



Baden-Württemberg

RABus

Abschlussbericht

Reallabor für den Automatisierten Busbetrieb im ÖPNV
in der Stadt und auf dem Land

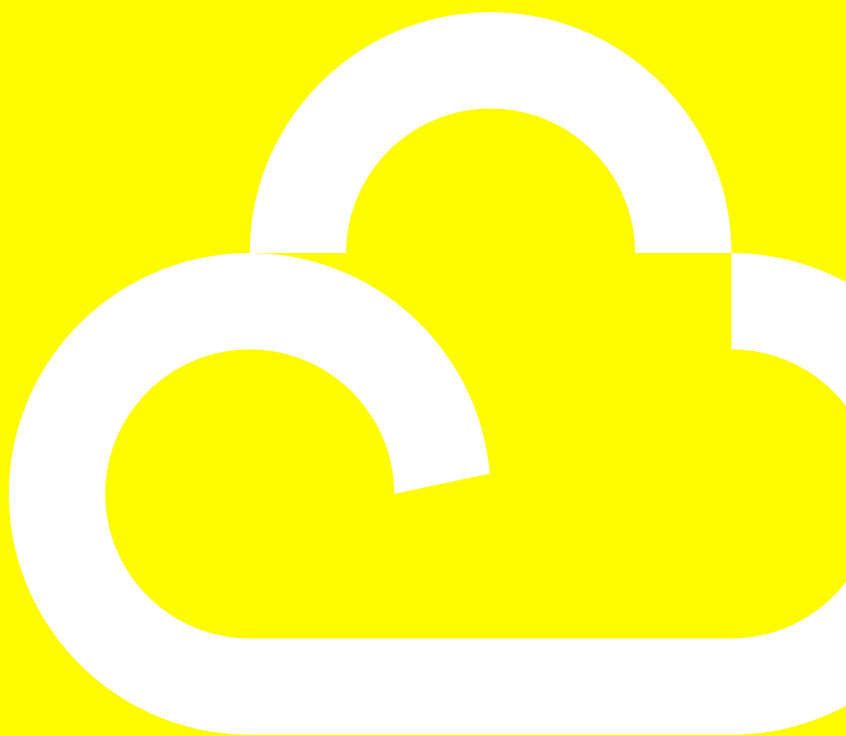
Februar 2026



Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
2	Einleitung	6
3	Projektergebnisse	8
3.1	Das autonome Transportsystem	8
3.1.1	AD-Shuttle	8
3.1.2	Autonomous Driving System von ZF	10
3.1.3	AD-Shuttle Inbetriebnahme	19
3.1.4	Validierung und Verifizierung von Sicherheitskonzept und AD-Fahrzeug	20
3.1.5	Übergreifende Beschreibung der ATS-Elemente	21
3.1.6	Festlegung des Betriebsbereichs (ODD)	30
3.1.7	Netzabdeckung im Kontext autonomes Fahren	31
3.2	Aufbau der Reallabore	32
3.2.1	Vorstellung der Reallabore	32
3.2.2	Routenführung	33
3.2.3	Vorbereitung der Infrastruktur und des Fahrbetriebs	34
3.2.4	Durchführung eines Probandenbetriebs	38
3.3	Wissenschaftliche Begleitforschung	42
3.3.1	Auswertung des Probandenbetriebs	42
3.3.2	Akzeptanzforschung	44
3.3.3	Modellierung verkehrlicher Wirkungen und Potenzialmodell	49
3.3.4	Technische Bewertung des Fahrbetriebs	52
3.4	Rechtliche Begleitung	58
4	Projekt-Beirat	60
4.1	Mitglieder des Beirats	60
4.2	Beiratsempfehlungen (Phase 1)	61
4.2.1	Weiterentwicklung der Standardisierung für den Einsatz von autonom fahrenden Elektrobussen im ÖPNV	61
4.2.2	Beiratsempfehlung aus Fahrgastsicht	61
4.2.3	Beiratsempfehlung aus Sicht der Verkehrsunternehmen und Flottenbetreiber	62
4.2.4	Technische Systemgestaltung und Zulassung	62

4.3	Beiratsempfehlungen (Phase 2)	65
4.3.1	Umsetzung des automatisierten Fahrens ermöglichen und skalieren	65
4.3.2	Personenbeförderung (auch für Erprobungsgenehmigungen) ermöglichen	65
4.3.3	Frühzeitige Tiefenintegration in ÖPNV-Systemumgebung	66
4.3.4	Anforderungen an das Störungsmanagement	67
5	Handlungsempfehlungen	68
	Abbildungsverzeichnis	70
	Tabellenverzeichnis.....	72
	Impressum	73
	Projektinformationen	74



1. Vorwort

Liebe Leser:innen,

die Mobilität von morgen zukunftssicher und nachhaltig zu gestalten, ist eine Aufgabe, die das Land Baden-Württemberg seit vielen Jahren angeht und erfolgreich umsetzt. Dabei spielen Zukunftstechnologien wie das automatisierte Fahren auch für den öffentlichen Verkehr eine bedeutende Rolle, um diesen gezielt zu erweitern, Versorgungslücken zu schließen und einen effizienten Ressourceneinsatz in Zeiten zunehmenden Fahrermangels zu ermöglichen. So kommen wir auch den Klimaschutzzielen im Verkehrssektor einen großen Schritt näher. Zusätzlich ergeben sich durch das automatisierte Fahren für die baden-württembergische Automobilwirtschaft neue Geschäftsfelder, welche es angesichts des Strukturwandels in der Branche zu nutzen gilt.

Das Projekt RABus hat sich in den vergangenen viereinhalb Jahren mit großem Engagement dieser Aufgabe gewidmet und einen bedeutenden Beitrag zur Erprobung und Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens im öffentlichen Verkehr geleistet. Mit dem erfolgreichen Abschluss des Projekts RABus hat Baden-Württemberg seine Rolle als Vorreiter für innovative Mobilitätslösungen einmal mehr unter Beweis gestellt. In den Reallaboren Friedrichshafen und Mannheim konnten über 1.600 Bürger:innen selbstfahrende Shuttles im öffentlichen Straßenverkehr testen. Die positiven Rückmeldungen und die hohe technische Verlässlichkeit der Fahrzeuge zeigen: Automatisiertes Fahren ist nicht nur eine Zukunftsvision, sondern zunehmend Realität – erlebbar, zuverlässig und sicher.

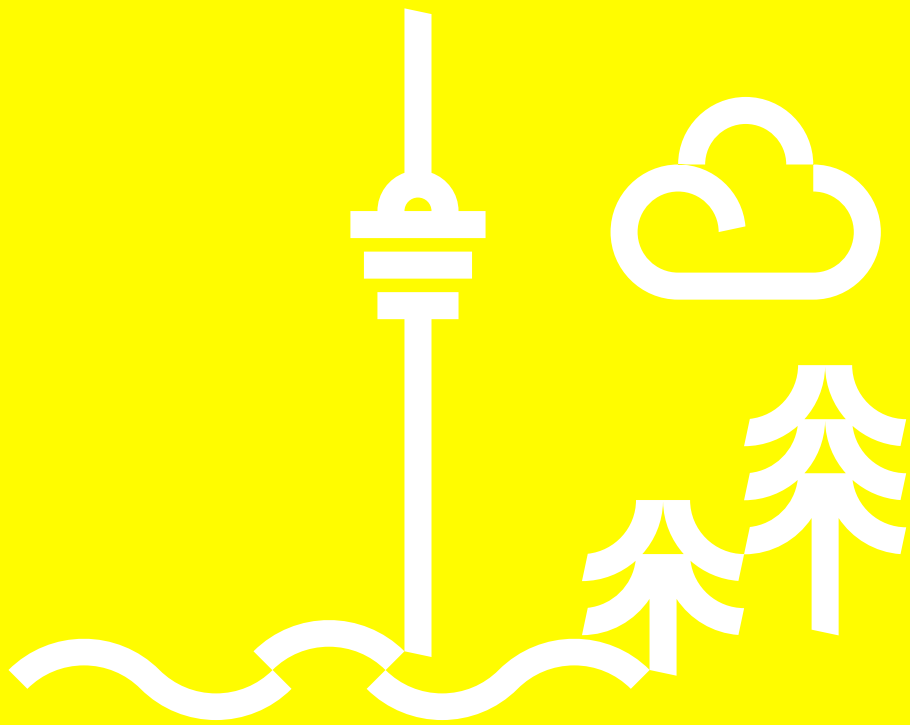


Die gewonnenen Erkenntnisse aus RABus stärken unsere Überzeugung, dass automatisierte und vernetzte Mobilität einen zusätzlichen Baustein der Mobilitätswende darstellen. Autonome Shuttles können helfen, Mobilitätsangebote insbesondere in ländlichen Regionen flexibler, barrierefreier und klimafreundlicher zu gestalten. Gleichzeitig zeigt sich, dass technologische Innovationen nur dann erfolgreich sind, wenn sie mit gesellschaftlicher Akzeptanz und praktischer Alltagstauglichkeit einhergehen. Ich danke allen Beteiligten und Projektpartnern für ihren Einsatz, ihre Expertise und ihre Lösungsorientiertheit. Gemeinsam haben wir gezeigt, wie Forschung, Wirtschaft und die öffentliche Hand zusammen an Lösungen für die Mobilität der Zukunft arbeiten können.

RABus ist ein wichtiger Meilenstein – nicht nur für Baden-Württemberg, sondern für die gesamte Weiterentwicklung automatisierter Mobilitätsformen in Deutschland.

Wir werden die gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um weitere Schritte hin zu einem modernen, sicheren, bedarfsgerechten und nachhaltigen öffentlichen Nahverkehr zu gehen und das automatisierte Fahren nun nach und nach in den Regelbetrieb im öffentlichen Verkehr zu überführen.

Winfried Hermann MdL
Verkehrsminister des Landes Baden-Württemberg



2. Einleitung

Im Rahmen der kontinuierlichen Bestrebungen, die Mobilität der Zukunft aktiv zu gestalten und zu optimieren, hat das Land Baden-Württemberg im Jahr 2020 mit seiner „Strategie zur automatisierten und vernetzten Mobilität“ im Rahmen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft (SDA) eine wegweisende Richtung eingeschlagen. Die Strategie zielt darauf ab, die Mobilität von Menschen und Gütern zu verbessern und gleichzeitig die Forschungs-, Innovations-, Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale im Land zu stärken. Durch die Fokussierung auf eine integrierte Entwicklung und Anwendung neuer Technologien in der Mobilitätsbranche betont Baden-Württemberg die Bedeutung einer zukunftsorientierten, nachhaltigen und effizienten Verkehrsgestaltung. Diese Vision umfasst sowohl die technologische als auch die gesellschaftliche Dimension der Mobilitätstransformation, indem sie Innovationen fördert, die sowohl die Lebensqualität verbessern als auch die Umweltbelastung minimieren.

Ergänzend zu diesen strategischen Ausrichtungen hat das Land die ÖPNV-Strategie 2030 formuliert, die einen besonderen Fokus auf die Integration automatisierter Fahrsysteme in den öffentlichen Personenverkehr legt.

Ziel ist es, ein zukunftsfähiges, effizientes und klimafreundliches Verkehrssystem zu schaffen, das die Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung auf nachhaltige Weise erfüllt. Ein Schlüsselement dieser Strategie ist die Einführung von Technologien und Konzepten, die die Effizienz und Attraktivität des ÖPNV steigern und gleichzeitig auf die Herausforderungen, wie das zunehmende Fehlen von Fachkräften im Verkehrssektor, reagieren.

Der Mangel an Fachkräften ist eine der wesentlichen Herausforderungen, um den geplanten Angebotsausbau im ÖPNV zu realisieren. Der Einsatz von automatisierten und vernetzten Technologien kann dazu beitragen, diesen Herausforderungen zu begegnen, indem beispielsweise der Bedarf an Fahrpersonal reduziert und die Effizienz der Verkehrssysteme gesteigert wird. Gleichzeitig eröffnet die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung neue Perspektiven für die Schaffung von hochqualifizierten Arbeitsplätzen in der Technologie- und Mobilitätsbranche, was das Wirtschaftspotenzial des Landes weiter stärkt.

Die Verabschiedung neuer Gesetze zum autonomen Fahren auf Bundesebene hat eine wichtige Grundlage für

die Weiterentwicklung und den Einsatz automatisierter Mobilitätslösungen geschaffen. Durch die Novellierung des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) und des Straßenverkehrsgesetzes (StVG) wurden entscheidende Rahmenbedingungen angepasst, die es ermöglichen, innovative Verkehrsformen rechtlich zu verankern und in die Praxis umzusetzen.

Im Rahmen des Projektes „Reallabor für den Automatisierten Busbetrieb im ÖPNV in der Stadt und auf dem Land“ wurde der Einsatz großer, vollautomatisierter Busse wissenschaftlich erforscht und real erprobt. Ziel war es, die Fahrzeuge so weiterzuentwickeln, dass sie sich mit akzeptablen Geschwindigkeiten in den regulären Verkehr integrieren lassen – innerorts mit mindestens 40 km/h und außerorts mit bis zu 60 km/h. Dabei wurden nicht nur technische, sondern auch betriebliche und wirtschaftliche Fragestellungen untersucht.

Die Entwicklung, Umsetzung und Erprobung eines wirtschaftlichen und zuverlässigen Fahrbetriebs mit vollautomatisierten Fahrzeugen ist von großer Bedeutung für die Zukunft des ÖPNV. Diese Technologie kann die Einführung eines attraktiven, bezahlbaren und umweltfreundlichen ÖPNV-Angebots z.B. nach den Rahmenbedingungen der Mobilitätsgarantie ermöglichen, oder perspektivisch auch On-Demand-Angebote stärken, die das bestehende Mobilitätsangebot ergänzen.

Das Projekt RABus hat im Ergebnis eine Beurteilung der landesweiten Übertragbarkeit autonomer Busverkehre geliefert und Handlungsempfehlungen für eine zukünftige Einführung erarbeitet. Dazu gehören Erkenntnisse über die technische Umsetzung, die betriebliche Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen und verkehrlichen Auswirkungen. Auch die Nutzerakzeptanz wurde intensiv untersucht, um eine bedarfsgerechte und erfolgreiche Implementierung zu gewährleisten. Das Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg förderte das Projekt mit 15,8 Mio. Euro.

Die zentralen Projektziele waren:

- Erprobung von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen in unterschiedlichen Gebietstypen mit realistischen Geschwindigkeiten im ÖPNV-Realbetrieb und begleitender Öffentlichkeitsarbeit.
- Darstellung automatisierter und flexibler Mobilitätsangebote für eine verbesserte Erreichbarkeit und Effizienz des ÖPNV.
- Bewertung der technischen Umsetzung, der betrieblichen Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit, der Nutzerakzeptanz sowie der rechtlichen und verkehrlichen Auswirkungen.
- Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur landesweiten Übertragbarkeit autonomer Shuttlesysteme.

Die Ausgangssituation in Baden-Württemberg stellt eine vielversprechende Basis für die Weiterentwicklung der automatisierten und vernetzten Mobilität dar. Mit einer klaren strategischen Ausrichtung, unterstützt durch rechtliche Anpassungen auf Bundesebene und adressiert durch die Herausforderungen des Fachkräftemangels, ist das Land auf einem guten Weg, die Mobilität der Zukunft nachhaltig zu gestalten und das Wirtschafts- und Beschäftigungspotenzial im Bereich der automatisierten Mobilität voll auszuschöpfen. Die ambitionierte ÖPNV-Strategie 2030 unterstreicht das Engagement Baden-Württembergs, innovative Lösungen zu fördern, die nicht nur die Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung adressieren, sondern auch nachhaltige, effiziente und inklusive Verkehrssysteme schaffen. Durch die Kombination aus fortschrittlicher Technologie, strategischer Planung und der Förderung von Fachkräften arbeitet Baden-Württemberg weiter an einer Mobilitätswende, die als Vorbild für andere Regionen dienen kann und den Weg für eine zukunftsfähige, wettbewerbsfähige und umweltfreundliche Mobilitätslandschaft ebnet.



3. Projektergebnisse

3.1 Das autonome Transportsystem

Im Rahmen des Projekts RABus lag der Schwerpunkt für ZF auf der Entwicklung und Erprobung eines autonomen Transportsystems (ATS). Die komplexe Aufgabenstellung setzte voraus, das autonome Shuttle als ganzheitliches System in den Fokus zu nehmen. Von ZF wurde dazu ein Ökosystem entwickelt, bei dem neben dem fahrerlosen Shuttle auch jene Dienste und Anwendungen integriert wurden, die für die Inbetriebnahme und den täglichen Betrieb notwendig sind.

Der Bericht beschreibt zunächst detailliert das Fahrzeug sowie die Bestandteile und Funktionen des autonomen Fahrsystems (Autonomous Driving System, AD-System). Die Integration der Sub-Systeme zu einem vollwertigen AD-Fahrzeug, das Sicherheitskonzept und die Testumfänge komplettieren den ersten Berichtsteil.

Im zweiten Berichtsteil richtet sich der Fokus auf jene Bestandteile, die für den autonomen ÖPNV-Betrieb in Zusammenhang mit einem AD-Fahrzeug erforderlich sind und für das RABus-Projekt entwickelt wurden.

Das Ende dieses Kapitels fasst die Erkenntnisse aus den entwicklungsbegleitenden Aktivitäten zusammen.

3.1.1 AD-Shuttle

Für die Reallabore Mannheim und Friedrichshafen wurden Shuttle-Prototypen der ZF Friedrichshafen AG entwickelt und eingesetzt. Die Kleinbusse haben eine Transportkapazität von bis zu zehn Personen inklusive Rollstuhlplatz. Die Vorgängergenerationen der ZF-Shuttles wurden bereits vor 20 Jahren in Betrieb genommen und haben den Nachweis erbracht, dass der automatisierte Betrieb möglich ist. Allerdings war dazu bislang eine eigene Fahrspur erforderlich. Im Projekt RABus galt es, den automatisierten Betrieb im Mischverkehr zu erproben.

Entsprechend den Vorgaben der Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung (AFGBV) wurde speziell für das Projekt von den Konsortialpartnern ein Shuttle gezielt weiterentwickelt, das den technischen Anforderungen im Mischverkehr gerecht wurde. Dazu ging der Technologiekonzern ZF eine projektbezogene Partnerschaft mit dem Shuttle-Hersteller eVersum aus

Österreich ein, der für das Projekt vier Elektroshuttles lieferte, die mit modernster AD-Technik von ZF ausgestattet waren. Ausgehend von einem bestehenden SAE-Level-0-Fahrzeug wurden die AD-Komponenten ergänzt sowie Lenkung, Bremse und Antrieb angepasst.

Die Montage der vier Fahrzeuge startete im Jahr 2023 und wurde Mitte 2024 abgeschlossen.



Abbildung 1: RABus Shuttle

Was bedeuten die SAE-Level?

Die SAE-Level (nach dem Standard SAE J3016) definieren international einheitlich den Automatisierungsgrad von Fahrzeugen – von der vollständigen Kontrolle durch den Menschen (Level 0) bis hin zum vollautonomen Fahren ohne Fahrer:in oder Lenkrad (Level 5). Die Einteilung hilft dabei, den technologischen Fortschritt und die Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrzeuge besser einzuordnen.

Level 0 – Keine Automatisierung:

Der Mensch fährt; Assistenzsysteme geben ggf. Hinweise (z. B. Warnsignale).

Level 1 – Fahrerassistenz:

Einzelne Fahrfunktionen automatisiert (z. B. Tempomat, Spurhalteassistent).

Level 2 – Teilautomatisierung:

Lenken und Beschleunigen/Bremsen automatisiert, Mensch überwacht dauerhaft.

Level 3 – Bedingte Automatisierung:

Fahrzeug fährt selbstständig, Mensch muss bei Bedarf eingreifen können.

Level 4 – Hochautomatisierung:

Selbstständiges Fahren in definierten Betriebsbereichen (ODD), kein menschlicher Eingriff erforderlich.

Level 5 – Vollautomatisierung:

Komplett autonomes Fahren in allen Situationen, ohne Fahrer:in oder Bedienelemente.

Fahrzeugklasse	M3a
Länge, Breite, Höhe	6,9 x 2,4 x 3,1 m
Fahrzeuggewicht inkl. AD Komponenten	9.200 kg
Motor	110 kW nominal/190 kW Peak (650 V)
HV Batterie	80 kWh
Laden	120 kW DC/22 kW AC
Vmax	54 km/h
Wenderadius	9,4 m
Einstiegshöhe	270 mm (nach Absenkung)
Einstiegsrampe	Ja, manuell ausziehbar
Anzahl Plätze im Fahrzeug	9 (+1 Sicherheitsfahrer:in & + 1 AD System Operator) +1 Rollstuhl

Tabelle 1: RABus Shuttle Parameter

Zunächst erfolgte die Einzelbetriebserlaubnis für das SAE-Level-0-Basisfahrzeug, gefolgt von der Genehmigung der AD-Umfänge und dem Sicherheitskonzept durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Der Genehmigungsprozess für die Shuttles wurde mit Erteilung der §-16-Erprobungsgenehmigung im dritten Quartal 2024 abgeschlossen. Die Betriebsaufnahme der Shuttles in den Reallaboren erfolgte im Oktober 2024.

Die Fahrzeuge sind elektrisch angetrieben und erproben mit dem übergeordneten ATS-Ökosystem einen Funktionsumfang gemäß SAE-Level 4. Die Anforderungen an ein Level-4-Fahrzeug ergeben sich primär aus dem Prinzip, die oder den Fahrer:in zu ersetzen, einschließlich der Rolle als letzte Rückfallebene im Falle von Fehlern im System. Die Gesetzgebung verlangt Sicherheitskonzepte für alle automatisierten Fahrsysteme (z.B. Antrieb, Lenkung, Bremse), um sicherzustellen, dass kein unverhältnismäßiges Risiko für Fahrzeuginsassen und Verkehrsteilnehmer:innen besteht. Im Falle eines fahrerlosen Fahrzeuges müssen Fehlerfälle vom Fahrzeugsystem autark beherrscht werden. Zum aktuellen Zeitpunkt sind Level-4-fähige Komponenten wie Bremse und Lenkung noch in der Entwicklung und nicht auf dem Markt erhältlich. Dies hatte zur Konsequenz, dass die Sicherheitsfahrer:innen während des RABus-Projekts durchgehend die Rückfallebene darstellten.

3.1.2 Autonomous Driving System von ZF

Die Fähigkeit, autonom zu fahren, erfordert den Einsatz eines komplexen Systems, um menschliche Fahrer:innen zu ersetzen und das Fahrzeug sicher entlang der Route zu manövrieren. Eine der Aufgaben, die ein automatisiertes System im Mischverkehr im Vergleich zum Betrieb auf einer eigenen Fahrspur bewältigen muss, ist beispielsweise die sichere Reaktion auf Fahrzeuge, Fußgänger:innen oder Radfahrer:innen, die vor dem Shuttle einscheren oder die Fahrspur kreuzen. Außerdem müssen die Fahrzeuge die Interaktion mit vorausfahrenden, seitlich fahrenden sowie folgenden Verkehrsteilnehmer:innen beherrschen. An Kreuzungen und Abbiegestellen muss das System die Absichten der anderen Teilnehmer:innen erkennen und sicher interagieren.

Für den komplexen Einsatzzweck im Mischverkehr wurde das „Autonomous Driving System“ (AD-System) von ZF entwickelt. Die AD-Fähigkeiten dieses Systems wurden im Projekt Schritt für Schritt erweitert und auf der öffentlichen Straße mit Proband:innen im Fahrzeug erprobt. Im Laufe des Förderprojekts wurde das AD-Shuttle mit Szenarien immer höherer Komplexität konfrontiert und seine Fähigkeiten wurden kontinuierlich gesteigert. Ein umfangreiches Testprogramm am Ende eines Entwicklungsschritts stellte sicher, dass das System sicher und zuverlässig im Mischverkehr eingesetzt werden konnte.

Die dafür entwickelten Hardware- und Softwareelemente werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

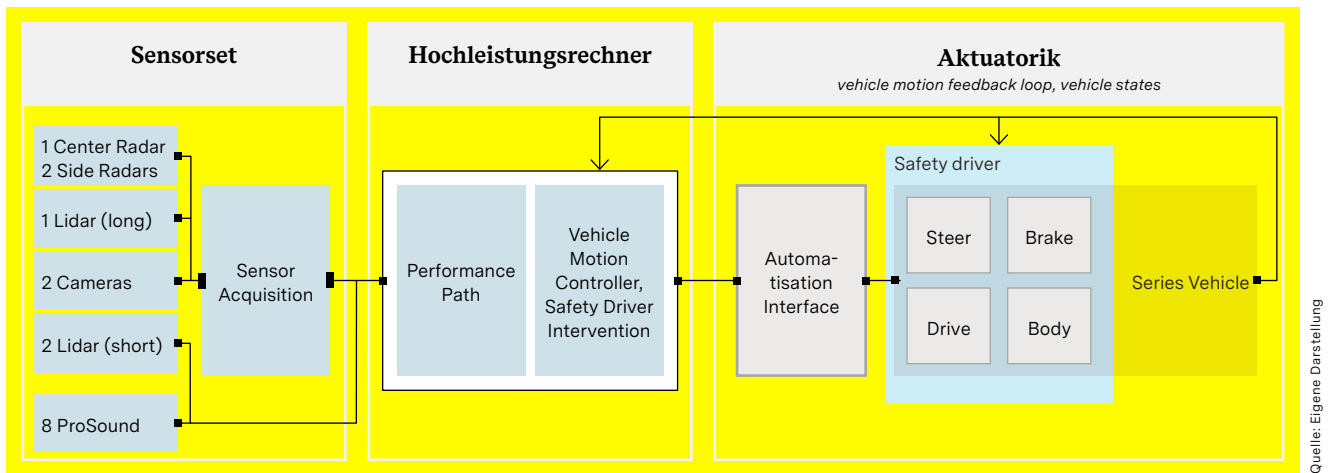


Abbildung 2: Autonomous Driving System von ZF

Sensorset

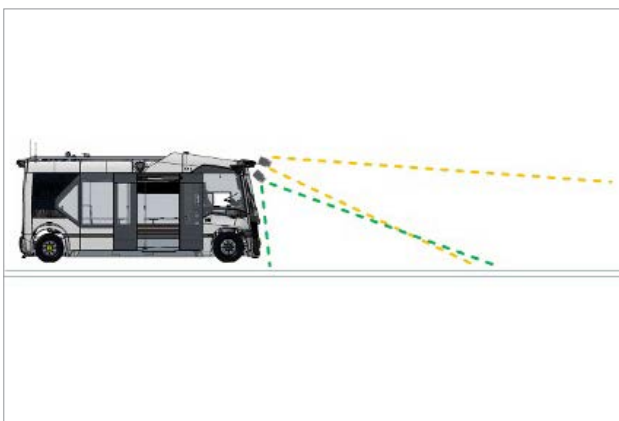
Im Vergleich zum Einsatz auf einer abgetrennten Fahrspur sind die Anforderungen an die Sensorik und deren Auslegung für den Einsatz im Mischverkehr deutlich höher. Eine zentrale Säule des Projekts war daher die Weiterentwicklung der Wahrnehmungssysteme und der Situationsinterpretation.

Um der Aufgabenstellung des Mischverkehrs gerecht zu werden, mussten die Eingaben verschiedener Sensoren (Abbildung 2) zusammengeführt werden. Diese sogenannte Sensorfusion ermöglichte eine redundante Erfassung der Fahrzeugumwelt.

ZF verwendete eine Kombination verschiedener Sensortypen wie Radar, Lidar, Kamera und weitere wie z.B. Mikrofone. Die Kombination und Platzierung der Sensortypen war das Ergebnis einer umfassenden Sensorset-Analyse.

Um die Wahrnehmung des Umfelds bestmöglich abzudecken, waren mehrere Sensoren eines Typs notwendig. In Abbildung 3 ist exemplarisch dargestellt, dass der untere („grüne“) Sensor aufgrund des technologisch bedingten eingeschränkten Sichtfeldes nicht in der Lage ist, das Fernfeld abzudecken. Während der obere („orange“) Sensor das Fernfeld gut abdeckt, wird dort die Informationen im Nahfeld nicht erfasst. Das Sensorset wurde so gestaltet, dass alle relevanten Informationen bezogen auf die Anforderungen aufgezeichnet wurden, die Messtechnik des Gesamtsystems durch die Anzahl der verbauten Sensorik aber nicht zu komplex wurde.

Abbildung 4 zeigt die Kombination von Front- und seitlichen Sensoren, die am Shuttle montiert wurden, um Fernfeld, Nahfeld und direkte Fahrzeugumgebung abdecken zu können.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Sensorsichtbereiche



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4: Front Sensor-Set (Front-Ansicht) mit Kameras (gelb), Radaren (blau), Lidaren (grün) und Mikrofonen (orange)

Funktionale Integration der Sensoren

Damit die erwähnte Komplexität des Systems beherrschbar blieb, lag der Fokus zu Beginn des Fahrbetriebs auf der Integration der Frontsensoren in die Fahrstrategie, da sie den größten Beitrag für das automatisierte Fahren leisten.

Zunächst wurde ein zentraler Frontradar funktional eingebunden, der grundlegende Informationen über vorausliegende Objekte lieferte. Zwei Radarsensoren an der Front links und rechts verbesserten die seitliche Abdeckung und erhöhten die Redundanz. Im nächsten Schritt wurde ein Long-Range-Lidar in der Sensorbar auf dem Fahrzeugdach integriert, um eine hochauflösende 3D-Erfassung des Fernfelds zu ermöglichen. Ergänzend kam ein Short-Range-Lidar zum Einsatz, der speziell für die präzise Erkennung von Konturen statischer Objekte im Nahfeld konzipiert war – etwa zur besseren Erfassung von Bordsteinen, Pollern oder geparkten Fahrzeugen.

Die schrittweise Einbeziehung der Sensoren in die Fahrstrategie führte zu einer Steigerung der Systemrobustheit, insbesondere bei komplexen Verkehrssituationen und in urbanen Umgebungen mit hoher Objektdichte.

Hochleistungsrechner

Die Verarbeitung der generierten Umfelddaten erfolgte mit Hilfe von Hochleistungsrechnern. Diese wiederum bestanden aus mehreren getrennten Recheneinheiten.

In der ersten Stufe wurden aus den Sensorsignalen und der Fahrmission eine Trajektorie und damit die Signale zur Ansteuerung der Aktuatoren berechnet. In einer zweiten Stufe, die aus Sicherheitsgründen auf einer eigenen Hardware lief, wurden die Signale der ersten Stufe plausibilisiert und mit Grenzwerten verglichen, die zum aktuellen Fahrzustand passen. Darüber hinaus wurde auch der Grundzustand des Fahrzeugs, wie zum Beispiel Fehlermeldungen im Basisfahrzeug, Gurtsignale, etc. überwacht. Nur wenn alle Zustände innerhalb der Grenzwerte lagen, wurden die Anforderungen an die Aktuatoren weitergegeben. Die Software war wiederum in zwei Pfade unterteilt.

Der erste Pfad, der sogenannte „Performance Path“, hatte die Aufgabe, der vorgegebenen Route zu folgen, die Straßenverkehrsordnung einzuhalten und dabei eine vorausschauende Fahrweise an den Tag zu legen, damit die Fahrgäste eine bequeme Beförderung erfahren.

Der zweite Pfad, der sogenannte „Safety Path“, hatte die Aufgabe, zu überwachen, dass die gefahrene Trajektorie jederzeit kollisionsfrei ist und die Route nicht verlassen wird. Im Falle einer Abweichung wurde das Fahrzeug in den sicheren Zustand gebracht.

Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems und des erheblichen Aufwands, der erforderlich war, um das System auf die Straße zu bringen, konnten nicht alle

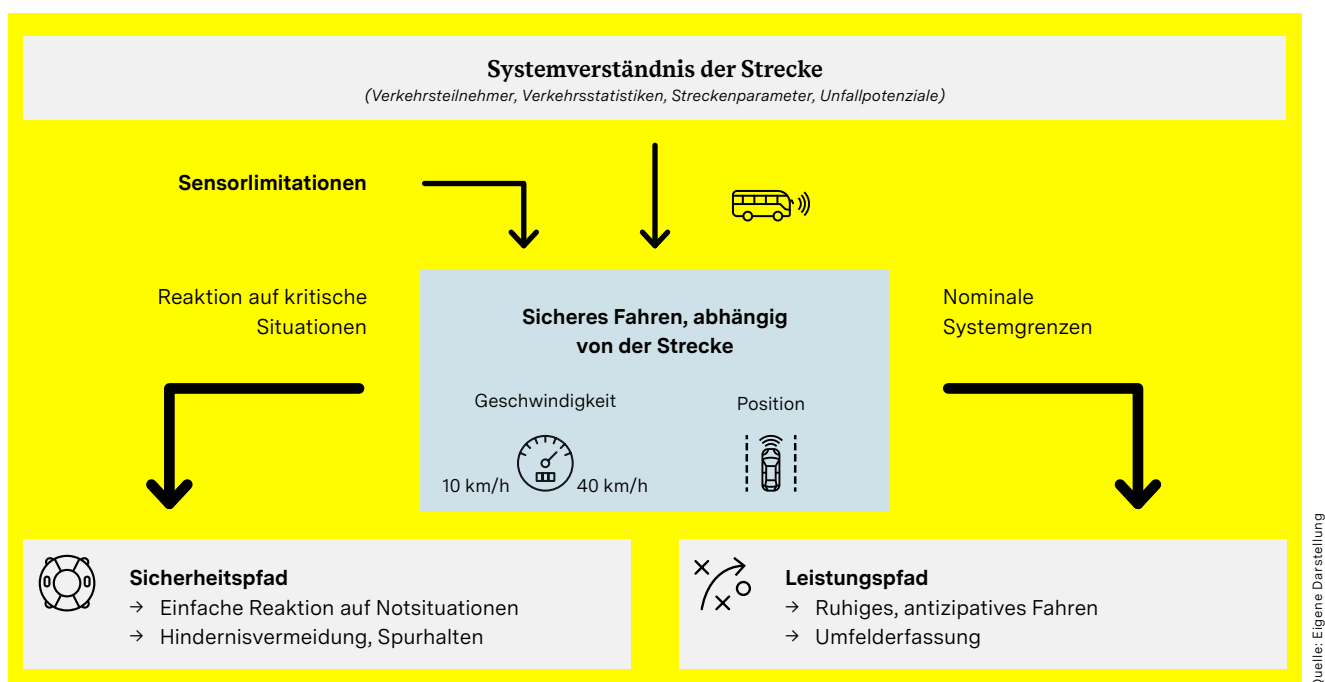


Abbildung 5: AD-System „Virtueller Fahrer:in“ – 2-stufiger Ansatz von ZF

Komponenten im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt werden. Ein Großteil der Entwicklungsaufgaben, die mit dem ATS verknüpft sind, wurde von ZF und seinen Entwicklungspartnern außerhalb des RABus-Projekts durchgeführt und zum Erreichen der Projektziele zur Verfügung gestellt.

Aktuatorik

Abhängig von den Befehlen, die der Hochleistungsrechner ausgab, wurden die Aktuatoren von Bremse, Lenkung und Antrieb geregelt. Es handelt sich dabei um einen Regelkreis. Der Fahrzeugzustand wurde vom AD-System kontinuierlich überwacht und bei Bedarf angepasst. Wicht das Fahrzeugverhalten vom erwarteten Verhalten ab, war der oder die Sicherheitsfahrer:in jederzeit in der Lage, die Kontrolle zu übernehmen.

AD-Software-Architektur und Fahrfunktionen

Die Auslegung und Entwicklung der AD-Software für die RABus Shuttles erfolgte durch ZF. Die Entwicklung beinhaltete die Software für den **Leistungspfad** sowie die Sicherheitsfunktionen der Safety Driver Intervention (SDI) innerhalb des **Sicherheitspfads**.

Die Bestandteile des **Leistungspfads** (Abbildung 6) Fahrfunktion, Objekterkennung und Lokalisierung wurden explizit für den Einsatz im Mischverkehr gestaltet und abgesichert. Die erste Integration der ausgewählten Software-Komponenten fand in einer frühen Integra-

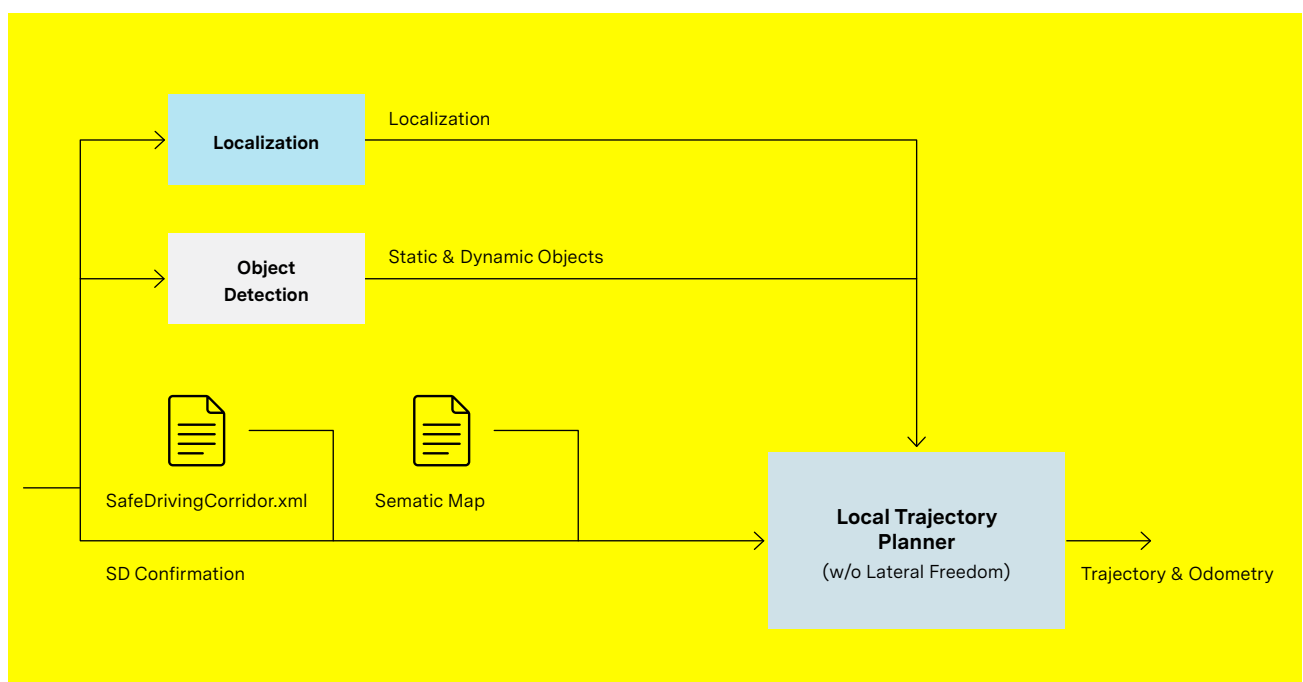
tionsstufe statt, da diese eine ähnliche E/E-Architektur wie das finale Shuttle aufwies.

