentrale 	<ul style="list-style-type: none"> Einstellen eines sicherheitsunkritischen Zustandes: sicherheitsgerechtes Stillsetzen, Absicherung der Stillsetzung Ermöglichung von Selbst- und Fremdrettung Ermöglichen der Kommunikation zwischen Leitstelle und Passagieren Anleitung von Leitzentralenpersonal in Extremfällen

TABELLE A-3: BEURTEILUNG DER NOTWENDIGKEIT VON QUERSCHNITTSTECHNOLOGIEN FÜR ALLE UNTERSUCHTEN LÖSUNGSKONZEPTE (1/2)

Querschnittstechnologien		UR 1	UR 2.1	UR 2.2	UR 2.3	UR 3	RW 1	KE 1	KE 2	KE 3	
Sensorik (Fahrzeug)	Umgebungs- wahrnehmung	Kamera	-	E	E	E	E	-	-	O	E
		IR-Kamera	-	O	O	O	-	-	-	-	O
		LiDAR	-	L	L	L	-	-	-	-	L
		Radar	-	E	E	E	-	-	-	L	E
		Ultraschall	-	O	O	O	-	-	-	-	E
		Mikrophon	-	O	O	O	-	-	-	-	O
	Lokalisierung	GNSS	E	O	E	E	O	-	-	E	E
		IMU	L	O	L	L	-	-	-	L	L
		Odometrie	L	O	L	L	O	-	-	E	E
	Umgebungssensoren		O	O	L	L	-	-	-	O	L
Sensoren zur Zustandsüberwachung		-	-	-	-	-	E	O	-	-	
Sensorik (Infrastruktur)	Umgebungs- wahrnehmung	Kamera	-	-	-	E	-	-	-	-	L
		IR-Kamera	-	-	-	O	-	-	-	-	O
		LiDAR	-	-	-	L	-	-	-	-	L
		Radar	-	-	-	E	-	-	-	-	L
		Ultraschall	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Intelligente Datenverarbeitung	Sensorfusion (in unterschiedlichen Prozessen)		E	E	E	E	O	-	-	E	E
	Umgebungs- wahrnehmung (Fahrzeug)	Objektdetektion und Entfernungsmessung	-	E	E	E	-	-	-	E	E
		Objektklassifizierung	-	L	L	L	-	-	-	-	L/E
		Objektverfolgung	-	E	E	E	-	-	-	-	E
		Verhaltensprädiktion	-	L	L	L	-	-	-	-	L/E
		Kollisionsrisikoeinschätzung	-	E	E	E	-	-	-	-	E
		Signal- u. Verkehrszeichenhandhabung	-	O	O	O	-	-	-	-	O
	Lokalisierung (Fahrzeug)	RTK-Korrektur	L	O	L	L	-	-	-	L	L
		SLAM	O	O	L	L	-	-	-	-	L
		HD-Map inkl. Landmarken	O	O	L	L	-	-	-	-	L/E
	Umgebungs- wahrnehmung (Infrastruktur)	Objektdetektion und Entfernungsmessung	-	-	-	E	-	-	-	-	L
		Objektklassifizierung	-	-	-	L	-	-	-	-	L
		Objektverfolgung	-	-	-	E	-	-	-	-	L
		Verhaltensprädiktion	-	-	-	L	-	-	-	-	L
		Kollisionsrisikoeinschätzung	-	-	-	O	-	-	-	-	L
	Fahrzeugfüh- rung	Ermittlung Brems- und/oder Beschleunigungsbedarf	-	O/L	O/L	O/L	-	-	-	E	E
		Ermittlung situationsopt. Geschw.	-	-	-	-	-	-	-	-	E
Überwachung Geschw.		-	O	O	O	-	-	-	L	E	
Überwachung Beschl.		-	-	-	-	-	-	-	L	E	
Innenraum- überwachung	Anomaliedetektion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Objektdetektion und -klassifizierung	-	-	-	-	-	-	O	-	-	
	Verhaltensanalyse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Querschnittstechnologien			UR 1	UR 2.1	UR 2.2	UR 2.3	UR 3	RW 1	KE 1	KE 2	KE 3	
	Zustandsüberwachung	Anomaliedetektion	-	-	-	-	-	E	-	-	-	
		Defektprädiktion	-	-	-	-	-	E	-	-	-	
		Predictive Maintenance	-	-	-	-	-	E	-	-	-	
	Intelligente Verkehrssteuerung	Ankunftszeitprognose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Schaltzeitprognose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Steuerung der LSA im Einflussbereich	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kommunikationstechnologie	Aktuelle Generation Direktkommunikationstechnik (ITS-G5, LTE-V2X)		E	-	O	O	-	-	-	-	O	
	Nächste Generation Direktkommunikationstechnik (802.11bd, NR-V2X)		L	-	E	E	-	-	-	E	E	
	Mobilfunk	LTE (4G)	O	-	-	-	-	E	E	-	-	
		NR (5G)	O	-	O	O	-	L	O	-	O	
	Andere	LPWANS	-	-	-	-	-	O	O	-	-	
Bluetooth		-	-	-	-	-	-	-	O	-		
Kommunikationsinfrastruktur	Feldebene	OBU	E	-	E	E	-	E	E	E	L	
		RSU	-	-	-	E	-	-	E	-	L	
	Zentralenebene	VMZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		LStZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		RSU-Zentrale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Depotmanagement	-	-	-	-	-	E	-	-	-	
		Teleoperator	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Service-Provider	MDM-Anbindung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Private und öffentliche Dienstleister	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	OCIT-Schnittstellen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kartendaten		O	O	L	L	-	-	-	-	-	L	
PKI-Infrastruktur		E	-	E	E	-	O	O	E	-	L/E	
HMI	Führerstand	Warnsignal (akustisch, visuell)	-	E	E	E	-	O	-	-	-	
		Geschwindigkeitsvorgabe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		SPAT-Informationen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Innenraum	Koordination Ausstieg	-	-	-	-	-	-	O	-	L	
	Straßenbahn außen	Warnsignale (akustisch, visuell)	O	O	O	O	-	-	-	-	-	O
		Intentionsmitteilung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	O
		Koordination Einstieg	-	-	-	-	-	-	O	-	-	L
	Bahnsteig	Anzeige Belegung Bahn	-	-	-	-	-	-	O	-	-	O
Koordination Einstieg		-	-	-	-	-	-	O	-	-	L	

Legende: „E“ – erforderlich, „L“ – leistungssteigernd, „O“ – optional, „-“ – nicht benötigt

TABELLE A-4: BEURTEILUNG DER NOTWENDIGKEIT VON QUERSCHNITTSTECHNOLOGIEN FÜR ALLE UNTERSUCHTEN LÖSUNGSKONZEPTE (2/2)

Querschnittstechnologien			FE 1	FE 2	EE 1	EE 2	UR 4, KE 4, EE 3	PE 1	PE 2	PE 3	PE 4
Sensorik (Fahrzeug)	Umgebungswahrnehmung	Kamera	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		IR-Kamera	-	-	-	O	O	O	O	O	O
		LiDAR	-	-	-	O	L	L	L	E	E
		Radar	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		Ultraschall	-	-	-	-	O	E	E	E	E
		Mikrophon	-	-	-	-	O	O	O	O	O
	Lokalisierung	GNSS	E	E	E	E	E	E	E	E	E
		IMU	L	L	L	L	L	L	L	L	L
		Odometrie	E	E	E	E	E	E	E	E	E
		Umgebungssensoren	O	O	O	O	L	E	E	E	E
Sensoren zur Zustandsüberwachung			-	-	-	-	-	O	O	E	E
Sensorik (Infrastruktur)	Umgebungswahrnehmung	Kamera	-	L	-	L	O/L	O/L	O/L	L/E	L/E
		IR-Kamera	-	-	-	L	O/L	O/L	O/L	L	L
		LiDAR	-	-	-	L	O/L	O/L	O/L	L	L
		Radar	-	-	-	L	O/L	O/L	O/L	L/E	L/E
		Ultraschall	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Intelligente Datenverarbeitung	Sensorfusion (in unterschiedlichen Prozessen)		E	E	E	E	E	E	E	E	E
	Umgebungswahrnehmung (Fahrzeug)	Objektdetektion und Entfernungsmessung	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		Objektklassifizierung	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		Objektverfolgung	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		Verhaltensprädiktion	-	-	-	L	E	L/E	L/E	E	E
		Kollisionsrisikoeinschätzung	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		Signal- u. Verkehrszeichenhandhabung	-	-	-	L	E	E	E	E	E
	Lokalisierung (Fahrzeug)	RTK-Korrektur	L	L	L	L	L	L	L	L	L
		SLAM	O	O	O	O	L	L	L	L	L
		HD-Map inkl. Landmarken	O	O	O	O	L	E	E	E	E
	Umgebungswahrnehmung (Infrastruktur)	Objektdetektion und Entfernungsmessung	-	L	-	L	O/L	O/L	O/L	L/E	L/E
		Objektklassifizierung	-	L	-	L	O/L	O/L	O/L	L/E	L/E
		Objektverfolgung	-	L	-	L	O/L	O/L	O/L	L/E	L/E
		Verhaltensprädiktion	-	-	-	L	O/L	O/L	O/L	L	L
		Kollisionsrisikoeinschätzung	-	-	-	O	O/L	O/L	O/L	L	L
	Fahrzeugführung	Ermittlung Brems- und/oder Beschleunigungsbedarf	-	-	-	L	E	E	E	E	E
		Ermittlung situationsopt. Geschw.	-	-	E	E	E	E	E	E	E
		Überwachung Geschw.	-	-	-	O	E	E	E	E	E
		Überwachung Beschl.	-	-	-	O	E	E	E	E	E
	Innenraumüberwachung	Anomaliedetektion	-	-	-	-	-	-	-	O	O
Objektdetektion und -klassifizierung		-	O	-	-	-	-	-	O/L	O/L	
Verhaltensanalyse		-	-	-	-	-	-	-	O	O	

Querschnittstechnologien			FE 1	FE 2	EE 1	EE 2	UR 4, KE 4, EE 3	PE 1	PE 2	PE 3	PE 4	
	Zustandsüberwachung	Anomaliedetektion	-	-	-	-	-	L	L	L/E	L/E	
		Defektprädiktion	-	-	-	-	-	L	L	L	L	
		Predictive Maintenance	-	-	-	-	-	L	L	L	L	
	Intelligente Verkehrssteuerung	Ankunftszeitprognose	E	L/E	E	E	-	-	-	-	O/L	O/L
		Schaltzeitprognose	E	L/E	E	E	-	-	-	-	O/L	O/L
		Steuerung der LSA im Einflussbereich	E	L/E	L	L	-	-	-	-	O/L	O/L
Kommunikationstechnologie	Aktuelle Generation Direktkommunikationstechnik (ITS-G5, LTE-V2X)		E	E	E	E	E	E	E	E	E	
	Nächste Generation Direktkommunikationstechnik (802.11bd, NR-V2X)		L	L	L	L	L	L	L	L	E	E
	Mobilfunk	LTE (4G)	O	E	O	E	O	E	-	-	E	O
		NR (5G)	O	L	O	L	O	L	-	-	L	O
	Andere	LPWANs	-	O	-	-	-	-	-	-	O	O
Bluetooth		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kommunikationsinfrastruktur	Feldebene	OBU	E	E	E	E	O/L	E	E	E	E	
		RSUs	E	E	E	E	O/L	E	E	E	E	
	Zentralebene	VMZ	E	E	-	L	-	-	-	-	E	E
		LSz	E	E	O	E	-	-	-	-	L	L
		RSU-Zentrale	O	O	O	O	-	-	-	-	O	O
		Depotmanagement	-	E	-	-	-	E	E	E	E	E
		Teleoperator	-	-	-	-	-	E	-	-	E	-
	Service-Provider	MDM-Anbindung	-	L	-	L	-	-	-	-	O	O
		Private und öffentliche Dienstleister	-	L	-	L	-	-	-	-	O	O
	OCIT-Schnittstellen		O	O	O	O	-	O	O	O	O	O
	Kartendaten		O	L	O	L	L	E	E	E	E	E
PKI-Infrastruktur (notwendig, wenn V2X genutzt wird)		E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
HMI	Führerstand	Warnsignal (akustisch, visuell)	-	-	-	O	O	-	-	-	-	
		Geschwindigkeitsvorgabe	O	L	E	E	-	-	-	-	-	-
		SPAT-Informationen	E	L	E	E	-	-	-	-	-	-
	Innenraum	Koordination Ausstieg		-	-	-	-	-	-	O	O	
	Straßenbahn außen	Warnsignale (akustisch, visuell)		-	-	-	-	E	E	E	E	E
		Intentionsmitteilung		-	-	-	-	L	L	L	E	E
		Koordination Einstieg		-	-	-	-	-	-	-	O	O
	Bahnsteig	Anzeige Belegung Bahn		-	O	-	-	-	-	-	O	O
Koordination Einstieg		-	-	-	-	-	-	-	O	O		

Legende: „E“ – erforderlich, „L“ – leistungssteigernd, „O“ – optional, „-“ – nicht benötigt

TABELLE A-5: BEWERTUNG DER LÖSUNGSKONZEPTE (1/2)

Bewertungskriterien		UR 1	UR 2.1	UR 2.2	UR 2.3	UR 3	RW 1	KE 1	KE 2	KE 3
Automatisierungspotenziale	Fahrplaneinhaltung / -stabilität	O	O	O	O	O	O	+	+	+
	Verkürzung Fahrzeit	O	O	O	O	O	O	O	+ bis O	O
	Taktverdichtung / Kapazitätserhöhung	O	O	O	O	O	O	+	+	+
	Flexibilitätssteigerung / Bedarfsorientierung	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	Reduktion von Wartungs- und Instandhaltungskosten	O	O	O	O	O	++	O	O	O
	Energieeffizienz	O	O	O	O	O	O	O	+	+
	Reduktion von Unfällen u. Unfallkosten	+	+	++ bis +	++ bis +	+	O	O	O	O
	Reduktion Personalbedarf	O	O	O	O	O	+	O	O	O
Reduktion Störungen	O	O	O	O	O	+	O	O	O	
weitere Kriterien	Marktreife	+	+++	-	-	++	+	-	-	--
	Verantwortung der Fahraufgabe	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer / System	Fahrer / System
	Kosten Fahrzeuge	O bis -	-	-	-	O bis -	-	-	-	--
	Kosten Infrastruktur	O	O	O	-	O	-	-	O	-
	Rechtl. Rahmenbedingungen vorhanden	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	O	O	Nein	Nein
	Funktionale Anforderungen definiert	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Standardisierungspotenzial	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Standardisierung vorhanden	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Akzeptanz	+++	++ bis --	++ bis --	++ bis --	++	+++	+ bis -	?	?	

