




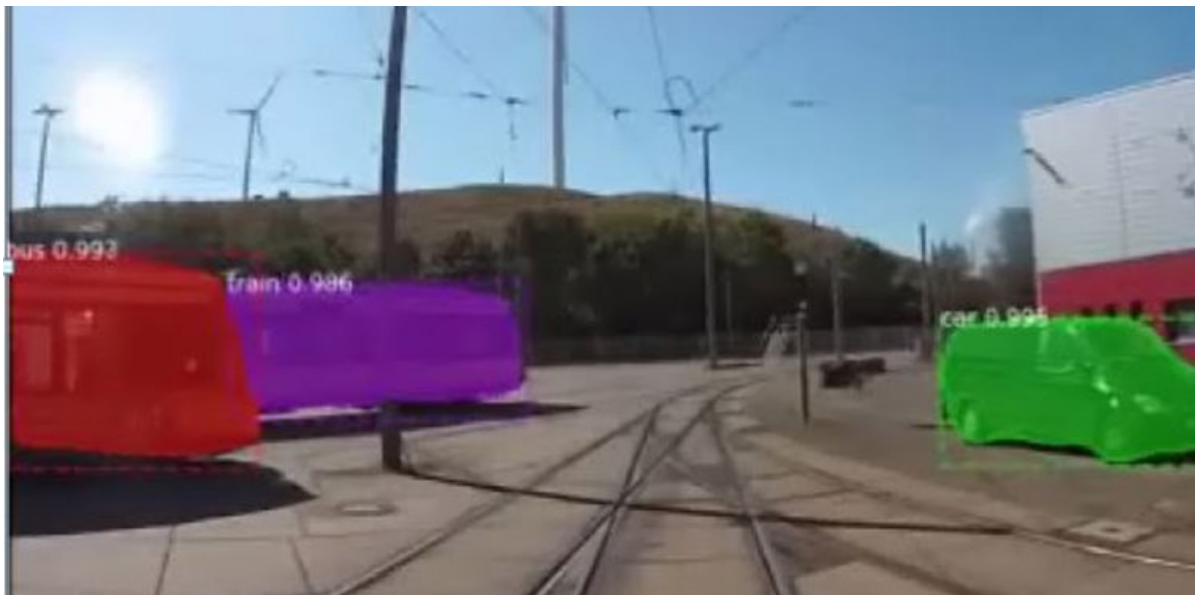
Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 38 (2023)



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

Kurzbericht



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

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

Kurzbericht

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

KIT, ECON / S. 6, 14, 17, 22, 25, 34, 36, 38

KIT, FAST / S. 7, 27, 30-33

TTK / S. 12, 13

PUBLIKATION ALS PDF

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

ISSN 2629-7973

Dresden, Juli 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

1	Einleitung.....	6
2	Stand der Automatisierung und Vernetzung im Straßenbahnbereich.....	9
3	Quantitative Abschätzung der Effekte einer Vernetzung und Automatisierung	11
3.1	Bahnbetriebliche Potenziale.....	12
3.2	Wirtschaftliche Potenziale	13
4	Vernetzung der Straßenbahn.....	16
4.1	Kommunikationssysteme.....	16
4.2	Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen.....	20
4.3	Digitale Karten	22
4.4	Anwendungssysteme der Vernetzung	24
4.5	Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren.....	25
5	Automatisierung der Straßenbahn.....	27
5.1	Fahrerassistenz als Vorstufe.....	27
5.2	Teleoperation als Vorstufe und Rückfallebene.....	28
5.3	Technik automatisierter Straßenbahnen.....	29
5.4	Branchenstruktur und Handlungsbedarf zur Realisierung der Automatisierung	33
5.5	Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren.....	36
6	Roadmap und Empfehlungen	38
6.1	Zusammenfassende Roadmap	38
6.2	Zukünftige Branchenstruktur	38
6.3	Herausforderungen und Treiber.....	39
6.4	Handlungsempfehlungen.....	39
7	Zusammenfassung	43
	Abbildungsverzeichnis.....	45
	Tabellenverzeichnis	46
	Quellenverzeichnis.....	47

1 Einleitung

Vernetzte und automatisierte Fahrfunktionen werden im Automobilbereich, bei U-Bahnen und Eisenbahnen mit Hochdruck entwickelt und auch schon eingesetzt oder erprobt. Welche Perspektiven haben sie bei Straßenbahnen? Welche Vorteile bieten sie und welche Kosten verursachen sie? Welche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Entwicklungsschritte sind notwendig, um sie voranzubringen? Diese Fragen werden in dem vorliegenden Bericht adressiert und aktuelle Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Antworten, die gegeben werden können, münden in eine „Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren“, die den Akteuren im Straßenbahnsektor Hinweise für ein verkehrsbetriebeübergreifend abgestimmtes Vorgehen eröffnet.

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

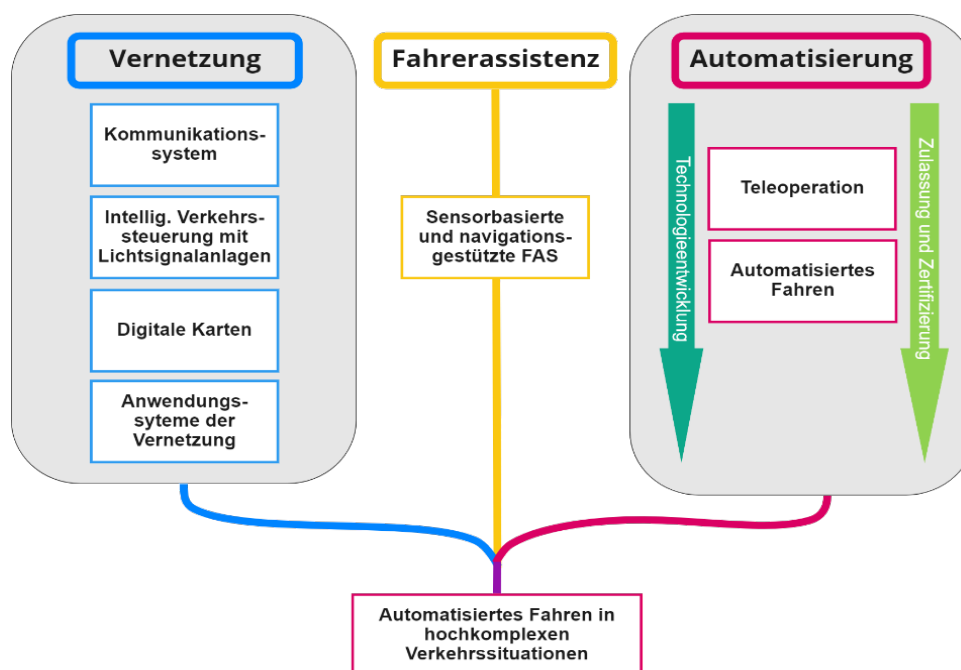


Abbildung 1-1: Wege zur Vernetzung und Automatisierung

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 sich später verbinden werden, denn die Schritte zur Vernetzung bereiten auch der 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. Als Vorwegnahme der Roadmaps zeigt Abbildung 1-1 die wesentlichen Elemente der beiden Stränge, unter Einbeziehung von Fahrerassistenz (FAS) und Teleoperation. Zugleich illustriert die Abbildung die Gliederung dieses Kurzberichts.

Doch handelt es sich bei dieser Entwicklung nicht um einen Selbstläufer. Die folgenden Kapitel und zusammenfassend die Roadmaps fokussieren auf die Herausforderungen und Lösungswege, die sich stellen. Abbildung 1-2 illustriert die Vielzahl der beteiligten Akteure, die zusammenarbeiten müssen. Neben den Anwendern - den öffentlichen Verkehrsunternehmen und Kommunalverwaltungen - nennt sie die Industrie, die Verbände und Normungsgremien und die staatlichen Akteure.

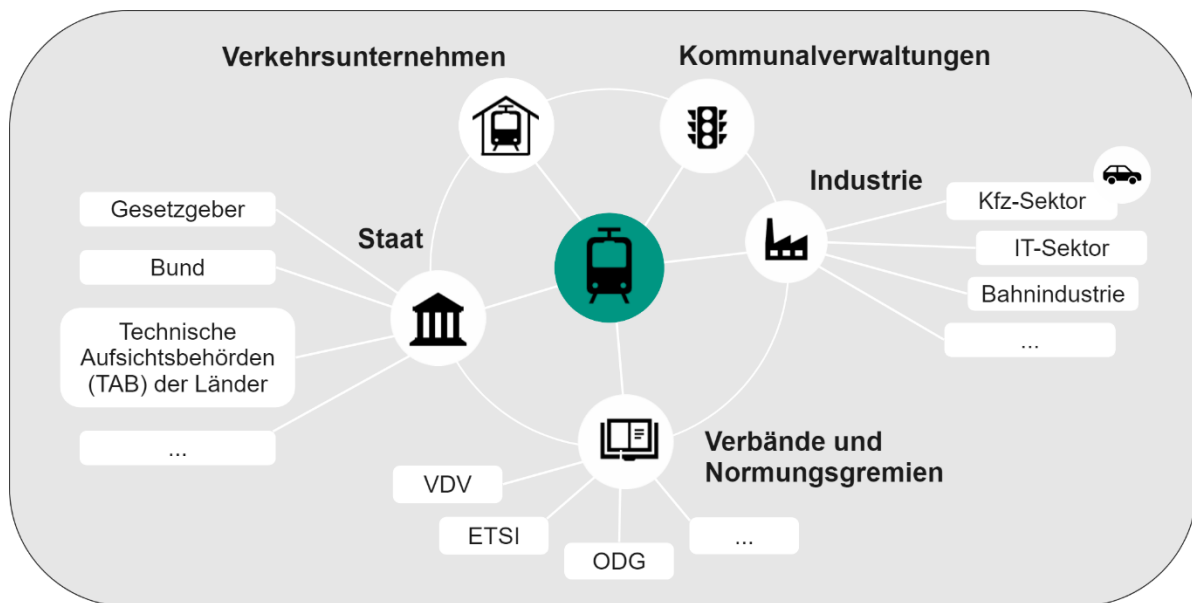


Abbildung 1-2: Die relevanten Akteursgruppen

Eine wichtige Aufgabe der Standardisierung und Normung besteht darin, wirtschaftliche Schnittstellen zwischen verschiedenen Akteuren der Branche zu etablieren, damit eine sinnvolle Marktentwicklung mit Arbeitsteilung, Spezialisierung und Wettbewerb möglich wird. Dabei ist sich zu vergegenwärtigen, dass die Unternehmen ihre Entwicklungen nicht für jeden einzelnen Verkehrsbetrieb 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. Der Exkurs „Technische und wirtschaftliche Schnittstellen“ (Abbildung 1-3) erläutert die beiden Begriffe und ihr Verhältnis zueinander.

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

Dies ist der Kurzbericht der Studie. Er ist für einen schnellen Überblick über Herausforderungen, Lösungswege und die entwickelte Roadmap konzipiert. Für detaillierte Erläuterungen des aktuellen Stands der Technik, der Technologien, Projekte und Hintergründe und der verwendeten Methoden wird auf den Hauptbericht verwiesen.

Exkurs: Technische und wirtschaftliche Schnittstellen

Der zentrale Begriff der „Schnittstelle“ hat eine doppelte Bedeutung:

- Technische Schnittstellen bestehen zwischen allen technischen Komponenten, die klar abzugrenzen sind und zusammen funktionieren sollen, zum Beispiel zwischen Sensoren, Soft- und Hardwarekomponenten und Aktoren eines Systems.
- Wirtschaftliche Schnittstellen bestehen zwischen verschiedenen Produzenten oder Betreibern von Komponenten, welche in einem Straßensystem eingesetzt werden. Eine gut etablierte wirtschaftliche Schnittstelle erlaubt die freie Kombination der Komponenten verschiedener Hersteller zu unterschiedlichen Gesamtsystemen und deren Einsatz durch die verschiedenen Betreiber. Wirtschaftliche Schnittstellen beschreiben daher eine Branchenstruktur.

Eine wirtschaftliche Schnittstelle setzt die Existenz und Normierung der zugrundeliegenden technischen Schnittstellen voraus. Für die vielen anderen technischen Schnittstellen, die nicht mit wirtschaftlichen Schnittstellen koinzidieren, ist der Normierungsbedarf geringer.

Einige wirtschaftliche Schnittstellen sind sehr grundlegend, so insbesondere die zwischen den Anwendern (Verkehrsunternehmen und Kommunen) auf der einen und der Industrie auf der anderen Seite. Andere bilden sich im Laufe der Zeit im Zusammenspiel der Akteure heraus.

Eine etablierte wirtschaftliche Schnittstelle schließt nicht aus, dass Unternehmen auch integrierte Produkte oder/und Dienste anbieten können. Aber sie erlaubt es Unternehmen eben auch, sich auf eine Seite der Schnittstelle zu fokussieren und dort Kernkompetenzen aufzubauen und aufgrund der hierdurch erzielbaren höheren Stückzahl Skalenerträge zu realisieren.

Am Anfang einer Technologie- und Marktentwicklung können die technischen Schnittstellen noch nicht normiert sein und die wirtschaftlichen Schnittstellen sowie die ausdifferenzierte Branchenstruktur noch nicht existieren. Innovative Pionierunternehmen müssen zunächst integrierte Lösungen entwickeln. Später sollten sie sich in die Normungsbemühungen aktiv mit einbringen, denn sie haben in der Regel großes Interesse daran, dass ihre Entwicklungen nicht in eine Sackgasse, sondern für deren wirtschaftlichen Absatz in tragfähige Marktstrukturen münden.

Abbildung 1-3: Exkurs: Technische und wirtschaftliche Schnittstellen

2 Stand der Automatisierung und Vernetzung im Straßenbahnbereich

Basis für alle weiteren Überlegungen im Projekt ist eine Literaturlatenbank mit ca. 170 Einträgen deutsch- und englischsprachiger Quellen sowie einige Literaturstellen aus dem chinesischen Sprachraum. Sie umfasst Bücher, Fachartikel, Berichte, Positionsberichte und weitere Quellen. Der Fokus liegt auf den in Abbildung 2-1 dargestellten vier Themengebieten. Die Abbildung zeigt für jedes Themengebiet die relevanten Funktionen und nennt Umsetzungsbeispiele aus der Praxis.