Funktionale Architektur

Bei der Ausarbeitung der Konzepte wurde der Fokus auf essenzielle Funktionen gelegt, um die Anforderungen des Projekts effizient zu erfüllen. Hierfür wurden die Strecken genau analysiert, um die spezifischen Herausforderungen und Gegebenheiten zu verstehen. Das Hauptziel war die Entwicklung einer stabilen Software mit maximaler Verfügbarkeit.

Neben Fahrzeugdaten wie Geschwindigkeit wurden auch Daten aus einem hochpräzisen Satellitensystem sowie von Lidar, Radar und Kameras verwendet. Für die Lokalisierung wurde eine Kombination aus verschiedenen Technologien ausgewählt, um eine präzise Standortbestimmung unabhängig von den lokalen Gegebenheiten zu gewährleisten.

Die Objekterkennung basierte auf Radar und Lidar. In der Fahrfunktion wurde ein Ansatz gewählt, der zunächst kein laterales Manövrieren, d.h. kein seitliches Ausweichen bzw. Verlassen der eigenen Fahrspur, erlaubte, um die Implementierung zu beschleunigen und die Zuverlässigkeit zu erhöhen.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 6: Funktionale Architektur Stream-1 RABus Shuttle

Objekterkennung – Umfeldwahrnehmung

Das Radar sendet elektromagnetische Wellen in die Umgebung aus, die sich ausbreiten und auf Objekte treffen. Wird ein Objekt getroffen, werden die Wellen teilweise reflektiert. Das Radar empfängt die reflektierten Wellen und misst die Zeit, die benötigt wird, um sie zu empfangen. Durch die Informationen ergibt sich eine Abschätzung von Entfernung, Richtung und Geschwindigkeit des erkannten Objekts. Algorithmen auf dem verarbeitenden Computer analysieren die empfangenen Daten und identifizieren die Objekte. Die Unabhängigkeit von Lichtverhältnissen und Witterungsbedingungen macht das Radar zu einer robusten Technologie für die Objekterkennung in verschiedenen Umgebungen.

Im Analyseprozess wurden Radarobjekte geclustert, das heißt sie wurden basierend auf ihren Eigenschaften wie beispielsweise Geschwindigkeit und Entfernung zu Radarzielen zusammengefasst.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch eine Situation, die mit der hier vorgestellten Methode ausgewertet wurde. Auf der rechten Seite sind die Radarziele aus der Vogelperspektive zu sehen, links ist als Referenz das zugehörige Kamerabild dargestellt. Die kreuzenden Fußgänger:innen werden akkurat erkannt und lokalisiert.

Die ZF-Radarperzeption wurde entwickelt, um für das RABus-Projekt alle relevanten Situationen abzudecken. Hierbei wurde das Konzept eines generischen Ansatzes gewählt, der jegliche Objekte erkennt, ohne sie klassifizieren zu müssen. Dies hatte den Vorteil, dass auch unbekannte Objekte sicher erkannt werden konnten.

Für die Objekterkennung wurde zunächst die Radartechnologie innerhalb der Fahrstrategie genutzt. Radar bietet den entscheidenden Vorteil, dass es nicht nur die Position von Objekten erkennt, sondern gleichzeitig auch deren Relativgeschwindigkeit präzise misst. Diese Eigenschaft machte den Radarsensor besonders geeignet für die Umsetzung einer Distanzregelfunktion, die es dem Fahrzeug ermöglichte, im urbanen Verkehr flüssig mitzuschwimmen und dynamisch auf vorausfahrende Objekte zu reagieren.

Gerade im Stadtverkehr, wo häufige Geschwindigkeitswechsel und kurze Abstände zwischen Verkehrsteilnehmer:innen auftreten, war diese Fähigkeit essenziell. Die robuste Detektion bewegter Objekte – auch bei schlechten Sichtverhältnissen wie Regen oder Nebel – trug zusätzlich zur Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems bei.

Im weiteren Projektverlauf konnten durch die Fusion von Radar- und Lidardaten die Umfelderkennung und damit die Fähigkeiten des Systems verbessert werden. Es kamen sowohl Long-Range (zur präzisen Erkennung entfernter Objekte und Fahrspuren) als auch Short-Range-Lidare (zur detaillierten Erfassung der unmittelbaren Fahrzeugumgebung) zum Einsatz.

Für die Lidar-Umfelderfassung sind mehrere interne Verarbeitungsschritte erforderlich, bis schlussendlich eine Objekthypothese feststeht. Zunächst erfolgt die Fusion der Lidardaten zu einer gemeinsamen 3D-Punktwolke, um daraus ein vollständiges Bild der Umgebung zu generieren. Die dichte Punktwolke wird vereinfacht,



Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Objekterkennung mittels Radar

Quelle: Eigene Darstellung

indem der Raum in Segmente unterteilt wird. Punkte innerhalb eines Segments werden zusammengefasst, was die Datenmenge reduziert und die Verarbeitung beschleunigt.

Punkte, die die Fahrbahnoberfläche darstellen, werden entfernt. Die verbleibenden Punkte werden in Gruppen eingeteilt, wobei jede Gruppe ein potenzielles Objekt darstellt. Abschließend wird um jede Gruppe eine Hülle gelegt, die als einfache Umrandung (Fence) des Objekts dient – nützlich u.a. für die Objektverfolgung.

Die Kombination beider Sensortechnologien ermöglichte fortan eine deutlich genauere Erkennung von Engstellen, etwa durch parkende Fahrzeuge, Baustellen oder andere statische Hindernisse am Fahrbahnrand.

Die Sensorfusion vereinte die Stärken beider Technologien: Während der Radar zuverlässig bewegte Objekte und deren Geschwindigkeit erkannte, lieferte der Lidar hochauflösende 3D-Punktwolken zur präzisen Konturerkennung. Diese Synergie führte zu einer signifikanten Steigerung der Systemrobustheit, insbesondere in komplexen urbanen Szenarien mit hoher Objektdichte und eingeschränkten Sichtverhältnissen wie beispielsweise in der Charlottenstraße.

Autonome Fahrfunktionen

Die autonomen Fahrfunktionen waren zentrale Bausteine zur Bewältigung der Fahraufgabe innerhalb des zu befahrenden Betriebsbereichs (Operational Design Domain, ODD, siehe auch 3.1.6) und wurden darauf ausgelegt, die gesetzlichen und sicherheitsrelevanten Anforderungen für den Mischverkehr auf öffentlichen Straßen zu erfüllen. Im Projekt RABus mussten die Fahrzeuge unterschiedliche Verkehrssituationen sicher meistern, darunter die Navigation auf vorgegebenen Routen, das Reagieren auf andere Verkehrsteilnehmer:innen sowie die Interaktion mit Ampeln und das Bedienen der Haltestellen.

Um die gesetzlichen und sicherheitsrelevanten Anforderungen zu erfüllen, wurde für das Projekt zunächst ein Basisumfang an Fahrfunktionen definiert und umgesetzt. Die Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs hatte anschließend das primäre Ziel, die Systemperformance für den Überlandbetrieb zu optimieren.

Basisfunktionen

→ Follow Mission: Das Shuttle ist in der Lage, einem vordefinierten Pfad auf einer vorgegebenen Strecke

zu folgen. Dazu gehört das Anpassen der Geschwindigkeit an Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie an die Streckengegebenheiten, beispielsweise in Kurven.

→ Adaptive Cruise Control (ACC): Das Shuttle passt seine Geschwindigkeit komfortabel und sicher an die aktuelle Verkehrssituation an. Es reagiert auf vorausfahrende und überholende Fahrzeuge, Gegenverkehr, Fußgänger:innen und andere Verkehrsteilnehmer:innen.

→ Rolling Handover: Die Funktion ermöglicht eine nahtlose Übergabe zwischen manueller Fahrt durch die oder den Sicherheitsfahrer:in und autonomer Fahrt durch das AD-System.

→ Clearance-based Speed Control: Das Shuttle passt seine Geschwindigkeit komfortabel und sicher an die direkte Umgebung an. Es fährt mit angemessener Geschwindigkeit beispielsweise an parkenden Fahrzeugen vorbei.

→ Safety Driver Confirmation: In komplexen Situationen wird als zusätzliche Sicherheitsfunktion eine Bestätigung der oder des Sicherheitsfahrers:in angefordert, bevor die Fahrt fortgesetzt wird. Dies ist beispielsweise bei der Einfahrt in Kreuzungen und Kreisverkehre, vor Zebrastreifen oder an Haltestellen der Fall.

Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs für den Überlandbetrieb (Reallabor-Friedrichshafen-Betrieb 2025)

Im Rahmen der Weiterentwicklung wurde die Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs für den Überlandbetrieb auf 54 km/h angehoben. Diese Erweiterung stellte neue Anforderungen an die gesamte Systemarchitektur. Insbesondere musste der Planungshorizont der Fahrfunktion deutlich erweitert werden, um bei höheren Geschwindigkeiten rechtzeitig auf relevante Verkehrssituationen reagieren zu können. Parallel dazu stiegen die Anforderungen an die Objekterkennung: Das System musste in der Lage sein, Objekte in größerer Entfernung zuverlässig zu detektieren und zu klassifizieren. Dies erforderte eine Optimierung der Sensorreichweiten sowie eine verbesserte Vorverarbeitung und Fusion der Sensordaten, um auch bei höheren Geschwindigkeiten ein sicheres und vorausschauendes Fahrverhalten zu gewährleisten.

Sicherheitskonzept

Die Sicherheit während des automatisierten Betriebs hatte jederzeit oberste Priorität. Die Einhaltung der Sicherheitsziele erforderte einen multiplen Ansatz, bis das Fahrzeug die Fahraufgabe schlussendlich eigenständig umsetzen konnten. Für das Projekt RABus galten folgende Hauptsicherheitsziele.

- Vermeiden von Kollisionen
- Vermeiden des Verlassens der Fahrspur
- Vermeiden starker Bremsungen
- Vermeiden von Shuttle-Bewegungen bei Ein-/Ausstieg
- Vermeiden hoher Fahrdynamik

Die Überwachung des automatisierten Systems ist perspektivisch die Aufgabe eines Sicherheitssystems. Für das Forschungsprojekt RABus setzte ZF auf das Zusammen-

menspiel von Technik und Mensch, um die Sicherheitsziele zu erreichen. So kamen Überwachungsfunktionen zum Einsatz, um ein ungewolltes Fahrzeugverhalten zu vermeiden. Die technische Implementierung des Safety-Driver-Intervention-(SDI)-Systems stellte sicher, dass spezielle Fehlverhalten der Nominalfunktion (z.B. Abbiegen, Geradeausfahren) für die oder den Sicherheitsfahrer:in kontrollierbar bleiben und nicht zu der Verletzung eines Sicherheitsziels führen. Das Überschreiten der spezifizierten Höchstgeschwindigkeit oder eine zu hohe Lenkwinkelgeschwindigkeit führten unmittelbar zur Deaktivierung der Nominalfunktion und erlaubten es der oder dem Sicherheitsfahrer:in, die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Die Sicherheitsfahrer:innen, Busfahrer:innen mit Zusatzausbildung für autonome Fahrzeuge, wurden speziell für diese Tätigkeit trainiert und ausgebildet.

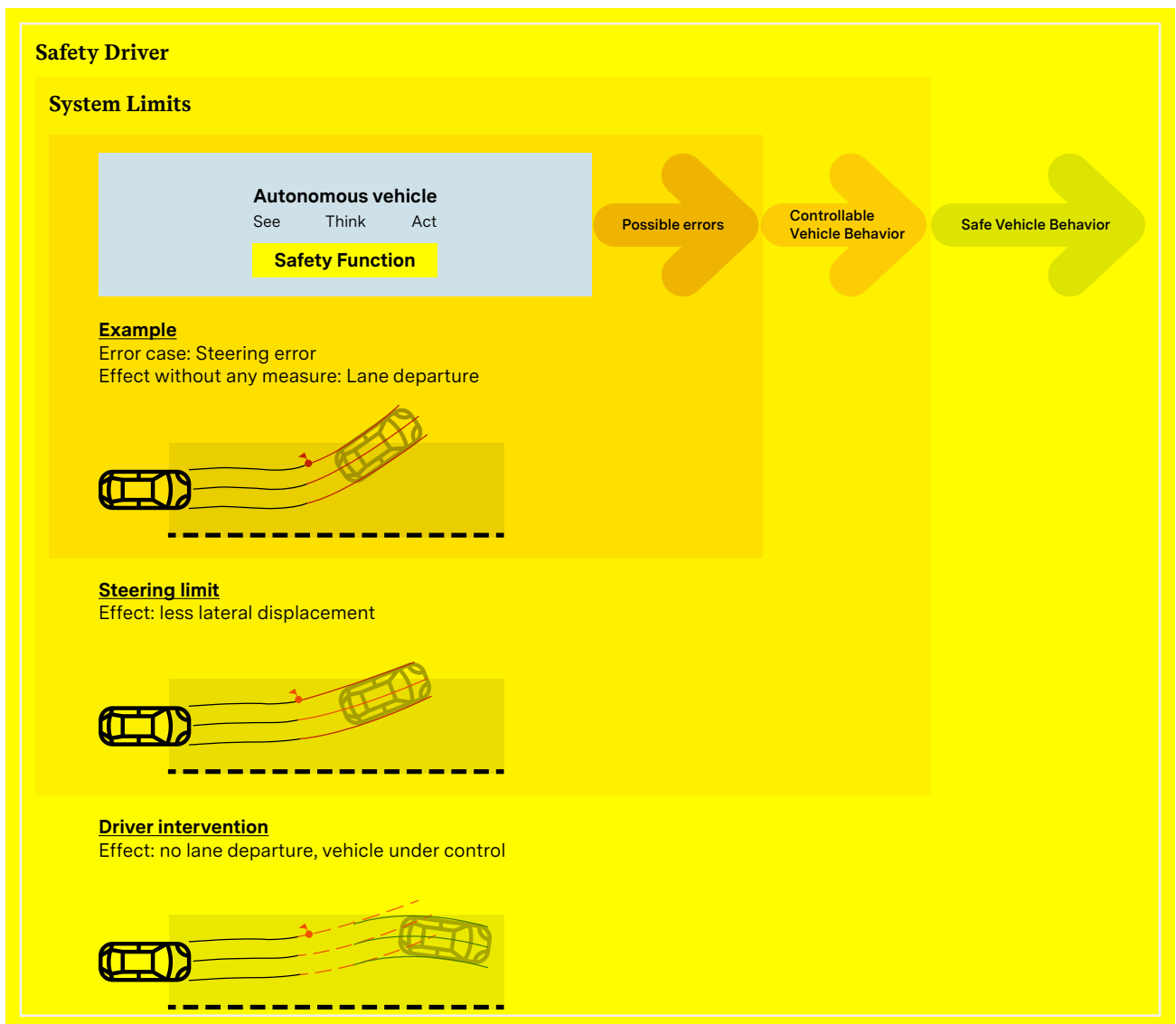


Abbildung 8: SDI-System

Das gewählte Sicherheitskonzept hat sich als zuverlässig und leistungsstark bewährt. Das Zusammenspiel der Softwarefunktionen im SDI-System als auch die Übersteuerbarkeit des Systems durch die oder den Sicherheitsfahrer:in trugen dazu bei, dass der Fahrbetrieb zu jederzeit sicher durchgeführt und von der Bevölkerung als neues Verkehrsmittel akzeptiert wurde.

Die Sicherheitsfunktionen wurden zunächst defensiv parametrisiert. Mit fortlaufendem Betrieb und kontinuierlich anwachsenden Erkenntnis zum Systemverhalten, konnten die Einschränkungen reduziert und damit die AD-Systemverfügbarkeit, beispielsweise das AD-Fahren bei Regen und Nebel, erhöht werden. Der Sicherheitsansatz war ein wesentlicher Erfolgsfaktor in diesem Projekt.

Hochauflösende Karte (HD-Karte)

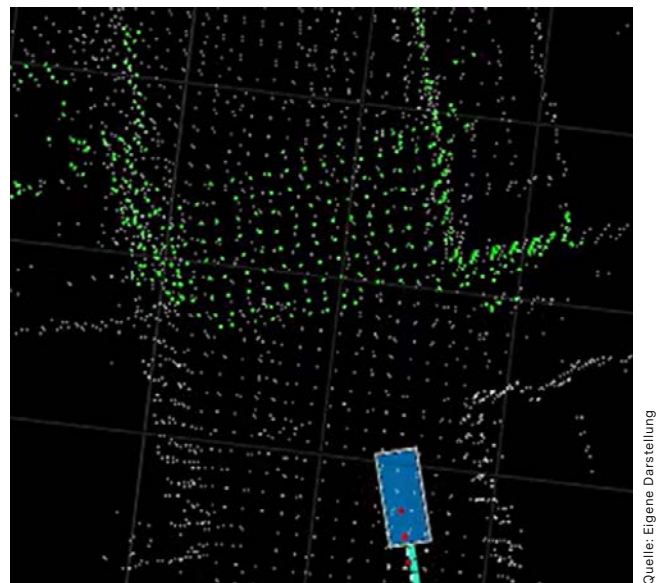
Für den Betrieb der autonomen Fahrzeuge war die hochauflösende, digitale Karte unverzichtbar. Sie lieferte Zusatzinformationen, die eine intelligente und sichere Routenführung ermöglichte. HD-Karten spielten eine Schlüsselrolle bei der Eigenlokalisierung des Fahrzeugs und unterstützten die vorausschauende Routenplanung, indem sie potenzielle Hindernisse wie Baustellen und statische Objekte am Fahrbahnrand kenntlich machten. AD-Fahrzeuge konnten Manöver dadurch effizient vorbereiten und umsetzen, was die Sicherheit für Passagier:innen und andere Verkehrsteilnehmer:innen erhöhte. Zudem ermöglichten HD-Karten die Simulation bestimmter Fahrszenarien, wodurch die Fähigkeiten und die Sicherheit des Fahrsystems vor dem Einsatz im öffentlichen Verkehr optimiert werden konnten.

Im Projekt RABus wurden verschiedene Kartenlayer gezielt genutzt. Semantische Layer dienten der Pfadplanung, der sensor-spezifische Layer leistete seinen Beitrag für die hochgenaue Lokalisierung.

Shuttle Eigenlokalisierung

Für ein autonomes Shuttle ist es essenziell, zu jedem Zeitpunkt seine genaue Position zu kennen. Die Ermittlung der eigenen Position ist die zentrale Aufgabe der Funktion „Lokalisierung“. Eine verlässliche und präzise Lokalisierung ist entscheidend, um sicher und effizient navigieren zu können. Für die Lokalisierung wurde eine Kombination aus Satellitennavigation, Lidar, Radar und Fahrzeugsignalen gewählt, um eine präzise Standortbestimmung zu gewährleisten.

Das „Global Navigation Satellite System“ (GNSS) bietet globale Positionsbestimmung über Satelliten und war ein wesentlicher Bestandteil der RABus-Lokalisierung.



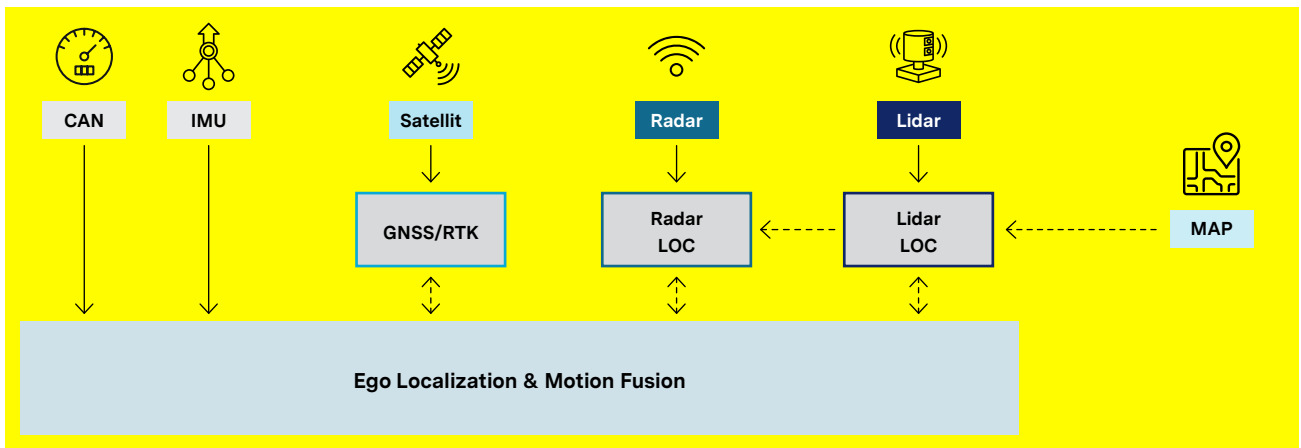
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 9: Lokalisierung: Vorab erstellte Karte (weiß) und aktuelle Lidarmessungen (grün). Ermittelte Fahrzeugposition wird als blauer Kasten dargestellt

Es ermöglichte die Bestimmung der absoluten Position des Fahrzeugs auf der Erdoberfläche. Allerdings war die Genauigkeit in städtischen Umgebungen aufgrund von Signalabschattungen und Mehrwegeausbreitung beeinträchtigt. Mit Lidar war ein aktives Sensorsystem beteiligt, das die Umgebung mit Laserstrahlen abtastet und die Entfernung zu Objekten anhand der Laufzeit der reflektierten Signale misst. Es erzeugte hochaufgelöste 3D-Punktwolken der Umgebung. Im Vorfeld wurde dafür mit dem Lidarsensor eine detaillierte digitale Karte der Strecke erstellt. Im laufenden Betrieb wurden die aktuelle Messung des Lidar mit der Referenz-Lidarkarte abgeglichen (siehe Abbildung 9).

Die Kombination der verschiedenen Sensortechnologien in einer Fusionskomponente (Abbildung 10) ermöglichte eine durchgehend robuste und genaue Lokalisierung auf der Strecke. Durch ein mehrfach redundantes System mit komplementären Stärken und Schwächen konnte das Shuttle seine Position und seine Orientierung auf wenige Zentimeter genau bestimmen. Ergänzt wurde die Fusion durch die Einbeziehung von Fahrzeugsignalen (wie Radgeschwindigkeiten) und einer inertialen Messeinheit, die noch mal unabhängig Beschleunigung und Drehneigung des Fahrzeugs lieferte.

Die eingesetzte Lokalisierungstechnologie hat sich für den Einsatz im Mischverkehr bewährt.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 10: RABus Fahrzeuglokalisierung von ZF

Die Magnetlokalisierung, die initial für das Projekt als Lokalisierungstechnologie vorgesehen war, kam nicht zum Einsatz. Nach Abstimmungen auf kommunaler Ebene haben sich die Konsortialpartner bewusst für diesen Schritt entschieden. Der Wegfall der Magnete konnte mit den oben genannten Technologien kompensiert werden und hatte keine negative Auswirkung auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung.

Mission – der autonome Fahrauftrag

Die Mission gibt grundlegende Informationen über die zu befahrende Route wie Start und Ende, Haltestellenpositionen und Anmeldepunkte für Lichtsignalanlagen vor. Die Missionen werden auf präzise HD-Karten projiziert, die alle geometrischen Informationen der Spur sowie Spurmarkierungen, Beschilderung und Lichtsignalanlagen enthalten. Zusätzlich beinhaltet die Mission einen streckenelementabhängigen Manöverraum, der u. a. ein

laterales Ausweichen oder ein Umfahren von statischen Hindernissen perspektivisch ermöglicht.

Für das Projekt entstanden unterschiedliche Konfigurationen an Fahraufträgen (Missionen), um sowohl die sich verändernden Betriebskonfigurationen (Streckenverläufe, Fahrzeiten, Taktung) als auch die fortlaufende Systemweiterentwicklung entlang der Strecken (u. a. Kommunikation mit Ampeln, Geschwindigkeitsanpassung) im Betrieb abzubilden.

Fahrstrategie

Um die hohen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, die an den Betrieb eines ATS gestellt werden, galt es ein mehrdimensionales Konzept zu entwickeln, das die Themen Mission und Lokalisierung, Umfeldwahrnehmung und Fahrzeugsteuerung sowie ein Eingriffskonzept für die oder den Sicherheitsfahrer:in umfasst.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 11: Mehrdimensionales Konzept zur Fahrstrategie

Für die Fahrstrategie erfolgt die permanente Überwachung der dynamischen Umgebung, also der Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer:innen oder plötzlich auftretender Objekte und Hindernisse. Die Mission besteht aus einzelnen Teilelementen, wie dem Folgen einer Straße, der Bewältigung von Kreuzungen und Kreisverkehren, der An- und Abfahrt von Bushaltestellen oder der Kommunikation mit Ampeln. Dieser modulare Aufbau ermöglicht bei Bedarf eine flexible Anpassung der Mission. Aus den Missionselementen, die mit dem Fahrplan und Geschwindigkeitsbegrenzungen vereint werden, leitet sich die zweigliedrige Fahrstrategie ab: Der erste Teil berechnet die primäre Fahrzeugansteuerung – also die Beschleunigung, das Bremsen und/oder das Lenken. Der zweite Teil der Software, der „Mission Controller“, übernimmt die sekundäre Fahrzeugsteuerung entsprechend dem Missionselement, in dem sich das Fahrzeug gerade befindet – z.B. das Setzen des Blinkers, die Türsteuerung oder das sogenannte „Kneeling“, also die einseitige Absenkung des Fahrzeugs zum erleichterten Ein- und Aussteigen an Bushaltestellen. Bevor die jeweiligen Signale für die Steuerung des Fahrzeugs weitergeleitet werden, werden sie durch eine Software überprüft. Treten hier oder bei der allgemeinen Überwachung des Fahrzeugstatus Unstimmigkeiten auf, wird die Fahraufgabe an die oder den Sicherheitsfahrer:in übergeben. Die Anwesenheit der Sicherheitsfahrer:innen über die gesamte Projektlaufzeit hinweg gewährleistete eine permanente Überwachung und die gesetzlich vorgeschriebene Übersteuerbarkeit des autonomen Systems.

Im Folgenden richtet sich der Fokus auf das Zusammenfügen (Integrieren) der Elemente zu einem Gesamtsystem „AD-Shuttle“.

3.1.3 AD-Shuttle Inbetriebnahme

In der Shuttle-Inbetriebnahme und AD-Software-Integration liefen die Ergebnisse von allen am Entwicklungsprozess beteiligter Domänen zusammen. Zur Orchestrierung der Arbeitsprodukte aus den verschiedenen Bereichen wurde im RABus Projekt ein Integrationsstufenplan (I-Stufenplan) erstellt und angewendet.

Eine Integrationsstufe definierte dabei sowohl den Liefertermin als auch den Umfang der zu liefernden Artefakte einer Domäne unter Einhaltung der abgestimmten Kommunikationsmatrix. Während die Kommunikationsmatrix verbindliche Anforderungen auf Signalebene an einzelne Steuergeräte definierte, war diese gleichzeitig ebenso maßgebend für den in der I-Stufe definierten Baustand der E/E-Architektur.

Bevor die Artefakte der einzelnen Domänen in das Fahrzeug integriert werden konnten, wurden diese in einer Simulationsumgebung, beispielsweise an einem Software-in-the-Loop (SiL) oder einem Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfplatz, getestet. Erst nach Abschluss dieser Testumfänge erfolgte die endgültige Integration in das Fahrzeug. Im Integrationsprozess wurden schließlich die gelieferten Artefakte zu einem Gesamtsystem zusammengeführt und die domänenspezifische Grundfunktionalität verifiziert. Im Anschluss erfolgte die ganzheitliche Verifizierung und Validierung des in den I-Stufen definierten Funktionsstandes von Fahrzeug und AD-System auf Teststrecke und öffentlicher Straße.

Integration des AD-Systems in das Basisfahrzeug

Im RABus-Projekt wurden ab Anfang 2024 die Shuttles schrittweise in Betrieb genommen. Für die Shuttles war eine intensive Kooperation mit dem technischen Dienst und Behörden notwendig, um die Anforderungen hinsichtlich Zulassung und Betriebssicherheit zu erfüllen. Darüber hinaus umfasste die Inbetriebnahme zusätzlich:

- Verifikation der Schnittstellen: Alle Signale von Fahrzeug zu AD-System (z.B. Raddrehzahlen, Geschwindigkeit) wurden überprüft. CAN-Gateways sorgten dafür, dass nur die gewünschten Nachrichten sicher übertragen wurden.
- Inbetriebnahme des Sicherheitskonzepts: Überprüfung der Mechanismen, zur Übersteuerbarkeit des AD-Systems durch die oder den Sicherheitsfahrer:in.
- Inbetriebnahme des AD-Systems: Inbetriebnahme von Steuergeräten, PCs und Sensoren sowie die Netzwerkkonfiguration und Softwareinstallation.

Durch den Integrationsprozess konnte sichergestellt werden, dass die AD-Fahrzeuge und die darin verbauten Komponenten funktionsfähig sind und die der I-Stufe entsprechenden SW-Stände besitzen. Zudem wurde durch einen ersten AD-Integrationstest die generelle Funktionsfähigkeit des AD-Fahrzeugs nachgewiesen. Dies ließ jedoch noch keinen Rückschluss auf die Leistungsfähigkeit oder die Systemgrenzen der einzelnen AD-Funktionen zu. Diese und auch die freigaberelevanten Nachweise wurden im nächsten Schritt auf Teststrecke und öffentlicher Straße verifiziert und validiert.

3.1.4 Validierung und Verifizierung von Sicherheitskonzept und AD-Fahrzeug

Die Teststrategie definierte zwei übergeordnete Ziele für die Validierung des RABus-AD-Shuttles. Erstens sollte die Fahrzeugsicherheit nachgewiesen werden, d.h., ob alle implementierten Funktionen und Maßnahmen des funktionalen Sicherheitskonzepts wie vorgesehen funktionieren und den relevanten Standards entsprechen. Das zweite Ziel sollte die Funktionalität des AD-Systems nachweisen, d.h., ob das AD-System die Fahraufgabe in der ODD gemäß den spezifizierten funktionalen Anforderungen erfüllt.

Absicherung SDI-System

Ziel der Tests war es, die korrekte Abschaltung und die Kontrollierbarkeit während des Abschaltvorgangs des AD-Systems durch das SDI-System zu überprüfen, für den Fall, dass Sicherheitsgrenzen auf Systemebene während des Fahrzeugbetriebs überschritten werden. Bestandteile der Tests waren der elektrische SDI-Integrationstest, in dem die generelle Funktionsfähigkeit der SDI-Komponenten überprüft wurde, der SDI-Funktionstest, in dem die Funktionsfähigkeit des gesamten SDI-Systems und aller Abschalt- und Übersteuerungsmöglichkeiten überprüft wurden, und die SDI-Kontrollierbarkeitstests. Hier wurde mittels Einspeisung eines unzulässigen Manövers überprüft, ob die oder der Sicher-

heitsfahrer:in in der Lage ist, das Fahrzeug zu jeder Zeit zu kontrollieren und in der Fahrspur zu halten. Dies war ein wichtiger Bestandteil der Absicherung und Voraussetzung für einen unfallfreien Betrieb auf der öffentlichen Straße.

Absicherung AD-System

Zur Absicherung des AD-Systems wurde ebenfalls ein mehrstufiger Ansatz gewählt, um die Sicherheit und Funktionsfähigkeit von Fahrzeug, AD-System und dessen Robustheit zu gewährleisten.

Für die Absicherung der AD-Funktionen und deren Performance entstand ein Testkatalog (Tabelle 2) basierend auf dem Europäischen Neuwagen-Bewertungsprogramm (European New Car Assessment Program, Euro NCAP), ISO22737, AFGBV und ODD-spezifischen Anforderungen, um die Fähigkeit des Systems abzusichern und die grundlegende Sicherheit des AD-Systems zu gewährleisten. Der szenariobasierte Testkatalog wurde dabei kontinuierlich an die Weiterentwicklung des AD-Systems angepasst.

Der Testkatalog wurde zunächst in der Simulationsumgebung getestet, wobei auch hier wieder verschiedene Ansätze wie SiL und HiL zum Einsatz gekommen sind. Erst im Anschluss wurden die Szenarien ausführlich auf der Teststrecke überprüft und durch Robustheitstests ergänzt.

Testfall	Quelle
False Postive Test - Static Child (6-7) - ISO-22737 - Stream1	ISO22737
False Postive Test - Adult - ISO-22737-Stream1	ISO22737
False Postive Test - Dynamic Adult - Following scenario - ISO-22737-Stream1	ISO22737
False Postive Test - Dynamic Child (6-7) - Following scenario - ISO-22737-Stream1	ISO22737
Driveable area test (Unblocked) - ISO-22737-Stream1	ISO22737
Driveable area test (Blocked)- Positive - ISO-22737- Stream1	ISO22737
Driveable area test (Blocked)- Negative- ISO-22737-Stream1	ISO22737
Child (6-7) Pedestrian- Situation C - ISO-22737- Stream1	ISO22737
Cyclist (6-7) - Situation C - ISO-22737-Stream1	ISO22737
Adult Pedestrian - Situation C - ISO-22737-Stream1	ISO22737
Cyclist (Adult) - Situation C - ISO-22737-Stream1	ISO22737

Tabelle 2: Auszug aus Testkatalog auf Basis ISO-22737

Die Absicherung sollte, wie in der Teststrategie beschrieben, zwei Hauptziele erfüllen:

1. Fahrzeugsicherheit

- Ein sicherer Betrieb des AD-Fahrzeugs auf öffentlicher Straße ist zu jeder Zeit gewährleistet.
- Das Sicherheitskonzept funktioniert und die oder der Sicherheitsfahrer:in ist zu jeder Zeit in der Lage das Fahrzeug innerhalb seiner Fahrspur zu halten.

2. AD-Funktionalität: Die AD-Funktionen und deren Grenzen wurden überprüft und ihre Leistungsfähigkeit entspricht den Anforderungen der ODD.

Zudem dienen die Testnachweise als Beleg für die interne und externe Freigabe des operativen Betriebs auf öffentlichen Straßen. Nach Abschluss der Testumfänge und erfolgter Freigabe erfolgte die Applikation auf der ODD als letzter Schritt der Inbetriebnahme und Absicherung.

Applikation auf der ODD

Die Inbetriebnahme der Strecken wurde in mehreren inkrementellen Schritten durchgeführt.

Ausgangspunkt ist die hochgenaue Karte, die Informationen zu den Fahrspuren, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Vorfahrtsregeln enthält. Daraus wurde unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen ein Korridor abgeleitet, innerhalb dem sich das Shuttle bewegen darf. Der Korridor wurde mit Haltepunkten angereichert, die Haltestellen oder Haltepunkte vor Zebrastreifen, Kreuzungen oder ähnlichem beschrieben.

Mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens wurde ein Pfad erzeugt, der folgende Bedingungen erfüllte:

- Der optimierte Pfad liegt vollständig innerhalb des definierten Korridors
- Die Geschwindigkeitsinformationen des optimierten Pfads liegen innerhalb der vorgegebenen Geschwindigkeitsbegrenzungen
- Der Pfad ist komfortabel befahrbar

Um diesen initialen Pfad zu testen, wurde er im ersten Schritt im Open-Loop Betrieb abgefahren. Erst danach erfolgte die Freigabe für den Closed-Loop-Betrieb in dem die letzten Feinabstimmungen durchgeführt wurden. Es galt den Pfad dahingehend zu optimieren, die Lenkeingriffe zu vermindern und das Fahrverhalten analog von menschlichen Fahrer:innen anzupassen, um den bestmöglichen Fahrkomfort zu erreichen. Besonderes Augenmerk lag auf Kreuzungen, Kreisverkehren, Bushaltestellen und seitliche Parkbuchten.

3.1.5 Übergreifende Beschreibung der ATS-Elemente

Der Betrieb autonomer Shuttlebusse im ÖPNV erfordert das Zusammenspiel verschiedener Systeme, um eine zuverlässige, sichere und komfortable Beförderung von Personen nach gängigen ÖPNV-Standards zu ermöglichen. Die dafür erforderlichen Elemente wurden für das Projekt von den beteiligten Projektpartnern entwickelt bzw. beschafft, installiert und in Betrieb genommen. Ein Auszug der von ZF entwickelten Umfänge ist in Abbildung 12 dargestellt und in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Sämtliche Schnittstellendefinitionen sowie die Inbetriebnahme und die Nutzung der Systeme erfolgten in enger Abstimmung zwischen den beteiligten Projektpartnern.



Abbildung 12: Autonomes Transport System (ATS) – RABus

Quelle: Eigene Darstellung

Aufbau einer Mobility-as-a-Service-Datenbank (MaaS-Datenbank)

Im Rahmen des Projekts RABus wurde eine Datenbank aufgebaut, mit der Rückschlüsse auf das Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugzustand darstellbar waren. Während des Betriebs wurden die Daten in den Fahrzeugen aufgezeichnet, aufbereitet und anschließend in die Datenbank eingespeist.