Legende: Bewertung von sehr positiv „+++“ bis sehr negativ „---“, oder ohne Auswirkung „O“

TABELLE A-6: BEWERTUNG DER LÖSUNGSKONZEPTE (2/2)

Bewertungskriterien		FE 1	FE 2	EE 1	EE 2	UR4, KE 4, EE 3	PE 1	PE 2	PE 3	PE 4
Automatisierungspotenziale	Fahrplaneinhaltung / -stabilität	+	++	O	+	+	O/+	O/+	+	+
	Verkürzung Fahrzeit	+	++	O	+	+ bis --	O	O	++ bis --	++ bis --
	Taktverdichtung / Kapazitätserhöhung	O/+	+	O	O	O/+	O	O	+	+
	Flexibilitätssteigerung / Bedarfsorientierung	O	O	O	O	O	+	++	++	+++
	Reduktion von Wartungs- und Instandhaltungskosten	O	O	O	O	O/+	+	+	++ bis +	++ bis +
	Energieeffizienz	+	+	+	+	+	O	O	+	+
	Reduktion von Unfällen u. Unfallkosten	O	O	O	O	++ bis +	O	O	+++ bis +	+++ bis +
	Reduktion Personalbedarf	O	O	O	O	O	+	++	++	+++
	Reduktion Störungen	O	O	O	O	O/+	O	O	+	+
weitere Kriterien	Marktreife	+	--	+	-	--	--	--	---	---
	Verantwortung der Fahraufgabe	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer / System	System / Teleoperator	System	System / Teleoperator	System
	Kosten Fahrzeuge	O/-	-	O/-	--	--	--	--	---	---
	Kosten Infrastruktur	-	--	-	-	- bis --	-	-	--	--
	Rechtl. Rahmenbedingungen vorhanden	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Funktionale Anforderungen definiert	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Standardisierungspotenzial	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Standardisierung vorhanden	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Akzeptanz	++	++	+ bis -	+ bis --	++ bis --	++ bis --	++ bis --	++ bis --	++ bis --	

Legende: Bewertung von sehr positiv „+++“ bis sehr negativ „---“, oder ohne Auswirkung „O“

TABELLE A-7: TECHNOLOGIEKOSTEN FAHRZEUG

Technologiegruppe	Technologie	Benötigte Einheiten pro Bahn	Technologiekosten pro Stück in €	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 1c	Szenario 2
Sensorik, Umgebungswahrnehmung	Kamera und 3D-ToF Kameras	16	1.200	x	x		x
	LiDAR	4	27.000	x	x		x
	Radar	4	360	x	x		x
	Ultraschall	4	75	x	x		
Sensorik, Lokalisierung	GNSS	2	30.000	x	x	x	x
	IMU	2	3.000	x	x	x	x
	Odometrie	2	3.000	x	x	x	x
Sensoren, Innenraumüberwachung	8 IP-Kameras+Rekorder+Verkablung Set	1	7.500		x		
Bordcomputer	Intelligente Datenverarbeitung für hochautomatisierte Fahrfunktionen, Umgebungswahrnehmung, Lokalisierung, Fahrzeugführung	1	50.000	x	x		x
	Grundfunktionen wie Innenraum- und Zustandsüberwachung	1	25.000	x	x	x	x
Kommunikationsinfrastruktur	OBU	2	8.000	x	x	x	x
HMI Straßenbahn außen	Intensionsmitteilung	2	1.000		x		
HMI Führerstand - OBU mit Display	Geschwindigkeitsvorgabe SPAT-Informationen	2	1.000	x	x		x

TABELLE A-8: TECHNOLOGIEKOSTEN INFRASTRUKTUR

Technologiegruppe	Technologie	Benötigte Anzahl pro Infrastruktureinheit	Technologiekosten pro Stück in €	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 1c	Szenario 2
LSA - Lichtsignalanlagen	RSU Steuergerät/ Prozessor	1	15.000			x	x
RSU - Funkgerät Weichen	Annahme: Die Weichensteuerung wird in ihrer bisherigen Funktionsweise nicht geändert.						
RSU - Funkgerät Fußgänger-/ Bahnübergänge	Kamera/ Sensoreinheit	0,5	500				
	Funkgerät - RSU Prozessor	0,5	15.000		x	x	x
Sensorik, Umgebungswahrnehmung an Kreuzungen	Kamera	2	500				
	Radar	1	120	x	x		x
	Prozessor RSU	1	15.000				
Bahnsteigseitige Sensorik Zwei Bahnsteige pro Haltestelle	Kamera	3	500	x	x	x	x
	RSU	1	15.000				
HMI Bahnsteig	Anzeige Belegung Bahn/ Koordination Fahrgastwechsel	1	50.000		x		

TABELLE A-9: TECHNOLOGIEKOSTEN KOMMUNIKATION UND BETRIEBSSTEUERUNG - ZENTRALE

Technologiegruppe	Technologie	Benötigte Einheiten pro Infrastruktureinheit	Technologiekosten pro Stück in €	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 1c	Szenario 2
Intelligente Verkehrssteuerung	Ankunftszeitprognose	1					
	Schaltzeitprognose	1	100.000*			x	x
	Steuerung der LSA im Einflussbereich	1					
Zentralen-Ebene Infrastruktur- betreiber	Verkehrsmanagementzentrale	1	70.000*			x	x
	Lichtsignalsteuerungszentrale	1	70.000*				
Service-Provider	MDM-Anbindung	Die Verwendung des MDM ist aktuell kostenlos, kostenpflichtige Service-Provider werden in der wirtschaftlichen Analyse nicht berücksichtigt.				x	x
	Private und öffentliche Dienstleister						
Kommunikationsinfrastruktur	Kartendaten - Digitale Karten	1	1.150.000		x	x	x
	PKI-Infrastruktur	1	500.000*		x	x	x
	OBU/ RSU Softwareentwicklungskit (SDK) Lizenzgebühr	5	3.430	x	x	x	x
	Echtzeitbasierte Besetztgradprognose für HMI Fahrgastwechsel	1	20.000		x		
Zentralen-Ebene Verkehrsbe- triebe	Depotmanagement	1	20.000*	x	x	x	
	Teleoperator	1	100.000*	x	x		

*laufende Kosten p.a.

TABELLE A-10: TABELLARISCHE ANALYSE TEILABSCHNITT LINIE 1

Haltestelle	Knoten		Länge	Gleisanzahl	km/h lt. VzG	max. km/h Parallelverkehr	Bahnkörper	Anzahl verkehrender Linien	Straßenname	Verkehrsschilder	Straßentypen	Radweg	Aufgaben im Straßenbahnverkehr					Einsatz Technologie									
	Start	Ende											Knoten		Kanten			LSA-Steuergerät	Funkgerät Weichen	Funkgerät Fußgänger-/Bahnübergänge	Umgebungswahrnehmung Sensorik	Bahnsteigseitige Sensorik					
													Haltestellen	Kreuzungen	Fußgänger-/Bahnübergänge	Wendeanlagen	Straßenbündiger oder besonderer Bahnkörper						Unabhängiger Bahnkörper				
Durlach Turmberg	Ein	Aus	100	1	30	30	straßenbündig	1	Grötzing Str.	-	-	-	X			X	X						X				
	Aus	Ein	215						Gymnasiumstr.	B 3	Bundesstr.	-								X	X						
Karl-Weysser-Straße	Ein	Aus	75						Badener Str.	B 3	Bundesstr.	-	X							X	X						X
	Aus	S	75													X	X										
Schlossplatz	S	Ein	115													X	X						X				
	Ein	Aus/S	80	2	30	30	eigen	2	Pfnztalstr.	Verkehrsberuhigter Bereich	Anliegerstraße, Fußgängerzone, sonstige Wege oder Plätze für Fußgänger	Einbahnstraße, für Radfahrer in Gegenrichtung geöffnet	X			X	X										
	Aus/S	S/W	10																					X	X		
	S/W	W	122	1	25	25	eigen	2	Pfnztalstr.	Verkehrsberuhigter Bereich	Anliegerstraße, Fußgängerzone, sonstige Wege oder Plätze für Fußgänger	Einbahnstraße, für Radfahrer in Gegenrichtung geöffnet				X	X										
	W	Ein	145																						X	X	
Friedrichschule	Ein	Aus	70										X			X	X						X				
	Aus	K/S/W/F	275													X	X										
	K/S/W/F	Ein/F	67			30								X	X	X	X										
Auer Straße	Ein/F	Aus/S/F	85			70										X	X						X				
	Aus/S/F	S	250			50										X	X										
	S	W	90			50										X	X										
	W	Ein/S	195													X	X	X									
Untermühlstr.	Ein/S	Aus/S/F	100	2	70	50/60	eigen	4	Durlacher Alle	B 10	Bundesstr.	Radfahrstreifen	X			X	X							X			
	Aus/S/F	Ein/S/F	930																					X	X		
Weinweg	Ein/S/F	Aus	125										X			X	X							X			
	Aus	S	470													X	X										
	S	Ein/W/F	60													X	X										
Tullastraße	Ein/W/F	Aus/S/W/K/F	135										X			X	X							X			
	Aus/S/W/K/F	W	70			30	str.-bünd.							X	X		X										
	W	Ein/F	390			60	eigen									X	X							X			
Gottesauer Platz	Ein/F	Aus/S/K/F	110			50								X	X		X							X			
	Aus/S/K/F	S	365			50										X	X							X			
	S	Ein/F	50			20										X	X										

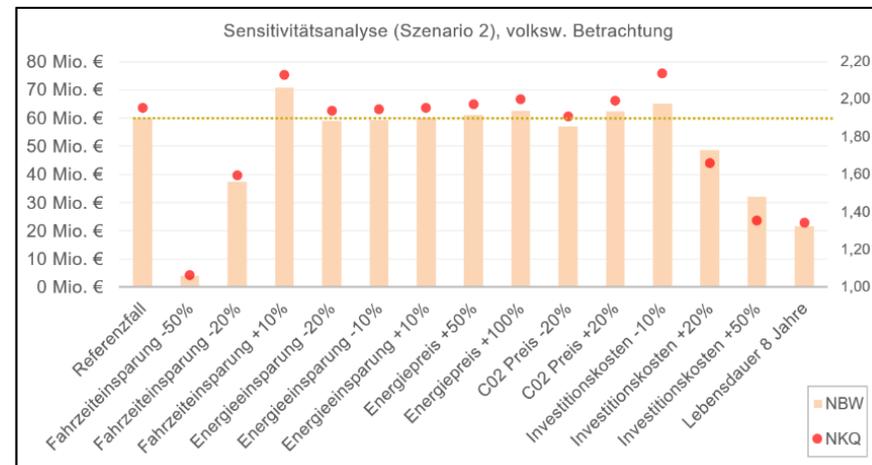
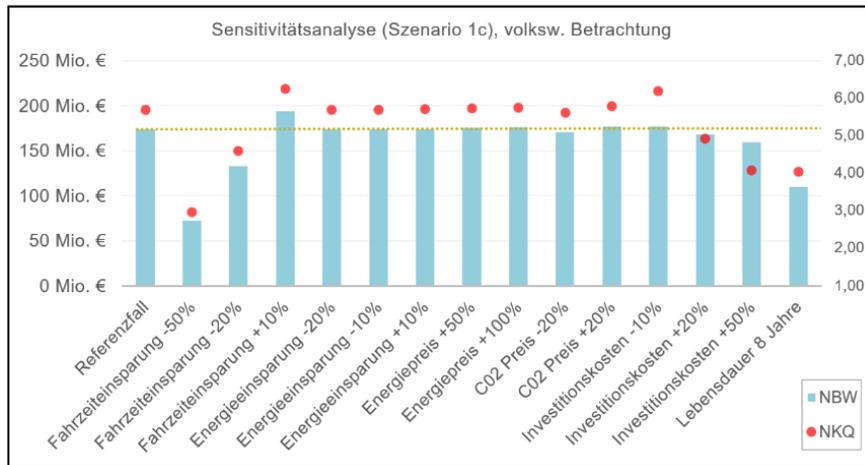
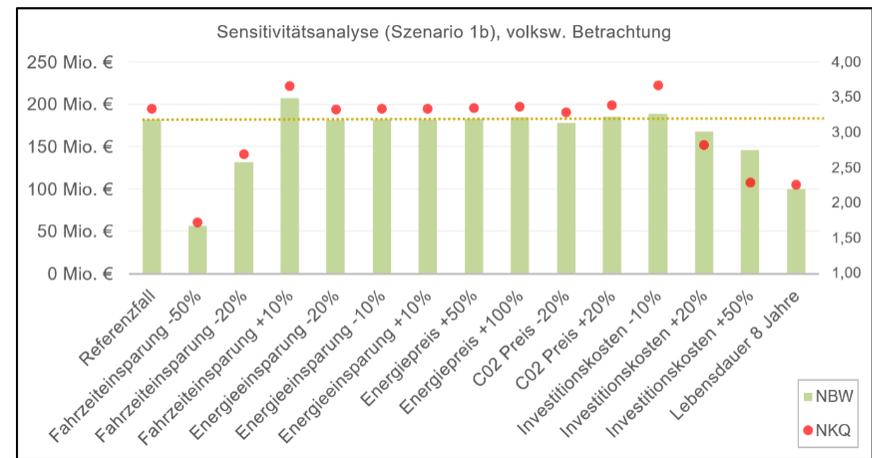
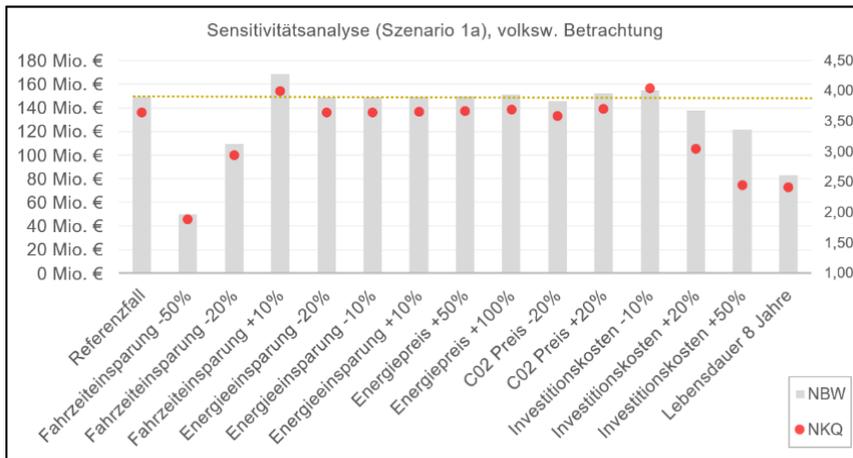