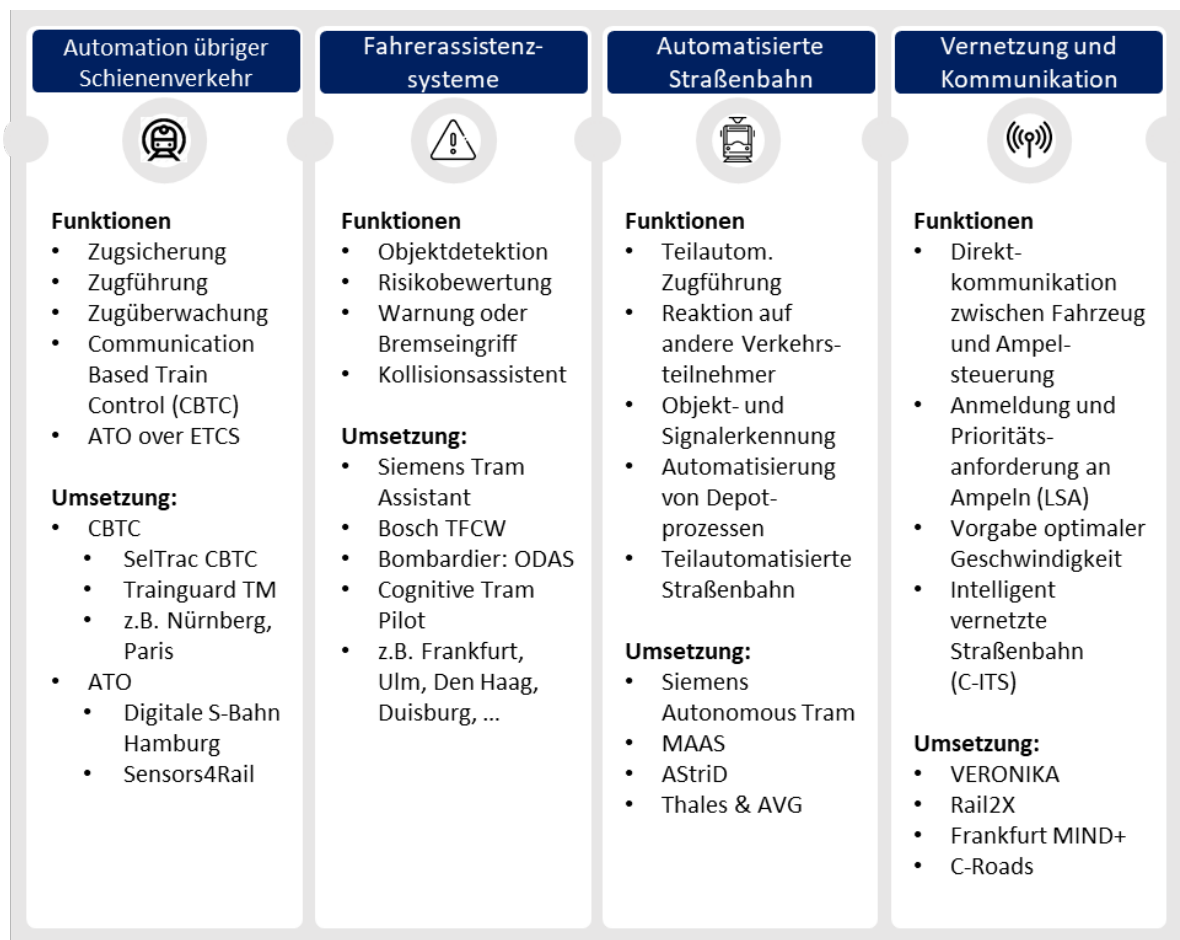


Abbildung 2-1: Schwerpunkte und Praxisbeispiele der Automatisierung und Vernetzung

Im übrigen Schienenverkehr, also im Vollbahn- und U-Bahn-Bereich, werden CBTC und das sogenannte ATO over ETCS eingesetzt. CBTC-Systeme (Communication Based Train Control) ermöglichen bereits heute die Vollautomatisierung (also bis zum fahrerlosen Fahren) auf *unabhängigen Bahnkörpern* (also ohne Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern) [1]. Produkte in diesem Bereich werden z. B. von Siemens und Thales angeboten und bei U-Bahnen eingesetzt. ETCS (European Train Control System) ist das harmonisierte Zugsicherungssystem der Vollbahn in Europa [2]. Dieses wurde um eine Komponente zur automatisierten Zugsteuerung (Automatic Train Operation, kurz: ATO) erweitert, sodass Teile der Strecke teilautomatisiert (in Grade of Automation (GoA) Stufe 2) gefahren werden können (daher ATO over ETCS genannt) [3].

Für Fahrerassistenzsysteme gibt es auch im Straßenbahnbereich einige erste Praxisbeispiele, insbesondere die Kollisionsschutzassistenten unterschiedlicher Firmen (z. B. Siemens [4], Bosch [5], Cognitive Pilot [6]). Bei Fahrerassistenzsystemen ist zu beachten, dass diese lediglich unterstützen und keine automatisierte Fahrzeugführung ermöglichen.

Erste Projekte setzen sich mit der Teilautomatisierung von Straßenbahnen auseinander. Prominentestes Beispiel ist wahrscheinlich die Siemens Autonomous Tram, die 2018 im Umfeld des Vorhabens AStriD in Potsdam vorgestellt wurde [7]. Weitere Projekte, die eine große Rolle spielen, sind die Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und Assistenzsysteme der Straßenbahn (kurz: MAAS) in Darmstadt [8] und Entwicklungen verschiedener Anbieter zum automatisierten Fahren im Depot [9].

Neben der Automatisierung spielt auch die Vernetzung eine wesentliche Rolle, relevante Praxisbeispiele hierzu sind die Projekte VERONIKA (Kassel) [10] und MIND (Frankfurt) [11].

3 Quantitative Abschätzung der Effekte einer Vernetzung und Automatisierung

Um die bahnbetrieblichen sowie die betriebs- und volkswirtschaftlichen Potenziale von vernetzten und automatisierten Betriebsfunktionen bei Straßenbahnen zu quantifizieren, wurden verschiedene Simulationen und Abschätzungen auf Basis eines realen Netzbetriebs, welcher die typischen Betriebssituationen von Straßenbahnen umfasst, vorgenommen. Ausgewählt wurde das Straßenbahnnetz der Karlsruher Verkehrsbetriebe (VBK), welches zunächst mithilfe der bahnbetrieblichen Simulationssoftware OpenTrack [12] detailliert abgebildet wurde. Dabei wurden die Vorzüge von Vernetzung und Automatisierung in Form von verschiedenen Szenarien bei der ehemaligen Linie 1 des Karlsruher Straßenbahnnetzes abgebildet.¹

Tabelle 3-1 zeigt, dass die ehemalige Linie 1 alle wichtigen Kategorien von Netzabschnitten enthielt. Die Tabelle gibt auch die Anzahl der besonders zu betrachtenden Betriebssituationen in jeder dieser Kategorien an.

TABELLE 3-1: TYPISCHE NETZABSCHNITTE AUF DER EHEMALIGEN KARLSRUHER LINIE 1

	Typische Netzabschnitte				
	Endhaltestelle mit Wendeanlage	Bahnkörper in Fußgängerzone	Besonderer Bahnkörper (Mittellage)	Besonderer Bahnkörper (Seitenlage)	Straßenbündiger Bahnkörper (Stadtstraße)
Anteil Bahnstrecke	6 %	17 %	44 %	27 %	6 %
Strecken-geschwindigkeit	40 km/h	25 km/h	60 km/h	60 km/h	30 km/h

Alle wichtigen Betriebssituationen sind mehrfach auf der Linie 1 vertreten und weisen folgende Infrastrukturelemente auf:

- 39 Signale,
- 26 Haltestellen,
- 25 Fußgänger-Bahnübergänge,
- 24 Weichen,
- 8 Straßenkreuzungen.

Ausgangspunkt der Analysen ist das sogenannte Referenzszenario, welches die Ist-Situation beschreibt. Die Simulation des Referenzszenarios wurde anhand von Echtzeit-Daten kalibriert und dann genutzt, um im aktuellen Netzbetrieb Störungen bzw. Situationen, bei welchen es zu häufigen Zeitverlusten und Verspätungen kommt, zu identifizieren. Diese Informationen wurden zur Entwicklung der Vernetzungs- und Automatisierungsszenarien genutzt.

¹ Während der Projektlaufzeit wurde im Dezember 2021 der Straßenbahntunnel der sogenannten „Kombilösung Karlsruhe“ eröffnet. Die Linie 1 verlief vor dieser Inbetriebnahme zwischen den Stadtteilen Durlach und Oberreit auf Straßenebene und hatte eine Länge von 11,65 km.

Es wurden insgesamt vier solcher Szenarien definiert, drei zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit im Sinne einer störungsfreien Betriebsqualität und eines zur Beurteilung der energetischen Effizienz:

- Szenario *Störungen an Kreuzungen*: Eliminierung von Wartezeiten an Knotenpunkten, insbesondere vor Lichtsignalanlagen;
- Szenario *Stationsverspätung*: Mittlere Haltezeit in der Innenstadt 27 Sekunden und außerhalb der Innenstadt 22 Sekunden;
- Szenario *Einbruchsverspätung*: Best-Case-Annahme – Reduktion der Einbruchsverspätungen auf 0 Sekunden;
- Szenario *Energiesparende Fahrstrategie*: Gleichmäßigeres Beschleunigen und Verzögern sowie vermehrtes Ausrollen.

3.1 Bahnbetriebliche Potenziale

Die einzelnen Szenarien werden mit der Software OpenTrack [12] simuliert, indem Modellparameter entsprechend angepasst werden. Die Ergebnisse der Simulationen werden in den folgenden Diagrammen gezeigt. Sie sind unterteilt in die Ergebnisse für die einzelne Linie 1 (Abbildung 3-1) und die Ergebnisse für das gesamte Karlsruher Straßenbahnnetz (Abbildung 3-2).

Im Szenario *Energiesparende Fahrstrategie* ergibt sich in der Simulation aller sechs Karlsruher Straßenbahnlinien eine Energieeinsparung von 7,4 % im Vergleich zum Ohne-Fall.

Insgesamt legen die Simulationen nahe, dass Vernetzung und Automatisierung zu deutlichen Fahrzeit- und Energieeinsparungen bei Straßenbahnen führen können.

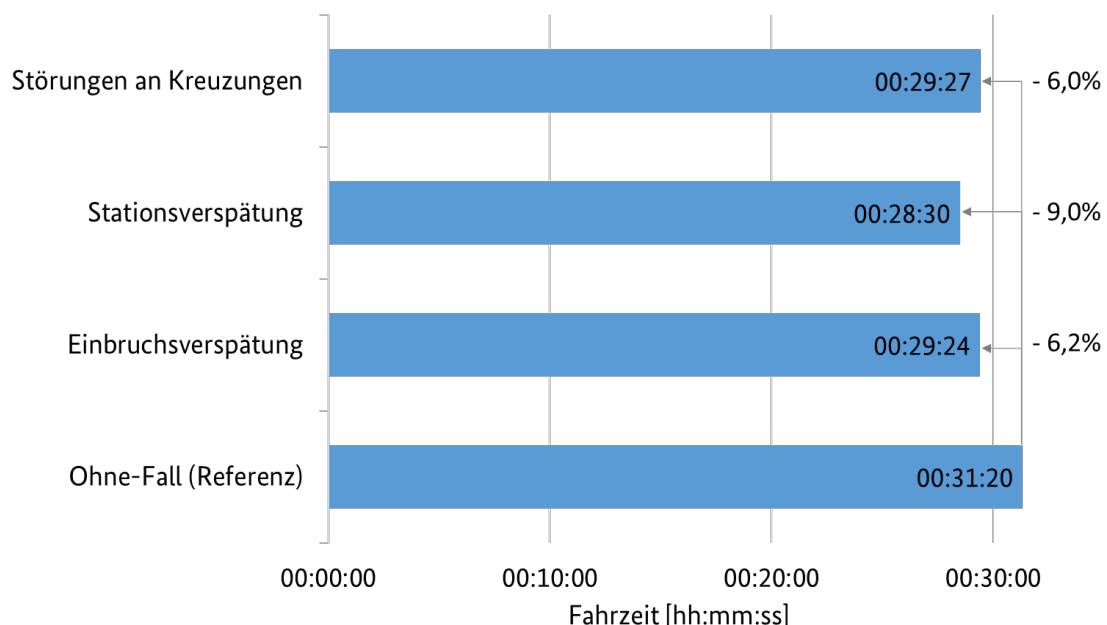


Abbildung 3-1: Errechnete Fahrzeiteinsparungen bei verschiedenen Szenarien der Simulation zur Karlsruher Straßenbahn-Linie 1, Fahrrichtung Oberreut

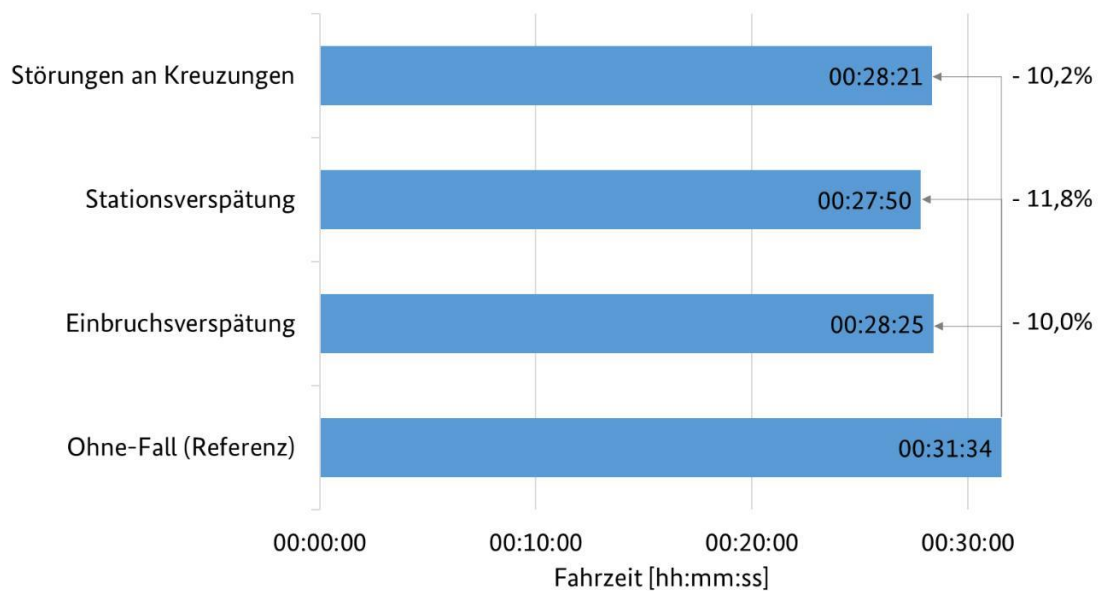


Abbildung 3-2: Errechnete Fahrzeiteinsparungen bei verschiedenen Szenarien der Simulation aller sechs Karlsruher Straßenbahnlinien

3.2 Wirtschaftliche Potenziale

Zur Abschätzung der wirtschaftlichen Potenziale werden die aus der Veränderung der Fahrzeiten und der Energieverbräuche zu erwartenden Nutzen den Investitionskosten gegenübergestellt. Dabei werden szenariospezifische Investitionspakete ermittelt (Infrastruktur, Fahrzeuge und Leitstelle), welche die jeweiligen Vorteile voraussichtlich generieren können. Die Investitionskosten werden unter der Annahme abgeschätzt, dass die erforderlichen Komponenten als Stand der Technik verfügbar sind; sie enthalten keine Forschungs- und Entwicklungskosten.

Die berücksichtigten Nutzenvariablen sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Sie werden mit Hilfe von Kennwerten aus der Standardisierten Bewertung [13] (welche als Grundlage für den Nachweis der Gesamtwirtschaftlichkeit für eine anteilige Förderung im Rahmen des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG) dient) sowie der Bundesverkehrswegeplanung [14] quantifiziert und monetarisiert. Die Bewertungen erfolgen sowohl aus volkswirtschaftlicher Sicht als auch aus der betriebswirtschaftlichen Sicht des Straßenbahnbetreibers.

TABELLE 3-2: 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

Die Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Analyse sind in Abbildung 3-3 zusammengefasst. Die Abbildung zeigt, dass in allen Szenarien der volkswirtschaftliche Nutzen deutlich über den Kosten liegt. Die wichtigste Nutzenkomponente ist in allen Szenarien die Fahrzeiteinsparung der Passagiere. An zweiter Stelle folgen zusätzliche Fahrscheinerlöse des Straßenbahnbetreibers. An dritter Stelle stehen verringerte Pkw-Betriebskosten aufgrund von Änderungen bei der Verkehrsmittelwahl.