Um eine effiziente und mit der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) konforme Handhabung der Daten zu gewährleisten, wurde das Daten-Lifecycle-Konzept entwickelt.

Datenrecording (Datenerhebung)

Während der Datenerhebungsphase (Data Acquisition) wurden Sensordaten innerhalb eines Fahrzeugs gesammelt. Je nach Zweck der Messkampagne stand für diese eine Aufbewahrungsrichtlinie zur Verfügung.

Transport

Die Daten wurden auf Festplatten in den Fahrzeugen zwischengespeichert und zu einem Datenübertragungspunkt transportiert. Der Datentransport erfolgte verschlüsselt, um die DSGVO-Anforderungen zu erfüllen. Abschließend erfolgte der Übertrag der Daten in die Infrastruktur der ZF.

Dateneingabe (Datenupload)

Sobald die Festplatten mit den Daten an die Kopierstation angeschlossen waren, nahm ein vollautomatisierter Prozess die Daten in ein Storage-System auf. Das Ziel für das Copytool war ein „Daten-Posteingang“. Daten

im Posteingang waren noch nicht für die Entwicklung freigegeben. Das Copytool stellte die Vollständigkeit der Daten nach einem erfolgreichen Prozess sicher und löschte die Daten von den Festplatten. Nach dem Kopiervorgang folgte die Datenverifikation.

Datenspeicherung

Zur Speicherung der großen Menge an Messdaten wurde ein hochperformantes Speichersystem verwendet. Der Storage wurde von der ZF IT im Rechenzentrum in Friedrichshafen gehostet.

Datenbackup

Um Datenverlusten auf dem Speichermedium vorzubeugen, wurde seitens der ZF IT der Backup-Service umgesetzt. In regelmäßigen Abständen wurden alle neuen oder veränderten Dateien vom Produktivsystem auf ein „Data-Recovery-System“ synchronisiert.

Datenlöschung

Ein Prozess stellte sicher, dass Daten automatisch gelöscht wurden, nachdem der Verwendungszweck erfüllt war. Dies musste von den jeweiligen Anforderern bestätigt werden. Ein möglicher Verwendungszweck konnte beispielsweise das Nachtrainieren der Objekterkennung sein. Wurde der Algorithmus nachtrainiert, und gab es keine weiteren Vorschriften bzgl. der Datenhaltung wie beispielsweise durch die Produkthaftung, war der Verwendungszweck erloschen und die Daten mussten entweder anonymisiert oder gelöscht werden.

Das Daten-Lifecycle-Konzept und die lokale Datenhaltung haben sich für den Einsatzzweck im Projekt

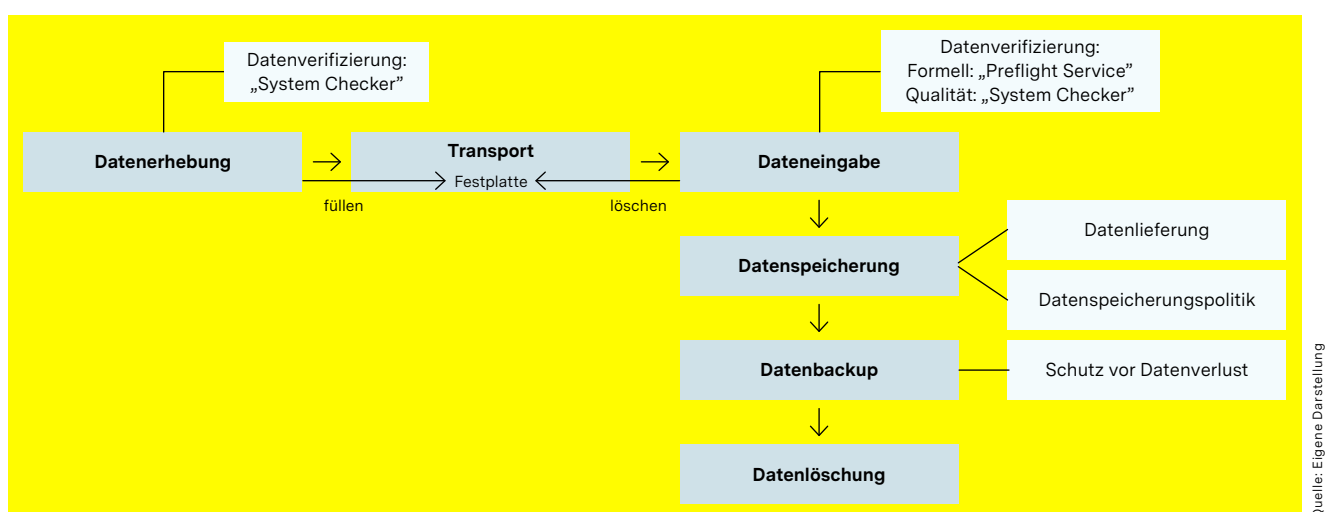


Abbildung 13: Daten-Lifecycle-Konzept

bewährt. Um jedoch den Herausforderungen in der Zukunft im Zusammenhang mit der Datenhaltung und Datennutzung zu begegnen, fanden im Projekt tiefgreifende Untersuchungen hinsichtlich neuer Technologien statt. Im Wesentlichen die Verlagerung der Daten von betriebseigenen Servern hin zu Cloud-Anbietern.

Zukünftige Herausforderungen im Rahmen der Datenhaltung

Über die Jahre und unter Berücksichtigung mehrerer Entwicklungsstufen werden die gesammelten und zu prozessierenden Datenmengen stetig ansteigen. Die Daten der abgeschlossenen Projekte müssen aus Gründen der Produkthaftung weiterhin vorgehalten werden, neue Strecken und Applikationen sorgen für einen stetig wachsenden Datenbestand. Diese Tatsache wird insbesondere die lokalen IT-Infrastrukturen belasten und führt ggf. zu sehr hohen Kosten. Um dem zu begegnen, wurden Lösungen betrachtet, um die Daten auf kostengünstige Speicher zu verteilen, sie zu archivieren oder zwischenzuspeichern.

Online/Offline Datenhaltung

Bei den zu verarbeitenden Daten kann man aktuell zwischen zwei verschiedenen Anwendungsfällen unterscheiden. Daten, die lokal zum Betreiben der HiL-Server für Validierungszwecke genutzt werden, müssen aller Voraussicht nach weiterhin lokal (offline) gehalten werden, da die Datenraten von den Cloud-Providern zu den HiL-Servern nicht ausreichen sind. HiL-Server sind Nachbildungen der realen Umgebung des Zielsystems und werden entwicklungsbegleitend eingesetzt. Für Sensordaten, die unregelmäßiger genutzt werden, oder die aufgrund von Produkthaftungsreglementierungen über Jahre und Jahrzehnte gehalten werden müssen, kann ein Onlinespeicher (Cloud) als adäquate Lösung eingesetzt werden. Insbesondere für den Anwendungsfall „Onlinespeicher“ sind Konzepte erarbeitet worden, damit der Wechsel von lokaler zu hybrider Datenhaltung, also das Halten der Daten sowohl offline als auch online, gelingt.

Lebenszyklusmodelle, Prozessierungsumgebungen und Datensicherheit sind nur einige Aspekte, die hier zwingend zu berücksichtigen sind. So muss bereits vor einer Datenaufzeichnung feststehen, für welchen Verwendungszweck Daten aufgezeichnet werden, wo diese Daten initial gespeichert werden und wie der Lebenszyklus der Daten und die Aufbewahrungsfristen definiert sind.

Ein mögliches Konzept ist in Abbildung 14 dargestellt. Der Anforderer (Kunde), beispielsweise ein Algorithmen-Entwickler, bestellt Sensordaten basierend auf seinem

Entwicklungsziel und lässt sie nach der Ermittlung des Verwendungszwecks aufzeichnen. Der Verwendungszweck wird direkt an Datenaufbewahrungsrichtlinien und/oder Produkthaftungsrichtlinien geknüpft. Die aufgezeichneten Daten werden auf dem Offline- oder Onlinespeicher vorgehalten, bis der Kunde die Daten initial prozessiert hat. Danach können sie je nach Verwendungszweck in unterschiedlichen Archiven landen: in Archiven, bei denen ein regelmäßiger Zugriff auf die Daten problemlos möglich ist, oder in Archiven, bei denen das Wiederherstellen der Daten mehrere Tage in Anspruch nehmen kann (z. B. Magnetbänder).

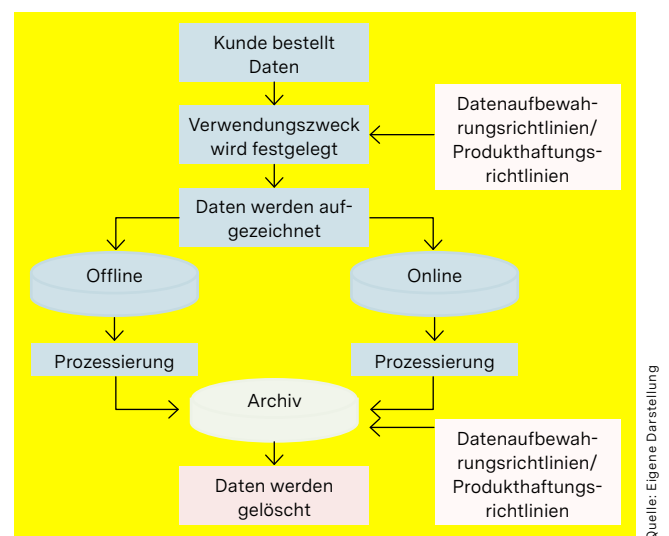


Abbildung 14: Datenhaltungskonzept

Sind die Daten für die Produkthaftung relevant, werden sie entsprechend lange vorgehalten. Wurde der Verwendungszweck erfüllt, müssen die Daten, insbesondere diejenigen, die personenrelevante Informationen wie beispielsweise Kameradaten beinhalten, aufgrund DSGVO-Relevanz, im Anschluss gelöscht werden.

Werden die Daten online in der Cloud gespeichert, sollte auch die Prozessierung online erfolgen. Eine Offline-Prozessierung kann nur in Einzelfällen Sinn machen, beispielsweise wenn es wenige Daten sind oder wenn man von einer einmaligen Prozessierung ausgehen kann. Für die Cloud-Datenhaltung sind Konzepte zur Cloud-Prozessierung untersucht worden.

Cloud-Prozessierung

Für die Verarbeitung von Daten in der Cloud stehen verschiedene Methoden zur Anbindung des Speichers an die Verarbeitungsumgebung (z. B. Server, virtuelle Maschinen) zur Verfügung. Im Rahmen des Projekts

wurden drei Ansätze in Zusammenarbeit mit einem Cloud-Anbieter hinsichtlich Leistung, Kosten, Flexibilität und Zugriffssicherheit untersucht:

1. Dateisystemtreiber mit REST-Kommunikation (z. B. WebDAV, S3FS)

Der Cloud-Speicher wird über einen Dateisystemtreiber eingebunden, wobei die Kommunikation über das REST-Protokoll erfolgt. Die Daten erscheinen wie lokale Dateien und Verzeichnisse, was die Integration in bestehende Anwendungen erleichtert.

- Vorteile: Einfache Nutzung, stabile Verbindung, geringe Kosten.
- Nachteile: Deutlich längere Laufzeiten (mindestens 3x langsamer als Offline-Verarbeitung auf ZF-Systemen), insbesondere bei CPU-lastigen Prozessen.

2. Dateisystemtreiber mit API-Kommunikation (z. B. AWS SDK, Azure Blob Storage API)

Hier erfolgt die Einbindung des Speichers ebenfalls über einen Treiber, jedoch wird die Datenübertragung über eine Programmierschnittstelle (API) gesteuert. Dies erlaubt eine gezieltere Steuerung des Datenzugriffs.

- Beispiel: Zugriff auf Objekte in einem Amazon S3 Bucket über das AWS SDK für Python (zum Beispiel boto3) oder auf Azure Blob Storage über die Azure Storage REST API.
- Vorteile: Feingranulare Steuerung, Automatisierung, bessere Kontrolle über Datenflüsse.
- Nachteile: Höhere Komplexität in der Implementierung, längere Laufzeiten (5–6x langsamer als Offline), insbesondere bei vielen kleinen API-Aufrufen ohne Caching.

3. Software-Defined Storage (SDS)

SDS entkoppelt Speicherfunktionen von der zugrunde liegenden Hardware. Die Verwaltung erfolgt vollständig über Software, was eine hohe Flexibilität bei der Wahl oder Kombination von Cloud- und On-Premise-Speichern ermöglicht.

- Vorteile: Anbieterunabhängigkeit, einfache Integration hybrider Speicherlösungen.
- Nachteile: Höhere Komplexität in der Verwaltung, zusätzliche Lizenz- oder Infrastrukturkosten.
- Bewertung: Aufgrund der Kostenstruktur wurde dieser Ansatz im Projekt nicht weiterverfolgt.

Fazit

Alle untersuchten Ansätze sind technisch realisierbar, weisen jedoch im Vergleich zur lokalen Verarbeitung teils erhebliche Performance-Nachteile auf. REST-basierte Lösungen wie WebDAV bieten eine einfache Integration, während SDS langfristig mehr Flexibilität verspricht – allerdings zu höheren Kosten und mit größerem Verwaltungsaufwand. Die Verwendung von Anbieterspezifischen APIs oder SDKs binden den Service erwartungsgemäß an einen Anbieter.

Für welche Lösung man sich zukünftig entscheidet, hängt primär von den Kosten und den Zugriffsberechtigungen ab. Eine schlechte Performanz ist prinzipiell eher zu ignorieren, als beispielsweise eine fehlende Logik bei den Zugriffsberechtigungen oder untragbare Kosten.

Für das RABus Projekt erfolgte die Datenspeicherung und Datenverarbeitung ausschließlich auf betriebs-eigenen Servern der ZF. Die entwickelten Services sind prinzipiell Cloud-fähig, wurden aufgrund Performance, Kosten und Zugriffsberechtigung jedoch nicht final in einer externen Cloud umgesetzt. Mit ansteigenden Datenmengen und dem Betrieb der Fahrzeuge an unterschiedlichen Standorten sind Cloudlösungen unumgänglich.

Ein Teilumfang der Services, die auf den ZF-Servern laufen und für das Projekt entwickelt und genutzt wurden, sind in folgendem Abschnitt erklärt.

Services und Maintenance

Um den effizienten Zugriff und die unmittelbare Nutzung der aufgezeichneten Fahrzeugmessdaten für die projekt-beteiligten Personen zu ermöglichen, galt es innerhalb der IT-Infrastruktur Services zu entwickeln und diese kontinuierlich zu überwachen und zu aktualisieren.

Als Beispiel kann hier die Data-Ingest-Toolkette genannt werden. Die Data-Ingest-Toolkette besteht aus einer Copy-Station, mit deren Hilfe die Messdaten aus dem Fahrzeug in die IT-Infrastruktur hochgeladen werden und verschiedenen Services zur Prozessierung der Daten. Die verschiedenen Services führen unterschiedliche Tests bzgl. der Qualität und Vollständigkeit der Daten durch. Anschließend stehen die Daten unmittelbar zur Visualisierung und Auswertung zur Verfügung.

Das entwickelte Auswertetools, u.a. der Sanity-Checker, bieten umfangreiche Möglichkeiten zur Visualisierung und Aggregation der Daten, so dass sowohl zusammen-gefasste Statistiken über den gesamten Zeitraum als

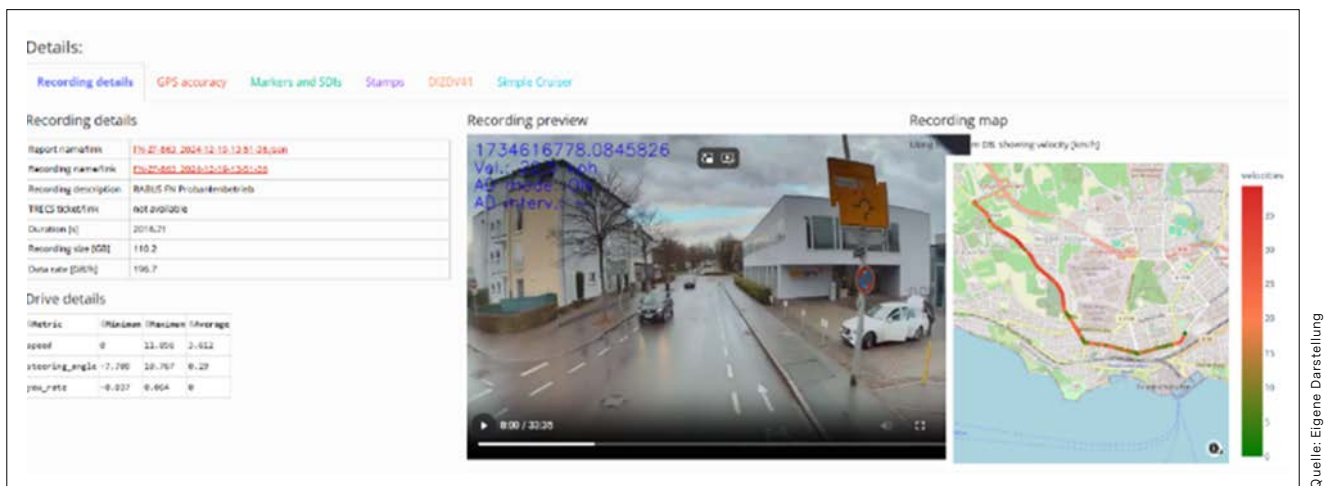


Abbildung 15: Detailansichten zu einem Datensatz aus der MaaS-Datenbank

auch detaillierte Werte und Sensor-Streams für einzelne Tage zur Verfügung standen. Eine benutzerfreundliche Oberfläche ermöglichte den Entwickler:innen mittels Filterfunktion und domainspezifischer Detailseiten einen effizienten Datenzugriff.

Die entwickelten Services, als auch deren Wartung und Pflege haben sich zuverlässig und nutzerfreundlich im Projekt bewährt. So konnten die Entwickler:innen mit dem Sanity-Checker bereits kurz nach der Aufzeichnung die Fahrdaten analysieren und Erkenntnisse zum Systemverhalten ableiten. Die Anforderungen aus der Erprobungsgenehmigung durch das KBA, die AD-Fahrten in Form von Fahrberichten zu dokumentieren, ließen sich ebenso ausleiten, wie Kennwerte zur Systemperformance.

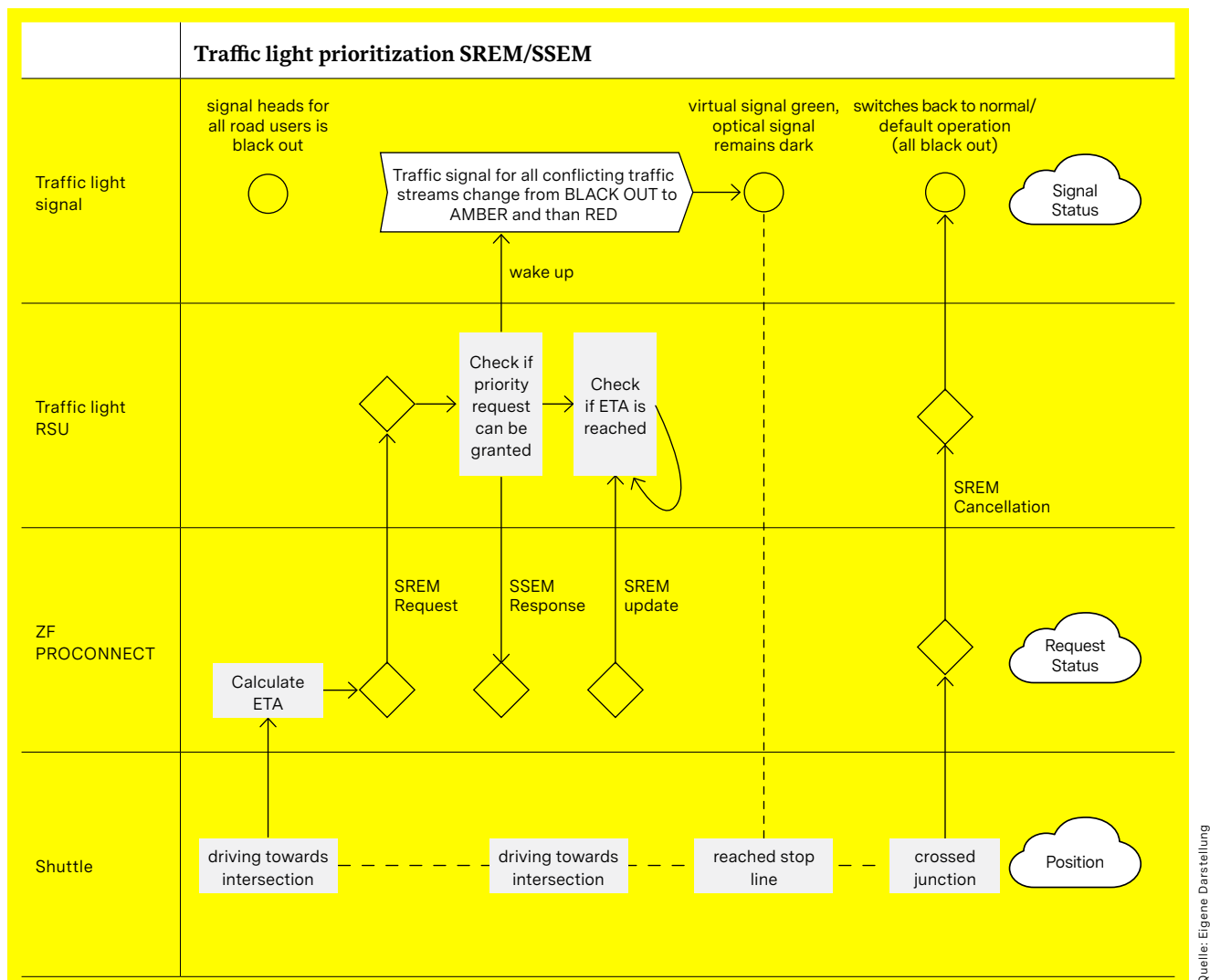
Vehicle-to-Infrastruktur-Kommunikation

Ein wichtiger Baustein für den reibungslosen Betrieb autonomer Fahrzeuge, perspektivisch ohne Fahrpersonal an Bord, ist die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmer:innen und der Infrastruktur. Mit Hilfe der zusätzlichen Informationen, beispielsweise zu Verkehrsfluss und Hindernisse im Betriebsbereich, wird das Fahrzeug noch sicherer und effizienter seine Fahraufgabe absolvieren können. Der Schwerpunkt im Projekt RABus lag auf der Kommunikation zwischen vernetzten Fahrzeugen und Infrastruktur Vehicle-to-Infrastruktur (V2I), für den Anwendungsfall „Lichtsignalanlage“. Die Entwicklung umfasste jene Funktionen und deren Erprobung, die für den Betrieb erforderlich waren. Die Kommunikation erfolgte auf Basis des Funkstandards IEEE 802.11p (ITS-G5, ITS = Intelligent Transport System), welcher die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ermöglichte. Der Standard ist für kurze Latenzzeiten und hohe Zuverlässigkeit ausgelegt.

In den Shuttles wurde dafür die Kommunikationseinheit „ProConnect“ von ZF installiert und mit den erforderlichen Funktion ausgestattet. Im Projekt RABus wurden folgende standardisierte Nachrichtentypen eingesetzt:

- **SPaTEM (Signal Phase and Timing Extended Message):** überträgt Informationen über den aktuellen und prognostizierten Signalstatus der Lichtsignalanlage.
- **MAPEM (MAP (Topology) Extended Message):** sendet die Kreuzungstopologie an vernetzte Fahrzeuge.
- **SREM (Signal Request Extended Message):** übermittelt eine Anfrage an die Lichtsignalanlage, um eine Grünphase anzufordern (nur in Mannheim).
- **SSEM (Signal Status Extended Message):** beantwortet die Anfrage nach dem Status der Lichtsignalanlage.

Die Nachrichtenübertragung erfolgte über Roadside-ITS-Stations, die als Schnittstelle zwischen Infrastruktur und vernetzten Fahrzeugen dienen. Auf der RABus-Teststrecke in Friedrichshafen erfolgte die Kommunikation mit den bereits vorhandenen Lichtsignalanlagen (LSA) entlang der Route. In Mannheim wurde an vier Knotenpunkten eine Lichtsignalanlage temporär für den Betrieb installiert. Ausgewählt wurden dafür in Mannheim Rot-Dunkel-Anlagen, die direkt vom Shuttle aktiviert wurden, wenn es sich dem Knotenpunkt näherte. Nach dem Passieren des Knotenpunkts erfolgte die Deaktivierung der Ampel durch das Shuttle. Abbildung 16 zeigt die Interaktion zwischen Fahrzeug und Ampelanlage anhand eines Flussdiagramms.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 16: SREM/SSEM Interaktion ATS mit LSA-Infrastruktur im Reallabor Mannheim

Ergänzend dazu wurde die folgende Ablaufsteuerung (siehe Tabelle 3) in der Fahrmission für jede Ampelanlage hinterlegt.

Durchführung	Beschreibung
ATS nähert sich der Kreuzung	ATS-Fahrmission weist die Traffic Light Applikation an, eine SREM mit Prio-Request zu erstellen und zu versenden.
Verarbeitung der Nachrichten	SPaTEM wird nach der gewünschten Signalgruppe gefiltert und an das Fahrsystem weitergeleitet.
	SREM wird erstellt und enthält ID der Kreuzung, Lane Connection ID und Zeit bis zur Kreuzung.
	SSEM der Infrastruktur, ob PRIO gewährt oder abgelehnt wird, wird verarbeitet.
	Traffic Light Applikation sendet stetig aktualisierte SREM-Nachrichten, um die LSA über die Gültigkeit der Priorisierungsanfrage zu informieren.
	Aktualisierung wird von der LSA bestätigt und von der Traffic Light Applikation verarbeitet.
Nach dem Überqueren der Kreuzung	ATS-Fahrmission weist die Traffic Light Applikation an, eine SREM mit EXIT-Request zu erstellen und zu versenden, um die LSA über das Ende der PRIO zu informieren.
	LSA kann in den Normalablauf zurückkehren.

Tabelle 3: V2X Ampelkommunikation Ablaufsteuerung

Die Kommunikationsmethode zeigte auch die Defizite dieser Technologie auf. Die offenen, funkbasierten Übertragungswege, die das System benötigt, bieten ein großes Missbrauchspotenzial. So könnten Angreifer z.B. mit unberechtigten Vorrangfahrten den Verkehrsfluss beeinträchtigen. Um Missbrauch zu vermeiden, wurde ein Vertrauensmodell vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) entwickelt, das die ITS-Stationen (Kommunikationskomponenten in Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur) sowohl authentifiziert als auch deren Nachrichten autorisiert.

Die Shuttles und die Lichtsignalanlagen wurden im Zuge des RABus-Projekts in die Public Key Infrastructure (PKI) der EU RCA L0 aufgenommen. Diese wird von der Atos Group betrieben. Der Verantwortungsbereich für die Lichtsignalanlagen lag bei der Yunex GmbH und der für die autonomen Shuttles bei der ZF Friedrichshafen AG.

Schlussfolgerung

Für höhere Automatisierungslevel bietet V2X (Vehicle-to-Everything) eine entscheidende Ergänzung zu den fahrzeugeigenen Sensoren. Während die verbauten Sensoren am Shuttle die unmittelbare Umgebung erfassen, liefert V2X Informationen über größere Entfernungen. Es ermöglicht, den verkehrstechnischen Zustand der LSA zu kennen und kooperativ zu agieren. Intelligente LSA der Reallabore Friedrichshafen und Mannheim können auf herannahende Fahrzeuge reagieren und eine Grünphase einrichten („Grüne Welle“). Die V2I-Kommunikation über V2X wurde in umfassenden Umläufen getestet und anhand der gesammelten Daten und Erfahrungen weiter verbessert. Unter normalen Bedingungen arbeitete das System zuverlässig und bildete die vorgesehene Interaktion korrekt ab. Trotz der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit wurden Verbesserungspotenziale identifiziert, die für einen Serieneinsatz zu beachten sind. So gab es vereinzelt Signalübertragungsprobleme oder die geschätzten Ankunftszeiten (Estimated Time of Arrival, ETA) zeigte Abweichungen zur Soll-Zeit.

Ausblick

Obwohl V2X über enormes Potenzial verfügt, steht seine flächendeckende Umsetzung vor erheblichen Herausforderungen. Eine Übertragung auf andere Projekte ist nicht ohne weiteres möglich. V2X-Nachrichten können unterschiedlich interpretiert werden, da verschiedene Stakeholder häufig eigene Perspektiven einbringen – und weil die Standards Spielraum für projektspezifische Anpassungen lassen. Umso wichtiger ist es, alle relevanten Akteure frühzeitig einzubinden, um Anforderungen und Schnittstellen effizient und einheitlich abzustimmen. Um eine hersteller- und länderübergreifende Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur zu ermöglichen, sind einheitliche Standards für Nachrichtenformate und Kommunikationsprotokolle unerlässlich. Standardisierungsorganisationen wie beispielsweise die C-Roads Plattform und das CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C-CC) sind zwei wichtige Initiativen im Bereich der V2X-Kommunikation.

Anzeigekonzept im Shuttle/Bedienkonzept für Passagiere

Die Akzeptanz für das autonome Verkehrsmittel hängt unmittelbar mit der Nutzerfreundlichkeit der Fahrzeuge zusammen. Ein wesentliches Element dabei war das Anzeige- und Bedienkonzept im Shuttle auf die Bedürfnisse der Nutzenden abzustimmen. Das Anzeigekonzept im Fahrzeug wurde mit Hilfe von Methoden aus dem User-Centered-Designprozess entwickelt und für die Mitfahrenden im Fahrzeug erlebbar umgesetzt. Auf Basis einer „Nutzerreise“ (user journey) wurden für die Passagier:innen notwendige Informationen von Fahrtbeginn bis Fahrtende festgehalten und es wurde Hilfe des UX/UI-Konzepts entschieden, welche Inhalte wann und auf welchem Monitor gezeigt werden. In Summe lieferten zwei Anzeigetafeln im Shuttle die für den Fahrgast relevanten Informationen. In Abbildung 17 ist beispielhaft eine Anzeige für den 48-Zoll-Monitor zu sehen. Es zeigt die aktuelle Shuttlegeschwindigkeit an und gibt weiterführende Informationen zu Fahrtverlauf (Linienleiter) und -dauer.

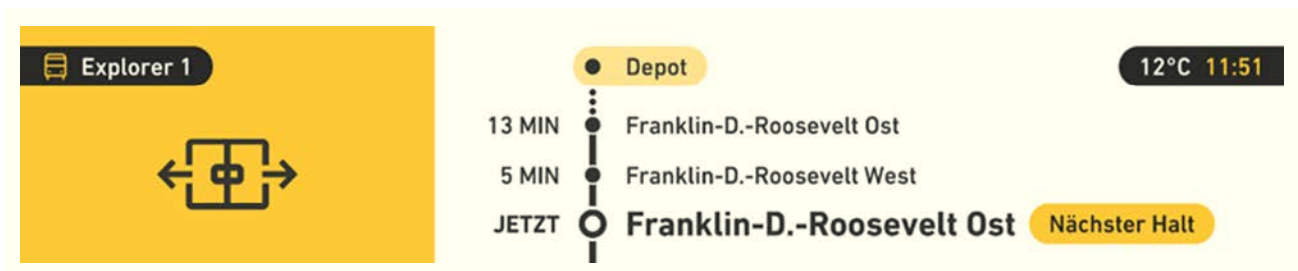
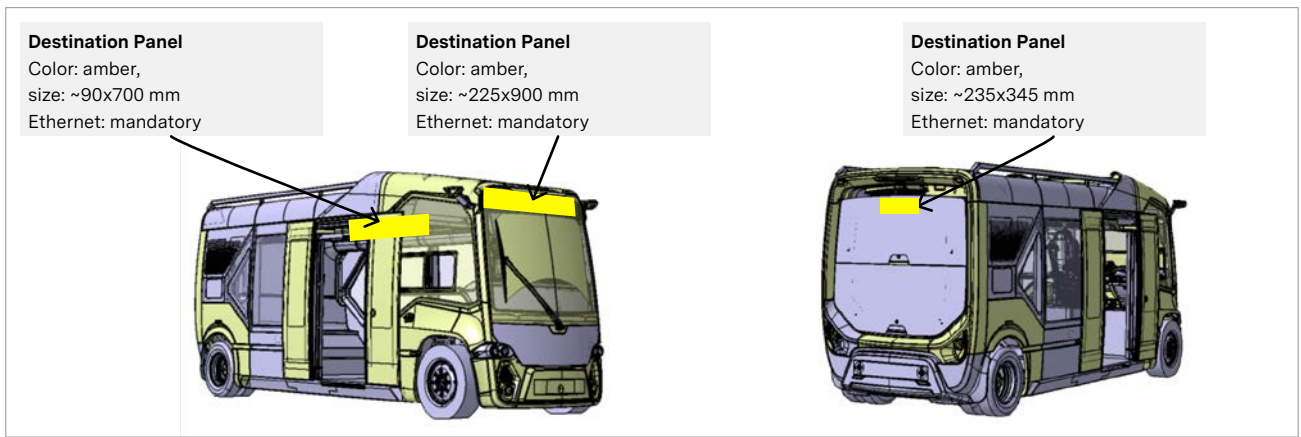


Abbildung 17: Displayanzeige für das Einsteigen der Passagiere inkl. Linienleiter

Quelle: Eigene Darstellung

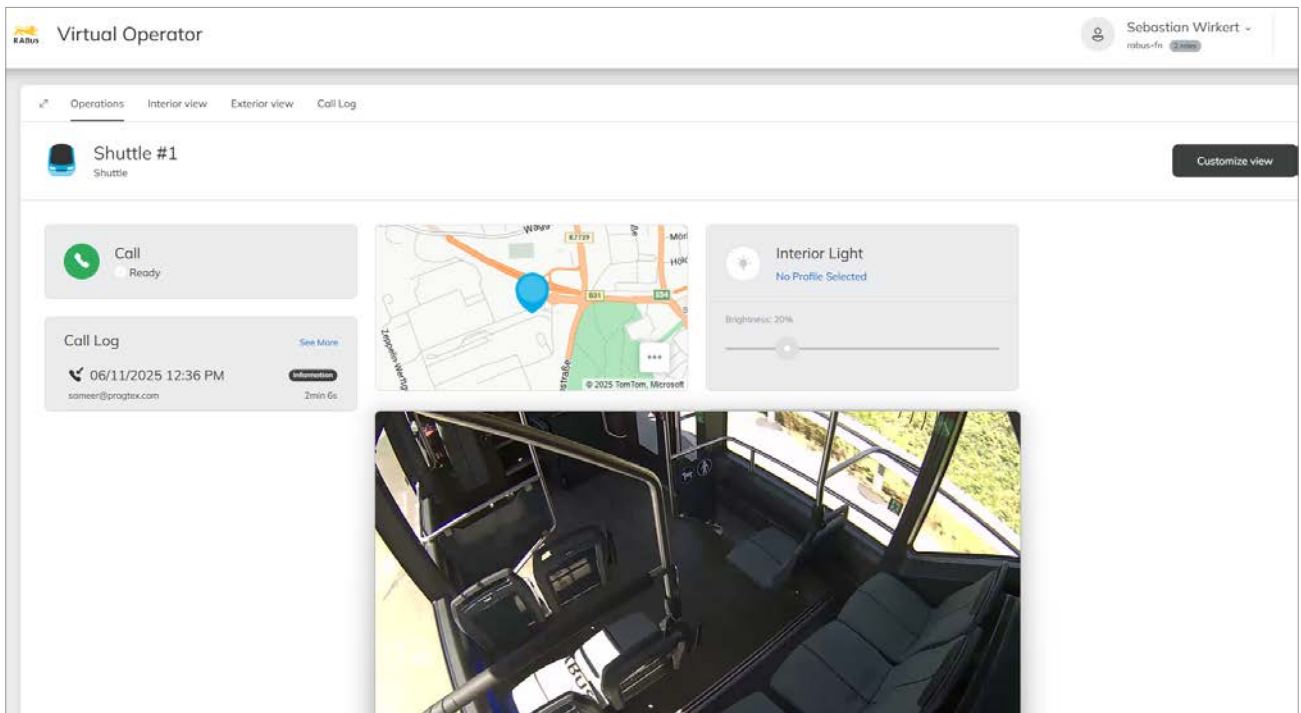


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 18: Außenanzeige für Fahrgastinformation

Zusätzlich zu den Innenraumdisplays lieferten drei Anzeigetafeln Informationen zu Fahrtrichtung und Liniennummer für die Personen außerhalb des Fahrzeugs. Die Displays wurden gemäß Abbildung 18 angeordnet. Für die Kommunikation zwischen Passagier:innen und technischer Aufsicht wurde eine Kommunikations- und Überwachungsverbindung geschaffen. Die Verbindung ist ein Kernelement für den zukünftigen L4-Shuttle-Betrieb ohne Sicherheitsfahrer an Bord und wird maßgeblich die Nutzung der Fahrzeuge beeinflussen. Die Anforderungen an diese Art der Kommunikation sind hoch, so muss beispielsweise das Mobilfunknetz durchgehend in hoher Qualität und Bandbreite verfügbar sein, damit Verbindungsabbrüche ausgeschlossen sind (siehe auch Kapitel 3.1.7).