Abbildung A-1: Sensitivitätsanalysen – volkswirtschaftliche Potenzialabschätzung

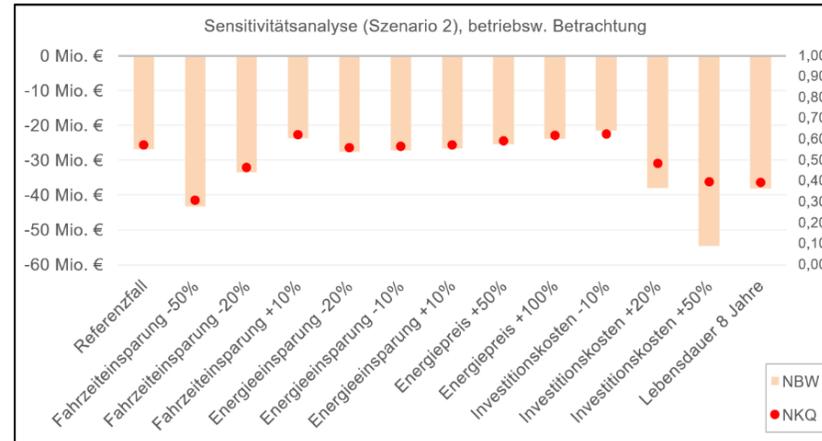
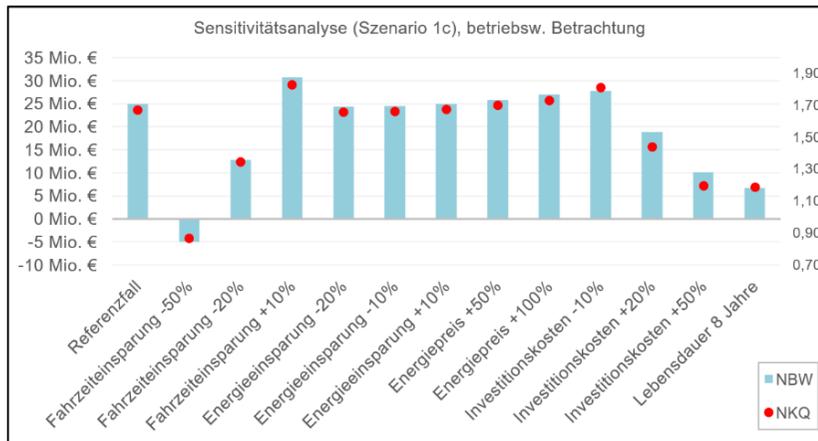
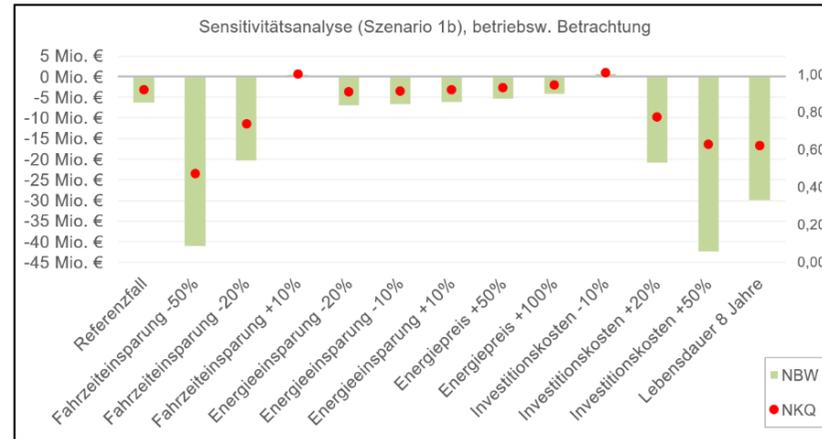
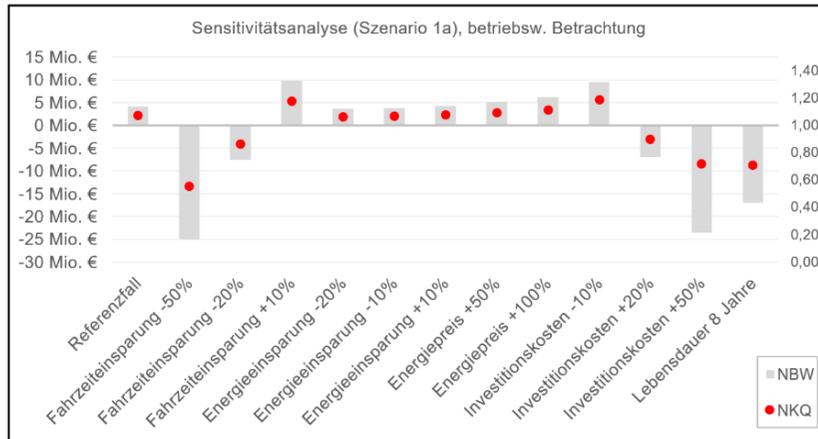


Abbildung A-2: Sensitivitätsanalysen – betriebswirtschaftliche Potenzialabschätzung

Anhang 2: Steckbriefe

Steckbrief 1:	RUBIN.....	211
Steckbrief 2:	Siemens TrainGuard MT.....	214
Steckbrief 3:	SelTrac.....	217
Steckbrief 4:	autoBahn-Projekt.....	219
Steckbrief 5:	Digitale S-Bahn Hamburg.....	222
Steckbrief 6:	Sensors4Rail.....	224
Steckbrief 7:	Cognitive Tram Pilot.....	226
Steckbrief 8:	Siemens Tram Assistant.....	228
Steckbrief 9:	Studie zu Straßenbahn-Fahrerassistenzsystemen.....	230
Steckbrief 10:	ODAS – Obstacle Detection Assistance System.....	232
Steckbrief 11:	Elastic.....	235
Steckbrief 12:	VERONIKA.....	237
Steckbrief 13:	Rail2X.....	241
Steckbrief 14:	COSEL.....	246
Steckbrief 15:	Digital Train Control und Frankfurt MIND+.....	248
Steckbrief 16:	Siemens Autonomous Tram.....	250
Steckbrief 17:	MAAS-Projekt.....	254
Steckbrief 18:	AstriD.....	257

Projekt-Steckbrief 1

PSB-Nr. 1: RUBIN: Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg

1. Allgemeine Informationen

Titel	RUBIN: Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg
Kategorie	Automatisierung: U-Bahn
Beteiligte	Siemens Mobility, VAG Nürnberg
Projektlaufzeit	2002-2008
Einsatzort	Nürnberg
Fahrzeugtyp	U-Bahn
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Vollautomatisierung: GoA 4 - fahrerlos - Zugbeeinflussung - Zugsteuerung - Zugüberwachung - Signalgebung - Türsteuerung - Störfallmanagement
Automatisierungsgrad	GoA 4
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	ATP-Fahrzeugrechner: - Kontrolle des automatisierten Zugbetriebs (ATO) - Überwachung von Fahrzeuggeschwindigkeiten, Abfertigungsvorgängen und autom. Kupplung - Zugortung und Wegerfassung - kontinuierliche Übertragung von Daten zur Fahrzeugdiagnose an Leitstelle ATO-Fahrzeugrechner: - Ausführen der über ATC-Übertragungskanal vom ATC-Streckenrechner empfangenen Befehle (Fahren, Bremsen, Auf-/Abrüsten, ...) Türen: - ausfahrbare Rampe - sensible Türkante zur Verhinderung der Abfahrt bei Gegenständen in der Tür sonstiges: - aktiver Bahnräumer - Entgleisungsdetektoren an jedem Drehgestell
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	ATC-Übertragungskanal: - Funkverbindung zum Austausch der Datentelegramme vom Streckenrechner zum Fahrzeugrechner

Projekt-Steckbrief 1

PSB-Nr. 1: RUBIN: Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg

2. Technische Informationen

Infrastruktur (physisch)

Bahnsteigsicherungssystem:
- Kameras und Radaranlagen

Stellwerke:

- Verbindung mit Leitstelle über Leitsystembus
- Signatechnikbus: Verbindung untereinander und mit für jeweiligen Stellwerksbereich zuständigen ATC-Strecken- und ATC-Rückkanalrechner
- Relaisstellwerke und elektronische Stellwerke
- Dieselaggregate für Stromausfälle

Infrastruktur (digital)

ATC-Streckenrechner (ATC-STR):

- Steuerung der Fahrzeuge
- Daten von Stellwerk: Belegung Streckenabschnitt, Stellung und Sicherung Fahrstraße
- gibt Fahrbefehl in Form von Datentelegrammen über ATC-Übertragungskanal an ATO-Fahrzeugrechner

ATC-Rückkanalrechner (ATC-RK):

- Übermittelt Infos über Standort, Traktion, Bewegungsrichtung der Fahrzeuge und über Bahnsteigüberwachungssystem an ATC-STR

Linienleiferschleifen (LL):

- Umsetzung der Linienzugbeeinflussung (LZB)
- über Schleifenanschlüsse mit ATC-STR und ATC-RK verbunden

Leit- bzw. Betriebszentrale

Steuerungszentrale:

- alle relevanten Infos werden über Leitsystembus von angeschlossenen Komponenten an Leitstelle übertragen
- 3 Arbeitsplätze: Verkehrsmeister, Fahrgastinfo, technische Störungsdisposition
- Verkehrsmeister: Überwachung Betriebsgeschehen, Eingriff in Fahrzeug- und Stellwerksablauf und Fernsteuerung, Bahnsteigüberwachung
- Fahrgastinfo: Ankündigung von Störungen oder Betriebsverstärkungen
- techn. Störungsdisposition: überwacht techn. Anlagen

Technikraum:

- Leittechnik für Zugsicherung
- Diagnoserchner für Fahrzeug und Fahrweg
- Fahrplanrechner
- Rechner für digitalen Betriebsfunk
- Anlagen für Fernmelde- und Videotechnik sowie Fahrgastinfos

weitere Aufgaben:

- Sperren der Türnotentriegelung nach Fahrtbeginn
- Überwachung und Wiederfreigabe im Gefahrenfall
- Überwachung des Fahrgastraums per Videokamera
- Kommunikation mit Fahrgästen über Notsprechstelle

Projekt-Steckbrief 1

PSB-Nr. 1: RUBIN: Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg

2. Technische Informationen

Technische Rahmenbedingungen

Sonstige Rahmenbedingungen

- Eignung für autonomen Betrieb durch:
- geschlossenes System (kein Mischverkehr)
 - wenig komplexes Liniensystem (nur eine Zuggattung)
 - Im Tunnelsystem kaum Risikoeinwirkung von außen

Zugführer:

- generell fehlende Lokführer in Branche

Kosten (UITP):

- Neubau: 3% mehr als konv. Metrolinie
 - Umrüstung: 30% Mehrkosten
-

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Gegeben durch Vorteile der Automatisierung:

- Flexibilität: Reaktion auf Fahrgastaufkommen
- Pünktlichkeit: verbessert durch zentrale Steuerung und Überwachung
- Kapazität: kleinere Sicherheitsabstände zw. Fzg. möglich
- Verfügbarkeit, Verlässlichkeit: besseres Fahrverhalten --> weniger Verschleiß, außerdem autom. Erkennung von Wartungsnotwendigkeit / Defekten
- Energieeffizienz: optimierte Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofile (Einsparungen bis zu 30%)

Herausforderungen

Chancen

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

ALLIANZ PRO SCHIENE. Autonomes Fahren auf der Schiene [online], 2016. 29. November 2016 [Zugriff am: 24. Mai 2022]. Verfügbar unter: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/autonomes-fahren-auf-der-schiene/>

Wikipedia– Die freie Enzyklopädie. RUBIN [online], [Zugriff am 24. Mai 2022]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/RUBIN>

Projekt-Steckbrief 2

PSB-Nr. 2: Siemens TrainGuard MT (CBTC-Produkt)