Im Vergleich zu vielen anderen Investitionen im öffentlichen Verkehr erstaunt das hohe volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Verhältnis dieser Szenarien. Der Grund ist darin zu sehen, dass Technologieinvestitionen grundsätzlich deutlich weniger kosten als bauintensive Infrastrukturinvestitionen.

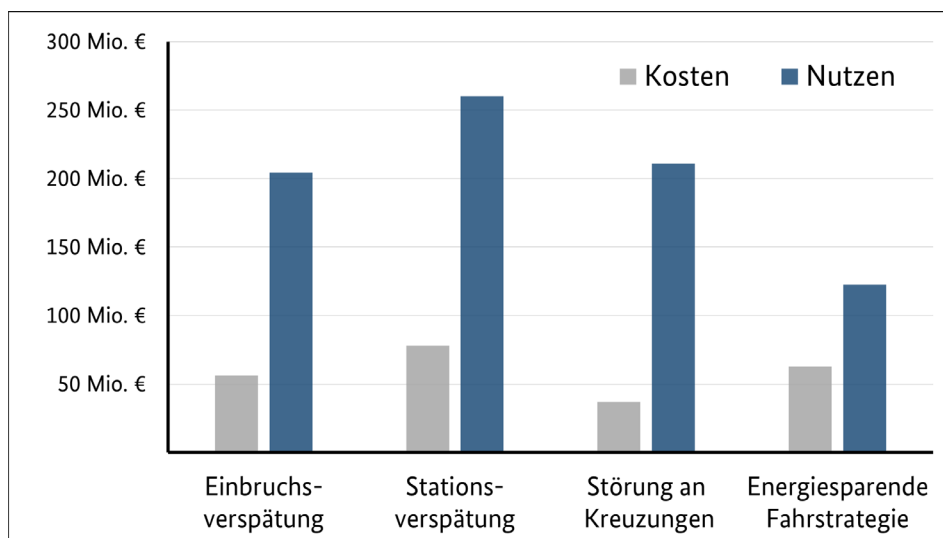


Abbildung 3-3: Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Potenzialabschätzung

Abbildung 3-4 zeigt die Resultate aus betriebswirtschaftlicher Sicht. Positive Ergebnisse können für die Szenarien *Einbruchsverspätung* und *Störung an Kreuzungen* ermittelt werden, wohingegen in den Szenarien *Stationsverspätung* und *Energiesparende Fahrstrategie* die Investitionskosten höher als der betriebliche Nutzen sind. In allen Szenarien stellen die Einnahmen durch zusätzliche Fahrscheinerlöse die wichtigste Nutzenkomponente des Straßenbahnbetreibers dar, gefolgt von eingesparten Arbeitskosten für Straßenbahnfahrpersonal und eingesparten Energiekosten.

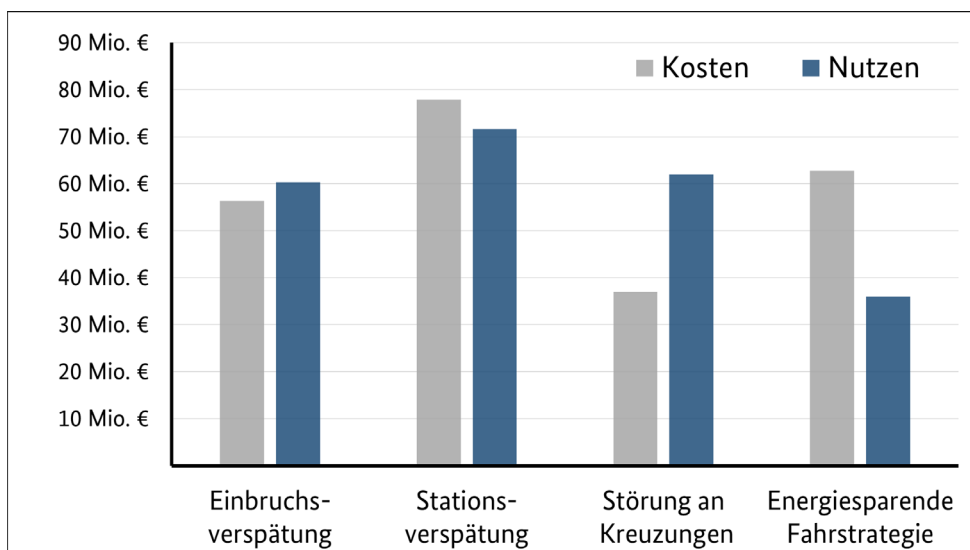


Abbildung 3-4: Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Potenzialabschätzung

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass Vernetzung und Automatisierung für Straßenbahnen durchaus wirtschaftliches Potenzial haben können. 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. Die Szenarien *Stationsverspätung* und *Energiesparende Fahrstrategie* sind im simulierten Beispielfall betriebswirtschaftlich nicht rentabel, so dass eine Förderung notwendig werden kann, um die volkswirtschaftlichen Vorteile der neuen Technologien zu heben.

Die hier vorgestellten Ergebnisse werden durch Sensitivitätsrechnungen weiter analysiert. Es zeigt sich, dass in allen Szenarien die positiven volkswirtschaftlichen Bewertungen gegenüber allen betrachteten Parameteränderungen robust sind. Hingegen ist die ohnehin knappere betriebswirtschaftliche Bewertung auch empfindlicher gegenüber Parametervariationen. Nur im Szenario *Störung an Kreuzungen* bleibt das Ergebnis robust positiv, solange sich die Fahrzeiteinsparung nicht um mehr als 50% verringert. Im Szenario *Energiesparende Fahrstrategie* ist die Wirtschaftlichkeit aus betriebswirtschaftlicher Sicht unter allen Modifikationen nicht gegeben.

Eine grobe Extrapolation der für die Stadt Karlsruhe ermittelten wirtschaftlichen Effekte auf alle deutschen Städte mit Straßenbahnbetrieb zeigt das bundesweit hohe volkswirtschaftliche Nutzenpotenzial von Vernetzung und Automatisierung: Während die extrapolierten Nutzen für alle Städte mit Straßenbahnbetrieb auf (je nach Szenario) zwischen rund 6,0 und 12,8 Mrd. € geschätzt werden, liegen die extrapolierten Kosten zwischen 2,3 und 4,3 Mrd. €.

Vertiefende Analysen zu Wirkungen und Wirtschaftlichkeit in verschiedenen Städten und Situationen sind empfehlenswert, um anwendungsfallspezifisch die Wirkungen der neuen Technologien genauer abzubilden.

4 Vernetzung der Straßenbahn

Konzepte und Entwicklungen für die Vernetzung des gesamten Verkehrssektors entwickeln sich sehr dynamisch und werden in naher Zukunft Realität. Sie werden unter den Begriffen V2X-Kommunikation² oder C-ITS³ gefasst. Grundlegende Entwicklungen werden vom oder für den Pkw-Sektor vorgenommen. Es ist jedoch wichtig, dass auch der öffentliche Verkehr frühzeitig daran teilnimmt. Für die Vernetzung im Straßenbahnsektor sind drei Kernsysteme von Relevanz:

- Kommunikationssysteme: Vernetzung bedeutet Kommunikation mit anderen. Daher werden technische Systeme benötigt, welche für diese Kommunikation genutzt werden können;
- Lichtsignalanlagen (LSA): mit Hilfe entsprechend aufgerüsteter LSA kann eine intelligente Verkehrssteuerung realisiert und eine Verbesserung des Verkehrsflusses erzielt werden;
- Digitale Karten.

Diese Systeme müssen bestimmte Anforderungen und Standards erfüllen, weshalb die nachfolgenden Kapitel im Detail auf die technische Ausgestaltung und Umsetzung und die Herausforderungen und Lösungswege für diese Systeme eingehen.

4.1 Kommunikationssysteme

Ohne ein leistungsfähiges Kommunikationssystem zwischen Fahrzeugen, Infrastrukturen und Zentralen ist eine Vernetzung und Automatisierung nicht möglich. Diese Voraussetzung ist aber noch längst nicht überall erfüllt. Der vielfach noch vorherrschende Analogfunk (wie bei Bake-Funk-Systemen) wird den Anforderungen auf Dauer nicht gerecht. Zudem sollen die von ihm genutzten Frequenzen bald moderneren Technologien zur Verfügung gestellt werden, so dass ein Ersatz notwendig wird.

Es ist jedoch noch nicht klar, welche Funktechnologie in Zukunft genutzt wird und welche Standards bei den modernen Kommunikationssystemen gelten sollen. Standardisierung ist notwendig um bundesweit einheitliche Grundlagen für die Anwendungssysteme der Vernetzung zu schaffen und Insellösungen zu vermeiden. Hier besteht Handlungsbedarf.

Abbildung 4-1 illustriert die wichtigsten Einheiten, die miteinander kommunizieren sollen:⁴

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

² V2X bedeutet „Vehicle to Everything“, Deutsch: „Fahrzeug zu Allem“, wobei X für beliebige Kommunikationspartner stehen kann. Entsprechend umfasst die V2X-Kommunikation die Kommunikation des Fahrzeugs mit der Infrastruktur, anderen Fahrzeugen, anderen Verkehrsteilnehmern und der Leitstelle.

³ Kurz für „Cooperative Intelligent Transport Systems“, also vernetzte, intelligente Verkehrssysteme.

⁴ Die Kommunikation der Menschen miteinander (z. B. Fahrzeugführer mit Betriebszentrale) ist hier mitgedacht, gehört aber nicht in den Untersuchungsraum.

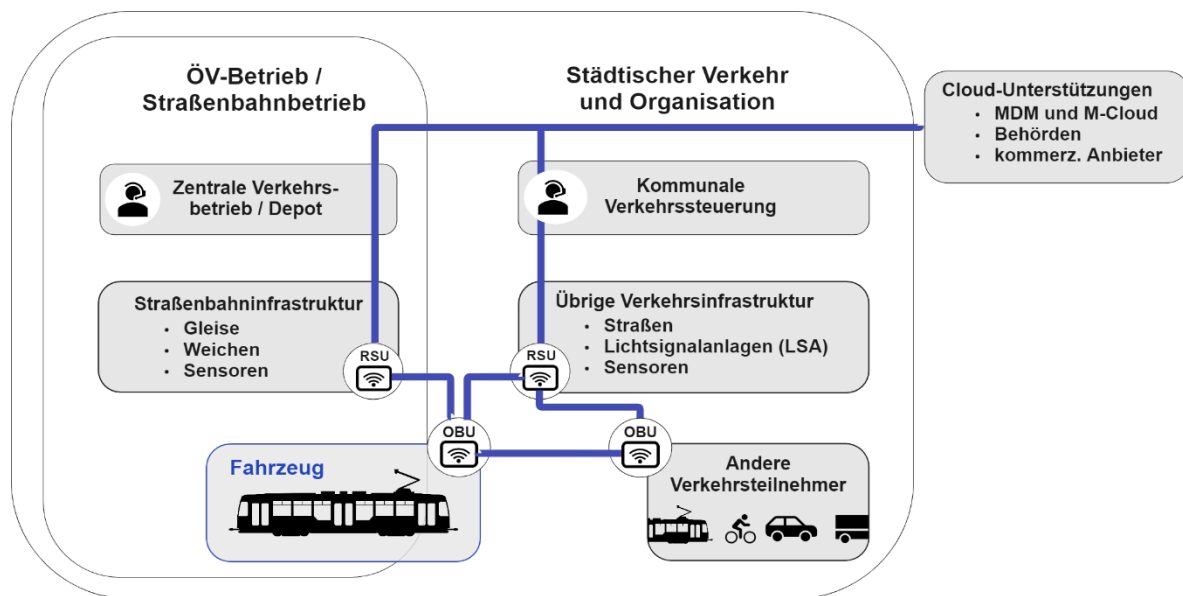


Abbildung 4-1: Kommunikationssystem mit relevanten Akteuren - Systemillustration

Die wichtigsten Bestandteile des Kommunikationssystems sind:

- **Kommunikationsinfrastruktur:** Abbildung 4-1 nennt die Geräte der Funkkommunikation: Onboard Units (OBU) in den Fahrzeugen und Roadside Units (RSU) an der Straßenbahninfrastruktur und der allgemeinen Verkehrsinfrastruktur⁵. Die Informationsübertragung zwischen festen Objekten (an der Straßenbahn- oder Verkehrsinfrastruktur und in den Zentralen) wird überwiegend per Glasfaser geschehen, denn dies ist schnell, sicher und spart knappe Funkfrequenzen.
- **Funktechnologie:** Diese umfasst den Funkstandard und die Frequenzbänder. Moderne Funktechnologien basieren auf WLAN oder Mobilfunk.
- **Datenaustauschformate:** Dies ist die „Sprache“, in der die Geräte der Funkkommunikation miteinander kommunizieren.

Die zentralen Herausforderungen und möglichen Lösungswege im Bereich der Kommunikationssysteme werden in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 dargestellt.

⁵ An dieser Stelle muss zwischen drei verschiedenen Infrastrukturen unterschieden werden: der Straßenbahn- und der allgemeinen Verkehrsinfrastruktur einerseits und der Kommunikationsinfrastruktur andererseits.

Herausforderungen

- Die technischen Schnittstellen zwischen Fahrzeugen, Verkehrsteilnehmern, Infrastruktur und Leitstellen sind zugleich wirtschaftliche Schnittstellen
 - Standardisierung ist notwendig, um Marktentwicklung zu ermöglichen
- Standardisierung benötigt Entscheidung zum Funkstandard
- Ausbau des Glasfasernetzes ist erforderlich
- Kosten für den Ausbau des Kommunikationssystems sind Hemmnis für die Umsetzung in Kommunen

Abbildung 4-2: Herausforderungen für den Einsatz von Kommunikationssystemen

Lösungswege

- Einrichtung entsprechender Arbeitsgruppen bei Branchenverbänden, bspw. VDV, in enger Abstimmung mit dem Bund und internationalen Normungsorganisationen
- Aufbau von Förderprogrammen zur Modernisierung der Kommunikationssysteme durch den Bund
- Ableitung einer Empfehlung zur Funktechnologie und damit verbunden einheitlicher Datenaustauschformate
- Empfehlung zu Mindeststandards der Funkgeräte (OBU und RSU) für die Hersteller
- Etablierung von Strukturen zur Integration der Vernetzung in die Authentifizierungs- und Zertifizierungssysteme hinsichtlich der Kommunikationssicherheit
- Festlegung der Datenmengen, welche von infrastrukturseitigen Sensoren an Fahrzeuge übermittelt werden, um Systemüberlastungen zu vermeiden; dies erfordert eine entsprechende Vorverarbeitung der Daten beim Sensor

Abbildung 4-3: Mögliche Lösungswege für den Einsatz von Kommunikationssystemen

Exkurs: Funktechnologien

Für ein modernes System der Fahrzeugkommunikation (V2X) bieten sich verschiedene Funktechnologien an. Die Funkeigenschaften einzelner Technologien definieren allerdings die möglichen Anwendungsbereiche im vernetzten Fahren, sodass je nach Anwendungsfall eine der folgenden Technologien oder beide gemeinsam zum Einsatz kommen.