Im Projekt RABus wurde die Kommunikation zwischen Passagier und Shuttle gemeinsam mit der Leitstelle der Verkehrsbetriebe erfolgreich erprobt. Das dafür entwickelte System beinhaltet die Kommunikationseinheit im Shuttle, die Konnektivitätsbox (ProConnect) für den stabilen und sicheren Datentransfer zwischen Fahrzeug und Leitstelle und die App-Anwendung innerhalb des Flottenmanagementsystem (ZF Connectivity Suite) für die technische Aufsicht. Die Anwendung ermöglichte sowohl die Audioverbindung als auch die Möglichkeit, per Innenraumkamera die Situation visuell zu beurteilen. Auf Basis dieser Informationen wird zukünftig die technische Aufsicht entscheiden können, welche Maßnahmen einzuleiten sind.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19: ZF Connectivity Suite – Anwendung „Virtual Operator“

Schlussfolgerung

Grundsätzlich hat sich das Anzeige- und Bedienkonzept während der Betriebsphase bewährt. Die gesammelten Erkenntnisse zeigen jedoch auch Verbesserungspotenziale für zukünftige Vorhaben. Insgesamt ist es ratsam, bei der Auswahl der Systeme im Innenraum speziell auf die Bedürfnisse von mobilitätseingeschränkten Personen einzugehen. Veranstaltungen mit Interessenverbänden, Rollstuhlfahrer:innen und älteren Menschen zum Thema Barrierefreiheit haben erste wichtige Hinweise für zukünftige Fahrzeuge zu Tage befördert. Unter anderem zeigte die Nutzung des Shuttles mit einem Rollstuhl, dass außer der Rampe speziell auch das Anzeige- und Bedienkonzept im Innenraum an die Bedürfnisse dieser Nutzergruppe anzupassen ist.

Flottenmanagement – Interaktion zwischen Shuttle, Passagier und Leitstelle

Ein zentraler Baustein für den zukünftigen Level-4 Betrieb ohne Fahrpersonal ist das Flottenmanagementsystem. Die zentrale Rolle nimmt dabei die technische Aufsicht „Operator“ ein. Diese muss zu jeder Zeit in der Lage sein, das autonome Shuttle zu überwachen und, wenn nötig, einzugreifen. Für die Entwicklung des Flottenmanagementsystems wurde von ZF eine holistische Servicelandschaft aufgebaut. Das Ergebnis daraus war die umfassende Servicelandschaft mit dem Namen ZF Connectivity Suite. Diese Umgebung enthielt die Dienste und Anwendungen, die für die Inbetriebnahme, den täglichen Betrieb und die Wartung bzw. Updates der autonomen

Shuttles notwendig waren. Perspektivisch können darüber auch Fahrmanöver mit Hilfe der technischen Aufsicht freigegeben werden. Während der Betriebsphase wurde die Plattform u. a. auch durch die Verkehrsbetriebe erprobt. Die Leitstellenmitarbeiter:innen der Verkehrsbetriebe wurden dafür geschult und bekamen Zugänge zur ZF Connectivity Suite. Die Nutzung durch die Verkehrsbetriebe hat zudem den Nachweis erbracht, dass die wesentlichen Informationen aus dem Shuttle in geforderter Qualität und Detailtiefe für den alltäglichen Betrieb angemessen sind.

Die ZF Connectivity Suite ist eine mandantenfähige Plattform, die es ermöglicht, mehrere unabhängige Einsatzgebiete der autonomen Shuttles parallel zu verwalten. Mit ihrer Architektur wird sichergestellt, dass die Daten und Konfigurationen der verschiedenen Nutzergruppen strikt voneinander getrennt bleiben. Jede Organisationseinheit, die die Plattform nutzte, hatte ihre eigene, abgeriegelte Umgebung, was höchste Sicherheit und Datenschutz gewährleistete.

Diese strikte Trennung zog sich von der Benutzeroberfläche bis hinunter zu den Datenebenen, sodass jede Einheit unabhängig agieren konnte, ohne dass es zu Überschneidungen oder unerwünschten Zugriffen kam. Somit konnte eine klare Trennung zwischen RABus Mannheim und RABus Friedrichshafen erfolgen und die Betreuung im Leitstand für beide Teilprojekte bedient werden. Für RABus Friedrichshafen war die DB Regio in

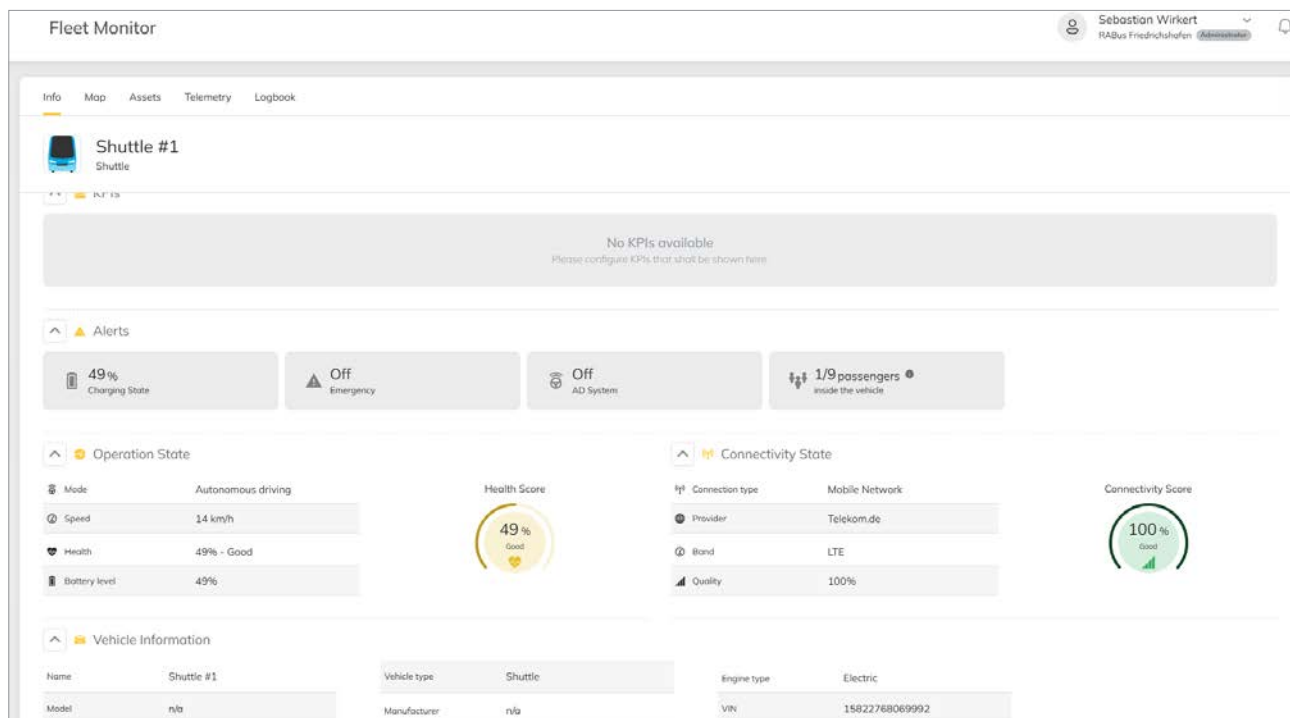


Abbildung 20: ZF Connectivity Suite – Anwendung „Fleet Monitor“

Quelle: Eigene Darstellung

Ulm zuständig, während für RABus Mannheim die Rhein-Neckar-Verkehrsbetriebe verantwortlich waren.

Schlussfolgerung

Die Connectivity Suite ist kein Ersatz des bestehenden Leitstandsystems der Verkehrsbetriebe, vielmehr eine Ergänzung, um autonome Shuttles zu verwalten, zu überwachen und perspektivisch Fahrmanöver freizugeben. Fahrinformationen (Position, Telemetriedaten) hingegen können durchaus auf bestehende Systeme projiziert werden.

Hier könnte in einem nächsten Schritt über die Programmierschnittstelle (API) der Datendrehscheibe Daten aus dem Fahrzeug an bestehende Leitstandsysteme übermittelt werden.

Betriebssicherheit und Überwachung des Betriebs

Die Sicherheit und die Zuverlässigkeit der Systeme waren die Hauptkomponenten für einen erfolgreichen Betrieb und damit für eine erfolgreiche Projektabwicklung. ZF verfolgte im Rahmen der Fahrzeugfreigabe für die öffentliche Straße einen zweistufigen Prozess. Die Einzelbetriebserlaubnis am Grundfahrzeug und die Genehmigung der autonomen Funktionen durch das KBA sind eine Komponente, die interne ZF-Fahrzeugfreigabe ist die zweite Komponente.

Beide Komponenten setzten eine adäquate Überwachung der Betriebsphase voraus. So war das KBA jederzeit berechtigt, Daten aus dem Fahrbetrieb einzusehen. Über Vorkommnisse unter Beteiligung Dritter war das KBA unverzüglich in Kenntnis zu setzen.

Betriebsbegleitend erfolgte die tägliche Durchsprache mit dem beteiligten Fahrpersonal zu Vorkommnissen während des Betriebs, Feedback der Proband:innen sowie Besonderheiten für die anstehenden Fahrten.

Um sämtliche Vorkommnisse direkt analysieren und bewerten zu können, wurde der Prozess zur Betriebs-

überwachung etabliert. Das interdisziplinäre Team überwachte den Fahrbetrieb und hat direkte Befugnisse den Betrieb einzuschränken bzw. zu stoppen, sobald eine potenzielle Gefährdung im Raum stand.

Die Abweichungen vom Soll-Verhalten wurden analysiert und das Risiko für den Fahrbetrieb bewertet. Abhängig von Art und Schwere der Abweichung konnte der Betrieb eingestellt werden, bis das Problem behoben oder eine Maßnahme umgesetzt war, die den sicheren Weiterbetrieb gewährleisteten.

Die etablierten Prozesse haben im Rahmen des Betriebs ihre Wirksamkeit eindrucksvoll untermauert. In Summe absolvierten die Fahrzeuge mehr als 430 AD-Fahrten sowohl in den Sommer- als auch Wintermonaten, ohne dabei Fahrgäste, andere Verkehrsteilnehmer:innen oder am Fahrbetrieb beteiligte Personen zu gefährden.

3.1.6 Festlegung des Betriebsbereichs (ODD)

Die ODD beschreibt die Umgebung, in der ein AD-System betrieben wird. Sie erfasst unveränderliche Rahmenbedingungen wie den Straßenverlauf sowie mögliche Bedingungen während des Betriebs, beispielsweise erwartete Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer:innen oder typische Wetterverhältnisse. Die präzise Definition der ODD ermöglicht es, die AD-Funktion innerhalb der Betriebsbereichsgrenzen zu analysieren, zu testen und zu validieren. Zudem eröffnet die Anpassung des zulässigen Betriebsbereichs die Möglichkeit, das System mit dem für die ODD notwendigem Funktionsumfang sicher zu betreiben.

Die Definition war angelehnt an das 6-Ebenen-Model von Pegasus. Die ODD-Beschreibung war zudem ein wesentlicher Bestandteil der Unterlagen für das KBA zur Beantragung der Erprobungsgenehmigung. Die Betriebsumgebung für RABus war gemäß Tabelle 4 definiert und durch das KBA genehmigt.



Abbildung 21: ZF-Betriebsüberwachung für AD-Shuttles

Quelle: Eigene Darstellung

Layer	Parameters
Layer 0: General area information	– Germany
Layer 1: Road Network and Traffic Guidance	– Two-way or one-way traffic – Junction – Roundabout – Bus stops
Layer 2: Roadside Structures	– German roads in accordance with building regulations of StVO in terms of road markings and signs – With or without lane line (with reference to minimum lane width) – Road surface material: asphalt and comparable surface, no loose ground
Layer 3: Temporary Modifications of L1+L2	– ODD shall not contain temporary changes (for example construction site). If there are temporary changes, only this section will be excluded from operations.
Layer 4: Dynamic Objects	– Mixed operation traffic, including for example the following: – Pedestrian, Bicycle, Car, Truck, Bus, Any obstacle on the road
Layer 5: Environmental Conditions	– Minimum ambient temperature: -40 °C, no ice on the surface of the road – Maximum ambient temperature: 45 °C – Maximum ambient humidity: 100% – Maximum illumination: daylight without reflexions – Maximum rain fall intensity: 10 mm/h – Maximum snow layer thickness on road: 0 mm
Layer 6: Information and Signals	– Traffic lights equipped with roadside units with V2X 802.11p – Operational area covered through 4G/5G

Tabelle 4: Auszug aus der Definition des RABus Betriebsbereichs (ODD)

3.1.7 Netzabdeckung im Kontext autonomes Fahren

Mobilfunktechnologien sind entscheidend für autonomes Fahren, da sie eine zuverlässige Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmer:innen ermöglichen. Eine stabile Internetverbindung ist essenziell, um Sicherheit und reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Sie erlaubt der technischen Aufsicht, in Notfällen direkte Anweisungen an das Fahrzeug zu übermitteln, und sorgt dafür, dass Fahrzeugzustandsdaten kontinuierlich übertragen sowie Software-Updates in Echtzeit installiert werden können.

Die Analyse der Mobilfunkabdeckung entlang der RABus Strecken zeigte erhebliche Diskrepanzen zwischen den von Netzbetreibern bereitgestellten Informationen und den gemessenen Werten. Schwachstellen und Funklöcher wurden identifiziert, die ein Risiko für den vollautonomen Betrieb darstellen, insbesondere in Notfallsituationen. Zudem wurde festgestellt, dass die verfügbare Bandbreite stark vom Zeitpunkt abhängt: Nachts war die Verbindung häufig besser als tagsüber, was vermutlich auf eine geringere Netzauslastung zurückzuführen ist.

Zur Verbesserung der Abdeckung könnten zusätzliche Mobilfunkmasten, eine optimierte Netzwerkkonfiguration oder alternative Technologien eingesetzt werden.

Im Projekt RABus wurde eine innovative Anwendung entwickelt, um die Mobilfunkabdeckung präzise zu analysieren. Messdaten wie Cell ID, Zeitstempel, Positions-Koordinaten, Mobilfunktechnologie und Bandbreite wurden in ein Cloud-basiertes Backend hochgeladen und in georeferenzierte Kacheln unterteilt. Diese dynamische Analyse ermöglichte eine gezielte Optimierung der Konnektivität, sodass die Fahrzeuge nur die Daten erhielten, die sie benötigten und das zum optimalen Zeitpunkt.

3.2 Aufbau der Reallabore

3.2.1 Vorstellung der Reallabore

Reallabor Friedrichshafen

Friedrichshafen, mit etwas mehr als 62.000 Einwohner:innen, ist ein wirtschafts- und forschungsstarkes Oberzentrum am Bodensee. Das prädestiniert die Stadt aus mehreren Gründen für ein Reallabor. Nicht nur hat mit der ZF Friedrichshafen AG ein Projektpartner seinen Hauptsitz in der Stadt, auch ist die Region touristisch hoch attraktiv – mit rund 800.000 Übernachtungen allein in Friedrichshafen. Der Messestandort mit mehreren großen, internationalen Fachmessen trägt ebenfalls zur Attraktivität bei. Gleich mehrere Hochschulen, darunter die Zeppelin Universität und die DHBW, haben hier ihren Standort. Der straßengebundene ÖPNV ist mit 16 Stadtverkehrslinien und zahlreichen Regionalverkehrslinien schon sehr gut ausgestattet. Diese Mischung macht Friedrichshafen zum perfekten Reallabor, um unterschiedliche mögliche Anwendungsfälle für das automatisierte Fahren zu erforschen.

Reallabor Mannheim

Im Norden Mannheims, ca. fünf Kilometer von der Innenstadt entfernt, lag mit Franklin die ehemals größte Wohnsiedlung der US-Armee. Nach dem Abzug der amerikanischen Streitkräfte bot das etwa 144-Hektar große Areal enorme städtebauliche Entwicklungsmöglichkeiten. So entstanden in den Jahren 2015 bis 2025 Wohnungen für insgesamt 9.000 Menschen, gewerbliche Einrichtungen sowie rund 50 Hektar Parkanlage.

Entlang des Geländes existiert mit der Stadtbahnlinie 5 bereits eine Anbindung an den ÖPNV. Allerdings ist dieses Angebot auf Grund der Größe von Franklin nicht ausreichend, so dass ein umfassendes Mobilitätskonzept erarbeitet wurde. Bestandteil dieses neuen Konzeptes ist die Umsetzung von automatisierten Buslinien, die entfernt liegende Areale von Franklin an die Linie 5 anbinden.

Da Franklin als Wohngebiet konzipiert ist, gilt dauerhaft eine Geschwindigkeitsbegrenzung von max. 30 km/h. Damit wird die Einführung von automatisierten Shuttles erheblich erleichtert, was die Erfolgsaussichten von RABus deutlich steigert.



Abbildung 22: Streckenverlauf Reallabor Friedrichshafen

3.2.2 Routenführung

Friedrichshafen

Für ein Projekt wie RABus, das großes öffentliches Interesse erfährt, sollte die Strecke in Friedrichshafen Relevanz und Wiedererkennungswert haben. Ebenso wurde berücksichtigt, dass die Route unterschiedliche Charakteristika in sich vereint. Folgende Kriterien spielten deshalb bei der Streckenauswahl eine Rolle.

- Repräsentative Streckenabschnitte mit einer Auswahl verschiedener Straßentypen: innerstädtisch und außerorts, wodurch höhere Geschwindigkeiten erreicht werden können und ein realer Linienbetrieb im suburbanen Raum dargestellt werden kann
- Anbindung und Verbindung wichtiger Orte von öffentlichem Interesse: ZF Forum, Stadtbahnhof, Friedhof, Universität und Klinikum Schnetzenhausen
- Sichtbarkeit in der Stadt für das Shuttle und das Projekt
- Gutes Fahrgastpotenzial an den Haltestellen, das entweder durch vorangegangene Verkehrszählungen oder durch Nahverkehrspläne ermittelt werden kann

Mannheim

Für das Reallabor Mannheim ist eine Route vorgesehen, die im Südosten den Platz der Freundschaft, im Norden das Depot für die Shuttles sowie den Spielplatz „Teufelsberg“ und im Westen die Einfahrt zur Offizierssiedlung anbindet. Gegenüber dem ursprünglich geplanten Streckenverlauf gab es zwei wesentliche Änderungen.

- 1) Die zwei Routen wurden zu einer Route zusammengeführt. Damit wird die Abraham-Lincoln-Allee umfahren, wobei eine gute Erschließung beibehalten wird.
- 2) Die Anbindung der Offizierssiedlung erfolgt nicht durch Befahren des James-Monroe-Rings, sondern durch das Befahren des Kreisverkehrs an der Einfahrt zur Offizierssiedlung.

Seit Projektbeginn hat sich auf dem Franklin-Gelände viel getan. Dies betrifft auch das ÖPNV-Angebot. Während zu Beginn des Projekts lediglich die Straßenbahnlinie 5 parallel zum Franklin-Areal verlaufen ist, hat die rnv aufgrund der steigenden Anwohnerzahl, die derzeit bei 6.607 liegt, und des steigenden ÖPNV-Bedarfs das Angebot deutlich erweitert. Zentrale Elemente der ÖPNV-Erschließung für das Stadtquartier sind die neue

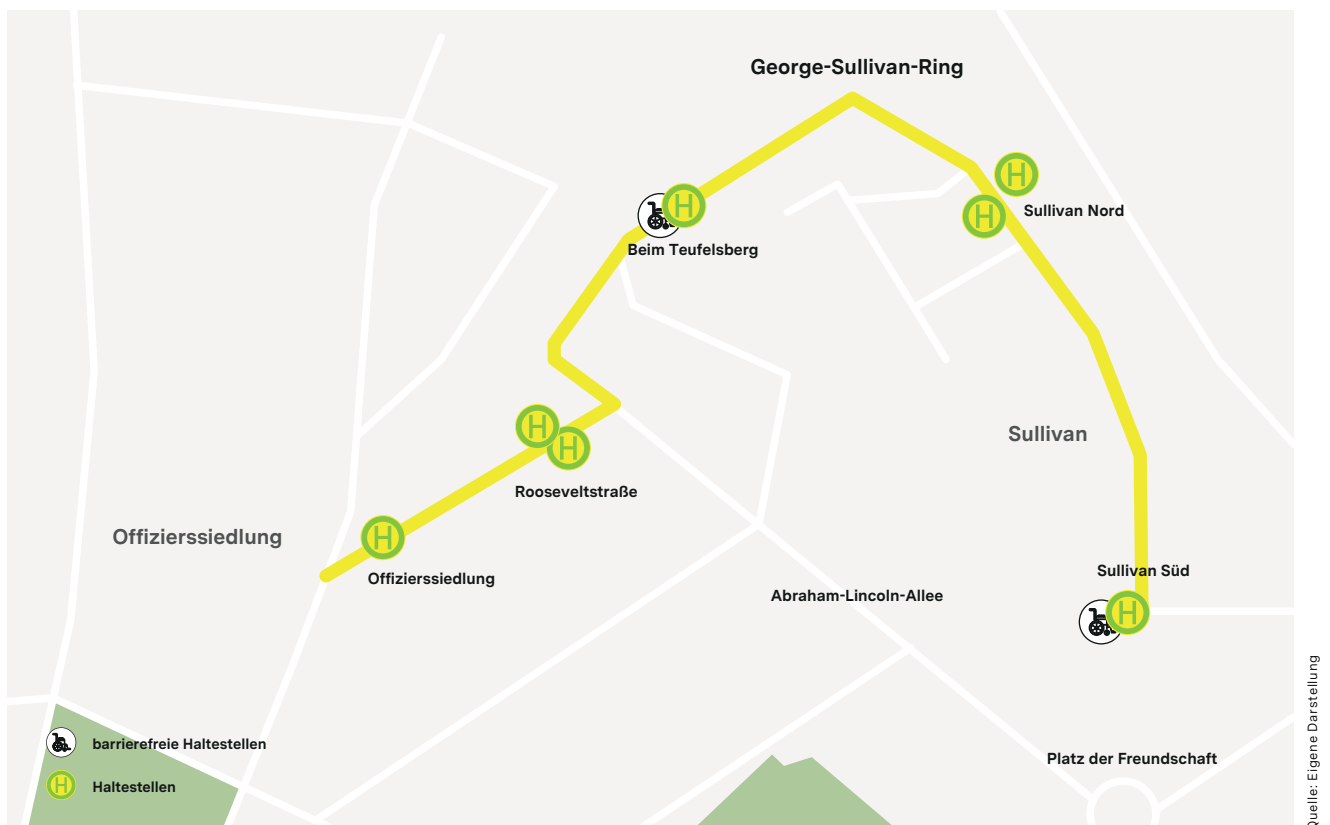


Abbildung 23: Streckenverlauf Reallabor Mannheim

Stadtbahnlinie 16, die E-Bus-Linie 67 und der fips (On-Demand-Shuttles).

Das RABus-Projekt ist aus verkehrstechnischer Sicht eine Ergänzung des bestehenden ÖPNV. Die Streckenführung der Shuttles verläuft entlang des äußeren Einzugsbereichs der vorhandenen Bus- und Bahnlinien, womit die zusätzliche Möglichkeit besteht, dieses Angebot als Fortbewegungsmittel innerhalb Franklins zu nutzen. Der Fokus liegt jedoch primär auf dem Test der Technik für den Einsatz in ÖPNV-Fahrzeugen.

3.2.3 Vorbereitung der Infrastruktur und des Fahrbetriebs

Haltestellen

Im Vorfeld des Betriebs lag ein besonderer Fokus auf der Anpassung der Infrastruktur entlang der geplanten Strecke. Ziel war es, sowohl die Barrierefreiheit als auch die digitale Fahrgastinformation zu verbessern, um damit die Nutzerfreundlichkeit des Angebots zu erhöhen und den Fahrbetrieb für die Fahrzeuge zu erleichtern.

Entlang der Route in Friedrichshafen wurden mehrere Haltestellen baulich angepasst, um einen barrierefreien Zugang zum Shuttle zu ermöglichen. Dazu zählen unter anderem die Anhebung von Bordsteinkanten sowie die Installation taktiler Leitsysteme. Diese Maßnahmen trugen dazu bei, die Zugänglichkeit für mobilitätseingeschränkte Personen deutlich zu verbessern. Parallel dazu erfolgte der Ausbau digitaler Fahrgastinformationssysteme. An allen Haltestellen entlang der gewählten Route wurden digitale und barrierefreie Anzeigetafeln (sogenannte ePapers) installiert, die über geplante Abfahrtszeiten in Echtzeit informieren. Diese infrastrukturellen Anpassungen wurden in enger Abstimmung mit den städtischen Fachämtern und dem Stadtverkehr Friedrichshafen umgesetzt. Sie bildeten eine wichtige Grundlage für einen sicheren und komfortablen Betrieb im Reallabor.

Ein Projekt wie RABus ist wegen der damit zusammenhängenden infrastrukturellen Anpassungen ohne die enge Einbindung kommunaler Behörden nicht realisierbar. Die zuständigen Stellen wurden regelmäßig über den Projektstand informiert – sowohl in Gremiensitzungen als auch in gezielten Abstimmungsterminen.

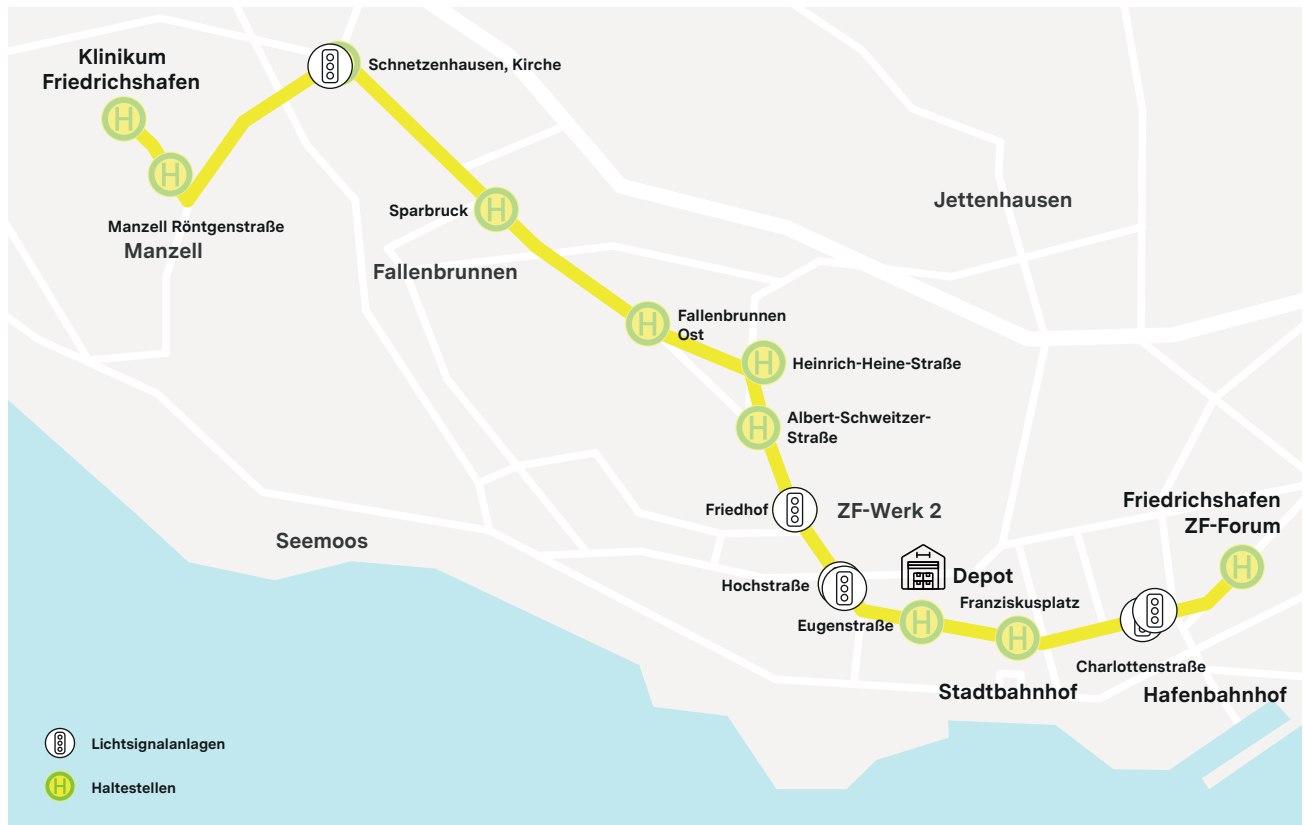


Abbildung 24: Streckenverlauf Reallabor Friedrichshafen inkl. Infrastrukturmaßnahmen

Zur Koordination mit den Behörden empfiehlt sich die Benennung einer zentralen Ansprechperson, die als Schnittstelle zwischen Projektteam und Verwaltung fungiert. Ebenso wichtig ist es, Entscheidungsträger frühzeitig für das Projekt zu gewinnen – insbesondere durch eine klare Darstellung des kommunalen Mehrwerts.

Für die erfolgreiche Implementierung automatisierter Shuttleverkehre ist der flächendeckende Ausbau barrierefreier Haltestelleninfrastrukturen ebenso unerlässlich wie die Bereitstellung digitaler Informationssysteme, um insbesondere bei flexiblen, fahrerlosen Angeboten eine transparente Auskunft zu Tarifstrukturen, Kapazitäten und Betriebsstatus zu gewährleisten und somit eine inklusive sowie nutzerfreundliche Mobilitätslösung zu ermöglichen.

In Mannheim wurden entlang der Route insgesamt acht Haltestellen eingerichtet, von denen eine barrierefrei gestaltet wurde. Diese Haltestelle ermöglichte mobilitätseingeschränkten Personen sowie Familien mit Kleinkindern im Kinderwagen die Mitfahrt, wodurch wertvolles Feedback gesammelt werden konnte. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung der Eignung eines Trans-

portsystems für den ÖPNV. Die Haltestellenpositionen inklusive der Benennung sind in Abbildung 22 (Friedrichshafen) und Abbildung 23 (Mannheim) dargestellt.

Lichtsignalanlagen

Eine weitere Infrastrukturmaßnahme, die aus funktioneller Sicht für den Betrieb der Fahrzeuge nicht erforderlich ist, jedoch u. U. zu einer Verbesserung des Betriebs führen könnte, ist die Aufstellung von Lichtsignalanlagen (LSA). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden entsprechende LSA in Betrieb genommen. Auf der ca. 2 km langen Route in Mannheim wurden insgesamt vier provisorische LSA inklusive Roadside Units aufgebaut. Die genauen Standorte können der Abbildung 25 entnommen werden. Jedes orange Quadrat stellt eine LSA dar. Diese befinden sich am Kreisverkehr in der Wasserkwerkstraße, an der Kreuzung Franklin-D.-Roosevelt-Str./Abraham-Lincoln-Allee, am Depot und an der Wendeschleife Sullivan Süd.

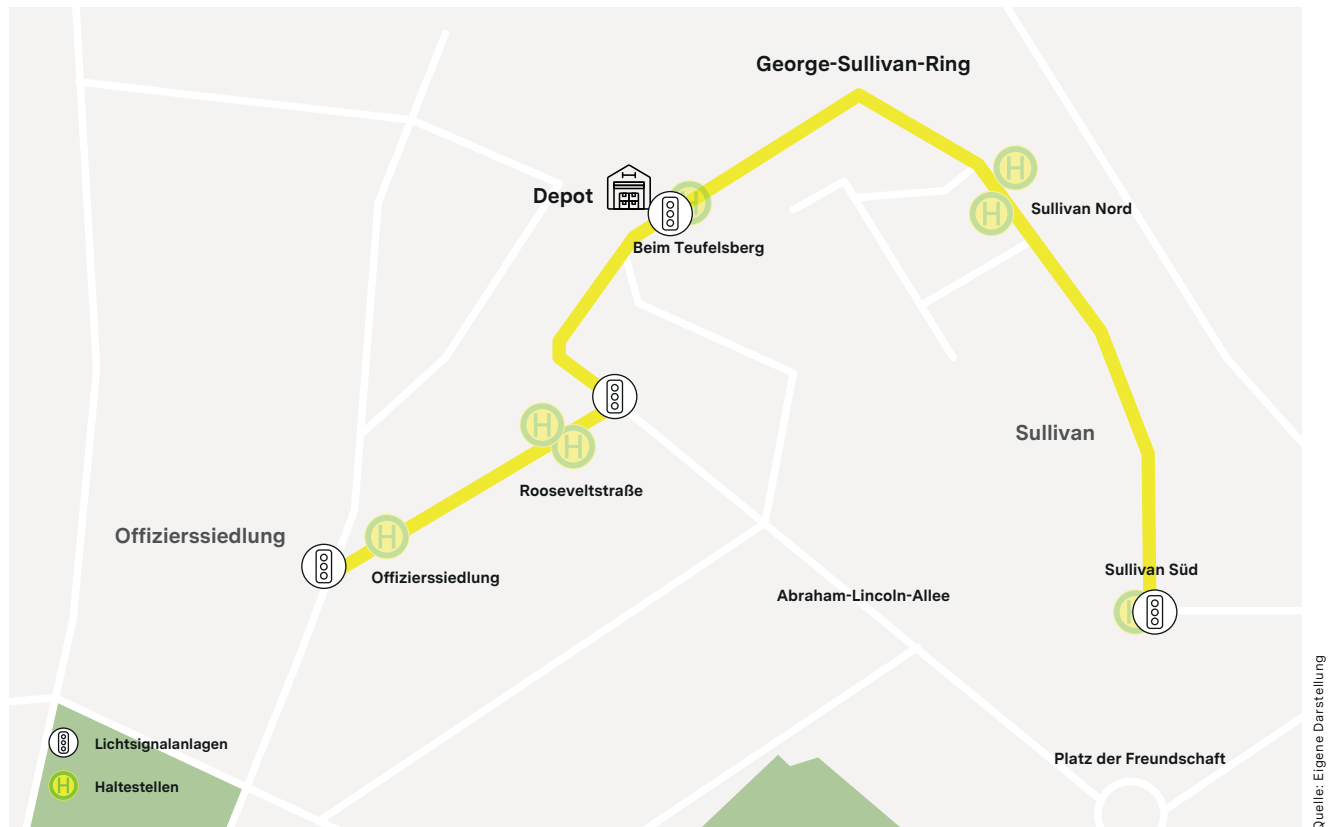


Abbildung 25: Streckenverlauf Reallabor Mannheim inkl. Infrastrukturmaßnahmen

Die beschriebenen provisorischen LSA wurden für die Dauer des Reallabors gemietet.

In Friedrichshafen wurden Anpassungen an bestehender LSA-Infrastruktur vorgenommen. Im Rahmen des Projekts wurden so insgesamt fünf Anlagen für den Betrieb vorbereitet: Charlottenstraße, Hochstraße, Friedhof, Sparbruck und Schnetzenhausen (siehe Abbildung 24).

Der Testbetrieb erfolgte zunächst ohne vollumfängliche Nutzung der LSA, da es notwendig war, kontinuierlich Anpassungen und Feinjustierungen an der Kommunikation zwischen dem autonom fahrenden Bus und der LSA vorzunehmen. Es gelang im Verlauf des Probandenbetriebs, ein zufrieden stellendes Ergebnis zu erzielen, das beide Systeme – Shuttle und LSA – harmonisierte und den sicheren Betrieb gewährleistete. Auf Basis der Daten und Erfahrungen aus dem Betrieb mit den Lichtsignalanlagen wurden Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Diese sind in den Abschnitten [Schlussfolgerung und Ausblick](#) näher erläutert.

Depot

Für die Fahrzeuge wurde sowohl in Mannheim als auch in Friedrichshafen eine streckennahe Abstellung über Nacht und in den Betriebspausen präferiert. Für die Planung des Depots in Mannheim fanden seit Projektbeginn mehrere Abstimmungstermine zwischen den Konsortialpartnern rnv und ZF statt. Hierbei wurden insbesondere die Anforderungen und Funktionen des Depots besprochen. Neben der Abstellung der Fahrzeuge ist auch das Laden, Fahrfertigmachen, Warten sowie kleinere Instandhaltungsmaßnahmen im Depot geplant. Außerdem ist im Depot die Leitstelle für die Simulation des L4-Betriebs vorgesehen. Nachdem die Anforderungen an das Depot feststanden, wurden die Ausschreibungsunterlagen vorbereitet und veröffentlicht. Hierbei waren für die Finalisierung der Unterlagen mehrere Abstimmungsrunden zwischen rnv, ZF und der MWSP (Mannheimer Wohn- und Stadtentwicklung Projektentwicklungsgesellschaft) erforderlich. Nach einem Kickoff vor Ort mit dem Auftragnehmer wurde der Aufbau zeitnah gestartet und zügig fertiggestellt. Die größten Verbraucher im Depot waren zwei Ladestationen mit jeweils 22 kW. Im Depot wurden Trockenreinigungen sowie kleinere Wartungen und Reparaturen durchgeführt. ZF führte monatlich eine große Wartung an beiden Fahrzeugen durch, wobei die Shuttles auf den Betriebshof der rnv in Käfertal gefahren wurden, da dort eine Grube bzw. ein Dacharbeitsstand zur Verfügung stand.

Die Büroeinrichtung im Depot umfasste Arbeits- und Pausenräume für die Systemingenieur:innen von ZF, die Safety Driver und das Begleitpersonal. Nach Ende des Probandenbetriebs in Mannheim konnte das Depot, welches in Abbildung 26 zu sehen ist, nach Rücksprache mit der RAB nach Friedrichshafen transportiert und dort weiter genutzt werden.

Denn auch in Friedrichshafen stellte sich die Frage der Unterbringung der Fahrzeuge. Zunächst wurden sie in einer Waschhalle auf dem Betriebsgelände der RAB untergestellt. Da dies keine dauerhaft tragbare Lösung darstellte, wurde im Rahmen der Projektverlängerung in Friedrichshafen die Halle aus Mannheim übernommen. Sie wurde auf dem Betriebshof der RAB installiert und die Fahrzeuge konnten nach erfolgreicher Inbetriebnahme der dortigen Ladeinfrastruktur untergestellt werden.

Das Ladekonzept bestand aus einer mobilen Ladeinfrastruktur. Diese wurde in die Halle integriert, so dass eine zuverlässige Übernachtladung der Fahrzeuge sichergestellt war.