1. Allgemeine Informationen

Titel	Siemens TrainGuard MT (CBTC-Produkt)
Kategorie	Automatisierung: U-Bahn
Beteiligte	Siemens Mobility
Projektlaufzeit	
Einsatzort	Beispiele: <ul style="list-style-type: none">- Beijing Line 10: weltgrößte CBTC Metrolinie- Paris Linie 1: 49 neu gelieferte Züge mit CBTC- S-Bane Kopenhagen
Fahrzeugtyp	hauptsächlich Metro / U-Bahn oder andere abgeschlossene Schienenverkehre
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">- Modulares ATC System- Alle Automatisierungsstufen möglich- Punktförmige Zugbeeinflussung (fixed block) und kontinuierliche Zugbeeinflussung (moving block mit CBTC) möglich
Automatisierungsgrad	GoA 2: STO: semi-automated train operation (teilautomatisiert) GoA 3: DTO: driverless train controll (fahrerlos) GoA 4: UTO: unattended train operation (unbemannt)
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">- ATO-Rechner- ATP-Rechner- Mensch-Maschine-Schnittstelle- Funkmodul (WLAN)- Eurobalisenantenne- zusätzliche Zuglokalisierung über Radar (Doppler-Effekt) und Odometrie
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	Airlink: <ul style="list-style-type: none">- WLAN-basiert, bidirektional. zusätzlich möglich: LTE- Nutzung weltweit freier oder lizensierter Frequenzbänder- Übergabe (Handover): Roaming, verläuft nahtlos- Verbindung mit CSR über Funk-Hauptleitung (radio backbone network), welches wiederum über Glasfaser mit Access Points verbunden ist
Infrastruktur (physisch)	Eurobalisen: ETCS-kompatibel, benutzt für punktförmige Zugbeeinflussung, basierend auf induktiver Kopplung

Projekt-Steckbrief 2

PSB-Nr. 2: Siemens TrainGuard MT (CBTC-Produkt)

2. Technische Informationen

Infrastruktur (digital)

Airlink Access Points: Zugangspunkte für WLAN-Kommunikation, redundant über Strecke verteilt

CSR: Central System Routers: Management der Kommunikation, Airlink access point sind abwechselnd mit zwei unabh. CSR verbunden

TVD: track vacancy detection (Streckenlückenerkennung): Trainguard MT funktioniert ohne TVD. Wird verwendet, wenn Züge Position nicht streckenseitigen Einheiten melden --> Sicherheit (andere Option: Achszähler)

Glasfaser: Verbindung Access Points zu Funk-Hauptleitung

Leit- bzw. Betriebszentrale

ATS (Zugüberwachung): Zugtracking, Routenfestlegung, Abfertigungsfunktionen von lokaler Betriebsconsole zum hochautom. zentralisierten Überwachungs- und Kontrollzentrum

Technische Rahmenbedingungen

Trainguard MT: CBTC-System

- Moving-Block Prinzip
- untersch. Grade der Zugbeeinflussung möglich (punktförmig bis kontinuierlich)
- erweiterbar auf höhere Automatisierungsstufen ohne Unterbrechung des Betriebs
- funktioniert mit Mischflotten --> Trainguard MT und ETCS-beeinflusste Züge gleichzeitig
- streckenseitige Transponder (Eurobalisen) benötigen keine externe Energiezufuhr oder Batterie

Installation in Kombi mit anderen Siemens Systemen:

- Controlguide für ATS
- Trainguard MT für ATP und ATO
- Trainguard als Interlocking (Verschlussregister) (IXL)
- Clearguard ACM Achszählsystem (TVD)
- Airlink Radiokommunikation (COM)

Cybersicherheit: basierend auf Standard EN 50159

Sonstige Rahmenbedingungen

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Projekt-Steckbrief 2

PSB-Nr. 2: Siemens TrainGuard MT (CBTC-Produkt)

3. Wesentliche Erkenntnisse

Chancen	Vorteile: <ul style="list-style-type: none">- höhere Leistungsfähigkeit- besser Scalierbarkeit- leicht upgradebar- Mischverkehr möglich- reduzierte Lebenszykluskosten- Langzeitqualität- energieoptimiertes Fahren
----------------	---

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

Siemens Mobility GmbH (Hg.) (o. D.): Trainguard MT. Optimal performance with the world's leading automatic train control system for mass transit. [Zugriff am: 15. August 2021].

Verfügbar unter <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab68c904-08fd-416c-8e28-60a18f8012af/smocbtctrainguardmten.pdf>

Projekt-Steckbrief 3

PSB-Nr. 3: SelTrac CBTC (CBTC-Produkt)

1. Allgemeine Informationen

Titel	SelTrac CBTC (CBTC-Produkt)
Kategorie	Automatisierung: U-Bahn
Beteiligte	Thales Canada Inc.
Projektlaufzeit	
Einsatzort	Beispiele: <ul style="list-style-type: none">- Ankara Metro Line M1- Beijing Line 4- Dubai Metro
Fahrzeugtyp	hauptsächlich Metro / U-Bahn oder andere abgeschlossene Schienenverkehre
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<p>Speed and Signal Safeguard:</p> <ul style="list-style-type: none">- Überwachung der Geschwindigkeitsprofile und Signalbefolgung- alle Funktionen von punktförmiger Zugbeeinflussung- Notbremse beim Überfahren roter Signale oder Geschwindigkeitsüberschreitungen <p>ATP:</p> <ul style="list-style-type: none">- kontinuierliche Zugbeeinflussung- dauerhafter Informationseingang im Zug durch funkbasiertes Data Communication System (DCS)- Moving-Block <p>ATO:</p> <ul style="list-style-type: none">- DTO und UTO (GoA 3 und GoA 4)- automatisierte Geschwindigkeitsregelung basiert auf Verkehrs- und Streckenbedingungen- Regelung Bahnsteigtüren und Zugtüren
Automatisierungsgrad	<p>GoA 2: STO: semi-automated train operation (teilautomatisiert)</p> <p>GoA 3: DTO: driverless train controll (fahrerlos)</p> <p>GoA 4: UTO: unattended train operation (unbemannt)</p>
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<p>Speed and Signal Safeguard:</p> <ul style="list-style-type: none">- Vehicle On-Board Controller (VOBC)- Transpoder Tag Reader- Display
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	<p>ComTrac DCS:</p> <ul style="list-style-type: none">- open-standard Funktechnologie- konstante Kommunikation- volle Redundanz durch überlappende Funkabdeckung

Projekt-Steckbrief 3

PSB-Nr. 3: SelTrac CBTC (CBTC-Produkt)

2. Technische Informationen

Infrastruktur (physisch)	Speed and Signal Safeguard: - Transponder
Infrastruktur (digital)	Streckenseitige Zone Controller: überschreiben Kommandos externer Interlockings
Leit- bzw. Betriebszentrale	NetTrac MT platform: System-Management-Center: Überwachung automatischer, halbautomatischer oder manueller Operation der gesamten Flotte
Technische Rahmenbedingungen	Moving-block (60 s Zugfolge)
Sonstige Rahmenbedingungen	

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen	
Akzeptanz	
Herausforderungen	
Chancen	Vorteile: <ul style="list-style-type: none">- kürzere Bahnsteige durch höhere Frequenz- weniger neue Tunnel benötigt- Systemerweiterung ohne Bindung an urspr. Fahrzeughersteller- energieoptimierte Fahrweise- fahrplansynchronisation- Remote-Diagnostik und zentralisiertes Fehlermanagement- automatisches Vorfalmanagement
Ausblick	

Relevante Online-Quellen:

Thales Group (Hg.) (o. D.): SelTrac CBTC. communications-based train control for urban rail. [Zugriff am: 9. August 2021]. Verfügbar unter https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/d7/asset/document/seltrac_cbtc_brochure.pdf

Projekt-Steckbrief 4

PSB-Nr. 4: autoBahn-Projekt

1. Allgemeine Informationen

Titel	autoBahn-Projekt
Kategorie	Automatisierung: Vollbahn
Beteiligte	Uni Salzburg, FH Wels, Stern&Hafferl GmbH, Siemens, Austrain Institute of Technology
Projektlaufzeit	2012
Einsatzort	
Fahrzeugtyp	Regionalbahn
Betriebssituation	Studie/Konzept inkl. Erprobung

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Autom. Betrieb: <ul style="list-style-type: none">- Beschleunigen- Bremsen- Anhalten- Fahren mit vordefinierter Geschwindigkeit- Hinderniserkennung
Automatisierungsgrad	
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	Sensorik: <ul style="list-style-type: none">- GPS, Lidar, Radar, Infrarotkamera, 2D-Kamera, Ultraschall- Sensorfusionskomponente <p>Kommunikationssystem: Kommunikation zwischen Bahnen und Zentrale</p> <p>CAN-Bus und Ethernet Verbindung zwischen Komponenten des Zuges</p> <p>Verhaltenskomponenten:<ul style="list-style-type: none">- BEC: Brake and Engine Control (von Siemens)- TCS: Train Control System: Überprüfung, ob Beschränkungen / Kommandos des menschl. Operators der Zentrale eingehalten werden. Erhält Daten von Umfeldsensorik --> Reaktion auf Hindernisse, Berechnet Bremskurven nach ETCS</p> <p>HMI: Mensch-Maschine-Schnittstelle</p> <p>Globale-Services-Komponente</p>
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	Funkkommunikation zw. Fahrzeugen und Zentrale (nicht genauer spezifiziert)

Projekt-Steckbrief 4

PSB-Nr. 4: autoBahn-Projekt

2. Technische Informationen

**Infrastruktur
(physisch)**

**Infrastruktur
(digital)**

**Leit- bzw.
Betriebszentrale**

theoretisch vorgesehen wäre ein Operator für alle Züge

**Technische
Rahmen-
bedingungen**

Definierte Anforderungen an autoBAHN:

- Hinderniserkennung basierend auf CENELEC Sicherheitsanforderungen
- vollautom. Betrieb mit einem Operator für alle Bahnen
- Sicherstellung der Passagiersicherheit

- Umbau eines Triebwagens durch Siemens, sodass softwaregesteuerte Fahrt möglich ist

- zuverlässige Hinderniserkennung auf ca. 80 m mit Lidar möglich, auch andere Sensorik sowie Sensorfusion wurden getestet

**Sonstige Rahmen-
bedingungen**

Infos zum Konzept autoBAHN:

- 20-30 Personen Kapazität
- 10-15m Länge
- Fahrt mit Moving-Block Prinzip
- Lokalisierung über GPS und andere Sensorinformationen
- Zeit zw. Zügen: 6-15 min

Unterschiede auton. PKW und Zug:

- höhere Investitionskosten für Sensorik denkbar
- keine anderen Fahrzeuge auf Strecke (bei Vollbahn)
- reduzierte Freiheitsgrade (nur longitudinale Bewegung)
- kritische Situationen (z.B. Bahnübergänge) sind bekannt und auf Strecke vermerkt
- Hinderniserkennung reduziert auf Frage, ob Gleise frei sind
- keine Betrachtung von Verhalten von Objekten außerhalb der Gleise
- Maximalgeschwindigkeit von 70 km/h

3. Wesentliche Erkenntnisse

**Relevante
Erfahrungen**

Sensorfusion verbessert Objekterkennung drastisch

Akzeptanz

**Herausforde-
rungen**

- Hinderniserkennung noch nicht ausgereift genug: Probleme bei schlechten Wetter-/Sichtverhältnissen
- gleiches gilt für ungewöhnliche Hindernisklassen
- auch große Steigung, Gefälle und enge Kurven sind problematisch
- nur statische Hindernisse betrachtet, kein Tracking von dynamischen Objekten
- autonome Zugortung / Lokalisierung noch zu ungenau

Projekt-Steckbrief 4

PSB-Nr. 4: autoBahn-Projekt

3. Wesentliche Erkenntnisse

Chancen

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

Gebauer, Oliver; Pree, Wolfgang; Stadlmann, Burkhard (2012): Autonomously Driving Trains on Open Tracks - Concepts, System Architecture and Implementation Aspects. In: it - Information Technology 54 (6), S. 266-279. DOI: 10.1524/itit.2012.0689.