- Indirekte Kommunikation erfolgt über Mobilfunk unter Nutzung einer Mobilfunkzelle als Zwischenstation. Sie ist daher langsamer als die Direktkommunikation, hat aber eine hohe Reichweite. Sie ist für viele Kommunikationszwecke zwischen Fahrzeugen und Zentrale oder Cloud ausreichend. Es wird 4G- oder 5G-Mobilfunk mit deren Mobilfunkfrequenzen genutzt.
- Direktkommunikation erfolgt unmittelbar zwischen den Funkgeräten in den Fahrzeugen oder an der Strecke (die OBUs und RSUs). Sie ist daher sehr schnell, hat jedoch nur eine geringe Reichweite (einige 100 Meter). Für sehr zeitkritische Anwendungen (automatisiertes Fahren, Teleoperation, fortgeschrittene Fahrerassistenz- und Vernetzungssysteme) benötigt man die Direktkommunikation (zusätzlich zur indirekten). Sie nutzt besondere ITS-Frequenzbänder im 5,9 GHz Band und erfolgt
 - entweder über WLAN (Standard IEEE 802.11p oder IEEE 802.11bd)
 - oder über die sogenannte Sidelink-Schnittstelle des Mobilfunks (4G oder 5G), die auch unabhängig von einer Abdeckung durch das Mobilfunknetz eine direkte Kommunikation zwischen Geräten ermöglicht.

Viele Verkehrsbetriebe nutzen außerdem eigene, interne Kommunikationsnetze, die von den übrigen V2X-Netzen separiert sind. Bei der Nutzung von V2X-Frequenzbändern kann der öffentliche Verkehr priorisiert werden (z. B. durch reservierte Kanäle).

Interoperabilität: Nur die WLAN-basierten Standards sind ohne weiteres miteinander interoperabel und können daher ohne Probleme im gleichen Funkkanal koexistieren. Für alle anderen Kombinationen der Direktkommunikation sind Methoden erforderlich, um die Kommunikation zwischen diesen Geräten überhaupt zu ermöglichen. Diese Methoden ziehen allerdings Nachteile wie erhöhter Aufwand, Komplexität, Latenzsteigerung oder eine Effizienzreduktion in der Spektrumsnutzung nach sich. Daher wäre eine Vereinheitlichung wünschenswert.

Auch im Pkw-Sektor hat man sich noch nicht auf eine zukünftig vorherrschende Funktechnologie der allgemeinen V2X-Kommunikation geeinigt. Bei der konkreten Auswahl der Funktechnologie auf kommunaler Ebene sollten sich die jeweiligen Kommunalverwaltungen und Verkehrsunternehmen eng abstimmen.

Die Gefahr, in Hinblick auf weitere Entwicklungen bei V2X eine falsche Entscheidung zu treffen, ist gegeben, sollte aber nicht zu hoch eingeschätzt werden. So gibt es die erwähnten Überbrückungsmethoden: In den kommenden Jahren kommen Funkelemente (OBU und RSU) auf den Markt, die in verschiedenen Standards kommunizieren und dabei auch Daten von einem Standard in den anderen übersetzen können. Viele Verkehrsbetriebe nutzen ohnehin vorzugsweise eigene, interne Kommunikationsnetze, die von den übrigen V2X-Netzen separiert sind.

Entscheidend ist, dass die Datenaustauschformate weiterhin technologieunabhängig definiert werden und dass auch die Anwendungssysteme der Vernetzung (siehe Abschnitt 4.4) so gestaltet werden, dass sie grundsätzlich mit allen modernen Kommunikationssystemen arbeiten können. Sollte es dennoch bei der Modernisierung zu Verzögerungen kommen, könnte der Bund versuchen, die durch gezielte Förderprogramme zu beschleunigen.

Abbildung 4-4: Exkurs: Funktechnologien

4.2 Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen

Lichtsignalanlagen (LSA) sind das Hauptinstrument für die dynamische Steuerung des städtischen Verkehrs. Wenn es gelingt, die LSA selbst intelligent und mit Bezug auf das aktuelle Verkehrsgeschehen zu steuern, dann kann der gesamte Verkehrsfluss verbessert und dabei der ÖPNV gezielt priorisiert werden. Die Straßenbahnen können davon in vielerlei Hinsicht profitieren (siehe auch Kapitel 3):

- Höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten und Effizienzgewinne der Straßenbahnen,
- Komfortgewinne und Energieeinsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise,
- Möglichkeiten für Taktverdichtungen.

Die zukünftige intelligente Verkehrssteuerung ermöglicht im Kontext einer allgemeinen V2X-Vernetzung des gesamten Verkehrs einen hohen Nutzen für alle Verkehrsteilnehmer. Für eine hochwertige vernetzte Verkehrssteuerung sollte sukzessive in Betracht gezogen werden, die für die Verkehrssteuerung an Kreuzungen maßgeblichen LSA mit einer hochwertigen V2X-Vernetzung in der aktuell modernsten Technik-Generation auszurüsten, sobald sich hierfür allgemeine Standards etabliert haben. Damit werden intelligente Steuerungen möglich, über die vom Fahrzeug zur LSA und auch in Gegenrichtung komplexe Informationen sicher austauschbar sind. Basis der Verkehrssteuerung werden künftig nicht nur LSA sein, sondern auch andere Informations- und Leitsysteme, wie intelligente Fahrzeugsteuerung oder flottenbezogene gesamtstädtische Verkehrssteuerungen, die gegenseitig in ihrer Steuerungsqualität vom Datenaustausch profitieren können.

V2X-Vernetzung sollte sich auch mit Straßenbahnsignalen auf besonderem und unabhängigem Bahnkörper kombinieren lassen. Perspektivisch –eine rechtliche Zulässigkeit vorausgesetzt– ist bei einer sicheren Kommunikationsarchitektur und einer Vollausrüstung der betreffenden ÖPNV-Flotte auch ein Verzicht auf ÖPNV-Lichtzeichengeber möglich, wenn Informationen zu Signalbildern digital an die Fahrzeuge übertragen werden und im Fahrzeug angezeigt oder automatisiert für die Fahrsteuerung verarbeitet werden.

Die zentralen Herausforderungen und mögliche Lösungswege im Bereich der Intelligenten Verkehrssteuerung werden in Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 dargestellt.

Exkurs: Abstimmung auf der kommunalen Ebene

Die Kommunalverwaltung (insbesondere die Verkehrs- und Bauverwaltungen) ist der zentrale Akteur für die lokale Umsetzung einer vernetzten LSA-Steuerung und für die Investitionen. Ihr Zusammenspiel mit den Verkehrsunternehmen ist sinnvoll zu gestalten. Als Einstieg kommt ggfs. eine linienbezogene Ausrüstung von ÖPNV-Fahrzeugen mit On-Board-Units (OBU) und eine sukzessive Ausrüstung der betreffenden Infrastruktur mit Roadside Units RSU in Betracht.

Als erste Zwischenstufe wird die Fahrzeug-LSA-Kommunikation zunächst nur im Nahbereich zwischen den einzelnen LSA und den gerade in der Nähe befindlichen Fahrzeugen umgesetzt. Straßenbahnen und Busse melden sich bei der LSA an und sollten auch ihre gewünschte Fahrtrichtung übermitteln. Dafür muss der tagesaktuelle Fahrplan im Bordcomputer des Fahrzeugs gespeichert werden.

In Zukunft erfolgt die Verkehrssteuerung aus einer LSA-Zentrale, die von der Kommunalverwaltung beaufsichtigt wird. Dann wird der tagesaktuelle Fahrplan direkt von der Zentrale des Verkehrsbetriebs an die LSA-Zentrale übermittelt, und die einzelnen Fahrzeuge melden kontinuierlich ihre aktuelle Position und somit auch ihre Abweichung vom Fahrplan an beide Zentralen. Die automatisierte bzw vernetzte Steuerungskompetenz in der kommunalen LSA-Zentrale erlaubt auch eine intelligentere Priorisierung in komplexen Situationen, etwa wenn mehrere Busse und Bahnen konkurrierend an einer Kreuzung ein Signal anfordern oder ÖPNV-Fahrzeuge auf Fahrbahnen vom übrigen wartenden Kfz-Verkehr blockiert werden.

Es könnte hilfreich sein, wenn ein Branchenverband (z. B. der Verband deutscher Verkehrsunternehmen, VDV) oder eine Organisation (z. B. die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV) Vorschläge und Leitlinien zur Gestaltung der innerkommunalen Kompetenzverteilung entwickelt.

Abbildung 4-5: Exkurs: Abstimmung auf der kommunalen Ebene

Herausforderungen

- **Hohe Investitionskosten**
 - Modernes Kommunikationssystem als Voraussetzung
 - Ausrüstung jeder LSA mit einer Steuerungs- und einer Funkeinheit (RSU)
 - Sensoren zur Messung der Verkehrsaktivität und Glasfaseranschluss für die Verbindung zur LSA-Steuerungszentrale erforderlich
 - Für komplexe Umgebungen und Systeme werden digitale Karten benötigt.
- **Mangelnde Technologiereife**
 - Verlässliche Algorithmen zur Prognose der Verkehrsströme und Fahrzeiten sowie zur Steuerung des Systems (LSA und Fahrempfehlungen) müssen entwickelt werden [15].

Abbildung 4-6: Herausforderungen für den Einsatz von intelligenter Verkehrssteuerung

Lösungswege

- **Sukzessive Herangehensweise**
 - Teiloptimierungen an neuralgischen Verkehrsknotenpunkten und deren wichtigsten Zuführungen → begrenzte Anforderungen an Algorithmen und digitale Karten
 - Aufrüstung der LSA im Rahmen anstehender Erneuerungen
- **Ausarbeitung von Standards** durch Branchenverbände, um Marktentwicklung zu ermöglichen
 - Einheitliche Schnittstellen zwischen der Steuerungs- und der Funkeinheit an den LSA
 - Durchgängige Verwendung offener Schnittstellen für Systeme der Straßenverkehrstechnik (OCIT-Standard) zur Kommunikation von LSA mit der zentralen Ebene
- **Fördermaßnahmen des Bundes**
 - Forschungsprojekte zur Prognosegenauigkeit und Lösungsalgorithmen für LSA-Schaltung und Fahrempfehlungen an die Verkehrsteilnehmer
 - Modellprojekte in ausgewählten Kommunen zur intelligenten LSA-Steuerung: Dabei ist auf den parallelen Ausbau eines modernen Kommunikationssystems und auf die Einhaltung der empfohlenen Standards zu achten.

Abbildung 4-7: Mögliche Lösungswege für den Einsatz von intelligenter Verkehrssteuerung

4.3 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 im Straßenbahnbereich noch keine digitalen Karten, oder allenfalls in rudimentärer, nicht standardisierter Form. Digitale Karten können verschiedene Detaillierungsgrade aufweisen und sehr unterschiedliche Objekte abbilden, zum Beispiel:

- 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 einer Genauigkeit im Zentimeterbereich: Dies wird im Kontext des automatisierten Fahrens benötigt, um die Interpretation von Sensordaten zu erleichtern.
- Hochdynamische Daten: von aktuellen Wetterbedingungen über Staus bis hin zu beweglichen Einzelobjekten.

Wirklich notwendig sind die statischen Basisinformationen, während die hochdynamischen Daten als zukünftige Erweiterungen zu begreifen sind. Abbildung 4-8 illustriert die zentrale Bedeutung der digitalen Karte für die Vernetzung.

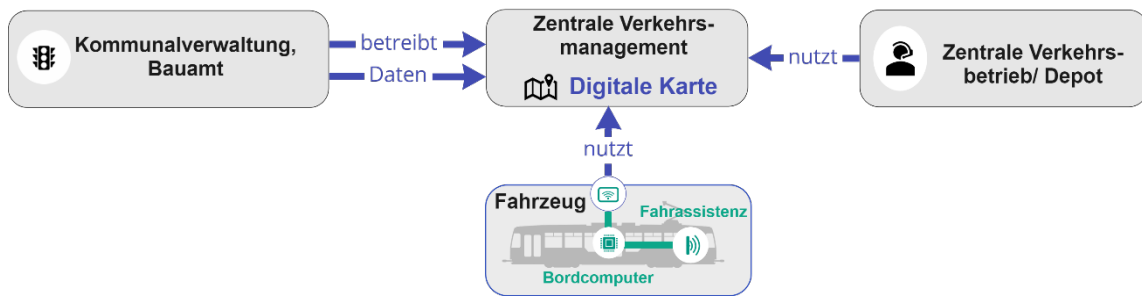


Abbildung 4-8: Digitale Karten – Systemillustration

Die Technologie zur Erstellung digitaler Karten ist vorhanden. Lediglich Konzept- und Produktentwicklung sind noch zu leisten.

Von großer Bedeutung ist jedoch die **Vereinheitlichung und Standardisierung digitaler Karten**, damit andere Anwendungssysteme der Vernetzung, die diese Karten nutzen wollen (z. B. Fahrerassistenz-, Flottenmanagement- oder Fahrzeugsteuerungssysteme; siehe Abschnitt 4.4), in jeder Stadt anschlussfähig sind. Die digitale Karte ist so etwas wie das „örtliche Betriebssystem“ für digitale Verkehrsanwendungen. 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 jeder Stadt zusammenarbeiten können sollen.

Die zentralen Herausforderungen und mögliche Lösungswege im Bereich der Digitalen Karten werden in Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 dargestellt.



Abbildung 4-9: Herausforderungen für den Einsatz Digitaler Karten

Lösungswege

- Da die Entwicklung und Nutzung digitaler Karten noch in den Anfängen stecken, kann eine vollständige Standardisierung heute noch nicht erfolgen. Sie sollte aber schon fest in den Blick genommen werden.
- Es ist naheliegend, dass die gleichen Normungsgremien, die für die Etablierung möglichst einheitlicher Kommunikationsstandards zuständig sind, aufgrund der großen Überschneidungen auch die Standardisierung digitaler Karten übernehmen.
- Die Standards für die Basis-Schichten sollten wenige Anforderungen an die Komplexität stellen, sondern eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Karten erlauben.
- Da Straßenbahnen nur auf wenigen, gleichbleibenden Strecken fahren, benötigen sie nur recht einfache digitale Karten. Daher hat hier der Straßenbahnsektor die Möglichkeit, die Entwicklung mitzugestalten.
- Der Aufwand für die erstmalige Erstellung einer verlässlichen digitalen Karte mit den für das Straßenbahnsystem erforderlichen Grunddaten wird überschaubar sein. Sodann sind Prozesse und Technologien nötig, um die digitalen Karten aktuell und verlässlich zu halten.
- Anpassungen des Rechtsrahmens: Die Kommunalverwaltungen und Verkehrsbetriebe sind zu verpflichten, relevante Daten zur Verfügung zu stellen. Die Datensicherheit ist zu gewährleisten.

Abbildung 4-10: Mögliche Lösungswege für den Einsatz Digitaler Karten

4.4 Anwendungssysteme der Vernetzung

Auf der Grundlage moderner, leistungsfähiger Kommunikationssysteme, digitaler Karten, Sensorik und der Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastrukturelementen sind moderne Anwendungssysteme möglich. Im Folgenden werden Beispiele für die Anwendung der Vernetzung aufgeführt:

- Fahrgastinformationssysteme können so weiterentwickelt werden, dass Fahrgäste im Internet und an den Haltepunkten 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. Kapitel 3). Erfahrungswerte über den Auslastungsgrad können veröffentlicht werden, so dass die Fahrgäste generell ihre Fahrgewohnheiten optimal anpassen können.
- Die Leistungsfähigkeit der Fahrerassistenzsysteme kann in Zukunft stark durch Vernetzung erhöht werden (siehe dazu Abschnitt 5.1).
- Mit Sensorik können wertvolle Zustands- und Wartungsdaten über Fahrzeug und Infrastruktur generiert und in entsprechenden Softwaresystemen genutzt werden.
- Die Sicherheit der Passagiere vor Angriffen und Belästigungen oder bei gesundheitlichen Notfällen kann in Fahrzeugen und an Haltepunkten mit sensorgestützten Systemen, welche Eingriffe von außen initiieren, erhöht werden.