Abbildung 26: RABus-Depot als Unterstellanlage für die Shuttles

Rettungskräfte

Zur Sicherstellung der Betriebssicherheit wurden mehrere Termine mit Einsatzkräften der Polizei und Feuerwehr durchgeführt. Im Rahmen dieser Schulungen erfolgte eine technische Einweisung in das automatisierte Shuttle.

Vorgestellte Inhalte umfassten:

- Fahrzeugarchitektur: Elektroantrieb, Sensorik (LiDAR, Radar, Kamera), Steuergeräte.
- Hochvoltssystem: 400V-Bordnetz, Lage der Trennstellen, manuelle Abschaltmöglichkeiten.
- Abschleppvorgang: zulässige Hebepunkte, Notentriegelung der Türen, Vermeidung von Schäden an der Sensorik.

Abbildung 27 zeigt den Austausch mit den Einsatzkräften der Feuerwehr. Die Fragen der Einsatzkräfte wurden ausführlich beantwortet, und es wurde ein gemeinsames Verständnis für den Informationsfluss im Notfall entwickelt.



Abbildung 27: Austausch mit den Einsatzkräften der Feuerwehr

Dialogveranstaltung mit Behindertenvertreter:innen

In beiden Reallaboren – Friedrichshafen und Mannheim – wurden noch vor Beginn des Probandenbetriebs gezielt Dialogveranstaltungen mit Vertreter:innen von Menschen mit Behinderungen sowie mit Senior:innen durchgeführt. Ziel war es, frühzeitig deren Erfahrungen, Bedürfnisse und Anregungen für den ÖPNV und den geplanten automatisierten Busbetrieb einzuholen und, soweit möglich, in die Projektentwicklung einfließen zu lassen.

In Friedrichshafen nahmen unter anderem Personen mit Seh-, Hör- oder Gehbehinderungen sowie Mitglieder des örtlichen Seniorenbeirats teil. Die Diskussionen brachten eine Vielzahl praxisnaher Anforderungen hervor. Genannt wurden insbesondere:

- Barrierefreies Ein- und Aussteigen durch automatisch ausfahrbare Rampen oder Klappen auf Anfrage und eine Absenkung des Fahrzeugs an der Haltestelle (Kneeling).
- Digitale, akustische und visuelle Fahrgastinformationen, ergänzt durch Blindenleitsstreifen im Einstiegsbereich.
- Taktile Bedienelemente für Haltewunsch oder Türöffnung, optional mit Sprachsteuerung oder leicht bedienbaren Touchscreens mit Vorlesefunktion.
- Automatische Erkennung von Mobilitätshilfen wie Rollstühlen oder Rollatoren zur Anpassung des Einstiegs.
- Großzügige Stellflächen für Rollstühle, Rollatoren und Kinderwagen sowie Sitzplätze mit Haltegriffen in unmittelbarer Nähe zum Einstieg.

→ Individuelle Unterstützung durch Fernüberwachung oder Assistenzsysteme.

In Mannheim wurde ein solcher Austausch unter dem Titel „Bürgerdialog Barrierefreiheit“ organisiert. Hier standen drei thematische Informationsstände im Mittelpunkt, betreut durch die jeweiligen Projektpartner: ZF (Fahrzeugaspekte), rnv (barrierefreie Haltestellen) und KIT (Angebotsformen und Bedienkonzepte). Nach einer einführenden Informationsphase fanden moderierte Diskussionen an den Ständen statt, mit wertvollen Rückmeldungen und gegenseitigem Verständnis zwischen Projektteam und potenziellen Nutzergruppen (siehe Abbildung 28).

Die frühzeitige Einbindung von Menschen mit Einschränkungen erweist sich als zentraler Erfolgsfaktor, um künftige Mobilitätsangebote inklusiver, zugänglicher und nutzerfreundlicher zu gestalten – nicht nur im Projektkontext, sondern auch als Impuls für die Weiterentwicklung des ÖPNV in der Region.



Abbildung 28: Bürgerdialog „Barrierefreiheit“

3.2.4 Durchführung eines Probandenbetriebs

Vorbereitungen des Fahrbetriebes

Im Laufe des Projekts verlagerte sich der Fokus Schritt für Schritt von der Vorbereitung der Infrastruktur hin zur praktischen Umsetzung des autonomen Shuttle-Betriebs. Nun standen vor allem die Organisation des Fahrbetriebs, die Unterbringung der Fahrzeuge sowie die Einführung eines digitalen Systems zur Registrierung von Proband:innen sowie zur Buchung von Mitfahrten im Mittelpunkt.

Kurz vor dem Start des Probandenbetriebs ergab sich, dass aus rechtlichen und sicherheitsrelevanten Gründen eine dritte Person im Fahrzeug notwendig ist. Da Sicherheitsfahrer:in und AD-Safety-Operator während der Fahrt nicht mit den Mitfahrer:innen interagieren dürfen, wurde ergänzend Sicherheitspersonal eingesetzt. Dieses übernahm die Kontrolle der Buchungsbestätigungen und achtete auf die Einhaltung der Shuttle-Regeln. Der oder die Sicherheitsfahrer:in wurde gemäß den Herstellervorgaben zur Fachkundig unterwiesenen Person (FuP) Sufe 1E, beim Hersteller ZF selbst geschult.

Voraussetzungen für eine Mitfahrt

Damit Personen am autonomen Shuttle-Betrieb teilnehmen konnten, war eine vorherige Online-Registrierung notwendig. Diese war Teil der behördlichen Vorgaben und stellte sicher, dass alle Mitfahrer:innen über ihre Rechte und Pflichten informiert waren. Bei der Registrierung stimmten die Teilnehmer:innen unter anderem der Datenverarbeitung, den Shuttle-Regeln und den Beförderungsbedingungen zu.

Die Beförderungsbedingungen wurden in Friedrichshafen in enger Abstimmung mit dem Regierungspräsidium Tübingen festgelegt. Dabei wurde entschieden, dass die regulären Beförderungsbedingungen des Stadtverkehrs

Friedrichshafen bzw. des Verkehrsverbunds bodo gelten. Die gute Zusammenarbeit mit der Aufsichtsbehörde hat den Projektstart deutlich erleichtert. Im Reallabor Mannheim wurden die Beförderungsbedingungen nach Rücksprache mit dem Regierungspräsidium Karlsruhe von der rnv definiert.

Auch der Umgang mit personenbezogenen Daten war ein wichtiger Aspekt. Für die begleitende Forschung mussten bestimmte Informationen – etwa zur Mobilität oder zu soziodemografischen Merkmalen der registrierten Personen – innerhalb des Projektteams ausgetauscht werden. Dafür wurde eine gemeinsame Vereinbarung zum Datenschutz erarbeitet, die alle Partner berücksichtigte. Die Abstimmung war aufwendig, aber notwendig, um einen datenschutzkonformen Betrieb sicherzustellen.

Für die Mitfahrt galten außerdem einige grundlegende Regeln: Alle Personen mussten während der Fahrt sitzen, sich eigenständig festhalten können und durften keine sperrigen Gegenstände mitführen. Zu Beginn lag das Mindestalter bei 18 Jahren, wurde später aber auf zwölf Jahre gesenkt.

Die Erfahrungen zeigen, wie wichtig eine frühzeitige und enge Abstimmung mit Behörden und Projektpartnern ist – besonders bei rechtlichen und organisatorischen Fragen. So konnte ein sicherer und gleichzeitig nutzerfreundlicher Betrieb ermöglicht werden.

Registrierung der Proband:innen und Fahrtenbuchung

Die Registrierung der Proband:innen erfolgte zentral über die Website des Projekts und wurde vom Stadtverkehr Friedrichshafen für beide Reallabore erstellt und verwaltet.

Neben der Registrierung stellte die Buchung einer konkreten Fahrt eine zentrale Voraussetzung für die Teilnahme am autonomen Shuttle-Betrieb dar. Erst durch diesen Schritt wurde gewährleistet, dass die Mitfahrt organisatorisch eingeplant und die Fahrplatzkapazität nicht überschritten wurde. Die Fahrtenbuchung war somit ein wesentliches Element zur Steuerung des Betriebs und zur Sicherstellung eines reibungslosen Ablaufs im Reallabor.

Die Buchungsplattform basierte auf einem digitalen Kalender, in dem alle verfügbaren Fahrten hinterlegt waren. Nutzer:innen wählten dort ihren Wunschtermin sowie die gewünschte Einstiegshaltestelle aus. Die technische Umsetzung erfolgte für beide Reallabore über die Systemwelt des Stadtverkehrs Friedrichshafen bzw. des Stadtwerks am See.

Nach jeder erfolgreichen Buchung erhielten die Teilnehmer:innen eine Bestätigungsmail mit allen relevanten Informationen zur Fahrt – neben einem Kalendereintrag auch die genaue Lage der gewählten Einstiegshaltestelle.

Zur Unterstützung der Teilnehmer:innen wurde 24 Stunden vor der gebuchten Fahrt eine Erinnerungsmail versendet. Diese enthielt zusätzlich den Link zur vorbereitenden Umfrage des KIT. Eine weitere E-Mail folgte 24 Stunden nach der Fahrt und lud zur Teilnahme an der Nachbefragung ein. Diese strukturierte Kommunikationskette ermöglichte eine enge Verzahnung zwischen Betrieb und begleitender Forschung.

Im laufenden Betrieb führten kurzfristige Änderungen, etwa wegen kurzfristiger Personalausfälle, zu Herausforderungen. Je nach Vorlaufzeit erfolgte die Information per E-Mail, telefonisch oder direkt an der Haltestelle – ein flexibler, aber personalintensiver Ansatz. Hier empfiehlt es sich, künftig verstärkt auf die digitale Haltestelleninfrastruktur zu setzen. Updates und aktuelle Fahrgastinfos können direkt über die ePaper an den Haltestellen an Fahrgäste kommuniziert werden – gleichzeitig könnten die Geräte aktuell verfügbare Kapazitäten oder ausgelastete Fahrzeuge als solche kennzeichnen.

Für einen skalierten Betrieb ist ein intuitiveres Vorgehen zur Fahrtenbuchung empfehlenswert – ausgerichtet für die Nutzung auf mobilen Endgeräten. Von Insellösungen einzelner Verkehrsunternehmen oder Verbünden sollte abgesehen werden. Eine landes- oder bundesweit ganzheitliche Mobilitätsplattform zur Fahrtenbuchung und Bezahlung sollte darüber hinaus zusätzlich Echtzeitinfos, Lokalisierungsdaten und Sitzplatzkapazitäten der Fahrzeuge anbieten.

Erkenntnisse aus dem Betrieb

Der Betrieb beider Reallabore startete zum 28. Oktober 2024. Es wurde für beide Reallabore jeweils ein Fahrplan definiert, der mehrere Fahrten von montags bis freitags sowohl vormittags als auch nachmittags vorsah (siehe Tabelle 5).

Im Rahmen des Reallabors Friedrichshafen wurde der Fahrplan in enger Zusammenarbeit zwischen dem Stadtverkehr Friedrichshafen und der ZF entwickelt. Das finale Fahrtangebot umfasste je zwei Fahrten nachmittags und vormittags – jeweils eine Fahrt entlang der Innenstadtroute (ca. 30 Minuten bei sechs Kilometer Strecke) und eine Fahrt entlang der Überlandroute (ca. 60 Minuten bei zwölf Kilometer Strecke). Besonderes Augenmerk lag bei der Gestaltung des Fahrplans auf der Haltestelle

„Klinikum“, an der gezielt Begegnungen mit dem regulären Stadtbusverkehr vermieden wurden. Hintergrund dieser Maßnahme ist die hohe Frequentierung dieser Haltestelle. Ein mögliches gegenseitiges Blockieren von Shuttles und Linienbussen hätte den Verkehrsfluss an diesem verkehrlich sensiblen Punkt erheblich beeinträchtigen können. Solche Störungen hätten sich zudem negativ auf die öffentliche Akzeptanz des Shuttle-Verkehrs in der Stadt auswirken können.

Im Reallabor Friedrichshafen war der enge Straßenraum eine große Herausforderung im innerstädtischen Bereich der Strecke – besonders durch parkende Autos, etwa in der Charlottenstraße. Für einen potenziellen weiteren Betrieb wäre das Freihalten der Parkflächen an der Charlottenstraße eine geeignete Maßnahme. Dies würde den Shuttle-Verkehr in der hochfrequentierten, engen Straße durch mehr Platz an den Fahrbahnrandern deutlich entlasten. Die dadurch fehlenden Parkflächen an der Charlottenstraße könnten durch das angrenzende Parkhaus am Stadtbahnhof kompensiert werden.

Zusätzlich kam es zu Überschneidungen mit Bauarbeiten an Haltestellen, die kurzfristige Anpassungen nötig machten. Durch die gute Zusammenarbeit zwischen dem Stadtbauamt und dem Projektteam konnten solche Situationen flexibel gelöst werden – zum Beispiel durch die Verlegung des Startpunkts an eine andere Haltestelle.

Diese Erfahrungen zeigen: Für den erfolgreichen Betrieb eines autonomen Shuttles braucht es vor allem gute Planung, klare Kommunikation und die Fähigkeit, flexibel auf Veränderungen zu reagieren. Im Kontext eines skalierten Betriebs sind Baustellen und dynamische Straßenverkehrsverhältnisse zu erwarten. Es bedarf hierfür – wie im Linienbusbetrieb – eines passenden Protokolls, das bei Bedarf entsprechend umgesetzt wird. Gleichzeitig bedarf es auch auf technischer Seite der Möglichkeit, bei kurzfristigen Streckenanpassungen die Fahrzeuge entsprechend mit Informationen zu bedienen, um einen reibungslosen Betrieb auch in diesen Fällen zu ermöglichen. Mit den ePapern an den Friedrichshafener Haltestellen steht die digitale Infrastruktur zur Fahrgastkommunikation in solchen Fällen bereit. Entsprechend wird ein flächendeckender Ausbau solcher Geräte im Rahmen eines skalierten, automatisierten Betriebs notwendig.

Die Erfahrungen zeigen außerdem, dass eine reale ÖPNV-Anwendung nur dann sinnvoll ausgebaut werden kann, wenn das Angebot über die bisherigen Zeiten von montags bis freitags ausgeweitet wird. Ein flexiblerer Fahrplan – auch am Abend oder am Wochenende –



Abbildung 29: Zwei Shuttles in der Charlottenstraße mit der Problematik der engen Fahrbahn

würde mehr Menschen erreichen und die Einbindung in den öffentlichen Nahverkehr deutlich verbessern.

In Mannheim erfolgte der Betrieb ebenfalls ausschließlich montags bis freitags und umfasste ein festgelegtes Fahrtenangebot mit insgesamt zehn Fahrten pro Tag. Der Fahrplan war in zwei Zeitfenster unterteilt: vier Fahrten am Vormittag sowie sechs Fahrten am Nachmittag, jeweils im 30-Minuten-Takt (siehe Tabelle 5).

Dieses Angebot ermöglichte eine kontinuierliche Erhebung von Nutzungsdaten unter realen Bedingungen im Mischverkehr.

In Mannheim wurde „Sullivan Süd“ als zentrale Einstiegshaltestelle festgelegt. Diese Haltestelle bietet eine Anbindung an den bestehenden ÖPNV und wurde gezielt ausgewählt, um den Anwendungsfall der Erschließung eines Neubaugebiets zu simulieren. Die Proband:innen erhielten mit der Buchungsbestätigung eine Wegbeschreibung zur besseren Auffindbarkeit der Einstiegshaltestelle. Diese diente zugleich als Ausstiegspunkt, da ein Umlauf sowohl Hin- als auch Rückfahrt umfasste. Ein Ausstieg an Zwischenhaltestellen war grundsätzlich möglich, wurde jedoch nur selten genutzt.

Die Entscheidung, den Betrieb mit Begleitpersonal (Stewards) durchzuführen, erwies sich als äußerst vorteilhaft. Die Stewards ermöglichten eine direkte Kommunikation mit den Fahrgästen, unterstützten bei der Orientierung und trugen wesentlich zur Sicherheit und Akzeptanz des Betriebs bei.

Die Inbetriebnahme und Erprobung der Connectivity Suite zur Leitstellenanbindung fand ebenfalls in dieser Phase statt. Diese Anwendung stellt eine zentrale Schnittstelle zwischen dem automatisierten Fahrzeug

und der betrieblichen Leitstelle eines Verkehrsunternehmens dar. Ihre zuverlässige Funktion ist eine Grundvoraussetzung für den späteren Einsatz von ATS im ÖPNV.

Ein Mitarbeiter der rnv wurde von ZF darin geschult, die Connectivity Suite zu bedienen und den Verkehr simuliert zu überwachen. Die Funktionalitäten der Anwendung wurden zu verschiedenen Zeitpunkten mehrfach getestet, um die Stabilität und Funktionalität unter realitätsnahen Bedingungen zu überprüfen.

Ein besonderer Fokus lag auf der Kommunikation zwischen Leitstelle und Proband:innen. Hierbei wurden verschiedene Szenarien durchgespielt, um die Reaktionsfähigkeit und Informationsweitergabe im Betrieb ohne direktes Begleitpersonal zu evaluieren. Die Ergebnisse dieser Tests flossen unmittelbar in die Weiterentwicklung des Systems und der betrieblichen Abläufe ein.

Reallabor	Zeitraum	Ziel-Ausbaustufe Fahrplan (werktags)	Besonderheiten
Friedrichshafen	28.10.2024 – 30.06.2025	09:10 10:10 13:10 14:10	Start mit Innenstadt-Route (28.10. – 22.11.2024) Überlandroute ab 22.11.2024 Fahrplan sukzessive erweitert bis Ziel-Ausbaustufe
Mannheim	28.10.2024 – 31.12.2024	09:10* 09:40 10:10* 10:40 13:10* 13:40 14:10* 14:40 15:10* 15:40	Nur Betrieb im Jahr 2024 Erste zwei Wochen (KW 44–45) reduzierter Fahrplan (*) Erweiterung auf Ziel-Ausbaustufe ab KW 46

Tabelle 5: Auszug aus der Definition des RABus Betriebsbereichs (ODD)

3.3 Wissenschaftliche Begleitforschung

Die Technik des autonomen Fahrens wird unsere zukünftige Mobilität maßgeblich prägen. Ihr erfolgreicher Einsatz im öffentlichen Verkehr – als Beitrag zu einer flächen- und energiesparenden Verkehrswende – hängt wesentlich von der Akzeptanz, der Gestaltung des Angebots sowie den ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen ab. Vor diesem Hintergrund umfasst die wissenschaftliche Begleitforschung im Projekt RABus mehrere miteinander verknüpfte Teilbereiche:

Das FKFS wertet im ersten Schritt den Probandenbetrieb aus, der im Rahmen der Erprobungsgenehmigung durchgeführt wurde. Ziel war es, das tatsächliche Nutzungsverhalten, soziodemografische Muster und mögliche Nutzungshürden systematisch zu analysieren.

Das KIT untersuchte die Akzeptanz autonomer Kleinbusse sowie deren Einbettung in das Gesamtsystem des ÖPNV. Ziel ist es, herauszufinden, welche Personengruppen unter welchen Bedingungen die autonomen Kleinbusse nutzen würden – und Empfehlungen zu geben, wie ihr Einsatz im Sinne einer nachhaltigen Mobilität möglichst effizient gestaltet werden kann. Zudem werden Räume/Gebiete identifiziert, in denen autonomer ÖV besonders hohes Potenzial hat.

Im letzten Teil erfolgt durch das FKFS die technische Bewertung des Fahrbetriebs, insbesondere zur Leistungsfähigkeit und Sicherheit der automatisierten Fahrzeuge unter realen Einsatzbedingungen. Hierzu wurde u. a. eine Methode zur Bewertung der Hinderniserkennung entwickelt und in der Praxis erprobt. Alle vier Teilbereiche liefern wichtige Erkenntnisse für den künftigen Einsatz automatisierter Mobilität im öffentlichen Verkehr

und zeigen, unter welchen Bedingungen ein Regelbetrieb sinnvoll und machbar erscheint.

3.3.1 Auswertung des Probandenbetriebs

Im Rahmen des Projekts RABus wurde ein Fahrbetrieb mit automatisierten Shuttles im öffentlichen Straßenraum erprobt. Aufgrund der Vorgaben der Erprobungsgenehmigung konnte dieser jedoch nicht als vollständig öffentlicher Linienbetrieb angeboten werden, sondern musste im Rahmen eines sogenannten Proband:innenbetriebs durchgeführt werden.

Interessierte Personen konnten sich hierfür über ein Onlineformular registrieren. Nach erfolgreicher Freigabe durch das Projektteam war es ihnen möglich, individuelle Fahrttermine über ein Buchungssystem zu reservieren (siehe Kapitel 3.2.4). Ziel war es, ein möglichst breites Spektrum der Bevölkerung für diesen realitätsnahen Testbetrieb zu gewinnen – also Nutzer:innen unterschiedlicher Altersgruppen, Geschlechter und Hintergründe.

Wer hat sich registriert?

Insgesamt wurden im Laufe des Projekts 2.693 Personen als Proband:innen registriert. Ein detaillierter Blick auf die Altersverteilung in Abbildung 30 links zeigt: Die Mehrheit stammt aus der Altersgruppe zwischen 18 und 44 Jahren. Besonders stark vertreten war die Gruppe der 35- bis 39-Jährigen. Mit zunehmendem Alter nahm die Beteiligung spürbar ab – insbesondere ab 65 Jahren, wie es in der Abbildung links deutlich zu erkennen ist. Abbildung 30, rechts zeigt: Nur rund 14 Prozent aller Registrierungen entfallen auf Personen über 65 Jahre, obwohl gerade diese Altersgruppe im Kontext barrierefreier Mobilität als besonders relevant gilt.

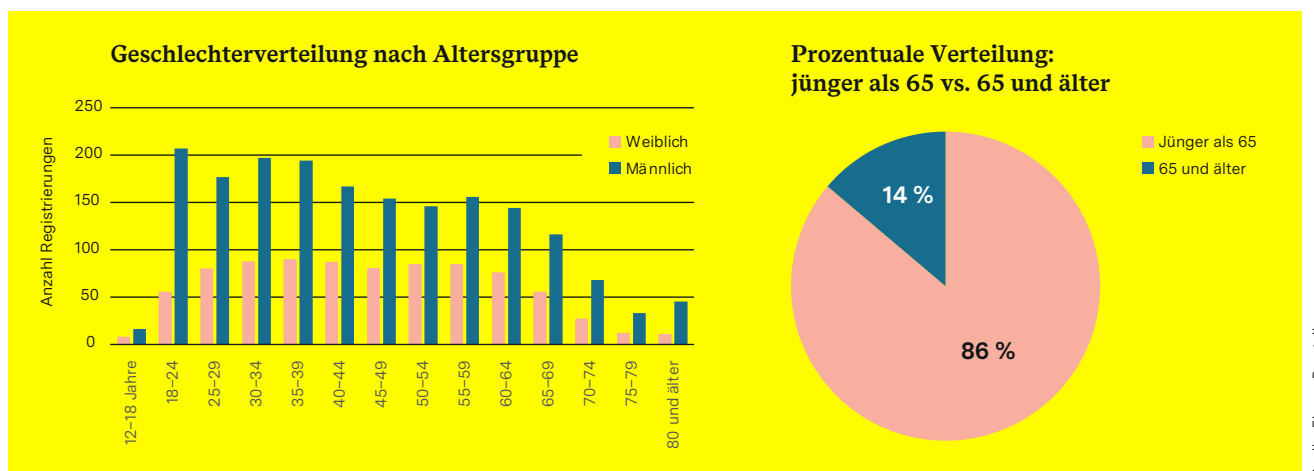


Abbildung 30: Proband:innenregistrierungen im Überblick

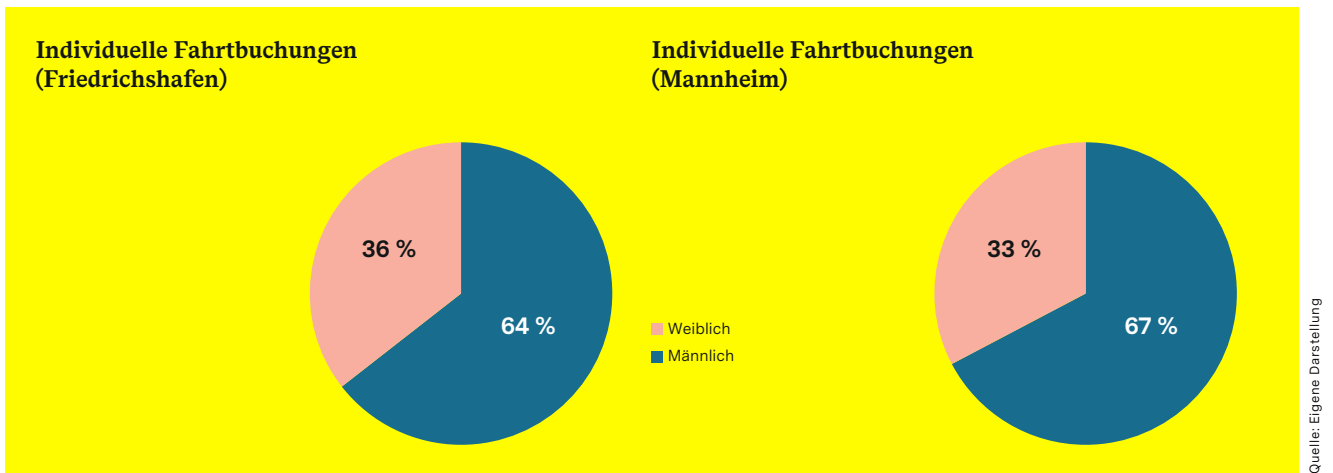


Abbildung 31: Fahrtenbuchungen im Überblick

Auch bei der Geschlechterverteilung zeigt sich ein deutlicher Unterschied: Rund 70,5 Prozent der registrierten Personen sind männlich. Dieser Männerüberschuss war in fast allen Altersgruppen erkennbar. Der deutliche Gender-Gap deckt sich mit bekannten Mustern aus Studien zu Shared-Mobility-Angeboten (z.B. E Scooter), bei denen sich häufig ein Männeranteil von über 65 Prozent zeigt. Gründe können vor allem im Mobilitätsverhalten und in den nachweisbar unterschiedlichen Wegeketten von Männern und Frauen liegen. Eine Integration eines autonom fahrenden Shuttles in die meist wesentlich komplexeren Wegeketten von Frauen erscheint mit mehr Hürden behaftet zu sein. Auch der Zugang zur Technik und wahrgenommene Sicherheitsaspekte können eine Rolle spielen.

Wer ist tatsächlich gefahren?

Ein Blick auf die gebuchten Fahrten bestätigt dieses Ungleichgewicht (siehe Abbildung 31): Auch bei den

tatsächlichen Fahrten lag der Männeranteil über dem der Frauen – in Friedrichshafen bei 64 Prozent, in Mannheim bei 67 Prozent. Die Frauenanteile lagen somit bei 36 Prozent bzw. 33 Prozent. Das zeigt, dass sich die unausgewogene Geschlechterverteilung nicht nur auf die Registrierung bezieht, sondern sich auch auf die tatsächliche Nutzung ausgewirkt hat.

Wann wurde gefahren?

Die gebuchten Uhrzeiten geben zudem Aufschluss über mögliche Nutzungsmuster (siehe Abbildung 32): In Friedrichshafen dominierten eindeutig die Nachmittagsfahrten – vor allem die Fahrt um 14.10 Uhr mit einem Anteil von über 40 Prozent. Dies könnte mit Schulschlusszeiten, Freizeitmobilität oder beruflichen Tagesabläufen zusammenhängen. In Mannheim war die Verteilung aufgrund der höheren Anzahl an angebotenen Fahrten gleichmäßiger über den Tag verteilt, der Schwerpunkt lag aber ebenfalls auf den Fahrten um 13.10 Uhr und 14.10 Uhr.

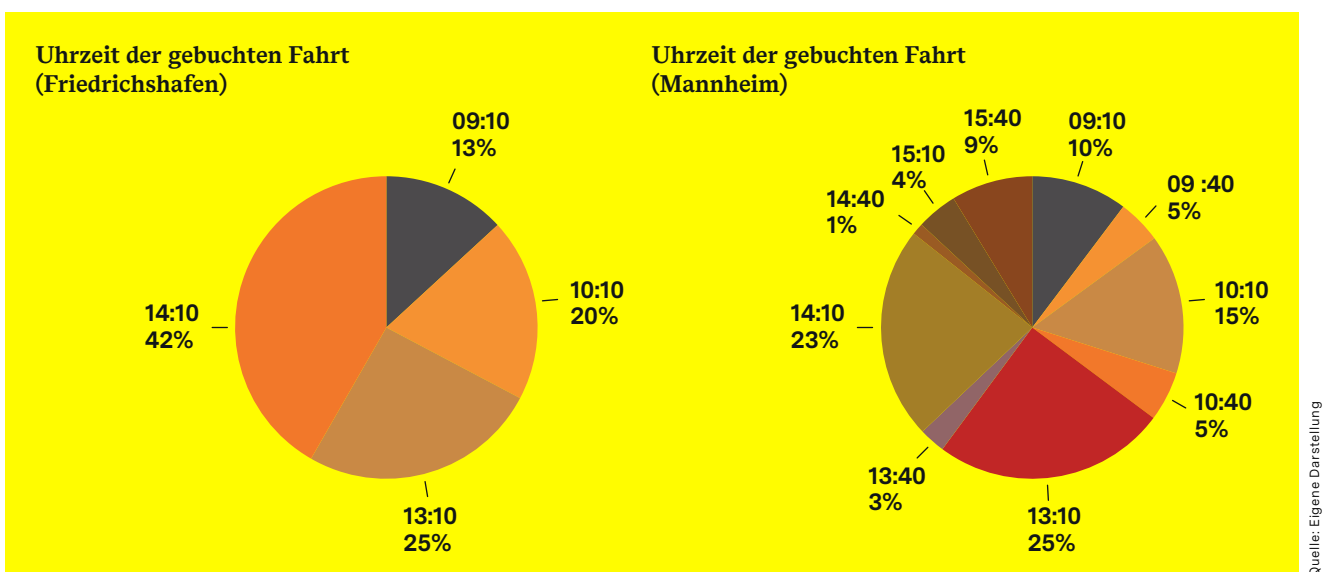


Abbildung 32: Fahrtenbuchungen im Überblick

Einordnung und Fazit

Die Ergebnisse des Probandenbetriebs zeigen: Der Betrieb automatisierter Shuttles im Realverkehr wurde gut angenommen – allerdings vorwiegend von jüngeren, männlichen Personen. Trotz breiter Kommunikationsmaßnahmen gelang es nicht, ältere Menschen und Frauen in gleichem Maße zu erreichen oder zur Teilnahme zu motivieren. Dieses Muster ist nicht ungewöhnlich – zahlreiche Studien (u. a. zur Einführung von Car- und Bikesharing) dokumentieren vergleichbare Einstiegshürden für bestimmte Gruppen.

Für zukünftige Projekte lässt sich daraus ableiten, dass gezielte und diversitätssensible Anspracheformate notwendig sind – z. B. über Seniorenzentren, frauenspezifische Netzwerke oder analoge Informationswege. Zudem sollten Angebote stärker auf konkrete Lebenssituationen und Mobilitätsbedarfe abgestimmt sein, um einen echten Alltagsbezug herzustellen. Auch gezielte Begleitmaßnahmen wie persönliche Einweisungen, Testtage oder Kooperationen mit lokalen Akteuren könnten dazu beitragen, Hürden abzubauen und die Akzeptanz in breiteren Bevölkerungsschichten zu erhöhen.

3.3.2 Akzeptanzforschung

In den folgenden Abschnitten wird zunächst das Konzept der Akzeptanzforschung sowie der verkehrlichen Bewertung vorgestellt (siehe Abbildung 33). Danach werden die Ergebnisse aus den Online-Erhebungen und Interviews erläutert. Anschließend wird aufgezeigt, welche

verkehrlichen Wirkungen auf Grundlage der im Projekt verwendeten Modelle zu erwarten sind.

Konzept der Begleitforschung

Zur Erforschung der Akzeptanz autonomer Kleinbusse wurden mehrere quantitative Online-Befragungen sowie qualitative Interviews in verschiedenen Formaten durchgeführt. Die Erhebungen richteten sich an drei Zielgruppen: die allgemeine Bevölkerung in Baden-Württemberg, die Bevölkerung in den beiden Reallaboren sowie Fahrgäste der Shuttle-Fahrten. Ziel war es, die Nutzungsakzeptanz zu analysieren, Personengruppen und ihre Bedürfnisse zu erfassen sowie mögliche Nutzungsbarrieren zu identifizieren.

Zudem wurden zwei Verkehrsnachfragemodelle entwickelt, mit denen die verkehrlichen Wirkungen eines künftigen Angebots autonomer Kleinbusse quantitativ ermittelt werden konnten. Unter Einbeziehung der Online-Erhebungen wurden agentenbasierte Verkehrsnachfragemodelle mit mobiTopp für die beiden Reallabore erstellt. Damit lassen sich verschiedene Maßnahmen – beispielsweise der Aufbau neuer Buslinien oder eines Ridepooling-Angebots – sowie Kombinationen in Form von Szenarien beispielsweise auf eine Veränderung des Modal Splits hin untersuchen. Darauf aufbauend wurde ein abstrahiertes Potenzialmodell für ganz Baden-Württemberg entwickelt, das auf Ebene der Zensusgitterzellen sowie auf Gemeindeebene aggregiert das Potenzial für autonome ÖPNV-Angebote darstellt.



Abbildung 33: Konzept der Begleitforschung zu Akzeptanz und verkehrlichen Wirkungen

Akzeptanz in Baden-Württemberg – Online-Erhebungen

Um Erkenntnisse zur Akzeptanz autonomer Kleinbusse in der Bevölkerung Baden-Württembergs zu gewinnen, wurde Anfang 2022 eine Online-Erhebung mit 1.434 Teilnehmer:innen über ein Meinungsforschungsinstitut sowie über Social Media durchgeführt. Obwohl alle Altersgruppen über 18 vertreten waren, waren ältere Menschen und Frauen leicht unterrepräsentiert.

Die Umfrage zeigt: Fast alle Menschen kennen den Begriff „autonomes Fahren“, doch jede fünfte Person fühlt sich nicht ausreichend über die Technik informiert. 44 Prozent der Befragten stehen der Technik kritisch gegenüber, 59 Prozent zeigen Interesse an der Nutzung (siehe Abbildung 34).

Für den weiteren Verlauf der Befragung wurde den Teilnehmer:innen ein zukünftig ausgereifter Stand der Technik beschrieben, der als Grundlage für die Fragen diente. Basierend darauf gaben 42 Prozent der Befragten an, autonome Kleinbusse auf jeden Fall als Teil des ÖPNV nutzen zu wollen. Für einen ebenso großen Anteil ist die Nutzung noch nicht sicher und hängt meist von den konkreten Rahmenbedingungen des Angebots ab. Die Zustimmung fällt in städtischen Regionen höher aus als in ländlichen, und auch jüngere Altersgruppen zeigen sich deutlich offener als ältere.

Besonders positiv wurde die Nutzung als Zubringer zum Schienenverkehr bewertet – 58 Prozent der Befragten können sich dies gut vorstellen. Auch Ridepooling-Angebote mit frei wählbaren Start- und Zielorten fanden breite Zustimmung: 54 Prozent befürworten diese Form der Nutzung. Die bei flexiblen Angeboten notwendige

vorherige Buchung wurde von 95 Prozent als unproblematisch empfunden. 84 Prozent der Befragten würden eine Buchung per App durchführen – wobei hier berücksichtigt werden muss, dass aufgrund der Online-Erhebung möglicherweise eine Verzerrung der Stichprobe in Richtung digital affiner Personen besteht.

Gefragt wurde außerdem, welche Verbesserungen das neue Angebot im Vergleich zum bestehenden ÖPNV bieten müsste, damit aus allgemeinem Interesse eine tatsächliche Nutzung wird. Am häufigsten genannt wurden ein besseres Angebot zu Randzeiten (83 Prozent), direktere Verbindungen (81 Prozent) sowie näher gelegene Haltestellen (77 Prozent).

Kritisch bewertet wurden dagegen unter anderem mögliche Arbeitsplatzverluste, die Preisgestaltung, die Präferenz für andere Verkehrsmittel, Sorgen wegen Hackerangriffen sowie potenzielle Technikfehler (siehe Abbildung 35). Dabei ist anzumerken, dass die Sorge um Arbeitsplatzverluste im Verlauf des Projekts immer seltener geäußert wurde. Dies steht im Zusammenhang mit dem zunehmenden Bekanntwerden des Fachkräftemangels in dieser Branche.

Abschließend wurden den Teilnehmer:innen hypothetische Entscheidungssituationen zur Verkehrsmittelwahl vorgelegt. Dabei zeigte sich: Die Wahrscheinlichkeit, autonome Kleinbusse zu nutzen, ist besonders hoch auf Arbeits- und Freizeitwegen. Heutige ÖPNV-Nutzende zeigen eine erhöhte Bereitschaft zur Nutzung. Personen, die hauptsächlich den Pkw nutzen, äußerten seltener die Bereitschaft zur Nutzung – sie bewerteten autonome Kleinbusse allerdings positiver als den bestehenden ÖPNV.