Außerdem verfügbar unter: <https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/autoBAHN-CyberPhysicalSystems-Journal-2012.pdf>

Pree, Wolfgang (2012): autoBAHN - autonom fahrende Eisenbahn auf bestehenden Regionalbahnstrecken. [Zugriff am 20.04.2022]. Online verfügbar unter:

<https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/BGR0052012MautoBAHN.pdf>

Projekt-Steckbrief 5

PSB-Nr. 5: Digitale S-Bahn Hamburg

1. Allgemeine Informationen

Titel	Digitale S-Bahn Hamburg
Kategorie	Automatisierung: Vollbahn
Beteiligte	Hansestadt Hamburg, Deutsche Bahn, Siemens Mobility
Projektlaufzeit	2018 bis 2021
Einsatzort	Hamburg, zwischen Berliner Tor und Aumühle, 23 km Strecke, Linien S2/21
Fahrzeugtyp	S-Bahn der Baureihe 474
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">- Fahrzeug übernimmt alle Funktionen (Beschleunigen, Bremsen, Türsteuerung)- Fahrzeugführer für Überwachung oder Eingriff bei Störungen zuständig- Bereitstellung der Züge erfolgt vollautomatisiert (Fahrt zum Abstellgleis oder zum Bahnsteig der Station Bergedorf)- Überwachung dabei durch Stellwerk
Automatisierungsgrad	ATO over ETCS (GoA 2)
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<p>ATO-Fahrzeuggerät: Steuerung des Zuges basierend auf Daten des ATO-Streckencomputers und der Fahrerlaubnis des ETCS-Systems, Erstellung eines energieoptimalen Geschwindigkeitsprofils</p> <p>ETCS-Fahrzeuggerät: Infos zur Fahrerlaubnis</p> <p>Balisenantenne: lesen der Infos der ETCS-Balisen</p> <p>(für vollautomatisierten Rangierbetrieb: eigens konfigurierter Rechner)</p>
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	<p>GSM-R: Funkbasierte Kommunikation zwischen Fahrzeuggeräten und Streckenausrüstung im ETCS-Betrieb</p> <p>ATO-Betrieb: 4G-Netz</p> <p>vollautomatisierter Rangierbetrieb: 5G</p>
Infrastruktur (physisch)	im Gleis verlegte ETCS-Balisen: Übermittlung zusätzlicher Informationen, z.B. Ortung, an Fahrzeug
Infrastruktur (digital)	<p>streckenseitiger ATO-Rechner: liefert Infos zu aktueller Fahrplanlage</p> <p>streckenseitige ETCS-Level-2-Streckenzentrale</p>

Projekt-Steckbrief 5

PSB-Nr. 5: Digitale S-Bahn Hamburg

2. Technische Informationen

Leit- bzw. Betriebszentrale	ETCS-Level-2-Streckenzentrale: <ul style="list-style-type: none">- bestehendes Stellwerk muss für ETCS-Betrieb aufgerüstet und um eine ETCS-Level-2-Streckenzentrale erweitert werden- ETCS-Computer: erhält Informationen für Zugsteuerung (z.B. Signalbefehle und Geschwindigkeitsbegrenzungen), erzeugt daraus Fahrplanweisungen und schickt diese per Funk an Fahrzeuge, kontinuierliche Überwachung
------------------------------------	---

Technische Rahmenbedingungen	sobald Zug unter ETCS-Überwachung fährt, kann ATO aktiviert werden
-------------------------------------	--

Sonstige Rahmenbedingungen	
-----------------------------------	--

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen	
------------------------------	--

Akzeptanz	
------------------	--

Herausforderungen	
--------------------------	--

Chancen	Chancen: <ul style="list-style-type: none">- kein Neubau nötig- Kapazitätssteigerung ohne Gleisneubau- stabiler, zuverlässiger Betrieb- erhöhte Pünktlichkeit- höhere Energieeffizienz
----------------	--

Ausblick	<ul style="list-style-type: none">- Erweiterung der Planung des digitalen Stellwerk Hamburg (DSTW)- 64 Fahrzeuge der neuen Baureihe 490 wurden ab Werk mit neuen Technologien (ATO, ETCS) bestellt- weitere Digitalisierung der Bestandsflotte
-----------------	--

Relevante Online-Quellen:

S-Bahn Hamburg Magazin (2021): Digitale S-Bahn Hamburg. [Zugriff am 08.12.2021]. Online verfügbar unter: <https://s-bahn.hamburg/magazin/digitale-s-bahn-hamburg>

Projekt-Steckbrief 6

PSB-Nr. 6: Sensors4Rail

1. Allgemeine Informationen

Titel	Sensors4Rail
Kategorie	Automatisierung: Vollbahn
Beteiligte	Deutsche Bahn AG, Siemens Mobility, Bosch Engineering, Ibeo Automotive Systems, Here Technologies
Projektlaufzeit	2019-2021
Einsatzort	
Fahrzeugtyp	
Betriebssituation	Studie/Konzept inkl. Erprobung

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungs-funktionen	keine Automatisierung sondern Erprobung neuer Lokalisierungsmethoden
Automatisierungs-grad	
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">- Kamera- Radar- Lidar- GNSS- Odometrie- Hochleistungsrechner: Sensorfusion, HD Map (hochauflösende Karte)
Vernetzung und Kommunikations-technologie	
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	
Leit- bzw. Betriebszentrale	
Technische Rahmen-bedingungen	Umgebungssensoren erkennen Landmarken in der Umgebung, die mit denen auf der digitalen Karte abgeglichen werden, um eine zentimetergenaue Lokalisierung des Zuges zu ermöglichen. Diese Daten werden kombiniert mit GNSS- und Odometriedaten
Sonstige Rahmen-bedingungen	

Projekt-Steckbrief 6

PSB-Nr. 6: Sensors4Rail

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Chancen

Chancen:

- präzise und kontinuierliche Lokalisierung ermöglicht in Zukunft optimierte Steuerung von Zügen, kürzere Zugfolgen und somit eine Kapazitätssteigerung
- Hindernisse können erkannt werden und unmittelbar an Leitstelle weitergeleitet werden

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

DIGITALE SCHIENE Deutschland: Sensors4Rail. [Zugriff am 24.05.2022]. Online verfügbar unter: <https://digitale-schiene-deutschland.de/Sensors4Rail>

Projekt-Steckbrief 7

PSB-Nr. 7: Cognitive Tram Pilot

1. Allgemeine Informationen

Titel	Cognitive Tram Pilot
Kategorie	Fahrerassistenzsystem: Straßenbahn
Beteiligte	Cognitive Pilot
Projektlaufzeit	
Einsatzort	z.B. Moskau
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">- Objekterkennung und -klassifizierung: PKW (Position und Bewegungspfad), Personen, Lichtsignale- Lokalisierung- Fahrerassistenz- automatisches Stoppen bei roten Ampeln oder Kollisionsgefahr- Geschwindigkeitsregelung in Abhängigkeit von Streckenparametern
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">- Videokamera mit elektr. Temperaturregelung- Radar- Hochleistungsrechner (Integration in Antriebs- und Bremssystem möglich)- GPS-Modul (optional)
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	
Leit- bzw. Betriebszentrale	
Technische Rahmenbedingungen	
Sonstige Rahmenbedingungen	

Projekt-Steckbrief 7

PSB-Nr. 7: Cognitive Tram Pilot

3. Wesentliche Erkenntnisse

**Relevante
Erfahrungen**

Akzeptanz

**Herausforde-
rungen**

Chancen

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

Cognitive Pilot (2020): FITSCO and Cognitive Pilot form Strategic Alliance to develop Intelligent Transport Systems. [Zugriff am 06.08.2021]. Online verfügbar unter: <https://en.cognitivepilot.com/autonomous-vehicles/fitsco-and-cognitive-pilot-form-strategic-alliance-to-develop-intelligent-transport-systems/>

Cognitive Pilot (2019): Cognitive Tram Pilot. [Zugriff am 06.08.2021]. Online verfügbar unter: <https://en.cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/>

Projekt-Steckbrief 8

PSB-Nr. 8: Siemens Tram Assistant

1. Allgemeine Informationen

Titel	Siemens Tram Assistant
Kategorie	Fahrerassistenzsystem: Straßenbahn
Beteiligte	Siemens
Projektlaufzeit	
Einsatzort	z.B.: Den Haag, Ulm, Bremen, Kopenhagen
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">- Objekterkennung- Kollisionsrisikoeinschätzung- Kollisionswarnung mit ggfs. Eingriff (Bremsen)
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">- Controller (Schnittstelle Siemens Tram Assistant und Straßenbahn, Erzeugung Kollisionswarnung und Bremsbefehl)- Kamera (Spur- und Objekterkennung)- Radar (Objekterkennung, Fusion mit Kameraobjekten, Klassifizierung, Bewertung der Objekte anhand Schienenverlauf und Tram-Geschw.)
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	
Leit- bzw. Betriebszentrale	
Technische Rahmenbedingungen	
Sonstige Rahmenbedingungen	

Projekt-Steckbrief 8

PSB-Nr. 8: Siemens Tram Assistent

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Chancen

Chancen:

- weniger Reperaturkosten durch verhinderte Kollisionen
- mehr Sicherheit
- Wegbereiter für autom. Fahren
- höhere Verfügbarkeit

Ausblick

Identifikation untersch. Anwendungsfälle:

- Depotbetrieb: auton. Betrieb auf gesicherten Gleisanlagen mit geringer Geschwindigkeit (Reduktion Personal, Optimierung Fahrzeugtransport)
- Autom. Ab- und Bereitstellen auf Stellplätzen: (Reduktion unproduktiver Fahrten, schnellerer Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge)
- Vollautom. auf Teilstrecken: Linien mit geringer Dichte oder spezieller Absicherung (Reduktion monotoner Überwachungsaufgaben, Pausenzeiten für Fahrer)
- Vollautom. Betrieb: ganze Strecke ohne Fahrer (Eliminierung Fahrerkabine, Potential neue Geschäftsmodelle)

Relevante Online-Quellen:

Siemens Mobility GmbH (2019): Auf dem weg zur autonomen Tram. [Zugriff am 10. August 2021] Online verfügbar unter:

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a31b03ec-6326-4694-9b19-35fd6b21373b/presentation-uitp-autonome-tram-d.pdf>

Höpfner, D. und M. Hofmann: Teaching Trams to Drive [Zugriff am: 9. August 2021] Online verfügbar unter: https://www.th-wildau.de/files/Transferservice/2020/Wissenschaftswoche/FoNeMo/01_Hoepffner.pdf

Projekt-Steckbrief 9

PSB-Nr. 9: Studie zu Straßenbahn-Fahrerassistenzsystemen

1. Allgemeine Informationen

Titel	Studie zu Straßenbahn-Fahrerassistenzsystemen
Kategorie	Fahrerassistenzsystem: Straßenbahn
Beteiligte	RWTH Aachen
Projektlaufzeit	2017
Einsatzort	
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Fahrerassistenzsysteme zur Erhöhung von Sicherheit, Komfort und Effizienz, z.B.: <ul style="list-style-type: none">- navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe- Fahrer-Müdigkeitserwarner- Emergency Brake Assist- Toter-Winkel-Assistent- Frontkollisionsschutzsystem- navigationsgestützte Kurvenassistenz- Kreuzungsassistent
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	Sensorik je nach FAS beinhaltet oft: <ul style="list-style-type: none">- Radar- Lidar- Kamera- GNSS- Fahrdynamiksensorik
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	Vernetzung kann / sollte genutzt werden, um weitere Assistenzfunktionen zu entwickeln
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	
Leit- bzw. Betriebszentrale	
Technische Rahmenbedingungen	

Projekt-Steckbrief 9

PSB-Nr. 9: Studie zu Straßenbahn-Fahrerassistenzsystemen

2. Technische Informationen

Sonstige Rahmenbedingungen

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Herausforderungen:

- Verkehrsunternehmen nicht bereit viel Geld zu zahlen (meist 0-1000 €)
- navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe: kann Potential erst entfalten, wenn Kommunikation mit Ampel "grüne Welle" ermöglicht
- Fahrermüdigkeitserkennung: basiert beim PKW auf Lenk- und Spurhalteverhalten, was bei Straßenbahn nicht möglich ist. Alternative: kamerabasierte Detektion von Unaufmerksamkeit / Müdigkeit
- Emergency Brake Assist: Notbremsung schützt äußere Verkehrsteilnehmer, aber gefährdet Passagiere, rechtliches / etisches Problem
- Toter-Winkel-Assistent: muss umprogrammiert werden, da sonst zu viele Falschwarnungen stattfinden (oft Objekte seitlich von Straßenbahnen)

Chancen

Chancen:

- Erhöhung Sicherheit, Komfort und Effizienz

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

Hyun-Suk, Jung (2017): Studie zu Straßenbahn-Fahrerassistenzsystemen. RWTH Aachen. Online verfügbar unter: <https://knowhow.vdv.de/wp-content/uploads/2019/01/VDV-Studie-Strab-FAS-final.pdf>

Projekt-Steckbrief 10

PSB-Nr. 10: ODAS – Obstacle Detection Assistance System

1. Allgemeine Informationen

Titel	ODAS – Obstacle Detection Assistance System
Kategorie	Fahrerassistenzsystem: Straßenbahn
Beteiligte	AIT (Austrian Institute of Technology), Bombardier, Mission Embedded GmbH
Projektlaufzeit	
Einsatzort	z.B. Frankfurt
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">- Schienendetektion- Trajektorienplanung- Hindernisdetektion- Warnung oder Bremsung
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">- 3D-Sensorik: Stereokamera- Rechneinheit (Analyse und Auswertung)- HMI: Signalisierung (Warnfunktionen), Bremsbefehle
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	
Leit- bzw. Betriebszentrale	

Projekt-Steckbrief 10

PSB-Nr. 10: ODAS – Obstacle Detection Assistance System

2. Technische Informationen

Technische Rahmenbedingungen

Ablauf Algorithmus:

- Kamerabild > Stereomatching > Tiefenkarte > Objektisolierung
- Kamerabild > Schienendetektion > Trajektorienprädiktion und Ego-Schätzung
- Kollisionsrisikoabschätzung basierend auf Objektdetektion und Trajektorienprädiktion > Warnung an Fahrer

Anwendung FAS Straße vs. Schiene:

- Straßenbahnen haben definierten Fahrweg, längere Bremswege, geringeren Spielraum zw. Routine- und Notmanövern
- für Straßenverkehr optimierte Systeme sind meist nicht einfach übertragbar
- Straßenbahnen dürfen nur schwach verzögern, um die Passagiere nicht zu gefährden

Sonstige Rahmenbedingungen

- 2013: Prototyp auf Betriebsgelände
 - 2015: Erprobung im Regelbetrieb
 - 2016: 73 Bahnen ausgerüstet (Frankfurt)
 - heute vermehrter Einsatz weltweit
-

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Herausforderungen:

- Kamera: starkes Sonnenlicht, starke Beleuchtung, Nachts ohne Umgebungslicht
- Präzision der Fahrweginformationen
- präzise Lokalisierung
- Fahrzeugposition und Orientierung
- Sensorreichweite
- Sensorauflösung
- Robustheit gegen Umgebungsbedingungen
- Szenenverständnis und KI
- Objektklassifikation
- Machine Learning

Chancen

Ausblick

Projekt-Steckbrief 10

PSB-Nr. 10: ODAS – Obstacle Detection Assistance System

Relevante Online-Quellen:

Fel, Landri; Zinner, Christian; Kadiofsky, Thomas; Pointner, Wolfgang; Weichselbaum, Johann; Reisner, Clemens (2018): ODAS - An anti-collision assistance system for light rail vehicles and further development. In: Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, Wien, 16.-19. April 2018.