Entwicklungsperspektive

- Bei diesen Anwendungssystemen handelt es sich um Produktentwicklungen, die aktuell technologisch möglich sind.
- Abgesehen von den Kosten 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 in Form von modernen Kommunikationssystemen, digitalen Karten und Vernetzung zu schaffen.
- Lediglich eine gewisse F&E-Förderung für die Entwicklung komplexer Anwendungssysteme könnte ins Auge gefasst werden (zum Beispiel im Rahmen des mFund-Programms des BMDV), da sich die Skalenerträge einer breiten Nutzung erst langsam realisieren werden.

Abbildung 4-11: Entwicklungsperspektiven für Anwendungssysteme der Vernetzung

4.5 Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren

Zusammenfassend illustriert Abbildung 4-12 Modernisierungspfade, bei denen der Fahrzeugführer durch technische Systeme unterstützt und entlastet, jedoch bis auf weiteres noch nicht ersetzt werden soll, sondern seine herkömmlichen Funktionen weiterhin ausführt. Die Symbole für die Akteure wurden in Abbildung 1-2 eingeführt.

Auf der rechten Seite der Abbildung werden Fahrerassistenzsysteme (FAS) gezeigt, die in Abschnitt 5.1 angesprochen werden:

- FAS, die ohne Vernetzung auskommen und bereits existieren, können von den Verkehrsunternehmen ohne weitere Abstimmung mit anderen Akteuren eingeführt werden. Ihren Nutzen stiften sie vor allem bei der Vermeidung von Unfällen. Mit ihnen findet die Sensorik Eingang in das Fahrzeug.
- FAS zur Fahrprofilvorgabe werden hingegen von einer modernen, leistungsfähigen Vernetzung mit digitalen Karten sehr stark profitieren.

Der linke Teil der Abbildung zeigt die Vernetzungstechnologien:

- Grundlage ist ein modernes Kommunikationssystem, dessen Bestandteile im linken oberen Bereich der Abbildung angedeutet werden. Es beruht entweder auf einem WLAN- oder auf einem 4G/5G-Mobilfunkstandard (Sidelink). Fahrzeuge und Verkehrsinfrastrukturen müssen mit der notwendigen Kommunikationsinfrastruktur ausgestattet werden. Die Elemente eines modernen Kommunikationssystems sind am Markt erhältlich, doch ist eine Umstellung teuer. Es wird einige Zeit dauern, bis die meisten Kommunen diese Umstellung vollzogen haben. Einen zusätzlichen Anreiz für die Einführung stellt der zukünftige Nutzen auch für andere Verkehrsteilnehmer dar, der durch die Einführung von C-ITS geschaffen wird.

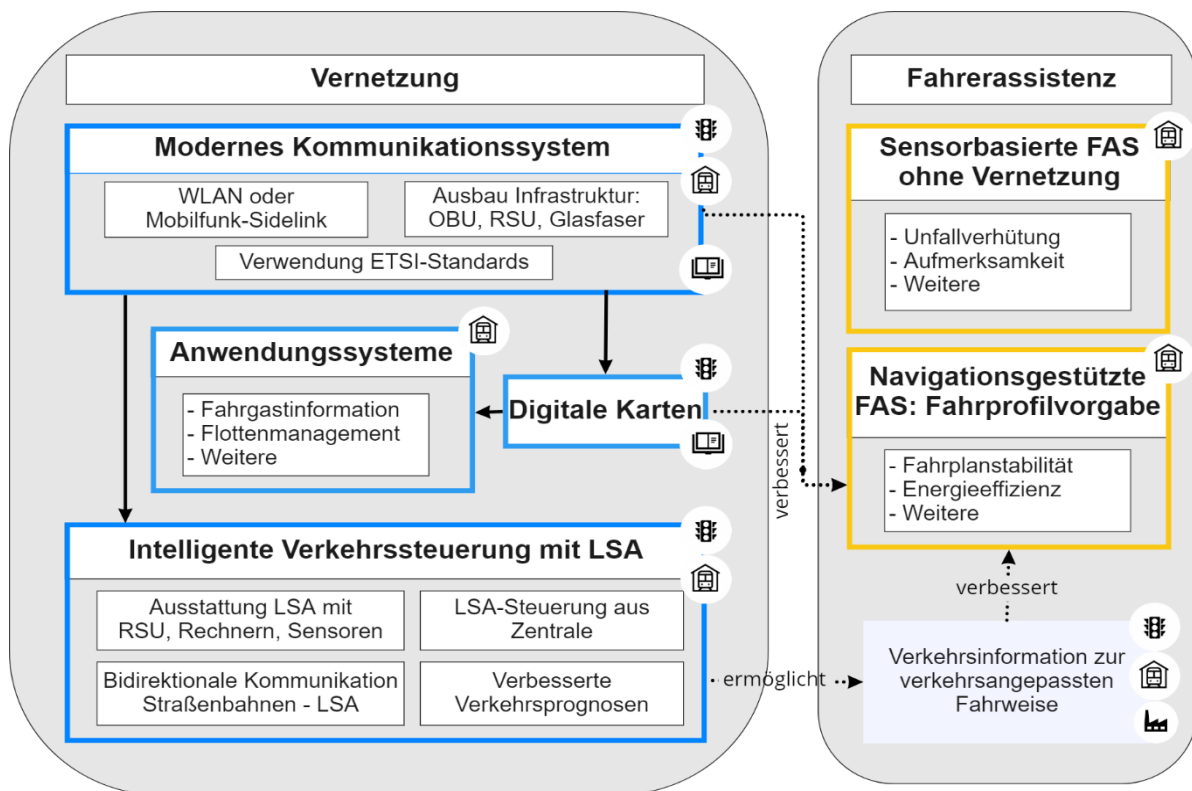


Abbildung 4-12: Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren

- In digitalen Karten (in der Abbildung mittig) sind alle Infrastrukturelemente und das unmittelbare statische Umfeld der Strecken (einbiegende Straßen usw.) verzeichnet. Eine solche Basisversion der digitalen Karte, deren Kosten möglichst niedrig sein werden, kann je nach Bedarf durch weitere Objektschichten ergänzt werden. Die Erstellung der digitalen Karte wird von der jeweiligen Kommunalverwaltung im Einklang mit dem Verkehrsunternehmen organisiert oder angestoßen. Die Umsetzung und Pflege sollte durch eine neutrale Stelle vorgenommen werden.
- Auf der Grundlage des modernen Kommunikationssystems und der digitalen Karten sind viele Anwendungen wie digitale Fahrgastinformations- und Flottenmanagementsysteme in Echtzeit möglich, die von den Verkehrsunternehmen eingeführt werden können.
- Intelligente Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen (LSA) wird im unteren, linken Teil der Abbildung gezeigt. Sie wird von der Kommunalverwaltung finanziert und betrieben, um - im Idealfall - mit einer Priorisierung des ÖPNV und insbesondere der Straßenbahnen den gesamten städtischen Verkehr effizient zu steuern. Die Verkehrssteuerung beruht auf einer guten V2X-Vernetzung und wird mit Hilfe eines teilautomatisierten Systems aus einer Steuerungszentrale der Kommunalverwaltung heraus durchgeführt.

Die stärker umrandeten Kästen in Abbildung 4-12 stellen zukünftig eigenständige, durch wirtschaftliche Schnittstellen identifizierte Subsysteme der Vernetzung dar, welche jeweils von verschiedenen Firmen angeboten werden können.⁶ Der mit diesen Herausforderungen verbundene Handlungsbedarf insbesondere in Hinblick auf notwendige Standardisierungen wurde in den vorigen Abschnitten beschrieben und wird in Abschnitt 6.4 zusammengefasst.

⁶ Mit Ausnahme der beiden Kästen zur Fahrerassistenz auf der rechten Seite, die oft eng verbunden sein werden.

5 Automatisierung der Straßenbahn

Die 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. Da das automatisierte Fahren immer auch vernetztes Fahren ist, verbinden sich mit ihm zudem die vielen Vorteile des vernetzten Fahrens, die in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben wurden.

Aktuell bestehen jedoch noch einige Grenzen und Herausforderungen bei der Automatisierung von Straßenbahnen. Hierbei sind neben Kosten und Akzeptanz der Systeme vor allem Herausforderungen im Bereich Technik und Infrastruktur auf der einen Seite und den Rahmenbedingungen auf der anderen Seite zu nennen. Konkrete Beispiele werden in Abbildung 5-1 anschaulich dargestellt.



Abbildung 5-1: Grenzen und Herausforderungen

Im Folgenden werden zunächst die Fahrerassistenzsysteme und die Teleoperation als Vorstufen und auch Rückfallebenen des automatisierten Fahrens beschrieben. Abschnitt 5.3 stellt die grundlegenden technischen Elemente, Optionen und Eigenschaften des automatisierten Fahrens dar. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen und Chancen für die Entwicklung einer zukunftsfähigen Branchenstruktur, die Technologieentwicklung und die notwendigen Rahmenbedingungen werden in Abschnitt 5.4 dargestellt. Sie münden in Abschnitt 5.5 in eine Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren.

5.1 Fahrerassistenz als Vorstufe

Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer unterstützen, jedoch nicht ersetzen, stellen eine wichtige Entwicklungsstufe der Vernetzung und Automatisierung von Straßenbahnsystemen dar, da sie mit begrenzten technologischen Anforderungen bereits sehr nutzbringend sein können.

- Notfall- und „Aufmerksamkeits“-Assistenten senken Unfallkosten signifikant und können auch ein ruhigeres Fahrverhalten (energiesparend und angenehmer für die Fahrgäste) induzieren. Sie werden bereits heute eingesetzt, hängen nicht notwendig von einer Vernetzung ab, können aber in Zukunft davon profitieren.
- Assistenten für navigationsgestützte Fahrprofilvorgabe informieren den Fahrzeugführer über die Verkehrssituation und eine verkehrsangepasste Fahrweise, basierend auf einer Vernetzung einschließlich digitaler Karten. Dies wird in besonderem Maße energiesparend und angenehmer für die Fahrgäste sein und kann auch eine Lärmreduktion für die Anwohner ermöglichen.

Fahrerassistenzsysteme stellen einen Anknüpfungspunkt dar, um die Modernisierung der Straßenbahnen in Richtung Sensorik, Digitalisierung, Vernetzung, digitaler Karten und Automatisierung voranzubringen. Technische Übergangssysteme werden zwischen Assistenz und Automatisierung changieren, indem sie den Fahrer von bestimmten Steuerungsaufgaben entlasten, ihn in einfachen Situationen ablösen und in komplexeren zur Übernahme auffordern, wobei sie ihn aber weiterhin unterstützen.

5.2 Teleoperation als Vorstufe und Rückfallebene

Die Teleoperation von Straßenbahnfahrzeugen bezeichnet die Übernahme der Fahrzeugführung durch einen nicht im Fahrzeug befindlichen Mitarbeitenden (z. B. in der Leitstelle) und ist eng mit der Automatisierung verbunden:

- Teleoperation als Rückfallebene wird langfristig erforderlich sein. Wenn die automatisierte Steuerung ausfällt oder schwer identifizierbare Hindernisse die Weiterfahrt verhindern, müssen die Fahrzeuge per Teleoperation (Fernsteuerung) unterstützt und ggf. manövriert werden.
- Teleoperation als Übergangstechnologie kann schon weit vorher relevant werden.
 - Bei nicht automatisierten Fahrzeugen kann sie eingesetzt werden, um *in einfachen Verkehrssituationen den Fahrer zu ersetzen*, so insbesondere im Depot oder auf Wendeschleifen, und ihm damit zum Beispiel eine Pause zu ermöglichen.
 - Bei automatisierten Fahrzeugen mit begrenzten Fähigkeiten kann Teleoperation eingesetzt werden, um *in komplexen Verkehrssituationen die automatisierte Steuerung zu ersetzen*.

Die zentralen Herausforderungen und mögliche Lösungswege im Bereich der Teleoperation werden in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 dargestellt.

Herausforderungen

- Die technologischen Voraussetzungen für Teleoperation existieren, aber praktisch einsetzbare Systeme einschließlich der Teleoperations-Arbeitsplätze und -Ausbildung gibt es noch nicht.
- Adäquate Sensorik muss im Fahrzeug (und vielleicht in der Umgebung) installiert werden.
- Kommunikationsinfrastruktur muss für die Echtzeitübertragung ausreichend leistungsfähig und verlässlich sein, um Fahrzeuge durch komplexe Verkehrssituationen zu manövrieren.
- Einige Normierungsfragen und insbesondere Zulassungs- und Zertifizierungsfragen sind noch zu klären.

Abbildung 5-2: Herausforderungen bei der Umsetzung von Teleoperation

Lösungswege

- Technologie- und Praxistests sind zunächst für den Einsatz auf den Betriebshöfen zu entwickeln
- Klärung erster Fragen zur Zulassung der Teleoperation
 - Durchführung von Forschungs- und Modellprojekten, in denen Anwender und Industrie in enger Zusammenarbeit mit den Verbänden und den Zulassungsbehörden die Voraussetzungen für „sicheres, teleoperiertes Fahren im Stadtverkehr“ ausarbeiten
 - Formulierung von Leitlinien für die einheitliche Gestaltung der Teleoperation
- Vorreiterrolle der Straßenbahn in der praktischen Umsetzung ist möglich und zu empfehlen, da viele Vorteile gegenüber PKW und Bussen bestehen:
 - Die immer wiederkehrenden und einfachen Fahrbewegungen auf einem begrenzten Netz stellen einen relativ einfachen Anwendungsfall der Teleoperation dar
 - Fahrzeuge bieten ausreichende Stromversorgung und viel Platz zur Anbringung von Sensoren
 - Organisation für die Ausführung der Teleoperation existiert bereits (Verkehrsunternehmen mit Betriebszentrale)

Abbildung 5-3: Mögliche Lösungswege bei der Umsetzung von Teleoperation

5.3 Technik automatisierter Straßenbahnen

Die Optionen und Voraussetzungen der Automatisierung von Straßenbahnen erschließen sich, indem:

- zunächst die vom Fahrzeug zu meisternden Betriebssituationen analysiert,
- sodann die dafür notwendigen technischen Grundfunktionen der Fahrzeugautomatisierung ermittelt und
- schließlich die konkreten Technologien, die diese Funktionen realisieren können, identifiziert

werden.

Abbildung 5-4 liefert eine Übersicht über die wichtigsten Betriebssituationen einer Straßenbahn.

In Hinblick auf diese Betriebssituationen lässt sich ein funktionales Modell von Straßenbahnen ableiten, welches auf dem aus der Robotik bekannten „Sense-Plan-Act Prinzip“ [16] basiert.⁷ Dieses Modell kann um die in Kapitel 4 beschriebene Vernetzungsebene ergänzt werden und ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

⁷ Sense-Plan-Act bedeutet: Eine Situation muss zuerst vom System wahrgenommen werden (Sense), dann muss eine Reaktion geplant werden (Plan) und schließlich die geplante Reaktion in eine Handlung (Act) überführt werden. Ein Beispiel für den konkreten Fall Straßenbahn ist: Die Straßenbahn erkennt mit Hilfe geeigneter Sensoren einen Fußgänger vor sich im Gleisbett (Sense), entscheidet, dass eine Bremsung erforderlich ist und wie diese erfolgen muss (Plan), und leitet die Bremsung ein (Act).