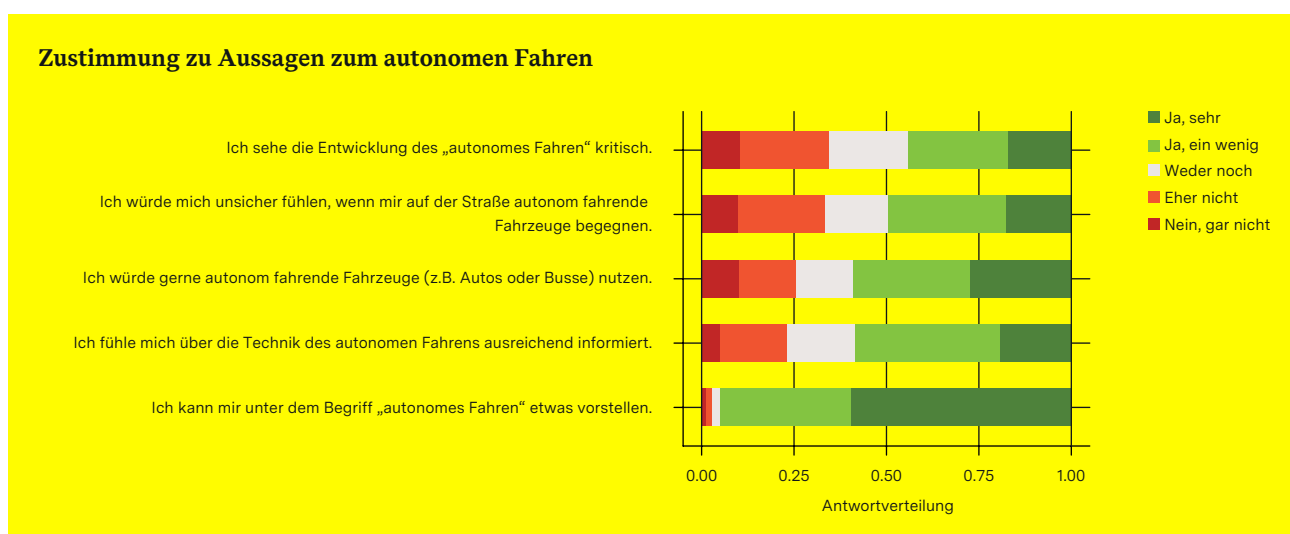
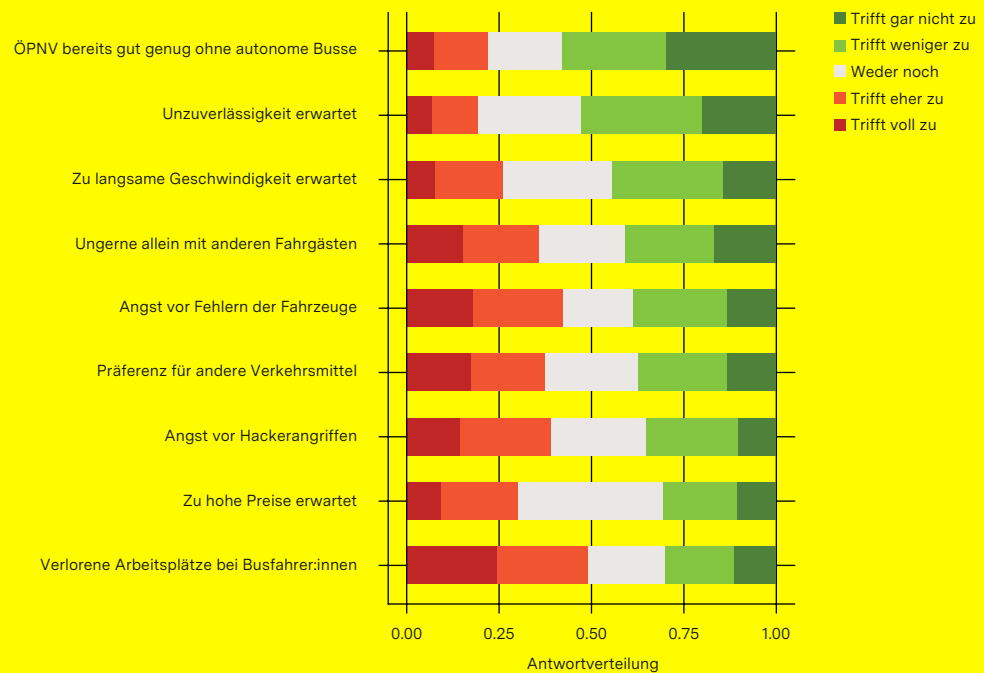


Abbildung 34: Zustimmung zu Aussagen zum autonomen Fahren

Argumente gegen Nutzung autonomer Kleinbusse



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 35: Zustimmung zu Vorbehalten gegen die Nutzung der autonomen Busse

Vertiefende Online-Erhebung in Mannheim und Friedrichshafen

Im Jahr 2024 wurde eine weitere Online-Erhebung in den Regionen Mannheim und Friedrichshafen durchgeführt, bei der 859 Personen über Social Media und Access-Panels erreicht wurden. Neben allgemeinen Fragen zur Akzeptanz wurden insbesondere auch lokale Nutzungswünsche erhoben, deren Start- und Zielorte die Befragten per Klick auf einem interaktiven Stadtplan hinterlegen konnten.

Dabei zeigten sich regionale Unterschiede, etwa in der durchschnittlichen Länge der gewünschten Fahrstrecken und bei den Verkehrsmitteln, die durch autonome Shuttles ersetzt werden sollen: In Mannheim lagen die Fahrtwünsche im Schnitt bei 6,8 km, wobei in 56 Prozent der Fälle der Pkw substituiert würde. In Friedrichshafen waren es durchschnittlich 9,1 km, mit einem Substitutionsanteil des Pkw von 66 Prozent. Beiden Regionen ist gemeinsam, dass insbesondere Ridepooling in Tür-zu-Tür-Form gewünscht wurde. Als Hauptgrund für das Interesse wurde in beiden Fällen die unzureichende Takung des bestehenden ÖPNV-Angebots genannt.

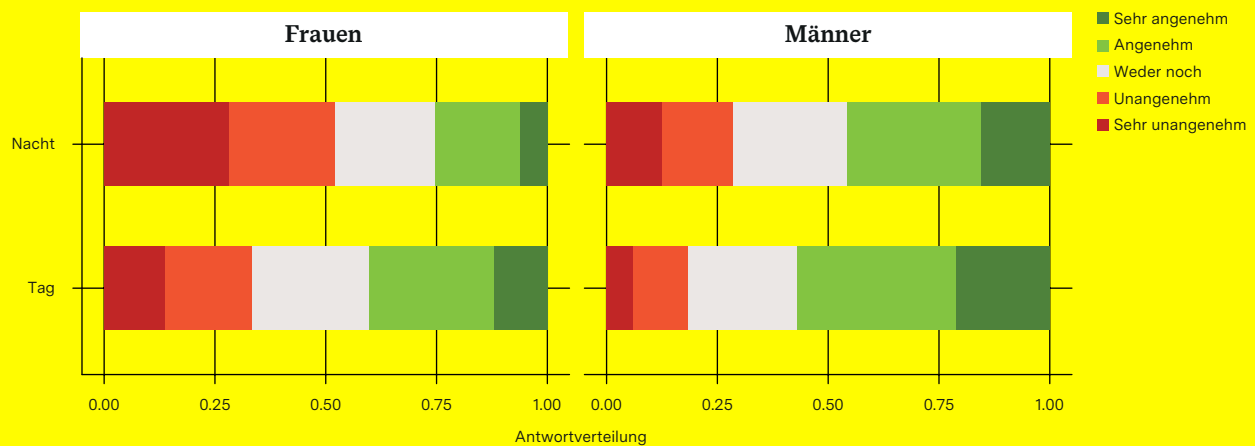
Ein weiterer Schwerpunkt lag auf einem sogenannten Stated-Choice-Experiment mit Fokus auf Zuverlässigkeit. Den Teilnehmer:innen wurden Entscheidungssituationen mit verschiedenen Verkehrsmitteln und Verspätungs-

szenarien vorgelegt. Das Ergebnis: Eine ungeplante Verspätung im ÖPNV wird im Durchschnitt 3,7-mal negativer wahrgenommen als eine reguläre Verlängerung der Reisezeit. Gerade für Angebote auf der ersten und letzten Meile ist diese Erkenntnis zentral, da hier verpasste Anschlüsse schnell zu größeren Verzögerungen führen können. Die gewonnenen Daten bieten eine wertvolle Grundlage für die Optimierung zukünftiger Angebote.

Auch das Zusammenspiel von Fahrzeuggröße und dem sogenannten sozialen Sicherheitsgefühl, bei dem es um die Sicherheit in Bezug auf andere Personen im Fahrzeug geht, wurde im Rahmen der Begleitforschung untersucht. Den Befragten wurden neun verschiedene Situationen präsentiert, in denen sich Fahrzeuggröße (7-Sitzer, Kleinbus und klassischer Linienbus) und Auslastung unterschieden. Für jede Situation wurden sie gebeten anzugeben, wie wohl sie sich fühlen würden – einmal bei Tag und einmal bei Nacht, jeweils unter der Annahme, dass sich kein zusätzliches Begleitpersonal im Fahrzeug befindet. Abbildung 36 zeigt exemplarisch drei dieser neun Situationen.

Die Ergebnisse zeigen: In den kleinen Fahrzeugen wird das Sicherheitsgefühl am geringsten eingeschätzt. In klassischen Bussen und autonomen Shuttles fällt das Empfinden deutlich positiver aus. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen Tag und Nacht:

Bewertung von verschiedene Situationen in autonomen Fahrzeugen ohne Begleitpersonal



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 36: Bewertung von neun Situationen in autonomen Fahrzeugen ohne Begleitpersonal (drei Beispiele unten) nach Tageszeit und Geschlecht (oben)

Durchschnitt wurden 40 Prozent der dargestellten Situationen bei Nacht als unangenehm bis sehr unangenehm empfunden – im Gegensatz zu 25 Prozent am Tag. Besonders auffällig sind zudem die geschlechtsspezifischen Unterschiede: Frauen fühlten sich in fast doppelt so vielen Situationen unwohl wie Männer. Das Alter der Befragten hatte wiederum kaum Einfluss.

Im Rahmen von Gesprächen und Interviews wurde deutlich, dass gezielte Informationen über vorhandene Sicherheitsmaßnahmen – etwa Kameraüberwachung, Mikrofone, Leitstellenzugriff oder KI-gestützte Erkennung kritischer Situationen – die Einstellungen deutlich positiv beeinflussen können. Das Thema soziale Sicherheit sollte folglich aktiv aufgegriffen und transparent kommuniziert werden. Die Fahrgäste müssen wissen, welche Maßnahmen ergriffen werden, um ihre Sicherheit im Fahrzeug zu gewährleisten.

Probandenbefragung

Teilnehmer:innen der Fahrten mit dem autonomen Kleinbus wurden im Rahmen des Buchungsprozesses zunächst vor der Fahrt mit einer speziell dafür ausgerichteten Online-Befragung kontaktiert und nach der Fahrt erneut befragt. Im Fokus standen dabei die Motivation zur Teilnahme sowie das konkrete Erleben der Fahrt.

Als Hauptgründe für die Teilnahme wurden das Interesse an der Technik und der Wunsch genannt, die Erfahrungen im persönlichen Umfeld weiterzugeben (siehe Abbildung 37 oben). Damit wurde das Thema auch über die Proband:innen hinaus in die Gesellschaft getragen. Ein zentrales Ziel des Reallabors war zudem der Abbau möglicher Vorbehalte gegenüber dem autonomen Fahren im öffentlichen Verkehr – 35 Prozent der Teilnehmer:innen

nannten dies als Motivation („Trifft zu“ oder „Trifft eher zu“). Von diesen 35 Prozent gab lediglich jede zehnte Person an, dass dieses Ziel nicht erreicht wurde (siehe Abbildung 37 unten).

Darüber hinaus bewerteten die Fahrgäste ihre Fahrt anhand verschiedener Kriterien auf einer Skala von einem bis fünf Sternen. In Abbildung 38 ist die durchschnittliche Bewertung im Zeitverlauf dargestellt. Besonders positiv wurden die Präsenz der Fahrbegleitung sowie der der Vorgang des Ein- und Ausstiegs bewertet. Verbesserungspotenzial sahen die Teilnehmer:innen vor allem bei der Geschwindigkeit und den Bremsvorgängen. Nach einem Technik-Update, durch das das Fahrzeug eine Höchstgeschwindigkeit von 54 km/h erreichte, stieg die Zufriedenheit mit der Geschwindigkeit deutlich an.



Abbildung 37: Durch Proband:innen angegebene Motivation für Teilnahme am Reallabor (oben) und Angabe zum Erfolg des Sorgen/Ängste Abbau (unten)

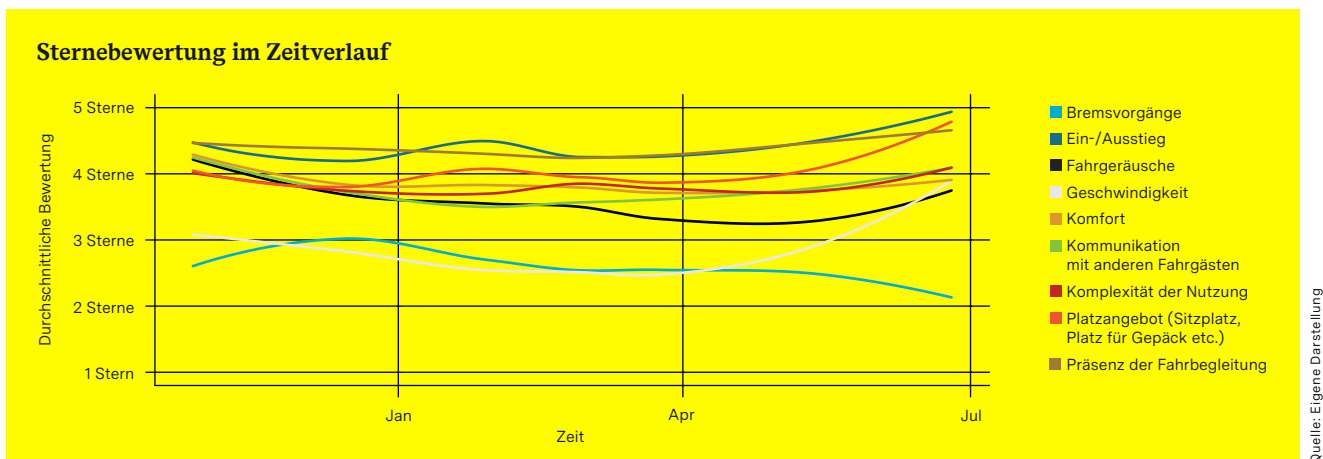


Abbildung 38: Gemittelte Bewertung der Aspekte der Mitfahrt im RABus-Shuttle

Öffentlichkeitsarbeit und qualitative Rückmeldungen

Das Projekt RABus war auf verschiedenen öffentlichen Veranstaltungen präsent, um über autonome Kleinbusse zu informieren. Dabei kamen qualitative Interviews und ein modifizierter Tablet-Fragebogen zum Einsatz, um ein Stimmungsbild der Teilnehmer:innen zu erfassen. Zu beachten ist, dass diese Rückmeldungen nicht repräsentativ sind.

Die Befragungen ergaben folgende qualitative Eindrücke.

- Große Neugierde und Aufgeschlossenheit gegenüber autonomem Fahren und den Kleinbussen
- Unsicherheiten bezüglich der Sicherheit der Technik, der Angebotsformen und der Barrierefreiheit, die jedoch durch die bereitgestellten Informationen meist ausgeräumt wurden
- Sorgen über den Verlust von Arbeitsplätzen, die ab 2023 kaum noch genannt wurden
- Wahrnehmung ländlicher und schlecht erschlossener Gebiete als bevorzugte Einsatzorte

3.3.3 Modellierung verkehrlicher Wirkungen und Potenzialmodell

Zur Bewertung der verkehrlichen Wirkungen eines zukünftigen ausgebauten Angebots autonomer Kleinbusse eignet sich die Methode der Modellierung besonders gut, da bislang keine umfangreichen Praxiserfahrungen für diese neue Form der Mobilität vorliegen.

Im Projekt kommt hierfür das am KIT entwickelte agentenbasierte Verkehrsnachfragemodell mobiTopp zum Einsatz. In mobiTopp wird ein digitaler Zwilling des Untersuchungsgebiets mit dem Mobilitätsangebot, den soziodemografischen Merkmalen der Menschen und möglichen Aktivitätenorten erzeugt. Alle Personen werden

dabei als einzelne Agenten repräsentiert. Im Verlauf der Simulation bewegen sie sich, um die von ihnen geplanten Aktivitäten (u.a. Arbeiten, Einkaufen, Daheimsein) im Verlauf einer Woche durchzuführen. Hierfür erhalten sie zu Beginn der Simulationen einen Aktivitätenplan, den sie „abarbeiten“. Dabei treffen sie modellbasierte Entscheidungen zum Ziel der Aktivität, zum Verkehrsmittel und zur Route (siehe Abbildung 39).

Das räumlich und zeitlich hoch aufgelöst Modellergebnis enthält alle durchgeführten Wege sowie die verwendeten Verkehrsmittel. Hiermit können die verkehrlichen Wirkungen von Veränderungen (z.B. neue Mobilitätsangebote oder Push- und Pull-Maßnahmen) detailliert gezeigt werden. Berücksichtigt werden dabei auch Pendlerverflechtungen, der gesamte Fahrplan des öffentlichen Verkehrs sowie Daten zu Points of Interest.

Bei der Verkehrsmittelwahl kommen die im Projekt RABus erhobenen Verkehrsmittelwahl-Verhaltensdaten zum Einsatz. In Szenarien wird das Verkehrsangebot durch die Einführung unterschiedlicher Angebote auto

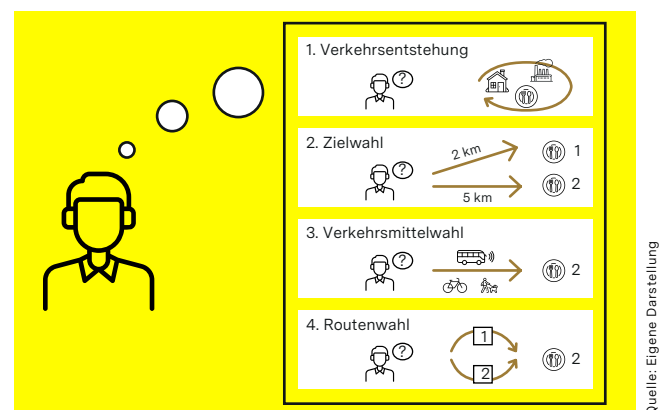


Abbildung 39: Prozessablauf in der Simulationsoftware mobiTopp aus der Sicht eines simulierten Agenten

nomer Shuttles variiert und es werden die Auswirkungen auf das Gesamtverkehrsaufkommen analysiert. Die Modellierungen wurden für die Städte Mannheim und Friedrichshafen durchgeführt. Die Ergebnisse werden u. a. als Modal Shift ausgewiesen – also als Veränderung der Anteile einzelner Verkehrsmittel am Gesamtverkehrsaufkommen.

Die in Abbildung 40 (rechts) dargestellten zwei Szenarien mit einem ganztägigen Ridepooling-Angebot für die Region Friedrichshafen zeigen: Mit wachsender Fahrzeuganzahl innerhalb eines Ridepooling-Angebots steigt der Anteil am Modal Split. Ab einer Flottengröße zwischen 60 und 200 Fahrzeugen ist jedoch eine Sättigung der Nachfrage in Friedrichshafen zu beobachten – die Verdreifachung der Fahrzeugzahl führt also nicht zu einer Verdreifachung der Nutzung. Die größte Verlagerung erfolgt in beiden Szenarien vom Pkw hin zum autonomen Shuttle. Allerdings sinkt mit zunehmender Flottengröße der durchschnittliche Besetzungsgrad und die Effizienz des Angebots wird reduziert.

In Mannheim werden unter anderem zwei Ridepooling-Szenarien mit jeweils 120 Fahrzeugen, aber je nach Uhrzeit unterschiedlichen Bedienegebieten untersucht (Abbildung 40, links): In einem Szenario wird Ridepooling ganztägig stadtweit, tariflich integriert und ohne weitere Push-Maßnahmen angeboten. Es zeigt sich, dass das neue Angebot gleichermaßen Fahrten des klassischen ÖPNV und des Pkw reduziert. Dies mindert die Effizienz des bestehenden ÖPNV und sorgt für eine geringere verkehrliche Entlastung. Wird hingegen das Stadtzentrum tagsüber vom Bedienegebiet ausgeschlossen und werden stattdessen nur die Randgebiete bedient – während nachts ein stadtweites Angebot besteht –, kann der Anteil des klassischen ÖPNV auf dem ursprünglichen Niveau gehalten werden, während Fahrten vom PKW

in das Ridepooling verlagert werden. Jedoch geht die Gesamtnutzung der autonomen Kleinbusse deutlich zurück.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die verkehrlichen Wirkungen autonomer Kleinbusse stark vom bisherigen Modal Split und von der Qualität des bestehenden ÖPNV-Angebots abhängen. In Nebenzeiten und in Regionen mit schwachem ÖPNV ersetzen Ridepooling-Fahrzeuge hauptsächlich Pkw-Fahrten. Durch gezielte Steuerung – etwa über restriktive Pkw-Nutzungsregelungen oder angepasste Tarifmodelle – kann und sollte die verkehrliche Wirkung der autonomen Kleinbusse deutlich gesteigert werden.

Landesweites Potenzialmodell für autonome Kleinbusse

Zur vergleichbaren Bewertung des möglichen Einsatzes autonomer Kleinbusse wird ein landesweites Potenzialmodell für Baden-Württemberg erstellt. Dafür wird untersucht, wie gut die Erreichbarkeit von bewohnten Orten mit dem bestehenden ÖPNV ist – und wie sich diese Erreichbarkeit durch den ergänzenden Einsatz autonomer Kleinbusse verändern würde.

Die Erreichbarkeit wird definiert als die Anzahl Menschen an ihren jeweiligen Wohnorten, die innerhalb von 30 Minuten mit öffentlichen Verkehrsmitteln erreichbar ist – ins Verhältnis gesetzt zur erreichten Anzahl von Menschen an ihren Wohnorten mit dem Pkw im gleichen Zeitraum. Im nächsten Schritt wird der bestehende ÖPNV durch ein flexibles, autonomes Angebot ergänzt. Anschließend wird berechnet, wie sich die Erreichbarkeit mit dem erweiterten ÖPNV verbessern würde.

Auf Grundlage von Daten aus der bundesweiten Befragung Mobilität in Deutschland wird dann abgeschätzt,

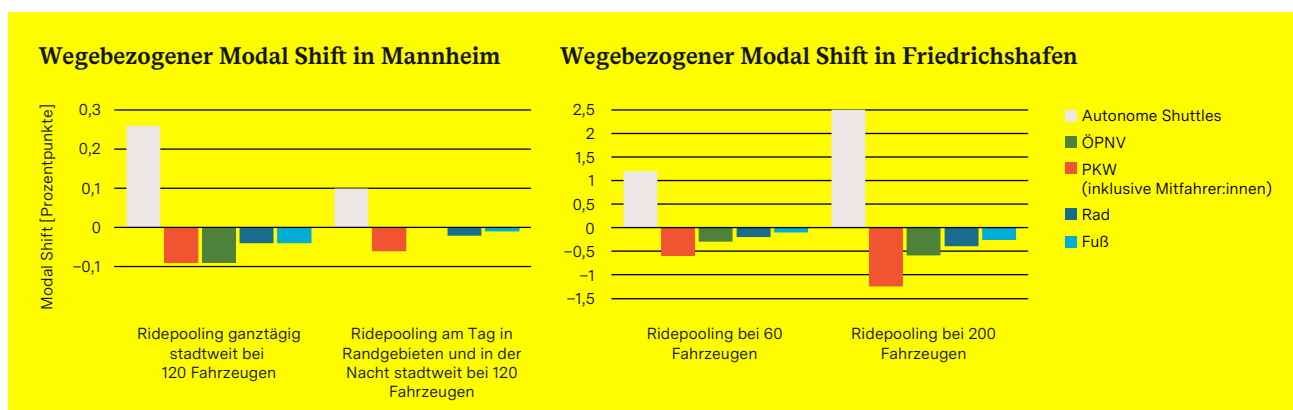


Abbildung 40: Verkehrsnachfragesimulation mit mobiTopp für die Regionen Mannheim (links) und Friedrichshafen (rechts) als Ridepooling-Angebot

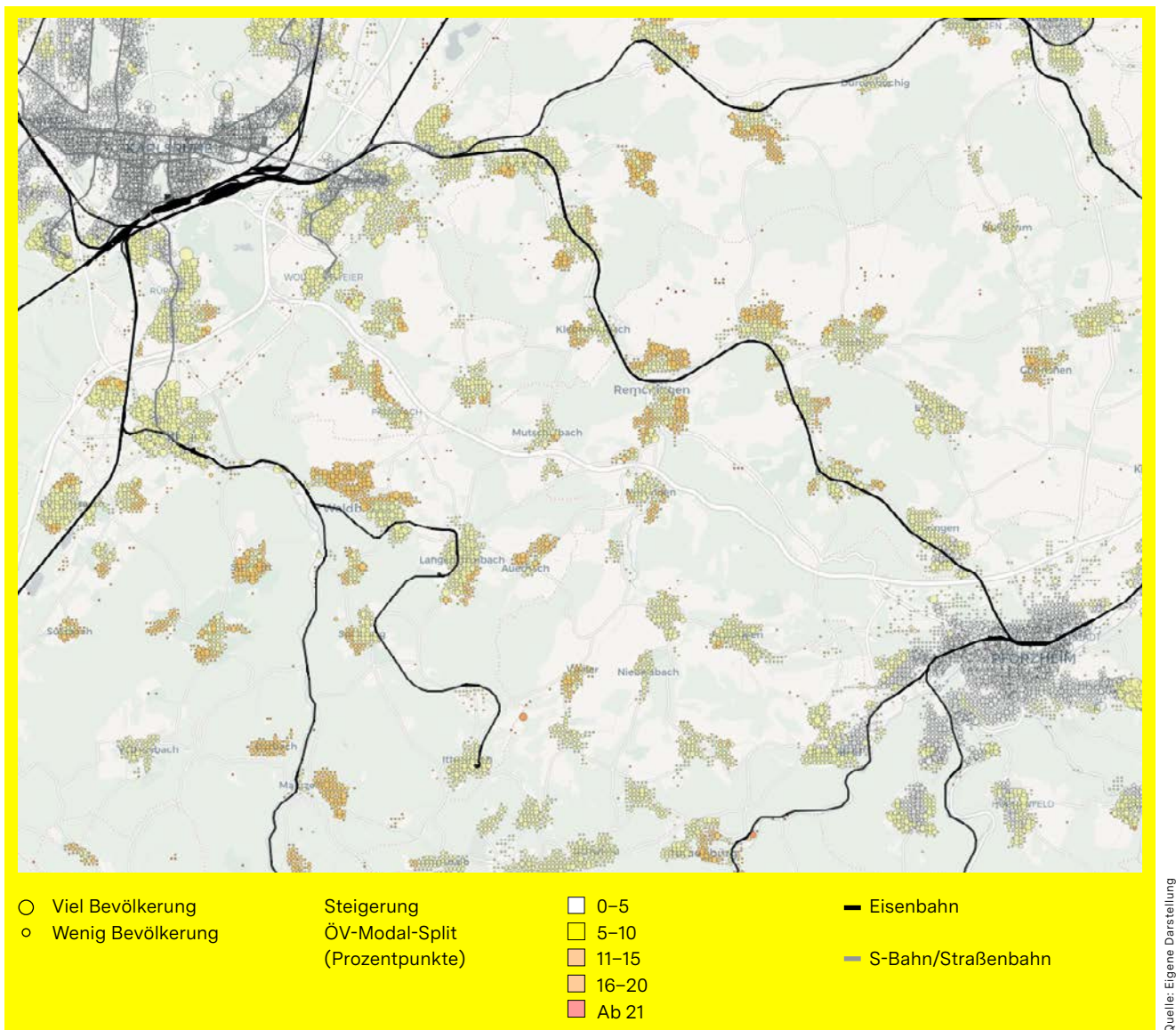


Abbildung 41: Darstellung von Orten mit Fahrgastpotenzial für flexible ÖPNV-Angebot

wie sich der Modal-Split-Anteil des öffentlichen Verkehrs im jeweiligen Gebiet durch das erweiterte ÖPNV-Angebot verändern könnte. Die daraus resultierenden zusätzlichen ÖPNV-Fahrten stellen das Nutzungspotenzial dar.

Abbildung 41 zeigt exemplarisch die potenzielle Steigerung des Modal-Split des ÖPNV für die Wohnbevölkerung in 100-m-Gitterzellen. Aus diesen Ergebnissen lassen sich geeignete Bedienggebiete und Linienführungen ableiten.

In nahezu jeder Gemeinde können potenzielle Einsatzgebiete identifiziert werden. Besonders hohes Potenzial zeigt sich im erweiterten Umfeld schienengebundener Systeme. Im ländlichen Raum hängt das Potenzial stark vom jeweiligen Einzelfall ab – insbesondere von der Raumstruktur rund um einen Ort und somit davon, ob relevante Ziele durch den erweiterten, flexiblen ÖPNV zusätzlich erreicht werden können.

Die vollständigen Ergebnisse sind in Form einer interaktiven Kartendarstellung für ganz Baden-Württemberg auf der Webseite des KIT online abrufbar (https://www.ifv.kit.edu/forschungsprojekte_1467.php).

3.3.4 Technische Bewertung des Fahrbetriebs

Für Mobilitätsanbieter, Verkehrsbetriebe und öffentliche Auftraggeber ist es von zentraler Bedeutung, automatisierte Fahrzeuge nicht nur nach Herstellerangaben, sondern auf nachvollziehbare Weise hinsichtlich ihrer Sicherheitsfunktionen bewerten zu können. Ein besonders sicherheitsrelevanter Bestandteil ist dabei das Hinderniserkennungssystem.

Ziel des Projekts RABus war es daher, eine praxisnahe und unabhängige Bewertungsmethode zu entwickeln, mit der sich die Leistung unterschiedlicher Hinderniserkennungssysteme systematisch vergleichen lässt – auch dann, wenn interne Daten oder Systemzugänge der Fahrzeuge nicht verfügbar sind.

Diese Methode soll ermöglichen, verschiedene Systeme im Vorfeld einer Anschaffung zu analysieren und fundierte Entscheidungen zu treffen. Der Ansatz folgt dabei einer sogenannten Blackbox-Logik: Es werden ausschließlich die Eingangs- und Ausgangsdaten des Systems betrachtet – die interne Signalverarbeitung oder der Algorithmus selbst bleiben außen vor.

Die Idee, Hinderniserkennungssysteme verschiedener automatisierter Fahrzeuge miteinander zu vergleichen, war bereits früh Teil der Projektkonzeption. In der praktischen Umsetzung des RABus-Projekts stand jedoch nur ein Shuttletyp zur Verfügung. Um dennoch eine fundierte Bewertung zu ermöglichen, wurde ein alternatives Verfahren entwickelt.

Da das RABus-Shuttle zu Projektbeginn noch nicht für Tests zur Verfügung stand, wurde zunächst der methodische Rahmen zur Bewertung der Hinderniserkennung priorisiert entwickelt. Ziel war es, eine standardisierte Vorgehensweise zu schaffen, die unabhängig vom Fahrzeugtyp anwendbar ist. Dazu gehörten die Definition relevanter Szenarien, die Festlegung von Prüfkriterien sowie die Entwicklung eines Auswerteprozesses.

Um die Methode frühzeitig erproben zu können, wurden erste Tests mit einem vorhandenen Referenzfahrzeug (eWolf) durchgeführt. Diese Versuche dienten dazu, die Bewertungslogik zu validieren und mögliche Anpassungen an den Testabläufen vorzunehmen. Erst zu einem späteren Zeitpunkt konnte das Verfahren mit dem RABus-Shuttle selbst angewendet und ein direkter Vergleich beider Systeme vorgenommen werden. Dabei wurden Unterschiede in der Erkennungsleistung, insbesondere bei teilverdeckten Objekten, dokumentiert und analysiert.

Bewertungskriterien

Ein zentrales Element der entwickelten Bewertungsmethode ist die Definition geeigneter Leistungskennzahlen für die Hinderniserkennung. Da intern verarbeitete Systemdaten in der Regel nicht zugänglich sind, stützt sich die Bewertung ausschließlich auf beobachtbare Größen – insbesondere erkannte Hindernisse im Vergleich zu einer Referenzmessung.

Um die Leistung eines Objekterkennungssystems nachvollziehbar zu bewerten, wird eine sogenannte Konfusionsmatrix verwendet. Sie stellt dar, welche Hindernisse im relevanten Verkehrsraum korrekt erkannt, übersehen oder fälschlich detektiert wurden. Aus dieser Matrix lassen sich anschließend mehrere Kenngrößen (Key Performance Indicators, KPIs) berechnen.

Im Projekt RABus wurden die folgenden Kennzahlen verwendet.

Erkennungsrate (Recall, R): Anteil korrekt erkannter Hindernisse an allen tatsächlichen Hindernissen

$$R = \frac{TP}{TP + FN}$$

Präzision (Precision, P): Anteil korrekt erkannter Hindernisse an allen vom System gemeldeten Hindernissen

		Klassifizierung	
		Erkannt als Hindernis (Positiv)	Nicht erkannt (Negativ)
Realität	Tatsächlich Hindernis (Positiv)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	Tatsächlich kein Hindernis (Negativ)	False Positive (FP)	True Negative (TN)

Tabelle 6: Konfusionsmatrix

$$P = \frac{TP}{TP + FP}$$

F1-Score: Harmonisches Mittel von Präzision und Recall

$$F1 = 2 \cdot \frac{P \cdot R}{P + R}$$

Zur Feinjustierung wurde zusätzlich ein gewichteter F1-Score ($F1_\alpha$) eingeführt. Mit diesem lässt sich der Fokus der Bewertung gezielt verschieben: Je nach Anwendungsfall kann ein höheres Gewicht auf Sicherheit (Vermeidung von False Negatives) oder auf Verfügbarkeit (Vermeidung unnötiger Stopps bei False Positives) gelegt werden.

$$F1_\alpha = \frac{1}{\alpha \frac{1}{P} + (1 - \alpha) \frac{1}{R}}$$

Dabei steht:

- $\alpha > 1$ → mehr Gewicht auf Recall (= mehr Sicherheit, weniger False Negatives)
- $\alpha < 1$ → mehr Gewicht auf Precision (= mehr Verfügbarkeit, weniger False Positives)
- $\alpha = 1$ → klassischer, ungewichteter F1-Score (Standardform)

Der flexible $F1_\alpha$ -Ansatz erlaubt es, Bewertungskriterien an unterschiedliche Einsatzszenarien und Sicherheitsanforderungen anzupassen – beispielsweise in dichtem Stadtverkehr versus abgelegene Gebiete.

Szenariengenerierung und Aufbau eines Testkatalogs

Um die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Hinderniserkennungssystemen bewerten zu können, müssen sie gezielt in praxisrelevanten, kritischen und mitunter seltenen Szenarien getestet werden. Ziel ist es, reproduzierbare und vergleichbare Testsituationen zu schaffen, die Aufschluss über das reale Verhalten der Systeme im Betrieb geben.

Die im Projekt RABus entwickelte Methodik basiert daher auf einer systematischen Szenariengenerierung, die zwei komplementäre Herangehensweisen vereint:

- **Wissensbasierte Szenariengenerierung** nutzt Fachwissen, Erfahrungswerte und Unfallanalysen, um typische Gefahrenlagen und risikobehaftete Konstellationen zu definieren (z. B. verdeckte Fußgänger:innen, enge Überholsituationen durch Radfahrende, schwierige Lichtverhältnisse).
- **Datenbasierte Szenariengenerierung** greift auf reale Fahrdaten (z. B. von Testfahrzeugen) und öffentlich verfügbare Datensätze zurück (z. B. KITTI, Safety Pool). Mithilfe automatisierter Analyseverfahren – etwa Reinforcement Learning oder Optimierungsalgorithmen – werden daraus besonders relevante Szenarien identifiziert.

Praxisbeispiel: Wie wirkt sich die Wahl von α im $F1_\alpha$ -Score aus?

Der gewichtete $F1_\alpha$ -Score erlaubt eine situationsabhängige Bewertung der Hinderniserkennung – je nachdem, ob im konkreten Anwendungsfall **Sicherheit** oder **Verfügbarkeit** im Vordergrund stehen soll:

Einsatzszenario	Ziel	Empfohlener α -Wert
Schulbus im innerstädtischen Verkehr	Höchste Sicherheit	$\alpha = 0,2-0,4$
Pendelshuttle auf abgegrenztem Werksgelände	Hohe Verfügbarkeit erwünscht	$\alpha = 0,6-0,8$
Regelbetrieb im gemischten Stadtverkehr	Ausgewogene Bewertung	$\alpha = 0,5$

Ein System mit hoher Recall-Rate erkennt fast alle Hindernisse, produziert aber auch viele Fehlalarme (niedrige Precision). Wird $\alpha = 0,3$ gewählt, gewichtet der Score die Erkennungsrate deutlich stärker – das ist vorteilhaft, wenn Sicherheit wichtiger ist als Komfort.