Online verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/1451549#.YKebSXtCSUK>

Lechleitner, Christoph (2014): Die Straßenbahn lernt Sehen. Innovationen im Bereich Straßen- und Stadtbahnen. Hg. v. Bombardier Transportation.

Online verfügbar unter: <https://www.schienefahrzeugtagung.at/download/PDF2014/MiV05-Lechleitner.pdf>

Projekt-Steckbrief 11

PSB-Nr. 11: Elastic

1. Allgemeine Informationen

Titel	Elastic
Kategorie	Fahrerassistenzsystem: Straßenbahn
Beteiligte	Barcelona Supercomputing Center (BSC), IKERLAN, Instituto Superior da Engenharia do Porto (ISEP), Information Catalyst (ICE), SixSq, Thales TRT, Thales Italia, Gestione ed Esercizio del Sistema Tranviario, Citta Metropolitana di Firenze
Projektlaufzeit	12/2018 - 06/2022
Einsatzort	Florenz, 3 Haltestellen
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">- Kollisionswarnung inkl. Daten aus infrastrukturseitiger Sensorik- Nutzung der kontinuierlich zur Verfügung gestellten Lokalisierungsdaten auch zu Optimierung des Verkehrsmanagements
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">- Kamera- Radar- Lidar- IMU- Fahrzeugrechner
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	vorhanden, jedoch keine Angabe über Technologie
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	<ul style="list-style-type: none">- Sensoren zur Umfeldwahrnehmung an drei Haltestelle und deren Umgebung- Vernetzungstechnologie- Fog-Computing-Komponenten (nicht genauer beschrieben)
Leit- bzw. Betriebszentrale	
Technische Rahmenbedingungen	
Sonstige Rahmenbedingungen	

Projekt-Steckbrief 11

PSB-Nr. 11: Elastic

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Chancen

Chancen:

- Unterstützung der Fahrer durch fahrzeugseitige und infrastrukturseitige Sensorik und entsprechende Vernetzung / Sensorfusion
- Reduktion von Unfällen
- Effizienzsteigerung im Verkehrsmanagementsystem
- Reduktion der Wartungskosten

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

Kiapidou, N.: ELASTIC [Zugriff am 24. Mai 2022]. Verfügbar unter: https://elastic-project.eu/sites/default/files/uploaded/ELASTIC%20PR_June%202021_0.pdf

Projekt-Steckbrief 12

PSB-Nr. 12: VERONIKA: Vernetzung von Fahrzeugen des Öpvn mit verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5

1. Allgemeine Informationen

Titel	VERONIKA: Vernetzung von Fahrzeugen des Öpvn mit verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5
Kategorie	Vernetzung
Beteiligte	Uni Kassel, Stadt Kassel, TTS GmbH, s.a.d GmbH
Projektlaufzeit	01/2017 - 12/2019
Einsatzort	Kassel
Fahrzeugtyp	Straßenbahn und Bus
Betriebssituation	Linienbetrieb (Erprobung)

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Fahrerassistenz: <ul style="list-style-type: none">- passgenaue ÖPNV Freigabe- ÖV-Fahrzeuganmeldung an Lichtsignalanlage- Ausgabe von Infos am Fahrerarbeitsplatz zur Unterstützung des energiesparenden Fahrens
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	On-Board Equipment (OBE) <ul style="list-style-type: none">- Smartphone inkl. VERONIKA-App, On-Board Unit (OBU), Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) Smartphone: <ul style="list-style-type: none">- im Blickfeld des Fahrers- VERONIKA-App: Realisation umfassender ÖV-spezifischen C-ITS-Funktionen- Anzeige nach Erhalt von SPaT Info: wird LSA mit aktuell gefahrender Geschw. bei "grün" erreicht?- indirekte Empfehlung hinsichtlich des Geschwindigkeitsprofils On-Board Unit: <ul style="list-style-type: none">- Kommunikation mit RSU über Kommunikationsstandard ETSI ITS G5

Projekt-Steckbrief 12

PSB-Nr. 12: VERONIKA: Vernetzung von Fahrzeugen des ÖPNV mit verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5

2. Technische Informationen

Vernetzung und Kommunikationstechnologie

Direktkommunikation über Kommunikationsstandard: ETSI ITS-G5 (IEEE 802.11p):

- Datenaustausch über OBU und RSU
- operative Daten, quasilatenzfrei, bidirektional

Mobilfunkgestützte Kommunikation mit Metadatenserver:

- zeitunkritische Versorgungs- und Administrationsdaten für ÖV-Fahrzeuge und RSUs

Datenaustausch zw. RSU und OBE: Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (V2I)

1. CAM: Cooperative Awareness Message:

- Stationstyp, Position, Geschw.vektor, Zeitstempel

2. MAP: Ausgesendet von RSU

- Basisdaten zur Lage und funktionalen Zuordnung von Fahrstreifen, Haltlinien, Signalgebern und Abbiegebeziehungen

3. SPaT: Signal Phase and Timing

- aktuelles Signalbild der LSA und zu erwartende Zeitpunkte des nächsten Freigabebeginns /-endes

4. SRM: Signal Request Message:

- Anforderung Freigabezeitpunkt

5. SSM: Signal Status Message:

- Bestätigung der SRM-Anmeldung,

6. DENM: Decentralized Environmental Notification Message:

- Nachricht zu ortsbezogenen Ereignissen (Gefahren, Baustellen, Staus, ..)

Infrastruktur (physisch)

Road-Side-Units (RSU)

Infrastruktur (digital)

- Verkehrsmanagementsystem
- Metadatenserver
- Schaltzeitprognosen
- Lichtsignalsteuerungszentrale
- RSU-Zentrale
- Mobilitätsdatenmarktplatz (MDM)
- Dienste Dritter
- RSUs

Leit- bzw. Betriebszentrale

Projekt-Steckbrief 12

PSB-Nr. 12: VERONIKA: Vernetzung von Fahrzeugen des ÖPNV mit verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5

2. Technische Informationen

Technische Rahmenbedingungen

Bisherige Technologie:

- Meldepunktverfahren: Straßenbahn überfährt fixen Meldepunkt und sendet Signal an nächste LSA
- wenig Genauigkeit (Ankunftszeitpunkt wird planerisch geschätzt), keine Rückmeldung an Fahrer (Quittierung)
- Nutzung analoger Funkfrequenzen (auslaufend)

Ablauf Kommunikation:

1. Fahrzeug gelangt in Signalbereich der RSU/LSA und empfängt MAP/SPaT.
2. OBE fordert über SRM mit der erwarteten Ankunftszeit (aus MAP Daten und Eigenlokalisierung) die Freigabe an.
3. RSU sendet nach erfolgreicher Verarbeitung der SRM die SSM-Quittierung. Diese wird Fahrpersonal angezeigt
4. Korrektur der SPaT-Daten, sofern Lignalsteuerung die ÖPNV-Priorisierung umsetzt

MAP kann auch Infos zu anderen Knotenpunkten beinhalten, sodass Anmeldung an übernächsten LSA möglich ist.

Schnittstellen zwischen einzelnen Komponenten:

- Standardisierte OCIT-C Schnittstelle für Datenaustausch zwischen Zentralenkomponenten (Verkehrsmanagementsystem, RSU-Zentrale, LStZ)
- Standardisierte OCIT-O Schnittstelle für Datenaustausch zwischen Feldelementen und Zentralenkomponenten

Sonstige Rahmenbedingungen

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

- Wellenlänge der V2X-Kommunikation (0,05 m) führt zu Dämpfung durch wasserdampfhaltige Atmosphäre, Reflexionen und Mehrwegausbreitungen
- Reichweite: wenige 100 Meter
- unbekannte Auswirkungen von: Bebauung, Topografie, Vegetation, elektromagnetische Störfelder (Oberleitungen)
- Ungenauigkeit der Ankunftszeit- und Schaltzeitprognose
- viele äußere Einflussfaktoren (z.B. Haltestellenwartezeit)

Chancen

- energieeffizientes Fahren an LSAs
- Verbesserung des allgemeinen Verkehrsflusses
- Erprobung von V2X-Technologie
- Wegbereiter für intelligentes Verkehrsmanagement
- kürzere Grün-Zeit für Straßenbahn durch genaue Taktung, mehr Pünktlichkeit bei gleichzeitig weniger Wartezeit des IVs an Ampel

Projekt-Steckbrief 12

PSB-Nr. 12: VERONIKA: Vernetzung von Fahrzeugen des Öpnv mit verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen auf der Basis des Kommunikationsstandards ETSI ITS G5

3. Wesentliche Erkenntnisse

Ausblick	C-ROADS Germany Urban Nodes: weitere 60 Knotenpunkte sollen C-ITS fähig gemacht werden (Projekt bis 2023)
-----------------	---

Relevante Online-Quellen:

Schäfer, Michael; Hoyer, Robert; Hepner, Eduard; Wang, Miao; Zhao, Chao; Schneegans, Lena et al. (2020): VERONIKA - Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel. Abschlussbericht, Teil 1. Kassel.

Online verfügbar unter:

https://www.tib.eu/en/search?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1741226813&cHash=091e0a52d3bb61cae73e3ab6aec74ebb#download-mark

Projekt-Steckbrief 13

PSB-Nr. 13: Rail2X - Smart Services

1. Allgemeine Informationen

Titel	Rail2X - Smart Services
Kategorie	Vernetzung
Beteiligte	DB Systel GmbH, DLR, DRALLE Systementwicklungen, Hasso-Partner-Institut, Uni Potsdam, Siemens Mobility
Projektlaufzeit	06/2017 - 05/2020
Einsatzort	Erzgebirge
Fahrzeugtyp	Siemens Desiro Classic Baureihe 642
Betriebssituation	Linienbetrieb (Erprobung)

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	V2X-Kommunikation in 3 Use Cases: <ul style="list-style-type: none">- Service und Diagnose (Zug - Infrastrukturanlagen)- Effizienz- und Komfortsteigerung (Kfz - Bahnübergang)- Bedarfshalt (Zug - Haltestelle)
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	Use Case 1: <ul style="list-style-type: none">- Rail2X-Komponente im Schienenfahrzeug: Fahrzeug-OBU: Aufnahme (von Strecken-RSU) und Zwischenspeicherung/Transport von Rail2X-Broadcast-Telegrammen, im Depot: Übertragung an Depot-RSU- GSM-Modul (4G/5G): Übermittlung besonders dringlicher Messwerte / Alarmmeldungen über Mobilfunknetz Use Case 2: Ausstattung Straßenverkehrsfahrzeug <ul style="list-style-type: none">- On-Board Recheneinheit- HMI- OBU (Cohda Wireless MK5) Use Case 3: <ul style="list-style-type: none">- Zentraleinheit: OBU + Controller- Triebfahrzeug-Bedieneinheit- Bedarfshalttaster

Projekt-Steckbrief 13

PSB-Nr. 13: Rail2X - Smart Services

2. Technische Informationen

Vernetzung und Kommunikations-technologie

V2X-Kommunikation:

- WLAN-Standard IEEE 802.11p (ETSI ITS-G5), internationaler Frequenzbereich 5,9 GHz
- kurze Distanzen bis zu wenigen 100 m
- Funkband ITS-G5A: nahezu weltweit reserviert
- ETSI ITS TS 103 301: standardisierte Nachrichtenformate für V2X

ETSI standardisierte Inhalte von Nachrichten:

- CAM (cooperative awareness message): Position des fahrenden Objektes, an dem OBU befestigt ist
- SREM (signal request extended message): Anfrage nach Zustand eines Infrastrukturelements (z.B. Schranke)
- SSEM: (signal status extended message): Antwort auf Anfrage nach dem Status
- SPATEM (signal phase and time extended message): Status der LSA
- CPM (collective perception message): Erfassung von Daten von nicht ausgerüsteten Fahrzeugen zu deren Simulation
- DENM (decentralised environmental notification message): Warnungen von liegegebliebenen Fahrzeugen oder Stauenden

Infrastruktur (physisch)

Use Case 1:

- Infrastrukturelemente, z.B. Weichen
- Strecken-Controller: Aufnahme Messdaten über Sensoren und Vorbereitung Weitertransport an RSU
- Depot-Controller: Paketannahme/Entpacken/Zwischenspeicherung, Übertragung per Mobilfunk an Datenmanagementsystem zur langfristigen Speicherung
- Rail2X-Sende- und Empfangsstation: Solarpanel, Akku, Mobilfunkantenne, Rail2X-Antenne, Rail2X-Einheit (RSU und Controller)

Use Case 2:

- Anmelde- und Abmeldetaster für Straßenverkehr ohne V2X
- Schranke mit Wayguard DLX, verbunden mit Rail2X-Modul ESCoS RSU

Use Case 3:

- zusätzliche Hopping-Station für Reichweitenerhöhung
- Haltepunkt: dynamischer Schriftanzeiger (DSA), Bedientaster, Cohda MK5-RSU

Projekt-Steckbrief 13

PSB-Nr. 13: Rail2X - Smart Services

2. Technische Informationen

Infrastruktur (digital)

- Sittraffic ESCoS (Siemens): ESCoS RSU
- Echtzeitdatenaustausch Straßenfahrzeug mit Straßeninfrastruktur über RSU
 - 6 Antennen: LTE, DSRC, WLAN/Bluetooth, GNSS
 - WLAN-basiertes Funkmodul
 - Zusammenarbeit mit Cohda Wireless: 5. Generation OBUs und RSUs (MK5-OBU, MK5-RSU)

Siemens Traffic Controller: SPATEM und MAPEM Nachrichten an Fahrzeuge

Use Case 1:

- Strecken-RSU: regelmäßiges Senden von Mess- und Diagnosedaten in Nachrichtenform (DENM)
- Depot-RSU: Aufnahme der Daten von Fahrzeug-OBU
- Datenempfangsstation: Aufnahme von Datenpaketen per Funk zu Diagnosezwecken auf freier Strecke oder Bahnhof von allen vorbeifahrenden Zügen