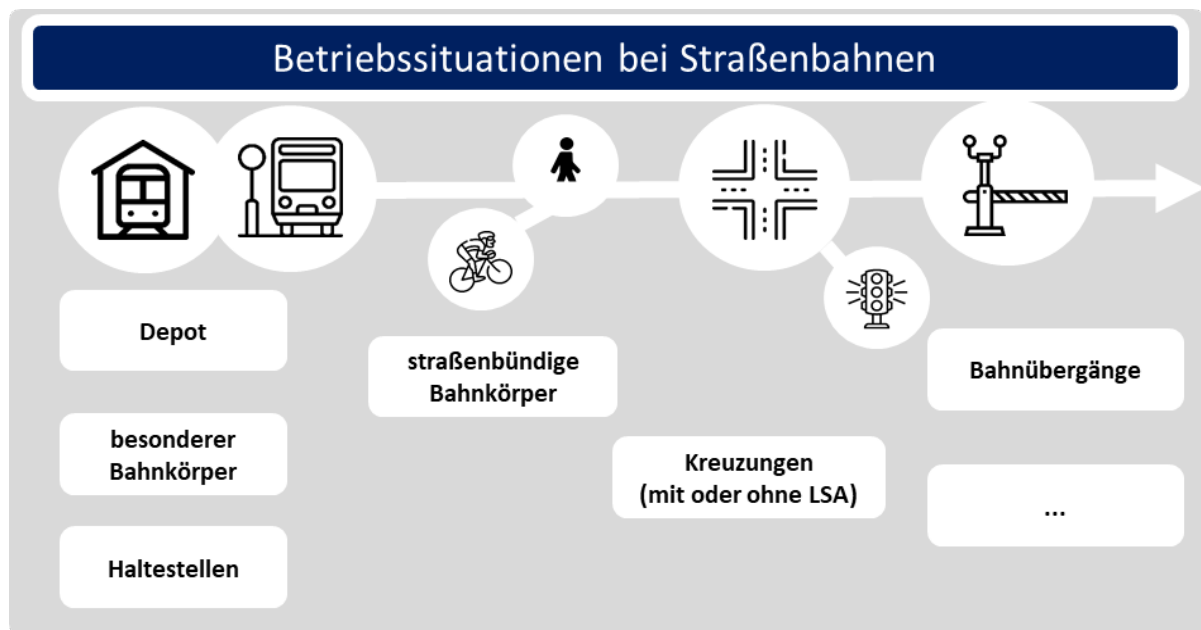


Abbildung 5-4: Betriebssituationen als Herausforderungen der Automatisierung

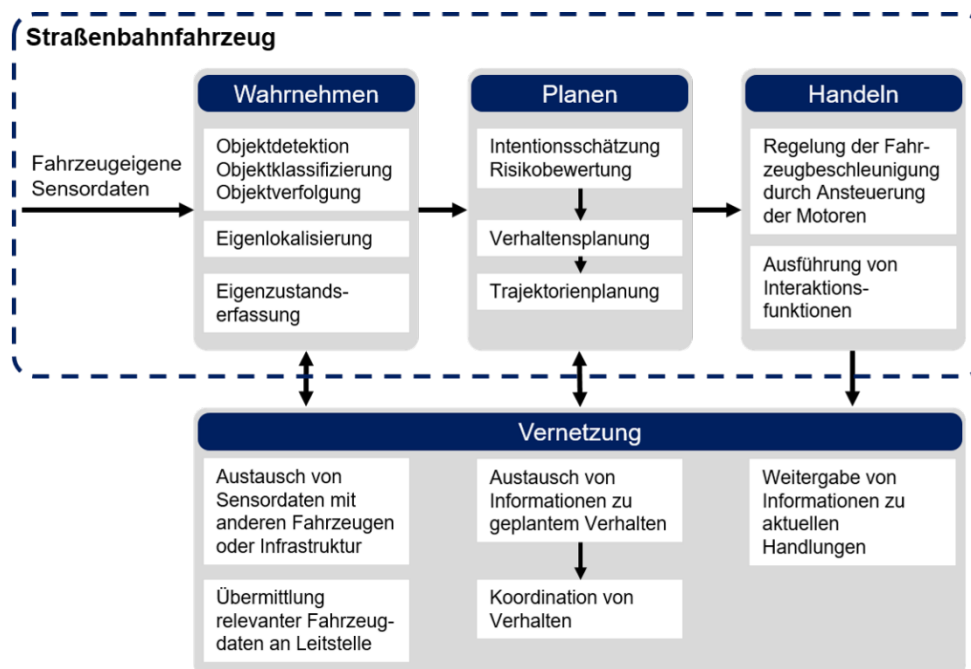


Abbildung 5-5: Grundfunktionen der Fahrzeugautomatisierung

Abbildung 5-6 listet die verschiedenen Querschnittstechnologien, mit denen die Grundfunktionen erfüllt werden können, auf. Rechts stehen die schon aus Kapitel 4 bekannten Querschnittstechnologien des vernetzten Fahrens. Links stehen die relevanten Querschnittstechnologien des automatisierten Fahrens, die im Anschluss beschrieben werden. Für jede Technologiegruppe werden die konkreten Technologien genannt, die von den Entwicklern und Anbietern der Steuerungssysteme unterschiedlich kombiniert werden können. Die Nachfrager und Anwender der Steuerungssysteme, also die öffentlichen Verkehrsunternehmen und die Kommunen, sollten sich mit den grundsätzlichen Eigenschaften, Vor- und Nachteilen der wesentlichen Komponenten auskennen.

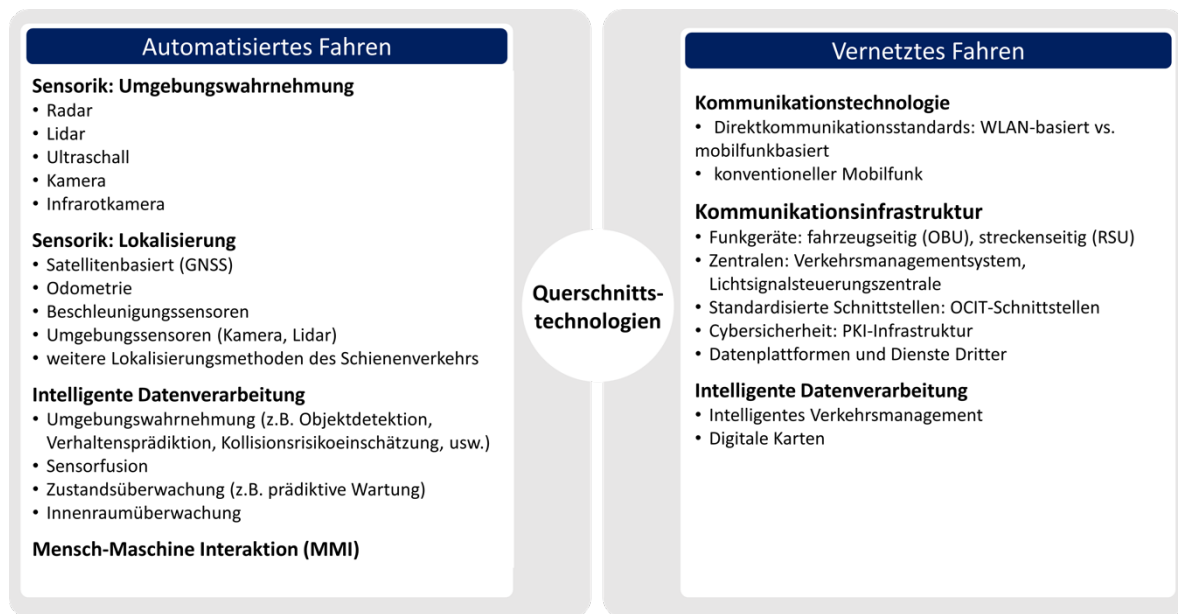


Abbildung 5-6: Relevante Querschnittstechnologien

Sensorik zur Umgebungswahrnehmung und Lokalisierung

Es werden geeignete Sensoren für die Aufgabe „Wahrnehmen“ (vgl. Abbildung 5-5) benötigt. Die Umgebung und das unmittelbare Umfeld der Straßenbahn müssen bekannt sein und ebenso die Position der Straßenbahn relativ zur Umgebung sowie aktuelle Änderungen dieser Position.

Für die Umgebungswahrnehmung gibt es verschiedene Sensortypen, aus denen eine Auswahl bzw. Kombination zu treffen ist. Abbildung 5-7 nennt die wichtigsten Sensortypen mit ihren Vor- und Nachteilen. Für eine zuverlässige und leistungsstarke Erfassung der Umgebung sowie eine aussagekräftige Situations- und Risikoeinschätzung ist die Kombination von Kamera, Radar und LiDAR anzustreben (Sensorfusion⁸). Mit Leistungssteigerungen bei der Datenauswertung kann es zukünftig möglich werden, auf einzelne Sensortypen zu verzichten.

Automatisierung erfordert eine permanente, hochgenaue und zuverlässige Lokalisierung der Straßenbahn in ihrem Umfeld. Hingegen wurden konventionelle Methoden der Ortung wie Achszähler oder Linienleiterschleifen für ein komplett anderes Anforderungsprofil entwickelt und genutzt, welches auf „einfacher“ Freigabe von Gleis- oder Streckensegmenten basiert. Die für eine Automatisierung geeigneten Lokalisierungsmethoden werden in Abbildung 5-6 (links) gelistet. Für die Auswahl ist zu berücksichtigen:

- Bei satellitenbasierten Methoden (GNSS), Beschleunigungssensoren oder Odometrie liegt der Vorteil in deren Robustheit, der Eignung für die Sensorfusion und den geringen Kosten.
- Kamera und LiDAR sind nur sinnvoll, wenn diese sowieso schon für die Umgebungserfassung gebraucht werden und dann in doppelter Funktion genutzt werden können.

⁸ Sensorfusion meint die Zusammenführung der Daten verschiedener Sensoren zu einem gemeinsamen Datensatz oder Bild.











Radar	 <ul style="list-style-type: none"> • robuste, wetterunabhängige Detektion (v.a.) größerer Objekte im Nah bis Fernbereich • Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung • kostengünstig 	 <ul style="list-style-type: none"> • geringe Auflösung und Genauigkeit • Klassifizierung von Objekten kaum möglich • Probleme bei Erkennung nicht-metallischer Objekte • Probleme mit störenden metallischen Objekten
Lidar	 <ul style="list-style-type: none"> • präzise, hochauflösende Detektion und Klassifizierung von Umgebung und Objekten • Erstellen von 3D-Karten 	 <ul style="list-style-type: none"> • anfällig gegenüber Wetterbedingungen • Probleme mit spiegelnden Oberflächen • Datenverarbeitungsaufwand • Kosten und Energiebedarf
Ultra-schall	 <ul style="list-style-type: none"> • Robuste, wetterunabhängige Detektion von Objekten im direkten Umfeld • kostengünstig 	 <ul style="list-style-type: none"> • sehr geringe Reichweite (wenige Meter) • keine Objektklassifizierung möglich
Kamera	 <ul style="list-style-type: none"> • präzise Detektion und Klassifizierung von Objekten und Umgebung • Erkennen von Verkehrszeichen und Signalen • Situationsinterpretation und Intentionsschätzung 	 <ul style="list-style-type: none"> • anfällig gegenüber Wetter und Belichtung • Datenverarbeitungsaufwand
Infrarot-Kamera	 <ul style="list-style-type: none"> • robuste, wetterunabhängige Detektion von Objekten im Nah- bis Fernbereich • belichtungsunabhängig • Klassifizierung von Objekten möglich 	 <ul style="list-style-type: none"> • vergleichsweise geringe Auflösung • Datenverarbeitungsaufwand • Kosten

Abbildung 5-7: Sensorische Umgebungswahrnehmung

- Des Weiteren besteht die Möglichkeit der Lokalisierung durch Vergleich der erfassten Umgebung mit den Daten in einer digitalen Karte. Diese sog. SLAM-Methode⁹ funktioniert allerdings nur in Zusammenarbeit mit LiDAR wirklich gut, Radar ist hierfür zu ungenau [17].
- Auch die Lokalisierung über Funktechnik ist für den Straßenbahnbetrieb geeignet, allerdings nur dann, wenn sowieso Road-Side-Units (RSU) für andere Anwendungen der Vernetzung installiert werden.
- Grundsätzlich empfiehlt sich, auch aus Kostengründen, eine Verortung der Sensorik im Fahrzeug, nicht in der Infrastruktur.

Intelligente Datenverarbeitung für die Fahrzeugsteuerung

Für die Planung der Aktionen des Fahrzeugs („Planen“ in Abbildung 5-5) bedarf es einer intelligenten Datenverarbeitung, sozusagen eines leistungsfähigen Gehirns, welches die Daten der Sensoren verarbeitet und analysiert und Handlungsempfehlungen ableitet.

Automatisiertes Fahren in hochkomplexen Verkehrssituationen stellt höchste Anforderungen an diese Fähigkeiten, wie zum Beispiel in unübersichtlichen Verkehrssituationen wie verkehrsreichen Kreuzungen oder an belebten Fußgängerzonen mit straßenbündigem Bahnkörper. Um dies zu ermöglichen, muss die intelligente Datenverarbeitung zusammen mit den wichtigsten Sensoren im Fahrzeug verortet werden, so dass die Übertragungswege kurz sind und Kabelverbindungen genutzt werden können.

Infrastrukturseitige Sensoren oder Steuerungssignale können daher nur eine ergänzende Rolle spielen, auch wenn diese sehr wichtig ist. Abbildung 5-8 verdeutlicht das kompakte Steuerungssystem im Fahrzeug als „Bordcomputer“, welches in der Realität aus einer Vielzahl von im Fahrzeug verteilten Komponenten, wie eng vernetzte Sensoren und Rechner, bestehen wird.

⁹ SLAM steht für *Simultaneous Localization and Mapping* und meint die Erstellung einer Karte der Umgebung und gleichzeitiger (Selbst-)Verortung in ebendieser Karte.

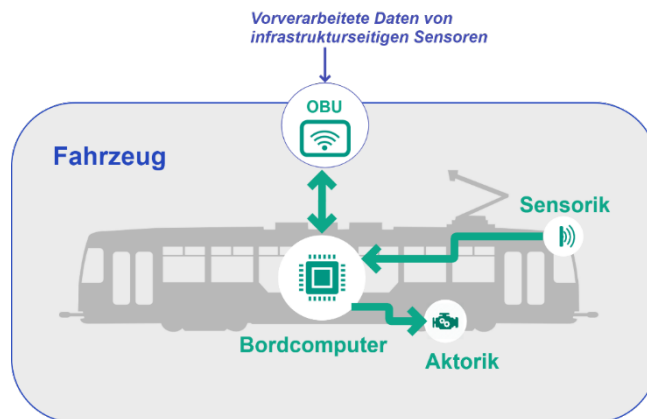


Abbildung 5-8: Die Kernfunktionen der Automatisierung sind im Fahrzeug verortet

Zustandsüberwachung

Infolge der Abwesenheit des Fahrers muss die intelligente Datenverarbeitung auch eine sensorbasierte Zustandsüberwachung des Fahrzeugs und des Fahrgastinnenraums leisten:

- Überwachung technischer Komponenten: Sicherstellung der System-Integrität, prädiktive Wartung und Instandhaltung sowie Vorhersage von Defekten aller wesentlichen Funktionen des Fahrzeugs einschließlich der Umgebungswahrnehmung und Lokalisierung. Sensordaten müssen permanent hinsichtlich deren Plausibilität geprüft werden.
- Monitoring des Fahrgastinnenraums: Medizinische Notfälle oder Straftaten sind durch die Echtzeitauswertung von Kameradaten zu identifizieren. Bei Vorliegen von Warnzeichen ist ein externer Mitarbeiter (z. B. aus der Verkehrszentrale) zuzuschalten.