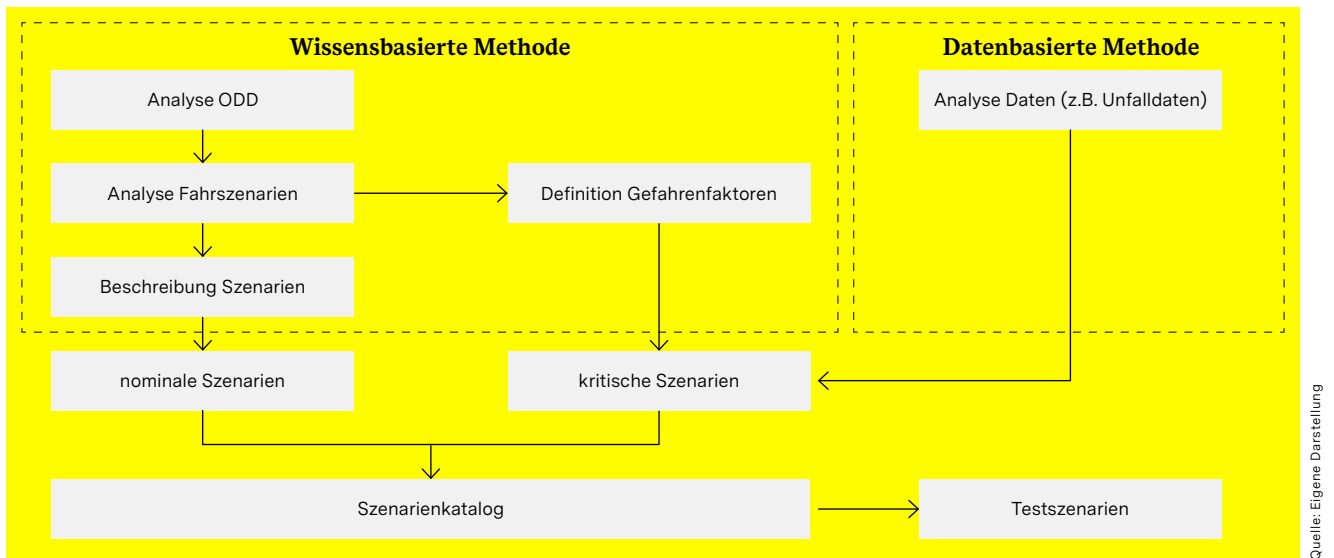


Abbildung 42: Methode zur Szenarienkatalogerstellung

Alle Szenarien wurden in einem zentralen Katalog dokumentiert, der Angaben zur Situation, den Umgebungsparametern und der Zielsetzung des Tests enthält. Die Struktur orientiert sich an der Norm ISO 34502, die vier zentrale Risikodimensionen beschreibt.

1. Eigenschaften des Fahrzeugs und der Sensorik
2. Merkmale der Umgebung
3. Verhalten und Eigenschaften erkannter Objekte
4. Verdeckungen und eingeschränkte Sichtlinien

Zur Visualisierung und Vorabprüfung wurden viele der Szenarien im virtuellen Fahrsimulator CARLA modelliert. Hier lassen sich selbst seltene oder potenziell gefährliche Situationen risikolos testen und bewerten. Die virtuelle Modellierung diente auch als Vorbereitung für die reale Erprobung im Schritt 3.

Am Ende stand ein strukturierter Szenarienkatalog mit 20 ausgewählten Testfällen, der sowohl Standard- als auch Extremsituationen abdeckt. Dieser diente als Grundlage für die reale Bewertung im Vergleichstest zwischen Shuttle und Referenzfahrzeug.

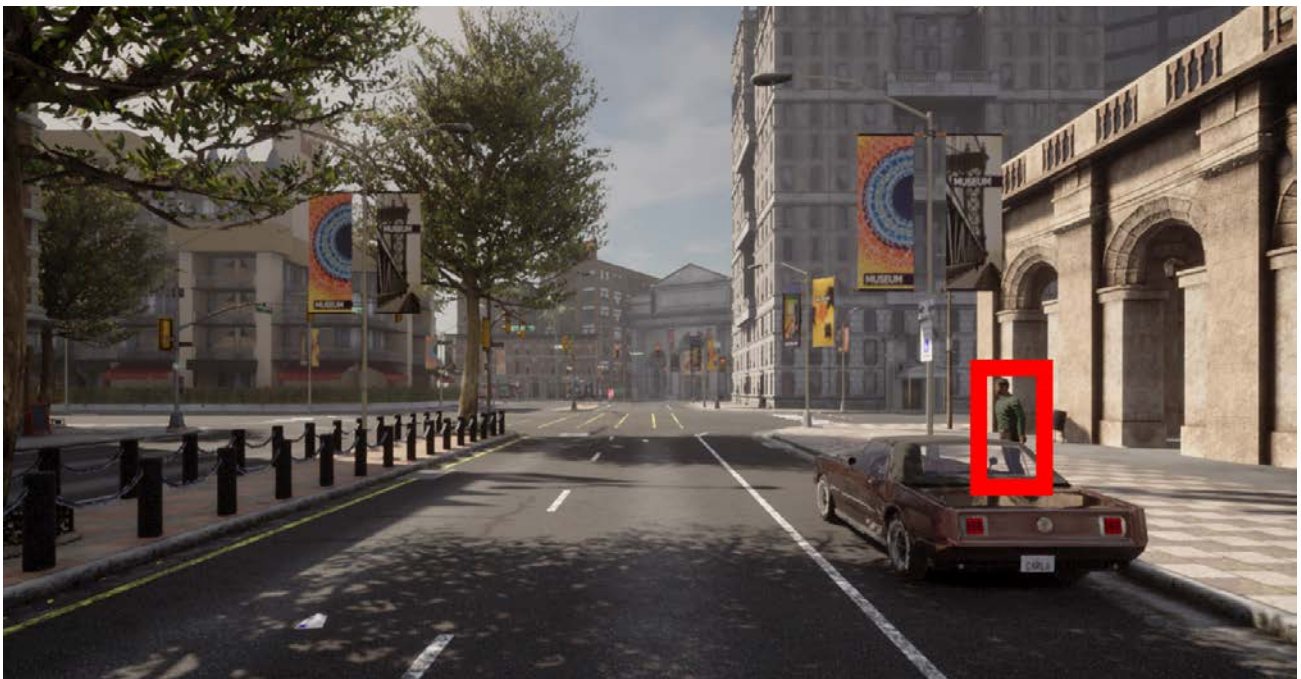


Abbildung 43: Potenzielle Gefahrenszenen in der virtuellen Umgebung (aufgrund von Verdeckungen)

Vergleichstest und Bewertung

Nach Definition geeigneter Bewertungskennzahlen und Erstellung eines standardisierten Szenarienkatalogs wurde im dritten Schritt die Bewertung der Hinderniserkennungssysteme im Realbetrieb durchgeführt. Ziel war es, die Hinderniserkennung automatisierte Fahrzeuge unter realitätsnahen Bedingungen in praxisrelevanten Szenarien zu testen und ihre Systemausgaben mit den zuvor definierten Referenzwerten abzugleichen.

Kern der Bewertung war ein Vergleichstest zwischen dem im Projekt eingesetzten Shuttlefahrzeug und dem eigens am FKFS aufgebauten Versuchsfahrzeug eWolf. Während das Shuttle auf proprietäre Sensordaten zurückgreift, die in der Regel nicht offen zugänglich sind, stellt der eWolf ein hochflexibles, transparentes Referenzsystem dar, dessen Sensorik und Algorithmen vollständig kontrolliert und angepasst werden können.

Der Vergleichstest wurde auf der Projektstrecke in Friedrichshafen durchgeführt. Dabei durchlief der eWolf zehn vollständige Testfahrten, während gleichzeitig die Daten des RABus-Shuttles aus zuvor dokumentierten Fahrten herangezogen wurden. Die Tests deckten ein breites Spektrum typischer Verkehrssituationen ab, darunter:

- Radfahrende, die längere Zeit auf derselben Spur bleiben
- unübersichtliche Ein- und Ausfahrten in Kreisverkehren
- plötzlich auftretende Fußgänger:innen hinter parkenden Fahrzeugen

Um diese Situationen systematisch auswerten zu können, wurde der Vergleich mit einem unabhängig arbeitenden Sensor- und Erkennungssystem vorgenommen.

Vergleichsfahrzeug eWolf

Das Vergleichsfahrzeug eWolf wurde vom FKFS als flexible Forschungsplattform für automatisiertes Fahren entwickelt.



Quelle: FKFS

Abbildung 44: eWolf

Im Projekt RABus wurde es mit zusätzlicher Sensorik, Rechenleistung und einem eigenen AD-Stack ausgestattet. Die Ausstattung umfasste u.a.:

- Frontkamera zur Objekterkennung
- 3D-LiDAR mit hoher Reichweite
- Radar- und Multikamera-Systeme
- Inertiale Messeinheit (IMU)
- Hochpräzises GNSS
- Eigener Embedded-Rechner für Objekterkennung
- Autonomiefunktion mit Ausnahmegenehmigung im Straßenverkehr

Der eWolf nutzt u. a. das neuronale Netzwerk YOLOv5, um Objekte in Kamerabildern zu erkennen und ihre 3D-Positionen zu bestimmen. Die Lidar-Daten dienen als Referenzquelle (Pseudo-Ground-Truth) zur Validierung der Systemausgabe des Shuttles.

Nachfolgend soll eines der Szenarien genauer betrachtet werden (siehe Abbildung 46): Ein Radfahrer bewegt sich längere Zeit mit geringer Geschwindigkeit direkt vor dem Fahrzeug. Dieses Szenario ist besonders anspruchsvoll für das Hinderniserkennungssystem, da das vorausfahrende Objekt über längere Zeit korrekt verfolgt und klassifiziert werden muss.



Abbildung 45: eWolf Hinderniserkennung beim Szenario „Radfahrer fährt längere Zeit vor dem Fahrzeug“

Für das analysierte Szenario wurden folgende Ergebnisse beim eWolf dokumentiert:

- Tatsächlich vorhandene Objekte (LiDAR) 4
- Korrekt erkannte Objekte (True Positives) 3
- Nicht erkannte Objekte (False Negatives) 1
- Fälschlich erkannte Objekte (False Positives) 1

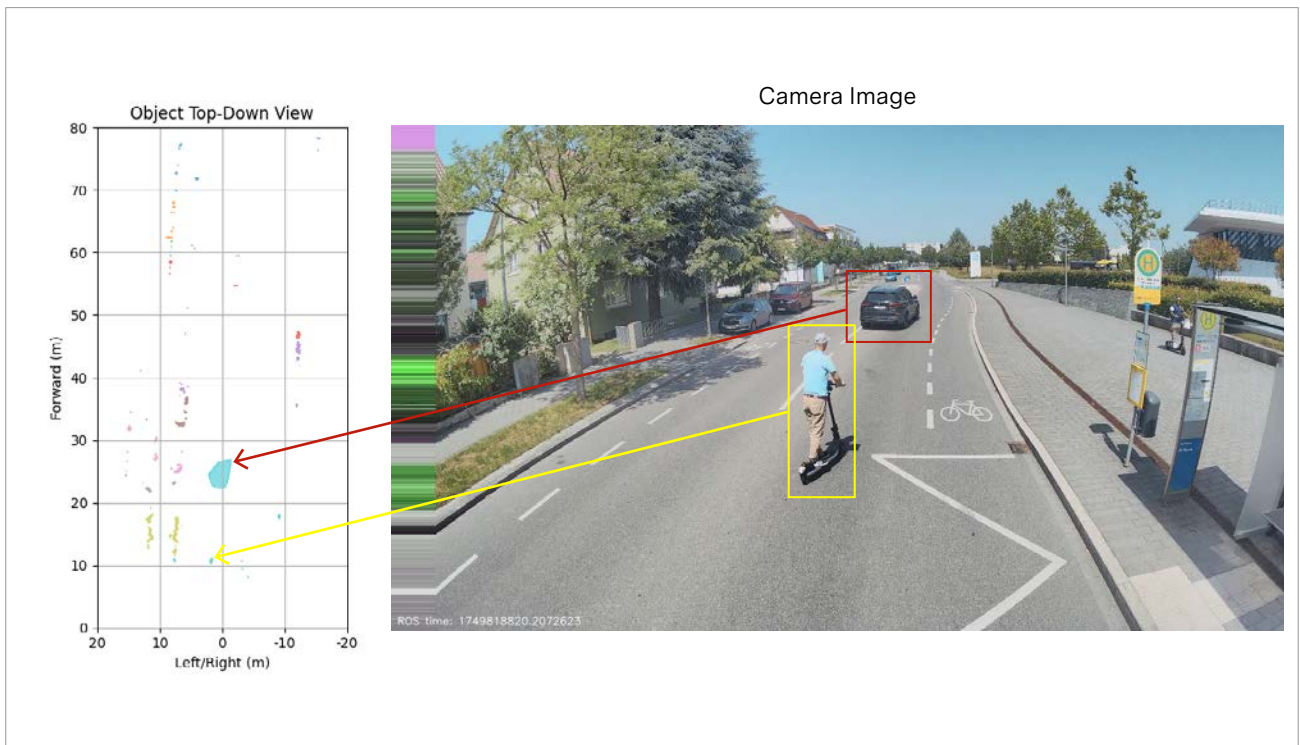
Auf Basis dieser Werte ergeben sich folgende Kennzahlen (KPIs):

- Erkennungsrate (Recall): 75 Prozent
- Präzision (Precision): 75 Prozent
- F1-Score (harmonisches Mittel): 75 Prozent

Diese Kennzahlen zeigen, dass das System in der Lage ist, einen Großteil der relevanten Objekte korrekt zu erkennen, jedoch gelegentlich Hindernisse übersieht bzw. irrtümlich Objekte detektiert, die real nicht vorhanden sind.

Für das im Projekt eingesetzte automatisierte Shuttle lagen keine Rohdaten des Wahrnehmungssystems vor, sodass keine direkten numerischen KPIs berechnet werden konnten. Stattdessen wurde eine qualitative Beobachtung durchgeführt (vgl. Abbildung 47).

- Die durch das Shuttle ausgegebenen Objektlisten zeigten in der Regel eine konsistente Erkennung des Radfahrers.
- Es wurden jedoch Unterschiede in der Stabilität der Objektverfolgung beobachtet – insbesondere bei längeren Zeiträumen oder wechselnden Lichtverhältnissen (Schattenwurf).
- Es konnten keine sicherheitskritischen Fehler festgestellt werden; das System reagierte zuverlässig mit angepasster Geschwindigkeit und sicherem Abstand.



Quelle: FKFS

Abbildung 46: RABus Hinderniserkennung mit Konturenpunkte

Die Beobachtungen legen nahe, dass das Shuttle eine robuste, wenngleich in Details konservativ ausgelegte Objekterkennung aufweist. Einzelne Schwankungen in der Objektverfolgung beeinträchtigten nicht die grundsätzliche Systemfunktionalität, hätten aber in bestimmten Kontexten (z. B. dichte urbane Umgebung) Optimierungspotenzial.

Mit dem gewählten Szenario konnte gezeigt werden, dass eine strukturierte Bewertung der Hinderniserkennung unter realen Bedingungen möglich ist – selbst bei unterschiedlichen Datengrundlagen.

Der eWolf liefert durch die Pseudo-Ground-Truth-basierte Referenz eine belastbare quantitative Einschätzung der Systemleistung. Das Bewertungssystem erlaubt eine objektive Auswertung und Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Wahrnehmungssystemen.

Das RABus-Shuttle konnte qualitativ eine stabile Hinderniserkennung demonstrieren. Die Beobachtungen zeigen eine hohe Grundzuverlässigkeit, ließen jedoch mangels direkter KPIs keine präzise Vergleichbarkeit zu.

Die entwickelte Methodik bewährt sich insbesondere in der Kombination: Quantitative Bewertung dort, wo Daten verfügbar sind, ergänzt durch strukturierte Beobachtungen in realen Fahrumgebungen. Für zukünftige Ausschreibungen oder Zulassungsverfahren bietet dieser Ansatz eine fundierte Entscheidungsgrundlage.

Mit der in RABus entwickelten dreistufigen Bewertungsmethodik liegt erstmals ein praxisnahes Verfahren zur Blackbox-Bewertung von Hinderniserkennungssystemen vor, das von Betreiberseite eingesetzt werden kann – unabhängig von Herstellerdaten oder internen Prozessen.

Die Kombination aus definierten KPIs, einem vergleichbaren Referenzfahrzeug (eWolf) und einer strukturierten Szenariengenerierung ermöglicht einen objektiven Vergleich der Systemleistung. Besonders hervorzuheben ist die Flexibilität des gewählten Ansatzes: Durch die Katalogisierung von typischen wie kritischen Szenarien lassen sich sowohl reale Fahrdaten als auch simulierte Prüfungen nutzen.

Die durchgeführten Testfahrten zeigten, dass ein solches Verfahren in der Lage ist, präzise Unterschiede in der Erkennungsleistung zwischen verschiedenen Systemen sichtbar zu machen. Gleichzeitig wurde durch die Gegenüberstellung mit einem Referenzsystem aufgezeigt, dass auch dieses (je nach Szenario) mit Herausforderungen zu kämpfen hat – etwa bei Clusterbildungsfehlern im LiDAR-System.

Insgesamt bietet die erarbeitete Methode:

- Ein Bewertungskonzept, das herstellerunabhängig einsetzbar ist
- Ein Werkzeug zur objektiven Systemauswahl für Kommunen, ÖPNV-Betreiber oder Ausschreibungsstellen
- Eine Grundlage für künftige Zulassungs- oder Qualitätssicherungsverfahren

Die RABus-Ergebnisse zeigen, dass die Bewertung sicherheitsrelevanter KI-Funktionen im automatisierten Fahren nicht allein den Herstellern überlassen werden muss. Stattdessen kann ein auf Open-Data- und Open-Scenario-Standards basierendes Verfahren genutzt werden, um Transparenz, Vergleichbarkeit und Vertrauen in automatisierte Mobilität zu stärken.

Besonders hervorzuheben ist die Übertragbarkeit des Verfahrens: Betreiber, Kommunen oder Beschaffungsstellen können standardisierte Szenarien nutzen, um unterschiedliche Systeme vergleichbar zu testen. Der eWolf diente dabei als offenes, nachvollziehbares Referenzsystem – ein Beispiel für gelebte Forschungstransparenz im automatisierten ÖPNV.

3.4 Rechtliche Begleitung

Im Rahmen des Projekts RABus wurde der Genehmigungsprozess zur Erprobung automatisierter Shuttle-Fahrzeuge erfolgreich abgeschlossen. Während initial der Technikträger (eVito) betrieben wurden, wurde im weiteren Verlauf die rechtliche Grundlage für den Einsatz der neuen Shuttle-Generation im öffentlichen Straßenraum geschaffen. Die erteilten Erprobungsgenehmigungen basieren auf § 1i Straßenverkehrsgesetz (StVG) i. V. m. § 16 der Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und Betriebs-Verordnung (AFGBV) und umfassen den Betrieb von insgesamt vier Fahrzeugen in Friedrichshafen und Mannheim.

Im Zuge der Antragstellung wurden sowohl die Einzelbetriebserlaubnis für das Automatisierungsfähige Basis-

shuttle (gemäß Art. 45 VO (EU) 2018/858) als auch die Systemgenehmigung zur Erprobung des automatisierten Fahrbetriebs beantragt. Das Verfahren wurde durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) geführt.

Ergänzend wurde auf Grundlage von Rückmeldungen des damaligen Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie des KBA klargestellt, dass im Rahmen einer Erprobungsgenehmigung keine „Personenbeförderung“ im Sinne des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) vorliegt. Für den Betrieb im Projekt RABus wurde daher ausdrücklich die „Mitnahme von Testpersonen“ genehmigt. Auf diese Wortwahl wurde seitens der Behörden besonderer Wert gelegt. Die Mitnahme wurde mit Verweis auf die anerkannten Forschungsziele des Landesprojekts legitimiert. Zu den benannten Zielen zählten insbesondere:

- die Erhebung von Akzeptanzdaten zur gesellschaftlichen Bewertung autonomer Shuttles,
- die Analyse des subjektiven Sicherheitsgefühls während der Fahrt sowie
- die Einbindung von Nutzerfeedback zur Weiterentwicklung des Fahrverhaltens.

Diese Auslegung ist deshalb von grundsätzlicher Bedeutung, da es derzeit weder Fahrzeuge mit nationaler Betriebserlaubnis noch mit EU-Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge mit Level-4-Fahrfunktion im Rahmen einer EU-Kleinserie gibt. Projekte wie RABus können ihre Ziele daher nur im Rahmen von Erprobungsgenehmigungen erreichen – und zwar nur dann, wenn auch reale Erfahrungen von Testpersonen (z. B. im Rahmen eines Probandenbetriebs oder einer „Closed User Group“) rechtlich abgesichert eingeholt werden können.

Im Folgenden werden die Stationen des Genehmigungsprozesses gemäß § 1i StVG i. V. m. § 16 AFGBV im Projekt RABus wiedergegeben, sie sind in Abbildung 48 grafisch dargestellt.

1. Nach Antragsstellung prüft das KBA den Antrag auf Genehmigungsfähigkeit. Die Bearbeitungszeit ist stark vom Umfang des Erprobungsvorhabens abhängig.
2. Für die Erprobung der Shuttles im Projekt RABus dauerte diese Prüfung zwei bis drei Wochen.
3. Das KBA beteiligt ferner die anderen zuständigen Behörden. Dabei werden gemäß § 1i Abs. 2 Satz 3 StVG, § 28 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) die für den Betriebsbereich örtlich zuständige Landesbehörde bzw.

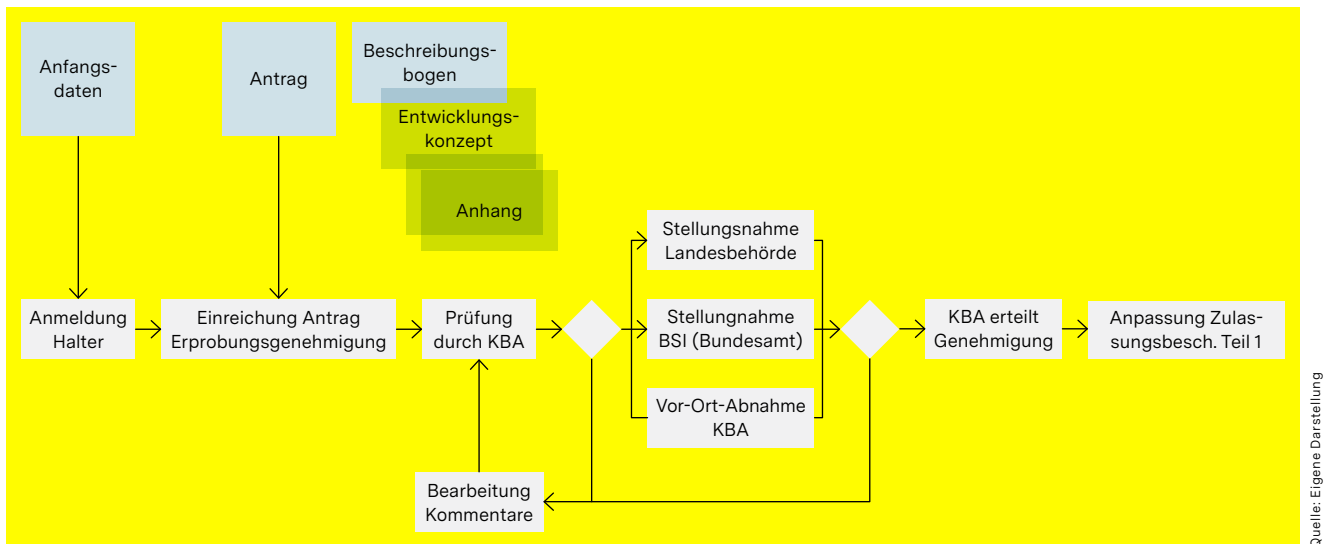


Abbildung 47: Genehmigungsprozess gemäß § 1i StVG i. V. m. § 16 AFGBV

die zuständigen Landesbehörden angehört.

4. Das Gesetz sieht für die Anhörung der anderen Behörden keine Frist vor. Das KBA kann jedoch eine angemessene Frist setzen. Was angemessen ist, hängt von den Umständen des Einzelfalls ab – insbesondere vom Umfang des Erprobungsvorhabens.

5. Für die Erprobung der Shuttles im Projekt RABus hatte die Landesbehörde eine zweiwöchige Frist zur Stellungnahme.

6. Gemäß § 1i Abs. 3 StVG wird das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) im Rahmen entsprechender Fragen bei der Erstellung, der Umsetzung sowie der Weiterentwicklung und Bewertung technischer Anforderungen beteiligt.

7. Die Prüfung durch das BSI dauerte im Projekt RABus ca. zwei Wochen.

8. Das KBA kann die Voraussetzungen für die Erprobungsgenehmigung am Fahrzeug prüfen oder zur Prüfung einen amtlich anerkannten Sachverständigen, einen technischen Dienst mit Gesamtfahrzeugbefugnissen oder eine andere Stelle beauftragen (vgl. § 3 Abs. 4-7 AFGBV).

9. Für die Erprobung der Shuttle-Fahrzeuge im Projekt RABus führte das KBA eine Vor-Ort-Abnahme durch. Dabei wurden die Übereinstimmung der Fahrzeugumbauten mit dem eingereichten Entwicklungskonzept und die Wirksamkeit des Sicherheitskonzepts überprüft. Alle Abschalt- und Übersteuerungsfunktionen mussten

im Fahrbetrieb auf einer Teststrecke vorgeführt werden, ebenso wie eine Probefahrt im AD-Modus mit dem zu dem Zeitpunkt umgesetzten Funktionsumfang.

10. Die Erprobungsgenehmigung für Friedrichshafen und Mannheim wurde gemäß § 1i Abs. 2 Satz 1 StVG, § 16 Abs. 1 Satz 1 AFGBV am 26.09.2024 durch das KBA erteilt. Die Genehmigung umfasste beide Strecken für alle Fahrzeuge.

11. Nach Erteilung der Erprobungsgenehmigung mussten die Fahrzeuge erneut zugelassen und ein Hinweis auf die Erprobungsgenehmigung unter Angabe des Datums der Ausstellung durch das KBA in die Zulassungsbescheinigung Teil I eingetragen werden, § 16 Abs. 7 AFGBV.

Für den Betrieb mit Fahrgästen war neben der AFGBV-Genehmigung nun auch eine Genehmigung nach dem PBefG zu prüfen. Maßgeblich war in diesem Zusammenhang die Frage, ob die angebotene Leistung als genehmigungspflichtiger Verkehr nach § 1 Abs. 1 PBefG einzuordnen ist. Da die Beförderung im Rahmen des Probandenbetriebs unentgeltlich erfolgte, wurde sie unter § 1 Abs. 2 Nr. 1a PBefG als genehmigungsfrei bewertet. Darüber hinaus wurde das Angebot in das bestehende ÖPNV-System integriert, wodurch eine gesonderte Liniengenehmigung entbehrlich war. Eine Bekanntgabe der Fahrpläne wurde als ausreichend angesehen.

Darüber hinaus wurde der gesamte Genehmigungsprozess der Shuttle-Fahrzeuge ausführlich dokumentiert und juristisch nachvollziehbar aufbereitet:

[Dokumentation des Genehmigungsprozesses](#)



4. Projekt-Beirat

Das Projekt RABus wurde über die Laufzeit von einem Beirat begleitet, der das Konsortium bei strategischen Fragestellungen unterstützte, bestehende Expertise bündelte und den Dialog zwischen den relevanten Akteuren förderte. Die Vertretungen aus Verbänden, Verkehrsverbünden, Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen wurden vom Konsortium und vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg benannt.

Der Beirat sollte bei der Entwicklung mittel- und langfristiger Ziele beratend mitwirken und die Zusammenarbeit mit Länderbehörden und anderen Einrichtungen des öffentlichen Verkehrs, wissenschaftlichen Institutionen, Fachverbänden, Standes- und Berufsorganisationen fördern.

4.1 Mitglieder des Beirats

Die Mitglieder des Beirats waren (Stand 30. Juni 2025):

- Dr. Till Ackermann, Fachbereichsleiter, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
- Peter Dörfler, Teamleiter, IVU Traffic Technologies AG
- Julian Gedemer, Referent Mobilität, Städtetag Baden-Württemberg
- Bernd Hasenfratz, Leiter Innovative Verkehrskonzepte, Bodensee-Oberschwaben Verkehrsverbund GmbH
- Dr. Thomas Huber, Leiter Innovative Verkehrskonzepte, DB Regio Bus
- Yvonne Hüneburg, Geschäftsführerin, Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e.V.
- Dr. Eike-Christian Kersten, Mitglied des Landesvorstandes, Verkehrsclub Deutschland Baden-Württemberg e.V.
- Reinhard Langer, Vorsitzender für Internes, Dachverband der Jugendgemeinderäte
- Dietmar Maier, Geschäftsbereichsleiter Leistungsangebot, Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH
- Prof. Ullrich Martin, Professor für Schienenbahnen und Öffentlicher Verkehr und Direktor des Instituts für Eisenbahn- und Verkehrswesens, Universität Stuttgart
- Michael Ruprecht, Teamleiter Mobilitätssystem, e-mobil BW
- Niklas Schöllhorn, Referent für autonomes und vernetztes Fahren im ÖPNV, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

- Dr. Christian Schudy, Manager, Strategische Unternehmensentwicklung, ZF Friedrichshafen AG
- Prof. Adrian Zlocki, Bereichsleiter Automatisiertes Fahren, fka GmbH

4.2 Beiratsempfehlungen (Phase 1)

4.2.1 Weiterentwicklung der Standardisierung für den Einsatz von autonom fahrenden Elektrobussen im ÖPNV

Ausgangslage

Im Projekt RABus wurden verschiedene Aspekte des Einsatzes von zukünftig autonom fahrenden Elektrobussen oder ÖPNV-Shuttles getestet. Am Ende zeigt sich an einigen Stellen noch weiterer Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf, um derartige Fahrzeuge zukünftig einfacher und umfänglicher einsetzen, d. h. skalieren zu können. Die Technologie und die rechtliche Basis sind noch in Entwicklung. Grundsätzlich gilt es, hier auf das „richtige“ Level zu setzen. Eine Ausrichtung, die zu sehr auf die heute teilweise eingeschränkte Technik setzt, ist genauso unpassend wie eine Ausrichtung an einem noch nicht marktreifen Ideal. Dies betrifft die daraus abzuleitenden Einsatzräume und -szenarien sowie die für einen ÖPNV-Betrieb notwendigen Fahrzeuge.

Eine wichtige Erkenntnis ist aber, dass die aktuellen Anbieter auf dem deutschen Markt noch das Potenzial haben, zur aktuellen Weltspitze in der Technologie des autonomen Fahrens aufzuschließen. Hier sind US-amerikanische, chinesische und israelische Firmen zu nennen. Dafür ist die seit Juni 2022 in Deutschland geltende Gesetzeslage tatsächlich im Weltmaßstab sehr fortschrittlich. Ein Marktdurchbruch für die Shuttle-Hersteller hängt an der Leistungsfähigkeit der autonomen Technik und einer grundsätzlichen Finanzierung.

Empfehlung

Insbesondere sollten in folgenden Bereichen die Entwicklungen intensiv weiterbetrieben werden:

- Standardisierung von Fahrzeugen: autonomen Bussen (L4), autonomen Shuttles (L4; 8–20 Plätze)
- Beschreibung von ÖPNV-Einsatzfeldern: automatisierte und autonome Fahrzeuge wie L4-Kleinbusse/-Shuttles, L4-Pkw im On-Demand-Einsatz
- Standardisierung von Prozessen, z. B. durch Informationstransfer in Richtung Kommunen
- Einigung bei der Aufgabenverteilung von Aufgabenträgern und weiteren Stakeholdern, um Effizienzen zu heben

- Standardisierung von technischen Schnittstellen, z. B. zwischen ÖV-Leitstelle und technischer Aufsicht

Zu der Standardisierung der fahrerlosen L4-Fahrzeuge gehört es, die kundenbezogenen Prozesse im ÖPNV-Betrieb zu vereinheitlichen. Dies umfasst die Bereiche

- Kommunikation und Verhalten im Regel- und im Havariefall
- Innenraumüberwachung
- Zugang, Identifikation und Ticketkontrolle
- Außenkommunikation

4.2.2 Beiratsempfehlung aus Fahrgastsicht

Ausgangslage

Ein attraktiver, häufig verkehrender ÖPNV ist ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehr. Mit dem Deutschlandticket wurden auf der Tarifseite viele Hemmnisse für eine stärkere Nutzung des ÖPNV beseitigt. Auf der Angebotsseite, gerade im Busverkehr außerhalb der Hauptachsen, fehlen heute aber vielfach die Angebote. Es gibt zu wenige und zudem oft zu wenig flexible Verbindungen. Neben den hohen Kosten begrenzen auch die demografische Entwicklung und der Fachkräftemangel beim Fahrpersonal die Angebotsausweitung. Im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen des Projekts RABus wurde bisher nachgewiesen, dass bei potenziellen Nutzer:innen eine Akzeptanz für ein autonom verkehrendes Fahrzeug besteht.

Empfehlung

Die Gestaltung der Inneneinrichtung des Fahrzeuges sollte sich bei geplantem Linieneinsatz an Linienbussen (barrierefreier Zugang, Sitzplätze, Multifunktionsflächen) orientieren – insofern wird begrüßt, dass das Fahrzeug mehr Sitzplätze als zunächst vorgesehen erhalten soll. Im On-Demand-Verkehr ist es ausreichend, wenn Teile der Flotten barrierefrei gestaltet sind, sofern für alle Fahrgäste ein gleiches Servicelevel geboten werden kann. Angesichts des Mangels an Fahrpersonal, der perspektivisch noch zunehmen dürfte, kommt dem Projekt RABus eine große Bedeutung zu, um die Betriebskosten bei gleichzeitiger Leistungsausweitung zu senken und damit auch mehr Flexibilität im ÖV-Angebot zu ermöglichen. Deshalb ist der Beginn der öffentlich produktiven Erprobungsphase mit Fahrgastbetrieb dringend zu empfehlen. Dabei ist besonders auf die Fahrgastinformation, die Integration in bestehende Auskunftssysteme und die Anschlussicherung, aber auch auf die subjektiven Sicherheitsempfindungen der Fahrgäste zu achten.

Um die vorgenannten Ziele zu erreichen, ist eine Ausweitung in ein flächenhaftes Bediensystem, das ohne Begleitpersonal im Mischverkehr mit verkehrsüblichen Geschwindigkeiten operieren kann, eine notwendige Bedingung.

4.2.3 Beiratsempfehlung aus Sicht der Verkehrsunternehmen und Flottenbetreiber

Ausgangslage

Die Verkehrswende als Mobilitätswende und Antriebswende stellt die Betreiber vor vielfältige Herausforderungen. Die Verkehrsmenge als Angebotsmenge ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. Verkehrsleistung kann derzeit nur erbracht werden, wenn das erforderliche Fahrpersonal dafür zur Verfügung steht. Die Situation ist aktuell schon sehr schwierig: Der Bestandsverkehr kann an vielen Stellen nur noch mit viel Mühe und Aufwand aufrechterhalten werden. Das belastet die Unternehmen wie auch das Personal, das mit Überstunden und Vertretung hier maximal belastet ist. In den Unternehmen bindet die Mangelsituation in Personalabteilungen, Disposition und Geschäftsführung unglaublich viel Zeit und Energie, die dann für andere betriebliche Themen fehlt.

Die Aussichten sind noch trüber: Nach aktuellen Branchenschätzungen fehlen bis 2030 bundesweit rund 76.000 Busfahrer:innen. Diese Mangelsituation gefährdet die angestrebte Verkehrswende.

Empfehlung

Damit die Verkehrswende eine effizientere Chance hat, brauchen wir technische Innovationen im Busbetrieb, insbesondere auch beim Betreiben der Fahrzeugflotte. Autonomes Fahren setzt langfristig Personalkapazität frei – Personal, das heute schon kaum mehr verfügbar ist. Das vorhandene Personal kann dann in Teilen – mit geänderter Funktion – z. B. eine Flotte steuern, ohne dass jedes Fahrzeug selbst 1:1 besetzt sein muss. Das eröffnet ganz neue Möglichkeiten hinsichtlich der Verkehrsmenge und auch der Feinerschließung/Anbindung des ländlichen Raumes an den Ballungsraum. Die Auswirkungen dieser Effekte sind über das Projekt RABus hinaus verstärkt zu untersuchen.

Vorhandene Berufsbilder werden sich dabei verändern, neue werden im Bereich der ÖV-Dienstleistung im Busbetrieb entstehen: Der unterstützende Service sowie die Begleitung und die Fahrgastkommunikation werden in den Vordergrund treten. Über Weiterbildungsangebote,

die aus dem Bedarf und dem technischen Fortschritt in der Übergangsphase resultieren, werden sich neue Berufsbilder entwickeln. Da diese Entwicklungen im Projekt nur anzureißen waren, sollten hierzu vertiefte Untersuchungen zeitnah beginnen.

Der Erfolg des öffentlichen Verkehrs geht mit „funktionierenden Reiseketten“ einher. Der technische Fortschritt im Bereich des autonomen Fahrbetriebs ist wichtig, um zukünftig mit weniger Fahrpersonal ein gutes ÖV-Angebot im Ballungsraum und im ländlichen Raum hinzubekommen, das wirtschaftlich noch darstellbar ist. Für den Nachweis der Wirtschaftlichkeit sind belastbare Grundlagen- und Berechnungsmethoden zu entwickeln.

4.2.4 Technische Systemgestaltung und Zulassung

1) Erprobungsgenehmigung

Ausgangslage

Für die Erprobung von autonomen Fahrzeugen existiert mit der AFGBV in Deutschland ein aktueller Gesetzesrahmen. Innerhalb dieses Rahmens ist die Genehmigung zur Erprobung von autonomen Fahrzeugen geregelt. Der Gesetzesrahmen ist im weltweiten Vergleich bereits ausgereift und gut strukturiert, so dass Empfehlungen eher auf Details der Ausführung zielen.

Allerdings gibt es folgende Herausforderungen.

1. Aus der Formulierung § 16 AFGBV ergibt sich ein großer Interpretationsspielraum in Bezug auf die einzureichenden Informationen und den Umfang der Unterlagen. Für die Erprobungsgenehmigung hatten im Falle von ZF die eingereichten Unterlagen für ein Fahrzeug ca. 600 Seiten, davon waren ca. 200 fahrzeugspezifisch. Konkrete vergebene Testkataloge für die Fahrfunktion existieren als Minimalanforderung ebenfalls nicht, Tests des KBA erfolgen entlang des § 16 AFGBV Abs. 3 Nr. 5 fokussiert auf die Abschaltbarkeit.

2. Der Genehmigungsrahmen gilt pro Fahrzeug, so dass pro Fahrzeug ein eigener Antrag mit allen Anhängen eingereicht werden muss. Das KBA akzeptiert zwar auch Anhänge die für mehrere Fahrzeuge gelten (z. B. Entwicklungskonzept, Nachweis der Sachkunde), die Antragstellung ist dadurch aber für mehrere baugleiche Fahrzeuge unnötig bürokratisch.