Use Case 2: Bahnübergangsanlage

- ESCoS RSU: verbunden über IEEE 802.11p mit OBU des Straßenverkehrs

Use Case 3:

- Haltepunkt: Rail2X-Einheit (OBU und Controller)
- Hopping-Station: Rail2X-Einheit (RSU und Controller)

**Leit- bzw.
Betriebszentrale**

Projekt-Steckbrief 13

PSB-Nr. 13: Rail2X - Smart Services

2. Technische Informationen

Technische Rahmenbedingungen

Ablauf bei Use Case 2:

- Anmeldung Kfz: periodisches Senden der Position (CAM), Bahnübergang empfängt Daten und berechnet Entfernung, einmaliges Senden einer Anfrage (SREM), Öffnung der Schranke möglich, wenn Fahrzeug-ID in CAM und SREM identisch sind
- Bahnübergang: periodisches Senden eigener Position (MAPEM) und Zustand (SPATEM), Entscheidung nach Überquerungsanfrage basierend auf Infos von Stellwerk, Beantwortung Anfrage (SSEM)
- Abmeldung: Überquerung wird anhand der Fahrzeugposition erkannt

Ablauf bei Use Case 3:

Anmeldung:

- Fahrgast betätigt Taster, einmalige Sendung SREM, Übermittlung Haltewunsch
- Anzeige Haltewunsch auf Display im Zug, Annahme oder Ablehnung durch Fahrer, Signal (SSEM) an Bahnsteig, Anzeige an DSA
- SREM: Fahrzeug-ID, Bahnhof-ID, Nummer der Anfrage, Nummer der Zufahrtsstraße
- SSEM: Bahnhof-ID, Anfrage-ID, Fahrzeug-ID, Zufahrtsstraße-ID, Antwort auf Anfrage (rejected, granted, processing), zusätzliche Erläuterungen

Hopping-Station:

- Weiterleitung CAM von Zug an Modul am Bahnhof und Weiterleitung SREM und SSEM
- Keine Verarbeitung von Daten
- CAM: Fahrzeug-ID, Breiten- und Längengrad, ellipsoide Höhe, Stationstyp, Stationsmerkmale

Sonstige Rahmenbedingungen

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Reichweite: ca. 250 m für problemlose Datenübertragung, bei 450 m sehr niedrige Empfangsrate

Akzeptanz

Herausforderungen

Use Case 3 Nachteile:

- Haltewunsch nicht immer zweifelsfrei erkennbar
- Reisende müssen sich aktiv bemühen
- keine Klarheit über Erkennung des Haltewunsches, ggfs. Stress und Unsicherheit bei Fahrer

Chancen

Use Case 3: Vorteile:

- kürzere Reisezeiten
- mehr Halteoptionen pro Strecke können angeboten werden
- Schienenanbindung auch für kleinere Siedlungen
- Energiebedarfs- und Verschleißreduktion durch langsames Durchfahren der Stationen

Projekt-Steckbrief 13

PSB-Nr. 13: Rail2X - Smart Services

3. Wesentliche Erkenntnisse

Ausblick	V2X-Technologie aus dem Straßenverkehr ist auch für Anwendungsfälle im Schienenverkehr einsetzbar
-----------------	---

Relevante Online-Quellen:

Meirich, Christian; Grünhäuser, Miriam; Strub, Leo; Pirl, Lukas; Schubert, Lucas Andreas; Wille, Christian et al. (2020): Rail2X - Smart Services. Projektabschlussbericht. Hg. v. DLR (Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrstechnik, Band 36).

Online verfügbar unter: https://elib.dlr.de/135454/1/Rail2X_Abschlussbericht_final.pdf

Projekt-Steckbrief 14

PSB-Nr. 14: COSEL: computer-optimised speed control for energy-efficient light rails

1. Allgemeine Informationen

Titel	COSEL: computer-optimised speed control for energy-efficient light rails
Kategorie	Vernetzung
Beteiligte	TU Dresden, Dresdner Verkehrsbetriebe AG
Projektlaufzeit	2014
Einsatzort	Dresden, Nord-Süd-Verbindung
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb (Erprobung)

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	keine Automation im Fahrzeug selbst, sondern intelligente Verkehrsinfrastruktur durch LSA in Kombination mit Fahrerassistenzsystem
Automatisierungsgrad	assistiert
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	COSEL: kann in Bordrechner integriert werden, oder über Smartphone im Fahrerraum installiert werden GNSS-System oder Odo- bzw. Tachometer zur Erfassung von Abweichungen zum Soll-Fahrverhalten und ggfs. Anpassung der Fahrempfehlung
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	keine Angaben
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	<ul style="list-style-type: none">- Dresdner Straßenverkehrsmanagementsystem VAMOS: MIV-Verkehrslagedaten- Betriebsleitsystem der DVB: Betriebsdaten (Sollabfahrplan, Fahrzeugpositionsdaten, geplante Anschlüsse, ...)- ÖV-Annäherungsmodell: ÖV-Ankunftsprognose für LSA- QLSA: optimaler Freigabebereich aus Sicht von MIV und ÖPNV- Verkehrsrechner: Anmeldung und Realisierung der Freigabe bei LSA, Sendung Freigabe an FAS
Leit- bzw. Betriebszentrale	
Technische Rahmenbedingungen	Verfahren: qualitätsgerechte ÖPNV-Behandlung an LSA (QLSA) <ul style="list-style-type: none">- multikriterielle Kostenfunktion (Fahrplanlage, dynamische Anschlüsse, MIV-Verkehrslage)

Projekt-Steckbrief 14

PSB-Nr. 14: COSEL: computer-optimised speed control for energy-efficient light rails

2. Technische Informationen

Sonstige Rahmenbedingungen	Haltestellenaufenthaltszeit wird ebenfalls als Stellschraube verwendet, da allein das Fahrverhalten nicht ausreichend ist (z.B. wegen vorgeschriebener Mindestgeschwindigkeit aus Gründen der Akzeptanz und Behinderung des übrigen Verkehrs)
-----------------------------------	---

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen	absolute Bevorrechtigung für ÖPNV nicht generell umsetzbar
------------------------------	--

Akzeptanz

Herausforderungen

Chancen	<ul style="list-style-type: none">- örtlich-zeitliche Verlagerung der Haltezeit führt zur Vergrößerung des fahrgastwirksamen Anteils an der Gesamthaltezeit- energiesparende Fahrweise- Reduktion von Verspätungen durch gezielte Priorisierung von verspäteten Fahrzeugen
----------------	--

Ausblick

Relevante Online-Quellen:

Gassel, Christian; Schönherr, Björn; Matschek, Tobias; Krimmling, Jürgen (2014): Steigerung der ÖPNV-Qualität durch kooperative Ampelanlagen. In: Nahverkehr 32 (5). Online verfügbar unter <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A34055/attachment/ATT-0/>

Projekt-Steckbrief 15

PSB-Nr. 15: Digital Train Control und Frankfurt MIND+

1. Allgemeine Informationen

Titel	Digital Train Control und Frankfurt MIND+
Kategorie	Vernetzung
Beteiligte	Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF), Stadt Frankfurt am Main (Straßenverkehrsamt), Siemens Mobility
Projektlaufzeit	2021-2031
Einsatzort	Frankfurt am Main
Fahrzeugtyp	U-Bahn, Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Automatisierung im Tunnelbereich durch CBTC-Technik Verbessertes Verkehrsmanagement durch Vernetzung (V2X) außerhalb des Tunnels
Automatisierungsgrad	assistiert bis automatisiert (Teilstrecken GoA 4)
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	keine genauen Angaben, voraussichtlich standardmäßige CBTC-Ausrüstung inkl. OBUs zur V2X-Kommunikation
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	Straßenbahnbereich: V2X-Kommunikation über ITS-G5, außerdem LTE zur Zentrale U-Bahn: je nach CBTC-Produkt (vrsl. WiFi-Standard)
Infrastruktur (physisch)	CBTC-Elemente (siehe CBTC-Produkte): z.B. WCU (Wayside-Control-Unit) und Stellwerk
Infrastruktur (digital)	- RSUs - CBTC-Elemente - Datenplattformen: Nutzung von zusätzlichen Daten wie z.B. Umwelt- und Verkehrsdaten, digitale Zwillinge, Verkehrssysteme
Leit- bzw. Betriebszentrale	- V2X-Zentrale: bündelt Informationen aus RSUs - kooperative Leitstelle für ÖPNV und IV: bündelt Daten aus öffentlichem und Individualverkehr, beinhaltet Simulationsmodule, Strategiemodule, Verkehrsplanungsinstrumente - Verkehrsrechner: beinhaltet mesoskopisches Verkehrsmodell und ist vernetzt mit V2X-Zentrale, Lichtsignalanlagen und kooperativer Leitstelle - ITCS-Zentrale: für CBTC-System, beinhaltet z.B. Soll-Fahrplandaten, verbunden mit Leitsystem
Technische Rahmenbedingungen	Nutzung einer OBU für Tunnel- und Außenbereiche und somit Ermöglichung von CBTC (inkl. Automatisierung) im Tunnel und C-ITS im Straßenbahnbetrieb

Projekt-Steckbrief 15

PSB-Nr. 15: Digital Train Control und Frankfurt MIND+

2. Technische Informationen

Sonstige Rahmenbedingungen

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen

Akzeptanz

Herausforderungen

Chancen CBTC: U-Bahn-Automatisierung (siehe andere Projekte)

- vernetztes Auslastungsmanagement:
- Analyse von Fahrzeugauslastung und Fahrgastströmen
- Planung von Fahrzeugkapazitäten
- Informationen an Kunden in Echtzeit
- Bereitstellung von Alternativen
- vernetzte Verkehrslenkung
- Priorisierung von ÖV und Einsatzfahrzeugen
- Gefahrenwarnungen
- Verkehrsflussoptimierung
- energieoptimale Fahrweise

Ausblick Stufenweise Einführung:

- Stufe 1: CBTC als neues, digitales Zugsicherungssystem (DTC) der U-Bahn
- Stufe 2: DTC auch an Oberfläche für U-Bahn und Tram
- Stufe 3: Verbinden von DTC und Verkehrsrechner zur ganzheitlichen Verkehrslenkung (Projekt "Frankfurt MIND+")

- Terminplan:
- Juni 2022: Start Fahrzeugumbau
 - Ende 2025: Ende Migration Strecke B
 - Ende 2028: Ende Migration Strecke A
 - Ende 2031: Ende Migration Strecke C und Tram

Relevante Online-Quellen:

Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) (2022): Digital Train Control Frankfurt (DTC): Das Zugsicherungssystem von morgen. [Zugriff am 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://innovation.vgf-ffm.de/dtc/>

Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) (2022): Frankfurt MIND (+): Der ÖPNV von morgen: multimodal, intelligent, nachhaltig, digital. [Zugriff am 21.04.2022]. Verfügbar unter: <https://innovation.vgf-ffm.de/frankfurt-mind/>

Projekt-Steckbrief 16

PSB-Nr. 16: Siemens Autonomous Tram

1. Allgemeine Informationen

Titel	Siemens Autonomous Tram
Kategorie	Automatisierung: Straßenbahn
Beteiligte	Siemens Mobility, ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH
Projektlaufzeit	2018
Einsatzort	Potsdam
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb (Erprobung)

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	<p>Fahrt:</p> <ul style="list-style-type: none">- autom. Beschleunigung und präzises Anhalten- Geschwindigkeitsregelung- Ein- und Ausfahrt an Haltestellen <p>Umfelderkenntnis:</p> <ul style="list-style-type: none">- Generische Objekterkennung und -abfertigung- Erkennung von und Reaktion auf Signale- an Bahnsteigen: Warnsignale, falls Personen zu nahe sind <p>Lokalisierung:</p> <ul style="list-style-type: none">- Selbstlokalisierung- Zustandsschätzung
Automatisierungsgrad	<p>GoA 2 (teilautomatisiert)</p> <p>Sicherheitsfahrer überwacht und greift ggfs. ein</p>

Projekt-Steckbrief 16

PSB-Nr. 16: Siemens Autonomous Tram

2. Technische Informationen

Technische Ausstattung der Fahrzeuge

Sensorik:

- Lidar: 1 4-Layer-Lidar (vorne) mit integrierter Objekterkennung und -tracking, zwei 16-layer-Lidars (vordere Ecken)
- Radar: drei, integriertes Objekttracking, nach vorne gerichtet
- Kameras: neun, sechs für Objekterkennung (nach vorne und vorne/Seite), drei für Signalerkennung
- Lokalisierung: INS (inertial navigation system): GNSS mit RTK, zusätzlich Odometrie, IMU

Recheneinheit:

- Sensorfusion
- Fahrzeugregelung

Fahrer-Schnittstelle:

- Anzeige des aktuellen Modus
- virtuelle Hebel (Gas/Bremse)
- aktuelle Geschwindigkeit
- Geschwindigkeitslimit / -ziel
- Objekt- und Signalerkennung
- Straßenbahnhaltestellen und Countdown

Vernetzung und Kommunikationstechnologie

Infrastruktur (physisch)

Infrastruktur (digital)

Leit- bzw. Betriebszentrale

Technische Rahmenbedingungen

1. Sensorik:

- Radar hat große Probleme, da hauptsächlich metallische Objekte (Strommasten, Bahnschwellen) erkannt werden und dadurch die Unterscheidung von z.B. Fußgängern schwierig ist.
- Lidar: hohe Dichte an Objekten in der Nähe macht Det./Klass. schwierig, viele false positives.
- Kamera: allg. gute Ergebnisse, trotzdem hohe false positives und starke Abh. von Position der Kamera

2. Prädiktion von Bewegungstrajektorien von Objekten: nur für wenige Sekunden ist Voraussage akkurat möglich, StraBa als sehr träges Fahrzeug bräuchte aber längere Prädiktionszeiträume