Mensch-Maschine-Interaktion

Für die Kommunikation des automatisierten Fahrzeugs mit Menschen sind geeignete Techniken und Formen der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) zu entwickeln. Dies betrifft die Bereiche:

- Interaktion zwischen Fahrer und Straßenbahnfahrzeug (Führerstand),
- Interaktion zwischen Personen in der Betriebszentrale und dem Straßenbahnfahrzeug,
- Interaktion zwischen Passagieren und Straßenbahnfahrzeug (Innenraum),
- Interaktion zwischen anderen Verkehrsteilnehmern und dem Straßenbahnfahrzeug.

Im Vergleich zu den Themen der Fahrzeugsteuerung stellen die Themen Zustandsüberwachung und MMI allerdings geringere technologische Herausforderungen dar.

5.4 Branchenstruktur und Handlungsbedarf zur Realisierung der Automatisierung

Implikationen für die zukünftige Branchenstruktur

Die Tatsache, dass die intelligente Datenverarbeitung im Fahrzeug verortet sein muss, um automatisiertes Fahren in hochkomplexen Verkehrssituationen zu ermöglichen, hat Implikationen für die zukünftige Entwicklung der Branche.

So sind zum Beispiel CBTC-Systeme oder „ATO over ETCS“-Systeme, die auf einer infrastrukturseitigen Steuerung beruhen und bei U-Bahnen oder Vollbahnen eingesetzt werden, nicht geeignet für die Automatisierung von Straßenbahnen, welche auf straßenbündiger Infrastruktur in komplexen Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern eingesetzt werden sollen.

Vielmehr ist davon auszugehen, dass einige Industrieunternehmen kompakte Systeme der Fahrzeugsteuerung entwickeln werden, die die gesamte Bordcomputer-Architektur einschließlich der fahrzeugseitigen Sensoren aus einem Guss umfassen (siehe oben Abbildung 5-8). Somit werden sich *keine* etablierten wirtschaftlichen Schnittstellen zwischen denjenigen Komponenten herausbilden, die *innerhalb* des Fahrzeugs der automatisierten Fahrzeugsteuerung 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.¹⁰

Die automatische Fahrzeugsteuerung braucht aber Unterstützung durch externe, infrastrukturseitige Sensordaten und Steuerungsleistungen. Entsprechend dem Prinzip, dass Fahrzeuge und Infrastruktur-relemente durch wirtschaftliche Schnittstellen zu trennen sind (siehe Kapitel 1), ist die infrastrukturseitige Unterstützung der Fahrzeugsteuerung durch standardisierte, wirtschaftliche Schnittstellen von den kompakten fahrzeugseitigen Steuerungssystemen abzutrennen. Für infrastrukturseitige Sensoren sind daher technische Standards zu setzen, die eine Kommunikation mit allen Steuerungssystemen erlauben. Dies betrifft neben den Datenaustauschformaten auch Vorgaben zum Grad der Vorverarbeitung von Sensordaten beim Sensor und zur Geschwindigkeit der Datenübertragung.

Technologieentwicklung

Abbildung 5-9 illustriert die beiden zentralen Herausforderungen für die Realisierung des automatisierten Fahrens, „Technischer Entwicklungsbedarf“ und „Zertifizierung: Sichere Systeme und sicherer Betrieb“.

Die linke Seite der Grafik weist auf die Technologieentwicklung bei der intelligenten Datenverarbeitung hin, um automatisiertes Fahren auch in hochkomplexen Verkehrssituationen zu ermöglichen. Die dafür notwendige technologische Grundlagenforschung und -entwicklung findet in anderen Branchen statt (Bildererkennung, Robotik, Kfz-Sektor usw.).

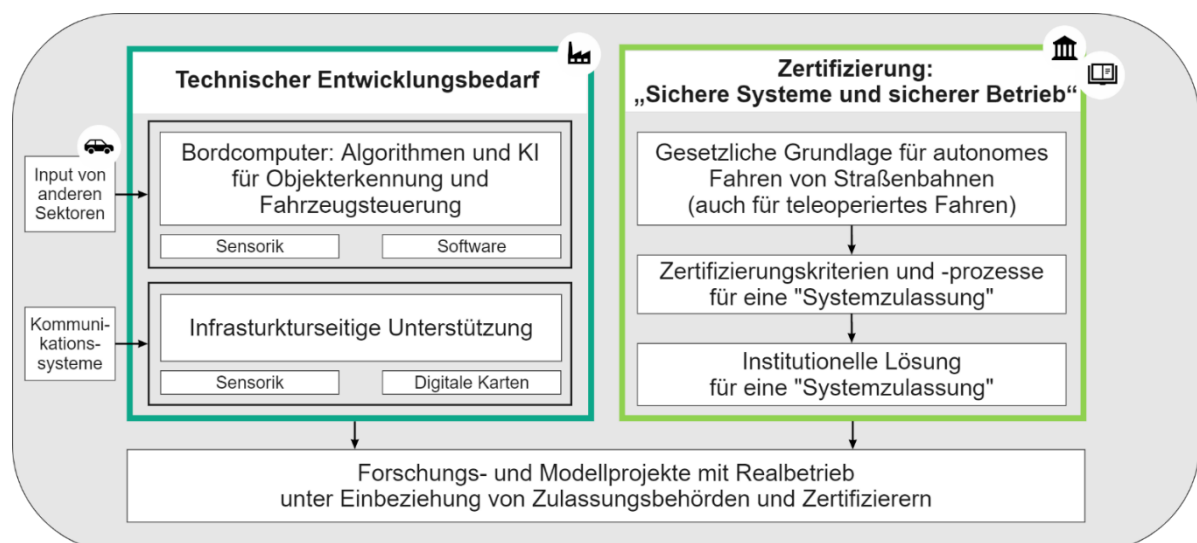


Abbildung 5-9: Automatisiertes Fahren - Herausforderungen, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure

¹⁰ Hingegen werden Anbieter von Steuerungssystemen durchaus auch Geräte anderer Hersteller in ihren Systemen fest kombinieren.

Im realen Betrieb bieten jedoch Straßenbahnen besondere Vorteile, so dass – ähnlich wie bei der Teleoperation – eine Vorreiterrolle der Straßenbahn bei der Umsetzung des automatisierten Fahrens in der Praxis möglich und zu empfehlen ist. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Straßenfahrzeugen relativ wenigen und kontrollierten Betriebssituationen, sind bei Straßenbahnen die Anforderungen insgesamt geringer, und das sog. „silent testing“¹¹, bei dem die automatische Fahrzeugsteuerung im Realbetrieb trainiert werden kann, ist bei ihnen besonders einfach und erfolgversprechend. Zugleich können von einer frühzeitigen Straßenbahnautomatisierung wichtige Impulse für die Umsetzung der Automatisierung anderer Verkehrsmittel ausgehen.

Daher sollten zügig die Übertragung und Anwendung der Automatisierungstechnologien für den Straßenbahnsektor erfolgen und parallel einige Zusatzfunktionalitäten, die speziell beim Straßenbahnsektor auftauchen (z. B. die Fahrgäste betreffend) entwickelt werden. Dies sollte mit Forschungs- und Modellprojekten mit Realbetrieb gefördert werden.

Rechtsrahmen, Zertifizierung und Zulassungsprozesse

Die rechte Seite der Abbildung 5-9 verweist auf den Themenkomplex der Zulassung und Zertifizierung und den dafür notwendigen Rechtsrahmen.

Die rechtliche Regelung des automatisierten Straßenbahnbetriebs ist ein komplexes Thema. Sie betrifft u. a. Dimensionen des sicheren Betriebs im Straßenraum und auf der Schiene, innovativer digitaler Methoden und Fähigkeiten und ggf. der Standardisierung von Technologien und Produkten. Für diese diversen Themenfelder bestehen Regelungen und Regelungsansätze auf gesetzlicher und nicht gesetzlicher Normungsebene im nationalen oder europäischen Rahmen. Dementsprechend scheinen verschiedene Optionen für die rechtliche Regelung des automatisierten Straßenbahnverkehrs möglich:

- 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).

In Einklang damit sind auch die Zulassungsprozesse und -institutionen für automatisierte Systeme zu gestalten. In Deutschland sind die Technischen Aufsichtsbehörden (TAB) der einzelnen Bundesländer für die Genehmigung 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 (oder auch die Teleoperation) selbst entwickelt. Anzustreben ist vielmehr eine Art einheitlicher „Systemzulassung“ für diese Systeme, welche dann von den TAB als Grundlage für die örtlichen Genehmigungen dienen kann. Dabei sollten abgestufte Systemzulassungen für den Einsatz in Verkehrssituationen unterschiedlicher Komplexitätsgrade eingeführt werden.

¹¹ Beim „silent testing“ werden hypothetische Entscheidungen eines automatisierten Steuerungssystems mit den tatsächlichen Entscheidungen eines Fahrzeugführers im Realbetrieb verglichen und bewertet. Diese Methode wird aktuell im Forschungsprojekt MAAS der TU Darmstadt bei Straßenbahnen praktiziert.

Hierfür ist auch ein geeigneter institutioneller Rahmen zu entwickeln. Grundsätzlich erscheinen drei Optionen möglich:

- Schaffung einer neuen Behörde oder Beauftragung einer existierenden Behörde auf Bundes- oder EU-Ebene.
- Auswahl und Ausstattung einer TAB für die „Systemzulassungen“, stellvertretend für alle anderen TAB.
- Etablierung von Zertifizierungskriterien und -standards durch Gremien der Industrie und Verbände, so dass auf dieser Grundlage spezialisierte Zertifizierungs-Unternehmen eine Übereinstimmung mit den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ feststellen können.

In jedem dieser Fälle sind zunächst in anwendungsorientierten Forschungsprojekten die Zertifizierungskriterien und -prozesse zu entwickeln. An diesen Projekten sollten neben den Anwendern (Verkehrsunternehmen und Kommunalverwaltungen) und der Industrie auch die Genehmigungsbehörden und Zertifizierer beteiligt sein, um sowohl deren Sichtweise und Kriterien zu berücksichtigen, als auch umgekehrt bei ihnen einen Lern- und Akzeptanzprozess in Gang zu setzen. Auch die zuvor genannten Anpassungen des Rechtsrahmens für die Zulassung werden wichtige Impulse von solchen Forschungsvorhaben erhalten.

5.5 Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren

Abbildung 5-10 zeigt die Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren (die Symbole für die Akteure wurden in Abbildung 1-2 eingeführt). In den Pfeilen übernimmt sie aus Abbildung 5-9 die beiden zentralen Herausforderungen „Technologieentwicklung“ und „Zulassung und Zertifizierung“. Dazwischen wird rotumrandet der wahrscheinliche Entwicklungsweg der Automatisierung gezeichnet, von der Beherrschung einfacher Verkehrssituationen über moderat komplexe bis hin zu hochkomplexen Verkehrssituationen.

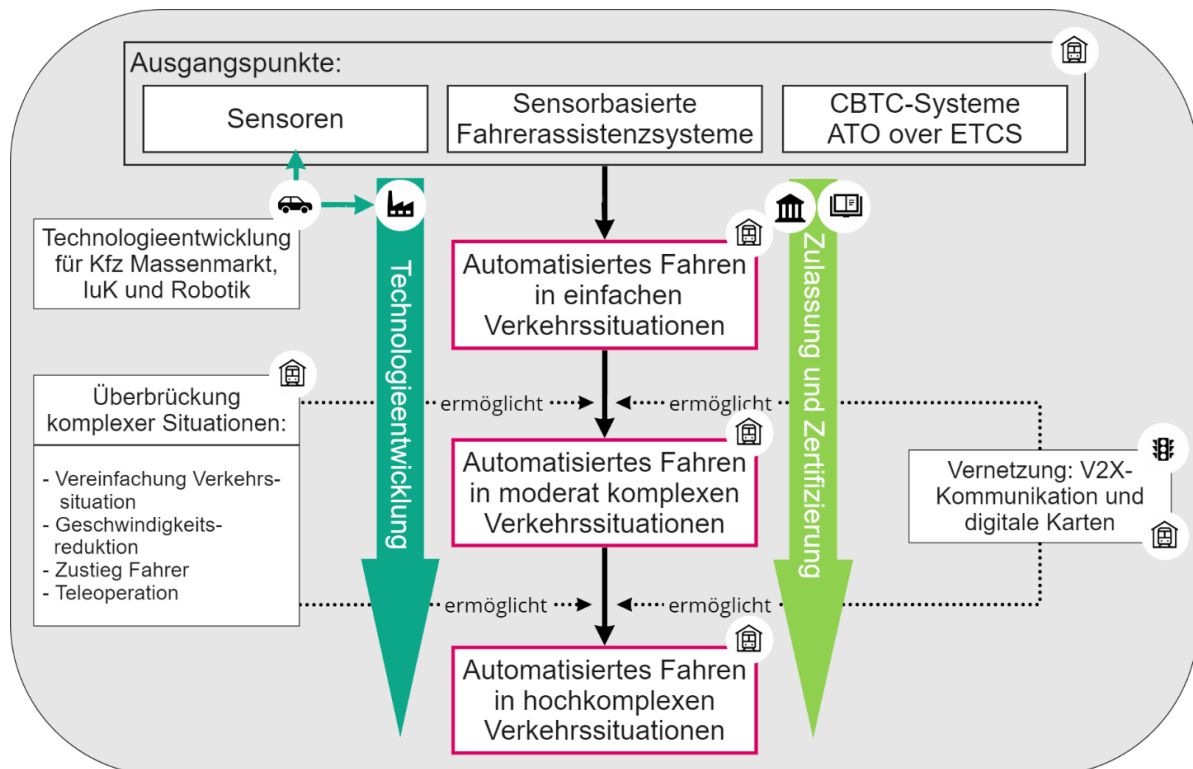


Abbildung 5-10: Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren

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 insbesondere für Anwendungen im Pkw-Sektor weiterentwickelt.
- Die CBTC- und ATO-Systeme, mit denen Bahnen auf baulich völlig unabhängiger Infrastruktur (zum Beispiel U-Bahnen) schon heute vollautomatisiert fahren können. Bei ihnen kommen Sensor-, Vernetzungs- und dynamische Steuerungstechnologien zum Einsatz; allerdings ist die Hauptkomponente der Fahrzeugsteuerung in der 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 insbesondere Notfallassistenten der Fall. Mit ihnen kommen die Sensoren und die intelligente Datenverarbeitung zur Sensorfusion ins Fahrzeug, so dass sie als direkte Vorläufer 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 müssen. Die Abfolge in der Mitte der Abbildung illustriert die sukzessive Entwicklung und Ausbreitung automatisierter Fahrfunktionen in der Praxis, deren erste beiden Stufen sind:

- Einfache Verkehrssituationen mit sehr wenigen und sehr gut kontrollierbaren Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern, wie Betriebshöfe oder bestimmte Wendeschleifen. Diese Einsatzbereiche generieren bereits spürbaren Nutzen für die Verkehrsbetriebe (z. B. Pausen und Einsparung langer Fußwege auf dem Betriebshof für das Fahrpersonal). Für den Betriebshof bietet sich zudem eine Integration in weitergehende, vollautomatisierte Betriebshof-managementsysteme an. Allerdings sind sich die Branchenexperten einig, dass der Einsatz im Betriebshof allein nicht ausreichen wird, um eine Automatisierung von Straßenbahnen wirtschaftlich zu tragen.
- Wichtig ist daher eine baldige Nutzbarmachung der Automatisierung auch für moderat komplexe Verkehrssituationen, um Personalkosten einzusparen bzw. entstehenden Personalmangel 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 weniger 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:

- Überbrückung komplexer Situationen (Abbildung links): Die Anforderungen an die automatische Steuerung können durch gezielte Maßnahmen lokal reduziert werden. Beispiele sind bauliche Maßnahmen, veränderte Verkehrsführungen oder -regelungen, abschnittsweise Teleoperation, 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.
- Vernetzung (Abbildung rechts): Die in Kapitel 4 erläuterten Grundelemente einer Vernetzung - modernes Kommunikationssystem, digitale Karten und infrastrukturseitige Sensoren - sind Voraussetzung für das hochentwickelte automatisierte Fahren. Auch Teleoperation als 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.