Empfehlung

Zu 1. Konkrete Anforderungen oder Vorlagen, vergleich-

bar mit der Mustervorlage „Entwicklungskonzept“ seitens des KBA, wären hilfreich für die Antragstellung. Zusätzlich könnten vereinheitlichte Testfälle, beispielsweise basierend auf NCAP-Testfällen, genutzt werden.

Zu 2. Der Genehmigungsprozess sollte vom Gesetzgeber so angepasst werden, dass eine Genehmigung für eine Reihe von Fahrzeugen beantragt werden kann, ohne dass jedes Fahrzeug als eigenständiges Genehmigungsobjekt mit allen Anlagen beantragt werden muss.

2) Homologation/Typzulassung

Ausgangslage

Für die Typzulassung und den Betrieb von autonomen Fahrzeugen existiert mit der VO (EU) 2022/1426 und der AFBV in Deutschland ein aktueller Gesetzesrahmen.

Für autonome Fahrzeuge gelten alle technischen Bestimmungen wie für herkömmliche Fahrzeuge. Während der Entwicklung ist es erforderlich, dass auch Fahrzeuge bzw. Prototypen, die perspektivisch ohne Fahrer:in und einen Fahrerarbeitsplatz ausgestattet sind, temporär mit einem Fahrerarbeitsplatz zugelassen werden.

Aktuell gibt es folgende Herausforderungen.

1. Auch für Fahrzeuge mit einem lediglich temporären Fahrerarbeitsplatz gelten alle Anforderungen an den Fahrerarbeitsplatz (z.B. Konstruktion eines Busses (UN ECE R107), Fahrerarbeitsplatz (UN ECE R79) oder Anforderungen an Sitze (UN ECE R17)). Damit sind für voll-autonome Fahrzeuge Regularien wie Scheibenwischer, Spiegel, Anforderungen ans Sichtfeld etc. konstruktiv vorzusehen, die im Regelfall nicht technisch notwendig sind oder teilweise im Widerspruch zu der Auslegung eines autonomen Shuttles stehen.

2. Sicherheitsfunktionen, die für die Unterstützung der oder des Fahrer:ins über die Global Safety Regulations (GSR II) eingeführt werden, sind für den übergangsweisen Betrieb in der Erprobungsphase vollständige Voraussetzung zur Zulassung (z.B. Blind-Spot-Information-System (UN ECE R 151), Intelligent Speed Assist (EU 2021/1958), Müdigkeitserkennung (EU 2021/1341) oder Alcohol Interlock (EU 2021/1243)).

3. Die Anforderungen an autonome Fahrzeuge auf nationaler Ebene (AFBV) und europäischer Ebene sind nicht angeglichen. So gelten für Prototypenstadien (nationale Zulassung) andere technische Regelungen als auf europäischer Ebene, wo üblicherweise die Typzulassung das

Entwicklungsziel ist.

Empfehlung

Zu 1. und zu 2.: Für Fahrzeuge, die konzeptionell nicht auf den Betrieb mit Fahrer:in ausgelegt sind, bei denen jedoch eine temporäre Nutzung mit Fahrerarbeitsplatz notwendig ist (Erprobung, temporärer Betrieb usw.) und die perspektivisch keinen Fahrerarbeitsplatz haben, sollte ein Umgang mit den technischen Anforderungen rechtlich geregelt werden. Dies könnte analog zu EBO § 18 Abs. erfolgen. Dort wird in Regel- und Nebenfahrzeuge unterschieden. Nebenfahrzeuge brauchen diesen Vorschriften nur insoweit zu entsprechen, als es für den Sonderzweck, dem sie dienen sollen, erforderlich ist.

Zu 3.: Eine Harmonisierung der technischen Anforderungen auf EU- und nationaler Ebene ist erforderlich, um die Fahrzeuge entlang einer konsistenten Regulation auszu-legen.

3) Kommunikationstechnologien

Ausgangslage

Mobilfunktechnologien spielen eine entscheidende Rolle im Kontext des autonomen Fahrens, da sie eine zuverlässige Kommunikation und Konnektivität zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmer:innen ermöglichen. Eine stabile Internetverbindung und eine zuverlässige Mobilfunkkommunikation sind aus mehreren Gründen von entscheidender Bedeutung für das autonome Fahren:

- Notfallkommunikation
- Fahrzeug- und Infrastruktur-Zustandsdaten
- Betrieb mehrerer autonomer Fahrzeuge innerhalb eines Systems
- Software-Updates
- Datensammlung und -analyse

Analysen haben deutlich gemacht, dass eine durchgehende und stabile Mobilfunkabdeckung entlang der Fahrtrouten autonomer Fahrzeuge von entscheidender Bedeutung ist. Unterbrechungen oder Schwachstellen in der Mobilfunkabdeckung können kritische Situationen verursachen und die Sicherheit des autonomen Fahrens gefährden.

Das Projekt RABus hat durch eine Analyse der Mobilfunkabdeckung wichtige Erkenntnisse über die Netzwerkabdeckung und deren Einfluss auf das autonome Fahren gewonnen. Wichtige Ergebnisse der Mobilfunkabdeckungsanalyse sind:

- Diskrepanzen bei Angaben zur verfügbaren Bandbreite der Netzbetreiber
- Identifizierung von Schwachstellen und Funklöchern
- Schwankende Bandbreite über Tagesverlauf

Empfehlung

Aufgrund der identifizierten Schwachstellen und Funklöcher sind Maßnahmen zur Verbesserung der Mobilfunkabdeckung erforderlich. Dies könnte die Installation zusätzlicher Mobilfunkmasten, die Optimierung der Netzwerkkonfiguration, Redundanzen oder die Nutzung alternativer Technologien umfassen.

4) Nutzererlebnis (UX/UI)/Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmer:innen

Ausgangslage

Durch die Einführung des autonomen Fahrens im öffentlichen Bereich fällt ein wichtiger Bestandteil zur Absicherung des Straßenverkehrs weg: die Kommunikation zwischen Fahrer:in und anderen Verkehrsteilnehmer:innen, z.B. durch Gesten und Verfolgen von Blicken.

Empfehlung

Diese oft nonverbale Kommunikation muss dementsprechend beim autonomen Fahren durch andere Kommunikationswege ersetzt werden. Zum einen kann dies visuell, z.B. durch nach außen gerichtete Displays, erfolgen; zum anderen ist auch die Nutzung akustischer Kommunikation im Kontext des autonomen Fahrens im öffentlichen Raum empfehlenswert. Letzteres trägt dazu bei, auch beispielsweise visuell beeinträchtigte Personen besser zu informieren.

Leider sind die Gestaltungsmöglichkeiten für nach außen gerichtete Displays durch gesetzliche Rahmenbedingungen stark eingeschränkt und auch die akustische Kommunikation über Lautsprecher nach außen ist nicht erlaubt.

Die Gesetzgebung muss daher entsprechend angepasst werden, um das autonome Fahren für alle Beteiligten im Straßenverkehr hinreichend sicher zu gestalten. Dies sollte in Abstimmung mit den Herstellern und z.B. der Polizei und Rettungsdiensten sowie Vertreter:innen von Interessengruppen der Verkehrsbeteiligten erfolgen, um verschiedene Perspektiven und Bedürfnisse zu berücksichtigen.

5) Wissenstransfer und Kommunikation

Ausgangslage

Bei der Bestellung und Inbetriebnahme von autonomen Shuttles sind viele verschiedene Teilnehmer:innen in der Verantwortung. Neben dem Hersteller für autonome Transportsysteme übernimmt das kommunale Verkehrsunternehmen den Flottenbetrieb als Halter und integriert die Technische Aufsicht (lt. § 14 AFGBV) als zentrale Funktion in die bestehende Leitstelle, von der aus sämtliche Aktionen koordiniert werden, die autonome Transportsysteme betreffen. Weitere wichtige Rollen übernehmen die Genehmigungsbehörden, die Aufgabenträger und Kommunen sowie die Infrastrukturbetreiber.

Empfehlung

Für eine zeit- und kostensparende Einführung von autonomem ÖPNV benötigt es eine gute Vernetzung der zuständigen Bezugsgruppen und Behörden. Des Weiteren braucht es einen personellen und inhaltlichen kommunalen Kompetenzaufbau. Besonders hervorzuheben ist hier die Rolle der Kommunen bei der Straßenzulassung. Sinnvoll wäre es, transferierbare Lösungen für kleinere Kommunen zu entwickeln.

Als gutes Beispiel für eine Vernetzung von Zuständigkeiten und Kompetenz könnten die zentralen Stellen für Digitalisierungsangelegenheiten dienen – viele Kommunen haben diese direkt am Bürgermeisterbüro angesiedelte Koordinierungsstelle eingerichtet. Für den Kompetenzaufbau, der für das autonome Fahren notwendig ist – z.B. bei der Integration der Fahrzeuge in die Infrastruktur – könnte solch eine Schnittstelle zwischen der Verwaltung, Eigenbetrieben und kommunalen Unternehmen, lokalen Akteuren sowie den Bürger:innen, den Rollout beschleunigen.

4.3 Beiratsempfehlungen (Phase 2)

4.3.1 Umsetzung des automatisierten Fahrens ermöglichen und skalieren

Ausgangslage

Im Projekt RABus wurde der Einsatz von zukünftig autonom fahrenden Elektrobussen oder ÖPNV-Shuttles getestet, jedoch wurde kein Regelbetrieb mit einer skalierbaren, marktreifen Fahrzeugflotte angestrebt.

Die Umsetzung des automatisierten Fahrens über einzelne Forschungsprojekte und Reallabore hinaus hat auch eine industriepolitische Bedeutung. In der Strukturstudie BW 2023 hat e-mobil BW gemeinsam mit DLR und IMU das automatisierte Fahren als relevantes und wichtiges Zukunftsfeld im Kontext der Transformation der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg identifiziert. Aus der Perspektive des Industriestandortes ist eine Umsetzung des automatisierten Fahrens notwendig, um als Leitmarkt wahrgenommen zu werden. Denn nur dann wird hier die Produktion der Komponenten für automatisiertes Fahren aufgebaut bzw. fortgeführt (z. B. Radar, Kameratechnologie, Lidar). Liegen die größeren Marktchancen in anderen Weltmarktreionen, besteht das Risiko, dass der Produktionsaufbau und die Wertschöpfung im Ausland erfolgen. Aktuell liegt die Technologieführerschaft im autonomen Fahren in Nordamerika und Asien, die deutschen Akteure konnten technologisch und investitionstechnisch den Anschluss nicht halten..

Empfehlung

Privatwirtschaftliche Investitionen machen die Entwicklung eines Leitmarktes für automatisiertes und vernetztes Fahren (AVF) erforderlich; die Industrie erwartet hierzu politisches Bekenntnis, Planungssicherheit sowie innovationsfreundliche Rahmenbedingungen. Daraus ergibt sich die Frage, was die nächste Stufe nach dem erfolgreichen Abschluss des RABus-Projekts und anderer vergleichbarer Reallabore in Baden-Württemberg sein wird.

Ein sinnvoller nächster Schritt sollte darin bestehen, die Erfahrungen aller Projekte in einem übergreifenden Lessons-Learned-Dokument zusammenzufassen. Auf Basis dieser gesammelten Erkenntnisse ließen sich ein Leitfaden für den Einsatz automatisierter Shuttles im ÖPNV entwickeln bzw. derartige, vorhandene Unterlagen ergänzen, die beispielsweise als Grundlage für zukünftige Ausschreibungen dienen. Insbesondere sollten dabei nachfolgende Themen abgedeckt werden.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass bspw. rechtliche Rahmenbedingungen einem stetigen Wandel unterliegen und daher Mechanismen zur regelmäßigen Anpassung an neue gesetzliche Vorgaben enthalten sind.

- Berücksichtigung rechtlicher Rahmenbedingungen
- Industriepolitische Förderung von technologischen Entwicklungen
- Aufbau von Infrastrukturen für autonomes Fahren (im ÖPNV)
- Ausschreibungsoptionen bzw. Vergabeverfahren wie beispielsweise Innovationspartnerschaften

4.3.2 Personenbeförderung (auch für Erprobungsgenehmigungen) ermöglichen

Ausgangslage

Ziel: Die gesetzlichen und praktischen Voraussetzungen für die Personenbeförderung durch autonome Shuttles schaffen. Es muss möglich sein, ohne bürokratischen Aufwand Personen in einem Fahrzeug/Shuttle zu befördern, auch wenn nur ein Testbetrieb durchgeführt wird und eine Erprobungsgenehmigung für das Fahrzeug vorliegt. Die Akzeptanz für das automatisierte Fahren kann nur erreicht werden, wenn die Menschen frühzeitig eingebunden werden

Problem

Im Rahmen von Forschungsprojekten zum hochautomatisierten/autonomen Fahren im ÖPNV ergeben sich derzeit regelmäßig Problemstellungen aus der gültigen Rechtslage zur Personenbeförderung und aus dem Umstand, dass die Fahrzeuge aktuell oftmals nur Erprobungsgenehmigungen besitzen.

Zum einen handelt es sich um die notwendige Liniengenehmigung und um die Erfüllung der Pflichten aus dem PBefG. Diese sind im Rahmen von Forschungsprojekten aktuell kaum zu überwinden, da sie rechtliche Ressourcen erfordern und zeitliche sowie finanzielle Dimensionen erreichen können, die im Rahmen von Forschungsprojekten nicht vorgesehen und nicht sinnvoll sind.

Zum anderen wird aufgrund der aktuell restriktiven Handhabung der Erprobungsgenehmigung die Beförderung von Fahrgästen, die nicht Angehörige der Erprobenden sind, erheblich gehindert und nicht zugelassen. In der Praxis wird dem begegnet, indem „Nutzungs- und Probandenverträge“ zwischen interessierten Dritten und Fahrgästen mit dem Halter und Betreiber des autonomen Fahrzeugs abgeschlossen werden. Dies begründet einen erheblichen Mehraufwand für die Verfahrensbeteiligten

und zusätzliche Hemmnisse bei den Nutzer:innen, wenn diese den Eindruck gewinnen, eine Erprobung sei nur unter einer Haftungsfreistellung und Verzicht auf ihre berechtigten Sicherheitsinteressen zulässig.

In der Folge sind regelmäßig keine repräsentativen und realistischen Tests mit Fahrgästen möglich, sondern nur mit Testpersonen (geschlossene Nutzergruppe) im bewussten Testbetrieb (kostenfrei, ohne Bedienpflicht).

Empfehlung

Im Rahmen von öffentlich geförderten Forschungsprojekten mit hochautomatisierten/autonomen ÖPNV-Fahrzeugen sollten die zuständigen Landesbehörden eine auf den Projektzeitraum befristete Genehmigung nach § 2(7) PBefG als eigenwirtschaftliche Verkehre ohne die Auflage von Pflichten aussprechen. Die Leistungen der Projektpartner im Förderprojekt sollten unschädlich der EU VO 1370/2007 erfolgen können.

Die zuständigen Länderbehörden sind gefordert, im Rahmen der Anhörung und Beteiligung an den Erprobungsgenehmigungsverfahren des KBA darauf hinzuwirken, dass eine Erprobung durch Fahrgäste, die keine Angehörigen des Halters oder weiterer Forschungsteilnehmer:innen sind, zugelassen wird.

Bereits im Rahmen des Erprobungskonzepts ist von dem Antragsteller der Erprobungsgenehmigung darzulegen, dass – soweit ein zulässiger Stand der Technik erreicht ist – die Erprobung auch die Beförderung von Fahrgästen und Dritten umfasst und erforderlich ist. Soweit die Erprobung einen (sicherheitstechnischen) Stand der Technik erlangt, die eine Personenbeförderung erlaubt, ist dieser zuzulassen.

Eine zuverlässige Akzeptanzgewinnung kann nur gelingen, wenn auch breiten Bevölkerungsschichten eine Nutzung ermöglicht wird. Der Halter bzw. Betreiber hat entsprechende Vorkehrungen zu treffen (bspw. Service-/technisches Personal vorzuhalten), die die Sicherheit der Fahrgäste gewährleisten.

Ein generelles, abstraktes Verbot der Personen- und Güterbeförderung ergibt sich weder aus dem Gesetz noch aus der Gesetzesbegründung.

Sofern Fahrzeuge mit autonomer Fahrzeugtechnologie auf bestehenden, im Rahmen öffentlicher Dienstleistungsaufträge fahrenden bzw. konzessionierten Linien(bedarfs)verkehren genutzt werden, sollte für diese ebenfalls eine Genehmigung erteilt werden. Soweit

ÖPNV-Betreiber autonome Fahrzeuge in ihre Betriebsflotte integrieren, muss gewährleistet werden, dass die bestehende Linienkonzession und damit zusammenhängende Beihilfen (SGB-Mittel, Haushaltsmittel, Zuschüsse aus allgemeinen Vorschriften etc.) nicht gefährdet werden. Ggf. ist zu prüfen, unter welchen beihilferechtlichen Bedingungen die anfänglichen, durch den autonomen Betrieb bedingten Mehrkosten gegenüber einem „fahrer-basierten“ Betrieb bezuschusst werden können.

4.3.3 Frühzeitige Tiefenintegration in ÖPNV-Systemumgebung

Ausgangslage

Die Integration autonomer Shuttles in bestehende Systeme der Verkehrsunternehmen und -verbünde ist eine Grundvoraussetzung für deren erfolgreiche Einführung und Akzeptanz. Dabei sind zentrale Aspekte wie die Einbindung in Tarifsysteme, Vertriebsinfrastruktur und Echtzeitdatenübermittlung von besonderer Bedeutung. Diese Regelungen erfordern eine frühzeitige Abstimmung zwischen den Beteiligten, da sie bereits bei der Fahrzeugausschreibung berücksichtigt werden müssen und eine reibungslose Umsetzung im späteren Betrieb sicherstellen.

Empfehlung

Der Beirat empfiehlt, die Tiefenintegration autonomer Shuttles in die ÖPNV-Systeme als eine zentrale Voraussetzung für deren erfolgreichen Betrieb zu betrachten. Zu diesem Zweck sollten frühzeitig folgende Maßnahmen umgesetzt werden.

→ **Integration in Tarifsysteme:** Autonome Shuttles müssen vollständig in die bestehenden Verbundtarife integriert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass keine zusätzliche Tarifkomplexität entsteht („Tarifdschungel“). Die Option einer kostenlosen Nutzung sollte ebenfalls klar geregelt sein, falls diese vorgesehen ist.

→ **Vertriebsinfrastruktur:** Die Fahrzeuge sollten auch entsprechend ihrer Einsatzart in die lokale Vertriebslandschaft integriert werden. Im Falle der On-Demand-Nutzung erfolgt die Buchung per App und die Identifikation des Fahrgastes im Fahrzeug. Im Falle des Linienverkehrs ist zu klären, ob im Fahrzeug Tickets erhältlich sein sollen oder ob der Einstieg nur nach einer digitalen Kontrolle eines Tickets erfolgen soll („Zustieg nur mit gültigem (e)Ticket“).

→ **Automatische Fahrgastzählsysteme (AFZS) und Echtzeitdatenübermittlung:** AFZS werden mehr und mehr zum Standard im ÖPNV. Beispielsweise ist im Bereich der Türen hierfür eine Sensorik erforderlich. Datenstandards der Verbünde sind entsprechend zu bedienen, und die Daten sind an die regionalen Drehscheiben weiterzuleiten. Für die Vernetzung mit dynamischen Fahrgastinformationsanzeigen, elektronischen Fahrplanauskünften und Anschlusssicherungen müssen die Shuttles Echtzeitdaten im VDV-Standardformat bereitstellen. Dies gilt auch für die Ansteuerung von Lichtsignalanlagen, um akzeptable Durchschnittsgeschwindigkeiten im städtischen Verkehr zu gewährleisten.

→ **Fahrgastinformation:** Autonome Shuttles sollten wie herkömmliche ÖPNV-Fahrzeuge mit Haltestellenanzeigen, Zielbeschilderung gemäß der Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft) und Angaben zur Fahrzeugauslastung ausgestattet sein. Diese Daten sollten an die regionalen Datendrehscheiben weitergeleitet werden. Für die Schnittstelle zum Kundendienst sind die im Projekt Leitmotiv KI erarbeiteten Standards anzuwenden.

→ **Buchung und Disposition:** Für On-Demand-Verkehre ist die Einbindung in bestehende Buchungs- und Dispositionssysteme der Verkehrsunternehmen erforderlich. Dadurch können über Verbund-Apps durchgängige Buchungs- und Auskunftsprozesse („Single Sign-on“) ermöglicht werden. Bei Flächenverkehren sollte die Möglichkeit geschaffen werden, virtuelle Fahrpläne oder Richtungsbandbuchungen zu implementieren. Für die Schnittstelle zur On-Demand-Auftragsverwaltung und -Erteilung sind die im Projekt Leitmotiv KI erarbeiteten Standards anzuwenden.

Die Umsetzung dieser Maßnahmen erfordert eine enge und frühzeitige Abstimmung zwischen allen beteiligten Akteuren. Nur durch eine umfassende Integration in die bestehenden ÖPNV-Systeme können autonome Shuttles effizient und nutzerfreundlich eingesetzt werden, was langfristig die Akzeptanz und den Erfolg dieser Technologie sichern wird.

4.3.4 Anforderungen an das Störungsmanagement

Ausgangslage

Im ÖPNV treten regelmäßig Störungen wie Umleitungen, Verspätungen oder Verkehrsunfälle auf, die schnelle und koordinierte Maßnahmen erfordern. Während in konventionellen Bussen die Kommunikation mit der Leitstelle über den/die Fahrer:in erfolgt, benötigen autonome Shuttles angepasste Prozesse, um Störungen effizient zu bewältigen. Die Entwicklung eines effektiven Störungsmanagements ist daher essenziell, um den Betrieb autonomer Fahrzeuge in den Verkehrsverbund zu integrieren und die Erwartungen der Fahrgäste zu erfüllen.

Empfehlung

Der Beirat empfiehlt, ein standardisiertes Störungsmanagement für autonome Shuttles zu entwickeln, das die Leitstellenprozesse erweitert und an die Besonderheiten dieser Fahrzeuge anpasst. Für die Leitstellen sind die im Projekt Leitmotiv KI erarbeiteten Standards anzuwenden. Bei den Prozessen ist zu unterscheiden, ob sie die technische Aufsicht oder die ÖPNV-Leitstelle bzw. den Kundendienst betreffen. Im Fokus stehen vier Aspekte.

→ **Automatische Störungsmeldungen:** Autonome Shuttles sollten Verkehrsstillstände oder andere kritische Ereignisse aktiv je nach Betroffenheit an die Technische Aufsicht bzw. an die Leitstelle melden.

→ **Kommunikation und Disposition:** Die Leitstelle und die Technische Aufsicht müssen die Möglichkeit haben, mittels Live-Bildern und Situationsanalysen dispositive Maßnahmen zu treffen, z. B. Ausweichmanöver, Ersatzverkehr oder Fahrplananpassungen.

→ **Fahrgastinformation:** Eine unmittelbare Information der Fahrgäste durch Live-Durchsagen und digitale Medien (Apps, dynamische Anzeigen) ist zentral, um Transparenz und Vertrauen zu schaffen.

→ **Störungskonzept:** Ein Störungskonzept unter den Bedingungen des fahrerlosen Betriebs muss vorgesehen und datenschutzgerecht sein.

Ein klar definiertes Störungsmanagement gewährleistet die Zuverlässigkeit und Effizienz des autonomen ÖPNV und ist ein wesentlicher Baustein für die erfolgreiche Einführung dieser Technologie.

5. Handlungsempfehlungen

Politische und regulatorische Rahmenbedingungen

Für den erfolgreichen Einsatz automatisierter Shuttles im ÖPNV sind klare, verlässliche Rechtsgrundlagen entscheidend. Hierzu gehören verbindliche Zusagen zur Förderung und Finanzierung der Fahrzeugbeschaffung, um die Abnahme einer festgelegten Anzahl von Fahrzeugen sicherzustellen, sowie die Definition der Einsatzszenarien und der technischen Anforderungen an die Fahrzeuge.

Eine bundesweit einheitliche Auslegung des PBefG, insbesondere bei der Abgrenzung zwischen der Mitnahme von Testpersonen und genehmigungspflichtiger Personenbeförderung, würde Rechtsunsicherheiten vermeiden. Ebenso sollten Genehmigungsprozesse nach § 1i StVG und § 16 AFGVB verkürzt und standardisiert werden – z. B. durch klare Zuständigkeiten, frühzeitig abgestimmte Musterdokumente und Leitfäden für Antragsteller:innen.

Für nicht-serienmäßige Fahrzeuge sind Ausnahmeregelungen nötig, um frühe Erprobungen zu ermöglichen. Ergänzend sollten Experimentierklauseln für digitale Infrastruktur (z. B. Roadside Units, V2X-Ampeln) befristete Genehmigungsmodelle und vereinfachte Prüfverfahren bieten.

So werden regulatorische Hürden reduziert, Innovationszyklen verkürzt und der Weg für praxisnahe Erprobungen geebnet.

Technische Standards und Integration

Der flächendeckende Einsatz autonomer Shuttles erfordert serienreife, skalierbare Lösungen mit einheitlichen Schnittstellen. Ziel ist eine gemeinsame technische Architektur, die den herstellerübergreifenden Betrieb verschiedener Fahrzeugtypen über eine zentrale Leitstelle ermöglicht.

ODD-Weiterentwicklung sollte entlang klarer Roadmaps erfolgen (z. B. Stadt → stadtnah → Land), um den Einsatzbereich schrittweise zu erweitern. Förderprogramme für modulare IT-Infrastrukturen können helfen,

Insellösungen zu vermeiden und die Integration in bestehende ÖPNV-Systeme zu sichern.

Die im Projekt entwickelte Methodik zur Hinderniserkennung zeigt, wie standardisierte Bewertungsverfahren frühzeitig Stärken, Schwächen und Einsatzgrenzen erfassen können – ein Mehrwert für technische Weiterentwicklung und Genehmigungsprozesse.

Einheitliche Standards und interoperable Systeme sichern langfristig Effizienz, Skalierbarkeit und Betriebssicherheit.

Betriebsorganisation und Verkehrsbetriebe

Der Einsatz autonomer Fahrzeuge verändert Prozesse, Rollen und Qualifikationsanforderungen in den Verkehrsbetrieben. Neue Aufgaben entstehen in Wartung, Steuerung und Planung, wofür gezielte Schulungs- und Umschulungsprogramme nötig sind. Berufsbilder wie Werkstattpersonal, Disponent:innen oder technische Aufsicht müssen klar definiert werden.

Eine frühzeitige Berücksichtigung der Haltestelleninfrastruktur ist entscheidend – barrierefrei, digital ausgestattet und in überregionale Informations- und Buchungssysteme integriert. Dezentrale Einzellösungen können insbesondere in touristischen Regionen Zugangshürden schaffen.

Ladeinfrastruktur muss in Fahrplan- und Betriebsplanung eingebettet werden, um Reichweitenbegrenzungen zu kompensieren. Für Betriebshofprozesse gelten besondere Anforderungen, z. B. Bewegungen nur durch unterwiesenes Personal und gesicherte nächtliche Abstellung.

Herausforderungen im öffentlichen Raum wie zugeparkte Engstellen erfordern ein aktives Parkraummanagement, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Einheitliche Leitfäden für Planungsabteilungen – etwa durch den VDV in Kooperation mit Herstellern – können helfen, infrastrukturelle Anpassungen auf ein Minimum zu reduzieren.

So werden Betriebssicherheit und Nutzerfreundlichkeit gewährleistet, ohne unnötige Kosten zu erzeugen.

Angebotsgestaltung und Kommunikation

Das im Projekt beobachtete hohe Nutzungsinteresse sollte genutzt werden – ebenso die Chance, bisher nicht ÖV-affine Personen zu erreichen. Sobald serienmäßig zugelassene Fahrzeuge verfügbar sind, empfiehlt sich der Einsatz insbesondere dort, wo bereits eine gewisse ÖV-Affinität besteht, das Angebot jedoch zeitweise oder abschnittsweise Lücken aufweist (z. B. erste/letzte Meile, Tangentialverbindungen, Nachtverkehr).

Langfristig sind flexibel anpassbare Betriebsformen sinnvoll, z. B. Linienbetrieb zu Spitzenzeiten und Ridepooling in Schwachlastzeiten. Ergänzende Push-/Pull-Maßnahmen (z. B. Einschränkungen für den motorisierten Individualverkehr, tarifliche Anreize) sollten gewünschte Lenkungseffekte verstärken.

Voraussetzung ist ein zuverlässiges, gut verknüpftes ÖPNV-Gesamtsystem mit zuverlässig funktionierenden Umstiegen auf schienengebundene Systeme. Die im Projekt erarbeiteten Ansätze zur nachfrageorientierten Angebotsoptimierung sollten hierfür gezielt genutzt werden.

Für die Akzeptanzförderung ist eine zielgruppengerechte Ansprache entscheidend: Digitale Kanäle erreichen technikaffine Gruppen, analoge Wege wie Flyer, Veranstaltungen oder Kooperationen mit lokalen Einrichtungen binden weniger digitalaffine Zielgruppen ein. Barrierearme Zugänge sowie niedrigschwellige Angebote – z. B. Kennenlern- oder Gruppenfahrten – senken Hemmschwellen.

Ebenso wichtig ist eine frühzeitige, verständliche Kommunikation zu technischen und auch zu sozialen Sicherheitsaspekten, um Vertrauen in allen Bevölkerungsgruppen zu schaffen. Zudem Bedarf das Konzept des Ridepoolings zusätzlicher Erklärung.

So entsteht die Grundlage für eine breite Akzeptanz und zielgerichtete Nutzung neuer Angebote.

Forschung und technische Erprobung

Die im Projekt eingesetzten Methoden haben gezeigt, dass frühzeitige Entwicklungs- und Testphasen entscheidend sind, um technische Systeme effizient zu validieren. Da das vorgesehene Shuttlefahrzeug zu Projektbeginn noch nicht verfügbar war, wurde die Methodenentwicklung zur Hinderniserkennung vorgezogen.

Diese umfasste die Definition relevanter Testszenarien, messbarer Prüfkriterien (KPIs) und eines strukturierten Auswerteprozesses. Erste Tests mit einem Referenzfahrzeug (e-Wolf) ermöglichten die Validierung der Bewertungslogik und Optimierung der Abläufe für den späteren Einsatz am RABus-Shuttle. Die standardisierte Vorgehensweise berücksichtigte verschiedene Hindernisarten sowie variable Umwelt- und Sichtbedingungen und ermöglichte eine präzise Bestimmung der Einsatzgrenzen (ODD).

Für zukünftige Projekte empfiehlt sich, solche standardisierten Prüfmethode frühzeitig zu etablieren, um technische Schwächen gezielt zu identifizieren, Systemgrenzen transparent zu dokumentieren und die Ergebnisse als Grundlage für Genehmigungsprozesse zu nutzen.

Frühzeitige, methodisch saubere Tests sichern Qualität, verkürzen Entwicklungszeiten und schaffen Vertrauen bei Genehmigungsbehörden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: RABus Shuttle	9
Abbildung 2: Autonomous Driving System von ZF	11
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Sensorsichtbereiche	11
Abbildung 4: Front Sensor-Set (Front-Ansicht) mit Kameras (gelb), Radaren (blau), Lidaren (grün) und Mikrofonen (orange)	11
Abbildung 5: AD-System „Virtuelle:r Fahrer:in“ – 2-stufiger Ansatz von ZF	12
Abbildung 6: Funktionale Architektur Stream-1 RABus Shuttle	13
Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Objekterkennung mittels Radar	14
Abbildung 8: SDI-System	16
Abbildung 9: Lokalisierung: Vorab erstellte Karte (weiß) und aktuelle Lidarmessungen (grün). Ermittelte Fahrzeugposition wird als blauer Kasten dargestellt	17
Abbildung 10: RABus Fahrzeuglokalisierung von ZF	18
Abbildung 11: Mehrdimensionales Konzept zur Fahrstrategie	18
Abbildung 12: Autonomes Transport System (ATS) – RABus	21
Abbildung 13: Daten-Lifecycle-Konzept	22
Abbildung 14: Datenhaltungskonzept	23
Abbildung 15: Detailansichten zu einem Datensatz aus der MaaS-Datenbank	25
Abbildung 16: SREM/SSEM Interaktion ATS mit LSA-Infrastruktur im Reallabor Mannheim	26
Abbildung 17: Displayanzeige für das Einsteigen der Passagiere inkl. Linienleiter	27
Abbildung 18: Außenanzeige für Fahrgastinformation	28
Abbildung 19: ZF Connectivity Suite – Anwendung „Virtual Operator“	28
Abbildung 20: ZF Connectivity Suite – Anwendung „Fleet Monitor“	29
Abbildung 21: ZF-Betriebsüberwachung für AD-Shuttles	30
Abbildung 22: Streckenverlauf Reallabor Friedrichshafen	32
Abbildung 23: Streckenverlauf Reallabor Mannheim	33
Abbildung 24: Streckenverlauf Reallabor Friedrichshafen inkl. Infrastrukturmaßnahmen	34

Abbildung 25: Streckenverlauf Reallabor Mannheim inkl. Infrastrukturmaßnahmen	35
Abbildung 26: RABus-Depot als Unterstellanlage für die Shuttles	37
Abbildung 27: Austausch mit den Einsatzkräften der Feuerwehr	37
Abbildung 28: Bürgerdialog „Barrierefreiheit“	38
Abbildung 29: Zwei Shuttles in der Charlottenstraße mit der Problematik der engen Fahrbahn	40
Abbildung 30: Proband:innenregistrierungen im Überblick	42
Abbildung 31: Fahrtenbuchungen im Überblick	43
Abbildung 32: Fahrtenbuchungen im Überblick	43
Abbildung 33: Konzept der Begleitforschung zu Akzeptanz und verkehrlichen Wirkungen	44
Abbildung 34: Zustimmung zu Aussagen zum autonomen Fahren	45
Abbildung 35: Zustimmung zu Vorbehalten gegen die Nutzung der autonomen Busse	46
Abbildung 36: Bewertung von neun Situationen in autonomen Fahrzeugen ohne Begleitpersonal (drei Beispiele unten) nach Tageszeit und Geschlecht (oben)	47
Abbildung 37: Durch Proband:innen angegebene Motivation für Teilnahme am Reallabor (oben) und Angabe zum Erfolg des Sorgen/Ängste Abbau (unten)	48
Abbildung 38: Gemittelte Bewertung der Aspekte der Mitfahrt im RABus-Shuttle	49
Abbildung 39: Prozessablauf in der Simulationsoftware mobiTopp aus der Sicht eines simulierten Agenten	49
Abbildung 40: Verkehrsnachfragesimulation mit mobiTopp für die Regionen Mannheim (links) und Friedrichshafen (rechts) als Ridepooling-Angebot	50
Abbildung 41: Darstellung von Orten mit Fahrgastpotenzial für flexible ÖPNV-Angebot	51
Abbildung 42: Methode zur Szenarienkatalogerstellung	54
Abbildung 43: Potenzielle Gefahrenszenen in der virtuellen Umgebung (aufgrund von Verdeckungen)	54
Abbildung 44: eWolf	55
Abbildung 45: eWolf Hinderniserkennung beim Szenario „Radfahrer fährt längere Zeit vor dem Fahrzeug“	56
Abbildung 46: RABus Hinderniserkennung mit Konturenpunkte	57
Abbildung 47: Genehmigungsprozess gemäß § 1i StVG i. V. m. § 16 AFGVB	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: RABus Shuttle Parameter	9
Tabelle 2: Auszug aus Testkatalog auf Basis ISO-22737	20
Tabelle 3: V2X Ampelkommunikation Ablaufsteuerung	26
Tabelle 4: Auszug aus der Definition des RABus Betriebsbereichs (ODD)	31
Tabelle 5: Auszug aus der Definition des RABus Betriebsbereichs (ODD)	41
Tabelle 6: Konfusionsmatrix	52

Impressum

Titel des Berichts

RABus Abschlussbericht

Herausgeber

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)
Pfaffenwaldring 12
70569 Stuttgart
Deutschland

Verantwortlich für den Inhalt

Ulrike Weinrich (FKFS), Magdalena Linnig (SVF), Jonas Kufky (SVF), Katherina Grafl (RAB),
Abdurrahman Pekyürek (rnv), Martin Kagerbauer (IfV, KIT), Christian Klinkhardt (IfV, KIT),
Kim Marion Kandler (IfV, KIT), Matthias Banholzer (ZF), Michael Frischmann (ZF), Enrico Hölbing (ZF),
Christian Kaes (ZF), Jonathan Scheu (ZF), Michael Vogt (ZF), Dennis Windmeier (ZF), Sebastian Wirkert (ZF)

Layout/Satz/Illustration

markentrieb GmbH

Jahr

2026

DOI

<https://doi.org/10.18419/opus-17927>

Rechtliche Hinweise

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers.
Der Inhalt des Berichts wurde mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der
Inhalte können wir jedoch keine Gewähr übernehmen.

Haftungsausschluss

Die Herausgeber übernehmen keine Haftung für Schäden, die durch die Nutzung der im Bericht enthaltenen Informa-
tionen entstehen könnten.

Projektinformationen

Projekt

Reallabor für den Automatisierten Busbetrieb im ÖPNV in der Stadt und auf dem Land – RABus

Konsortialpartner

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

Stadtverkehr Friedrichshafen GmbH (SVF)

Regionalverkehr Alb-Bodensee GmbH (RAB)

Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (rnv)

Institut für Verkehrswesen (IfV) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ZF Friedrichshafen AG (ZF)

Förderung

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Geschäftszeichen

VM5-3865-5/4/13

Projektvolumen

24.362.334 Euro (davon Förderung in Höhe von 15.791.291 Euro)

Projektlaufzeit

01.09.2020–30.06.2025 (58 Monate)



Baden-Württemberg