3. Vegetation auf Streck: als Objekte erkannt --> Trade-off zw. Erkennung von nahen Objekten am Boden und Nicht-Erkennen von höherer Vegetation

4. Reduktion der max. Geschw. in der Nähe von Fußgängerüberwegen (50->40 km/h)

Projekt-Steckbrief 16

PSB-Nr. 16: Siemens Autonomous Tram

2. Technische Informationen

Sonstige Rahmenbedingungen	Schnittstelle Mensch-Maschine: <ul style="list-style-type: none">- ausreichende Informationen bereitstellen für Fahrer, ohne zu viele Details zu präsentieren- klare Darstellung von Gefahren- Sicherstellung der Kontrollübernahme durch Fahrer zu allen Zeitpunkten
-----------------------------------	---

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen	Fahrer besser in folgenden Bereichen: <ul style="list-style-type: none">- Antizipation des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern- Bewerkstelligung von unvorhergesehenen Situationen- Interaktion mit Passagieren- Erkennung kleiner Objekte- Bewerkstelligung untersch. Wetterbedingungen
Akzeptanz	Vertrauen in / Akzeptanz für automatisierte/autonome StraBas nur erreichbar, wenn: <ul style="list-style-type: none">- Straßenbahn immer mit passender Geschwindigkeit fährt- immer gleich auf bestimmte Situationen reagiert- passendes Feedback (auditiv, visuell) im Falle von sicherheitsrelevanten oder außerordentlichen Situationen gegeben wird- Straßenbahn Feedback des Fahrers aufnehmen und umsetzen kann
Herausforderungen	Herausforderungen im Gegensatz zum Automobil: <ul style="list-style-type: none">- keine Sicherheitsgurte / Airbags für Passagiere- Zeitplananforderungen- Reaktions- / Aktionsspielraum beschränkt (z.B. kein Ausweichen durch Lenkung möglich)- Anwendung von Technologien und Sensorik aus dem Automobilbereich ist nicht so leicht und erfordert wesentliche Anpassungen <p>Probleme mit Umfeldmodellierung:</p> <ul style="list-style-type: none">- untersch. Umgebungsbedingungen- schwierige Umgebungen für manche Sensormodalitäten (Witterung, Beleuchtung, Reflexionen, ...)- Erkennung mancher Objekte mit manchen Sensoren nicht möglich- GNSS-basierte Lokalisierung ist nicht ausreichend für zuverlässigen Betrieb in allen Umgebungen, wahrnehmungsbasierte Lokalisierung nötig (z.B. SLAM)- komplexe Verkehrssituationen im Mischverkehr- Warn- und Handlungsstrategien zur Kommunikation mit Personen im Umfeld
Chancen	großes Verbesserungspotential wird in der Sensorfusion und in der Verwendung von Vernetzung gesehen

Projekt-Steckbrief 16

PSB-Nr. 16: Siemens Autonomous Tram

3. Wesentliche Erkenntnisse

Ausblick	Identifikation untersch. Anwendungsfälle: <ul style="list-style-type: none">- Depotbetrieb: auton. Betrieb auf gesicherten Gleisanlagen mit geringer Geschw. (Reduktion Personal, Optimierung Fahrzeugtransport)- Autom. Ab- und Bereitstellen auf Stellplätzen: höhere Geschwindigkeit, teilweise öffentliches Netz (Reduktion unproduktiver Fahrten, schnellerer Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge)- Vollautom. auf Teilstrecken: Linien mit geringer Dichte oder spezieller Absicherung (Reduktion monotoner Überwachungsaufgaben, Pausenzeiten für Fahrer)- Vollautom. Betrieb: ganze Strecke ohne Fahrer (Eliminierung Fahrerkabine, Potential neue Geschäftsmodelle)
-----------------	--

Relevante Online-Quellen:

Hofmann, Matthias (2020): Siemens Mobility und VIP Potsdam auf dem Weg zur autonomen Tram. In: bahn manager Magazin 2020 (02).

Online verfügbar unter: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1e976211-2679-49ab-8a45-6b034994a37f/mors-200305-fachartikel-potsdam-v010-de.pdf>

Palmer, Andrew W.; Sema, Albi; Martens, Wolfram; Rudolph, Peter; Waizenegger, Wolfgang (2020): The Autonomous Siemens Tram. In: 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transport Systems (ITSC) 2020, S. 1-6. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294699.

Online verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2102.04034>

Siemens Mobility GmbH (2019): Auf dem weh zur auonomen Tram. [Zugriff am 10. August 2021] Online verfügbar unter:

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a31b03ec-6326-4694-9b19-35fd6b21373b/praesentation-uitp-autonome-tram-d.pdf>

Projekt-Steckbrief 17

PSB-Nr. 17: MAAS-Projekt: Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsystemen der Straßenbahn

1. Allgemeine Informationen

Titel	MAAS-Projekt: Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsystemen der Straßenbahn
Kategorie	Automatisierung: Straßenbahn
Beteiligte	Digitalstadt Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, HEAG mobilo, Telekom
Projektlaufzeit	11/2017 - 03/2022
Einsatzort	Darmstadt
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Linienbetrieb (weiterhin manuelle Fahrt), Depot

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Automatisierung und Teleoperation Teleoperation: <ul style="list-style-type: none">- Bedienung aus der Ferne- Erweiterung der Automatisierung- kurzzeitige Übernahme der Steuerung in Szenarien, in denen Automatisierung nicht problemlos funktioniert oder in Bereichen in denen Automation noch nicht erlaubt ist- Integration in Flottenmanagement
Automatisierungsgrad	nicht automatisiert auf Linie (GoA 0) Teleoperation im Depot
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	Prototyp: <ul style="list-style-type: none">- Radar- Lidar- Ultraschall- Stereo-, Weitwinkel- und IR-Kameras- Algorithmen zur Sensordatenfusion und Erstellen einer HD digitalen Karte- Recheneinheit- 5G-Antenne
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	Mobilfunk (4G, 5G) für Teleoperation
Infrastruktur (physisch)	
Infrastruktur (digital)	
Leit- bzw. Betriebszentrale	

Projekt-Steckbrief 17

PSB-Nr. 17: MAAS-Projekt: Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsystemen der Straßenbahn

2. Technische Informationen

Technische Rahmenbedingungen	- Erprobung der Umfelderkennungssoftware im manuellen Betrieb - später Erprobung einzelner gestellter Szenarien auf Testfeld
-------------------------------------	---

Sonstige Rahmenbedingungen	
-----------------------------------	--

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen	- klassische Zugsicherungssysteme sind nicht vollständig für das automatisierte Fahren auf den Straßen anwendbar - nur zulässige Geschwindigkeit kann vorgegeben werden, aber nicht Einflüsse durch andere Verkehrsteilnehmer oder LSAs
------------------------------	--

Akzeptanz	Thema Arbeitsplätze: - Betrieb würde erst allmählich umgestellt werden - neue Mitarbeiter in Leitstelle / Teleoperation nötig
------------------	---

Herausforderungen	Herausforderungen Teleoperation: - Echtzeit-Kamerabilder notwendig, um Steuerung von außen optimal umzusetzen - mit 4G in Ballungsgebieten nicht immer möglich - Vorteil von 5 G soll später noch untersucht werden Herausforderungen Automatisierung: - Bewegungsmöglichkeiten: geringe Manöveroptionen, kein Ausweichen, große Masse, Trägheit, keine schnellen Reaktionen möglich - menschliches Verhalten: Menschen wissen, dass Straßenbahn auf Schienen fährt und laufen daher ggfs. sehr nahe an Schiene (Umgang mit solchen Situationen schwierig) - geringe Distanz zu Menschen und Objekten: parkende Autos, Infrastrukturelemente, sehr genaue Positionierung und Intentionsschätzung nötig - Sicherheit: sehr hohe Anforderungen - Masse macht Unfälle auch bei geringen Geschwindigkeit sehr kritisch, lange Bremswege im Vergleich zu Shuttles / Autos
--------------------------	--

Chancen	
----------------	--

Ausblick	Automatisierung erst in >10 Jahren
-----------------	------------------------------------

Projekt-Steckbrief 17

PSB-Nr. 17: MAAS-Projekt: Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsystemen der Straßenbahn

Relevante Online-Quellen:

Deutschland Mobil 2030 (2019): Pilotprojekt gestartet: Darmstadt testet ferngesteuerte und automatisierte Tram. [Zugriff am 24.05.2022] Verfügbar unter: <https://www.deutschland-mobil-2030.de/blog/pilotprojekt-gestartet-darmstadt-testet-ferngesteuerte-und-automatisierte-tram>

TU Darmstadt: Anwendung von Assistenzsystemen in Straßenbahnen. Online verfügbar unter: https://www.fzd.tu-darmstadt.de/forschung/research_projects_fzd/maas_fzd/index.de.jsp

TU Darmstadt (2019): Forschung für die Straßenbahn der Zukunft. Projekt MAAS untersucht Machbarkeit von Automatisierung und Teleoperation. [Zugriff am 10.08.2021}. Verfügbar unter: <https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuel>

Projekt-Steckbrief 18

PSB-Nr. 18: AstrID - Autonome Straßenbahn im Depot

1. Allgemeine Informationen

Titel	AstrID - Autonome Straßenbahn im Depot
Kategorie	Automatisierung: Straßenbahn
Beteiligte	Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Siemens Mobility, Verkehrsbetrieb Potsdam (ViP), Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM), Codewerk, Mapillary
Projektlaufzeit	10/2019 - 09/2022
Einsatzort	Potsdam
Fahrzeugtyp	Straßenbahn
Betriebssituation	Depotbetrieb

2. Technische Informationen

Automatisierungs- oder Vernetzungsfunktionen	Digitaler Betriebshof: <ul style="list-style-type: none">- Vollautomatisierung des Straßenbahndepots auf Basis einer autonom fahrenden Straßenbahn (siehe Siemens Autonomous Tram)- automatisierte Fahrzeugregelung- Kollisionsvermeidung- Lokalisierung- Steuerung und Automatisierung von Depotprozessen- Ansteuerung von Infrastrukturanlagen- Fahrstraßenstellung
Automatisierungsgrad	je nach Grad der Funktionsintegration: Kollisionswarnung + Fahrautomat (GoA2) + Sicherheit + Depotmanagementsystem (GoA4)
Technische Ausstattung der Fahrzeuge	Lokalisierung: <ul style="list-style-type: none">- GPS (nicht ausreichend vor allem in Hallen)- zusätzliche Techniken (ohne Spezifizierung), bspw. vernetzungsbasiert, infrastrukturbasierte Hilfsmittel- Nutzung hochgenauer digitaler Karten Umgebungserfassung: <ul style="list-style-type: none">- Sensorik wie bei Siemens Autonomous Tram
Vernetzung und Kommunikationstechnologie	<ul style="list-style-type: none">- digitale Vernetzung: sicher, redundant, gegen Cyberangriffe geschützt, Gelände vollständig abgedeckt (depoteigenes Funknetz)
Infrastruktur (physisch)	Depotinfrastruktur
Infrastruktur (digital)	<ul style="list-style-type: none">- Cloud- und Edge-Komponenten zur datentechnischen Integration aller Systeme- über Data-Hub von Codewerk in Daten- und Systemlandschaft eingebunden- digitale Karte zur Lokalisierung

Projekt-Steckbrief 18

PSB-Nr. 18: AstrID - Autonome Straßenbahn im Depot

2. Technische Informationen

Leit- bzw. Betriebszentrale	Betriebshof-Managementsystem: <ul style="list-style-type: none">- zentrales Überwachungssystem- disponiert und steuert Depot-Prozesse- Position aller Fahrzeuge, Zustand der Infrastruktur und Stellung von Signalen sowie Weichen müssen bekannt sein- Definiert Fahraufträge und sendet Befehle an Tram und Anlagen
Technische Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none">- geringere Komplexität des Gesamtsystems- max. 25 km/h- Notabschaltungen, Rückfallebenen notwendig (Versagen von Fahrzeugen, Anlagen, Weichen)- Einplanung von Notfallszenarien
Sonstige Rahmenbedingungen	keine Fahrgäste

3. Wesentliche Erkenntnisse

Relevante Erfahrungen	
Akzeptanz	
Herausforderungen	Herausforderungen: <ul style="list-style-type: none">- Lokalisierung nur mit GPS nicht ausreichend- Umgebungswahrnehmung muss auch bei schwierigen Bedingungen sicher und zuverlässig möglich sein- Erprobung weiterer Sensortechnologien nötig- fehlender Fahrer: Verhaltensanforderungen, Verantwortung, Haftung - ungeklärt
Chancen	Chancen: <ul style="list-style-type: none">- optimierte Personal- und Zeitnutzung- mehr Personal im Linienbetrieb- erste kommerzielle Anwendung- geschützter, abgeschlossener Bereich, ideales Testfeld, Zulassung einfacher, technische Komplexität geringer
Ausblick	<ul style="list-style-type: none">- Nutzung der Erkenntnisse aus AStriD für Verbesserung der Automatisierung auch im Linienbetrieb- autonomes Fahren bei höheren Geschwindigkeiten und komplexeren Situationen abhängig von Entwicklungen in der Automobilindustrie (Sensortechnologie)- Marktreife bis 2026- mittelfristig soll Depotautomatisierung als erste Stufe des autonomen Fahrens kommerziell nutzbar gemacht werden

Projekt-Steckbrief 18

PSB-Nr. 18: AstriD - Autonome Straßenbahn im Depot

Relevante Online-Quellen:

Hofmann, Matthias (2020): Trams das Fahren lehren. Auf dem Weg zur smarten, autonomen Straßenbahn. In: Der Nahverkehr 2020 (12), S. 20-24,

Online verfügbar unter: <http://docplayer.org/213215364-Trams-das-fahren-lehren.html>