Die Roadmap-Abbildung endet mit dem Fernziel des automatisierten Fahrens auch in hochkomplexen Verkehrssituationen. Die zentralen Herausforderungen, um dieses Ziel zu erreichen, betreffen die Technologieentwicklung und die Zulassung und Zertifizierung (farbige Pfeile). Der mit diesen Herausforderungen verbundene Handlungsbedarf wurde in Abschnitt 5.4 beschrieben und wird in Abschnitt 6.4 zusammengefasst.

6 Roadmap und Empfehlungen

6.1 Zusammenfassende Roadmap

Die Roadmap in Abbildung 6-1 zeigt die drei Stränge Fahrerassistenz, Vernetzung und Automatisierung, die sich - bundesweit gesehen - parallel entwickeln und ineinandergreifend gegenseitig unterstützen. Einzelne Kommunen setzen dabei den Schwerpunkt auf unterschiedliche Stränge oder Aspekte. Einige besonders wichtige Querverbindungen zwischen den Strängen werden gezeigt. Zu weiteren Details und der Rolle wichtiger Akteure können die beiden Teil-Roadmaps, Abbildung 4-12 und Abbildung 5-10, konsultiert werden.

Im Unterschied zu den beiden Teil-Roadmaps, die stärker die logischen Verknüpfungen zwischen den Elementen abbilden, geht die Gesamt-Roadmap aus Abbildung 6-1 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.

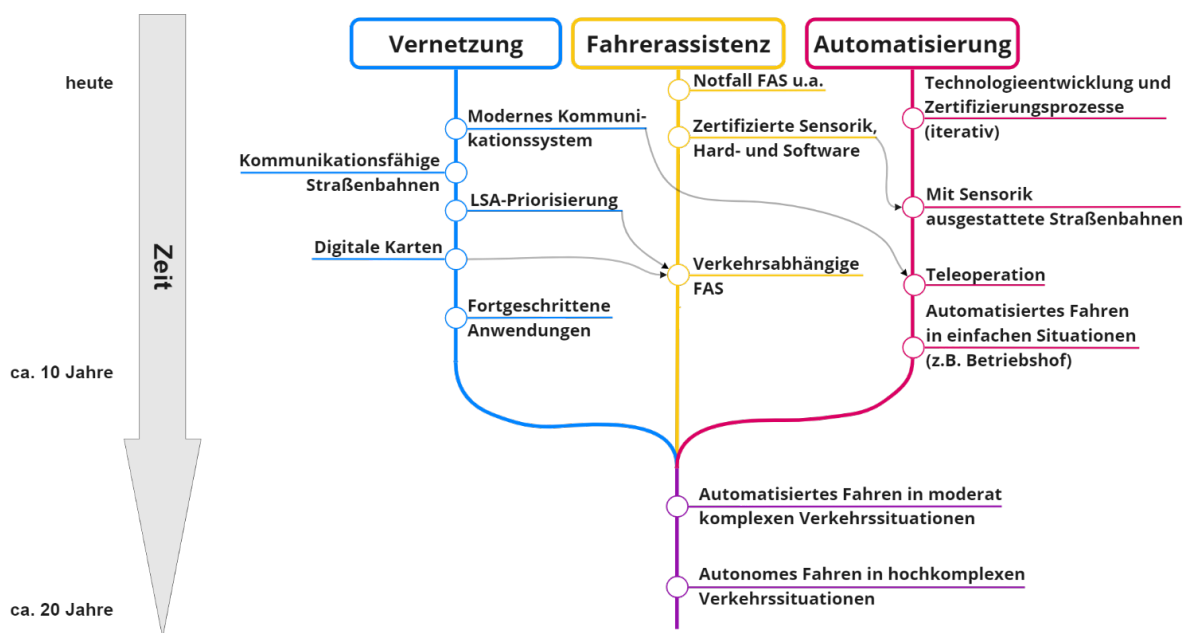


Abbildung 6-1: Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren

6.2 Zukünftige Branchenstruktur

Im Laufe der Zeit sollten sich wirtschaftliche Schnittstellen herausbilden, die es ermöglichen, Produkte verschiedener Hersteller zu kombinieren. Vor allem müssen die infrastrukturseitigen Elemente frei kom-

binierbar mit den fahrzeugseitigen Elementen sein. Anzustreben ist eine zukünftige differenzierte Branchenstruktur, bei der die Anwender (Kommunalverwaltungen und Verkehrsunternehmen) folgende Produkte oder Dienste 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.

Viele dieser Produkte oder Dienste werden bereits heute unabhängig und frei kombinierbar angeboten; diese wirtschaftlichen Schnittstellen sollen auch in Zukunft bestehen bleiben. Es kann und wird 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.

Sollten sich jedoch in der Folge die wichtigen 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 normierten Schnittstellen eine verlässliche Kombination ermöglichen.

6.3 Herausforderungen und Treiber

Abbildung 6-2 nennt zusammenfassend die wichtigsten Hemmnisse und Herausforderungen, die auf dem Weg zum vernetzten und automatisierten Fahren zu überwinden sind. Ihnen gegenüber stehen die Treiber einer Modernisierung, welche in Abbildung 6-3 genannt werden.

6.4 Handlungsempfehlungen

Die zentralen Herausforderungen, die in Abbildung 6-2 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:

- Normierung und Standardisierung durch Marktakteure,
- Rechtsrahmen und behördliche Regelungen,
- Bereitstellung finanzieller Mittel für den Innovationsaufwand,
- Kommunaler Abstimmungsbedarf hinsichtlich Investitionsstrategien in innovative zukunftssichere digitale Infrastrukturen,

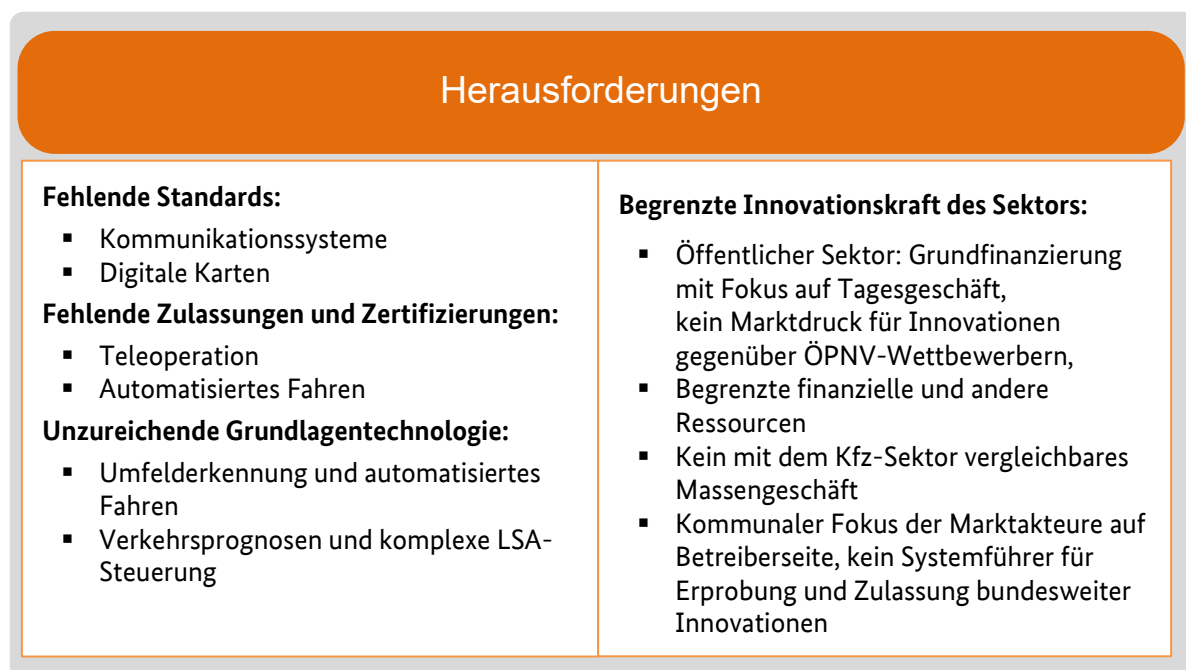


Abbildung 6-2: Herausforderungen der Automatisierung und Vernetzung von Straßenbahnen



Abbildung 6-3: Treiber der Entwicklung der Automatisierung und Vernetzung von Straßenbahnen

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 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.¹²
- 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.

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 Straßenbahnen¹³,
- und zur Entwicklung von „Systemzulassungen“ für Automatisierungssysteme, als Basis für die Zulassungen durch die Technischen Aufsichtsbehörden.

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

¹² 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).

¹³ Die grundsätzlichen Optionen, wie dies realisiert werden könnte, wird in Abschnitt 5.4 dargestellt.

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).

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 abstimmen¹⁴. 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.

¹⁴ Spezielle Abstimmungsfragen hinsichtlich der intelligenten Verkehrssteuerung von LSA wurden in Abbildung 4-5, dargestellt.

7 Zusammenfassung

Für den Straßenbahnverkehr werden der **Sachstand** und die Entwicklungsperspektiven von Vernetzung und Automatisierung erstmals zusammenfassend analysiert. Hierfür sind eine Vielzahl an Literaturquellen und Berichten 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 zur Teilautomatisierung dargestellt. Diese drei Säulen bilden auch die Startpunkte 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. 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 als auch 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 sind.

Zu innovativen Teilfähigkeiten werden anhand eines Realdaten-Modells für das Karlsruher Straßenbahnnetz 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. In einer volkswirtschaftlichen Bewertung kommen auch die bei den Fahrgästen anfallenden Nutzen der Fahrzeitverkürzung bzw. Störungsvermeidung zum Tragen, sodass die ermittelten Vorteile die Investitionskosten in allen modellierten Szenarien übersteigen, 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, sodass eine wettbewerbliche Branchenstruktur entstehen kann. 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 für die 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 wenigen, 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 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	6
Abbildung 1-2: Die relevanten Akteursgruppen	7
Abbildung 1-3: Exkurs: Technische und wirtschaftliche Schnittstellen	8
Abbildung 2-1: Schwerpunkte und Praxisbeispiele der Automatisierung und Vernetzung	9
Abbildung 3-1: Errechnete Fahrzeiteinsparungen bei verschiedenen Szenarien der Simulation zur Karlsruher Straßenbahn-Linie 1, Fahrtrichtung Oberreut	12
Abbildung 3-2: Errechnete Fahrzeiteinsparungen bei verschiedenen Szenarien der Simulation aller sechs Karlsruher Straßenbahnlinien	13
Abbildung 3-3: Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Potenzialabschätzung	14
Abbildung 3-4: Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Potenzialabschätzung	14
Abbildung 4-1: Kommunikationssystem mit relevanten Akteuren - Systemillustration	17
Abbildung 4-2: Herausforderungen für den Einsatz von Kommunikationssystemen	18
Abbildung 4-3: Mögliche Lösungswege für den Einsatz von Kommunikationssystemen	18
Abbildung 4-4: Exkurs: Funktechnologien	19
Abbildung 4-5: Exkurs: Abstimmung auf der kommunalen Ebene	21
Abbildung 4-6: Herausforderungen für den Einsatz von intelligenter Verkehrssteuerung	21
Abbildung 4-7: Mögliche Lösungswege für den Einsatz von intelligenter Verkehrssteuerung	22
Abbildung 4-8: Digitale Karten - Systemillustration	23
Abbildung 4-9: Herausforderungen für den Einsatz Digitaler Karten	24
Abbildung 4-10: Mögliche Lösungswege für den Einsatz Digitaler Karten	24
Abbildung 4-11: Entwicklungsperspektiven für Anwendungssysteme der Vernetzung	25
Abbildung 4-12: Teil-Roadmap zum vernetzten und assistierten Fahren	26
Abbildung 5-1: Grenzen und Herausforderungen	27
Abbildung 5-2: Herausforderungen bei der Umsetzung von Teleoperation	28
Abbildung 5-3: Mögliche Lösungswege bei der Umsetzung von Teleoperation	29
Abbildung 5-4: Betriebssituationen als Herausforderungen der Automatisierung	30
Abbildung 5-5: Grundfunktionen der Fahrzeugautomatisierung	30
Abbildung 5-6: Relevante Querschnittstechnologien	31
Abbildung 5-7: Sensorische Umgebungswahrnehmung	32
Abbildung 5-8: Die Kernfunktionen der Automatisierung sind im Fahrzeug verortet	33
Abbildung 5-9: Automatisiertes Fahren - Herausforderungen, Lösungsmöglichkeiten und beteiligte Akteure	34
Abbildung 5-10: Teil-Roadmap zum automatisierten Fahren	36
Abbildung 6-1: Roadmap zum vernetzten und automatisierten Fahren	38
Abbildung 6-2: Herausforderungen der Automatisierung und Vernetzung von Straßenbahnen	40
Abbildung 6-3: Treiber der Entwicklung der Automatisierung und Vernetzung von Straßenbahnen	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Typische Netzabschnitte auf der ehemaligen Karlsruher Linie 1	11
Tabelle 3-2: Berücksichtigte Nutzenvariablen	13

Quellenverzeichnis

- [1] L. Schnieder, 2020. Communications-Based Train Control (CBTC). Komponenten, Funktionen und Betrieb. Berlin: Springer Vieweg.
- [2] 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.
- [3] M. Villalba, 2016. Pioneering ATO over ETCS Level 2, *Railway Gazette International*. S. 107-109, September 2016. Verfügbar unter: <https://www.unife.org/wp-content/uploads/2021/03/Pioneering-ATO-over-ETCS-Level-2-Railway-Gazette.pdf>
- [4] 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/praesentation-uitp-autonome-tram-d.pdf>
- [5] Bosch Engineering, 2018. Kollisionswarnsystem für Stadt- und Straßenbahnen [online]. [Zugriff am: 19.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bosch-engineering.com/de/highlights/kollisionswarnsystem/>
- [6] 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
- [7] 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/>
- [8] 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
- [9] M. Hofmann, 2020. Trams das Fahren lehren. Auf dem Weg zur smarten, autonomen Straßenbahn, *Der Nahverkehr*. Nr. (12), S. 20-24, 2020.
- [10] 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: 2020.
- [11] 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/>
- [12] OpenTrack Railway Technology Ltd, 2020. Produkt-Webseite [online]. [Zugriff am: 27. Januar 2023]. Verfügbar unter: <http://www.opentrack.ch/>

- [13] ITP Intraplan Consult GmbH, 2016. Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr – Verfahrensanleitung. FE 70.893/2014 für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- [14] A. Dahl, A. Kindl, C. Walther, D. Paufler-Mann, A. Roos, V. Waßmuth, F. Weinstock und W. R. H.-U. Mann, 2016. Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 – FE-Projekt-Nr. 97.358/2015 für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München.
- [15] 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. ISBN 978-3-95606-646-7.
- [16] A. Srivastava, 2019. Sense-Plan-Act in Robotic Applications. Verfügbar unter: doi: 10.13140/RG.2.2.21308.36481.
- [17] 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. ISSN 1558-223X. Verfügbar unter: doi:10.1109/MRA.2006.1638022