a-BUS Iserlohn – New Mobility Lab

Fachhochschule Südwestfalen
University of Applied Sciences

MVG

Stadtwerke Iserlohn

ISERLOHN.
wald | stadt | heimat

gefördert durch:

Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen

DIGITALES NORDRHEIN-WESTFALEN
MODELLREGIONEN

Inhalt

Einleitung 9

Forschungsfrage 1: Anforderungsprofile für die Beschaffung von Fahrzeugen (Mobilitätsanforderungen mit technischen Anforderungen und ÖPNV-Anforderungen sowie Marktübersicht) 11

1.1 Anforderungsprofile für automatisiert fahrende Fahrzeuge (abhängig von Use-Cases) 11

1.1.1 Anforderungsanalyse und Untersuchungen des Benchmarktes über automatisiert fahrende Fahrzeuge und analoge Projekte (weltweit) 11

1.1.2 Fahrzeugbeschaffung (Lastenhefterstellung und Vergabeverfahren) 13

1.1.3 Umgesetzte ÖPNV-Anforderungen gemäß Lastenheft 14

1.1.4 Parameter für zukünftige Fahrzeuge 16

1.3 Zulassung der Strecke und des Fahrzeugs 16

1.2 Systemgrenzen und aktuelle Einschränkungen der autonomen Shuttle 17

1.3 Geschwindigkeit und Softwareupdates des Herstellers 18

1.4 Fazit 20

Forschungsfrage 2: Anforderungsprofile für ein ressourceneffizientes Energiemanagement (Ladepunktplanung, Nutzung dezentral erzeugter Energie, Ermittlung von Planungsparametern) 21

2.1 Ladepunktplanung 21

2.2 Ermittlung von Planungsparametern 22

2.3 Nutzung dezentral erzeugter Energie 23

Forschungsfrage 3: Anforderungsprofile an die Kommunikations-Infrastruktur (Technische Realisierung und Systemeigenschaften, Kennzahlen zur Ermittlung des Investitionsaufwandes, Grenzen der aktuellen Technologie) 25

3.1 Technische Realisierung und Systemeigenschaften 25

3.1.1 Hauptkommunikationssystem auf WLAN-Basis 26

3.1.2 Backup-Kommunikationssystem im Sub-1-GHz-Band 28

3.1.3 Knoteninstallation entlang der Strecke 29

3.1.4 Kommunikationsinfrastruktur und angebundene Systemkomponenten 30

3.2 Kennzahlen zum Investitionsaufwand für das Kommunikationssystem 32

3.3 Grenzen der aktuellen Technologie (WLAN-Mesh) 34

Forschungsfrage 4: Anforderungsprofile für eine digitale Betriebsführung (Klassischer Leitstellen-Betrieb im ÖPNV, Anbindung automatisiert fahrender Fahrzeuge, Benutzerinformationssystem) 36

4.1 Einleitung: Aufgaben und Anforderungen eines Leitsystems (allgemein) 36

4.2 Technische Details des Leitsystems der MVG 37

4.3 Funktionen der Fahrzeughersteller-Software 37

4.4 a-BUS-Benutzerinformationssystem 39

4.4.1 Infotainmentsysteme an den Haltestellen 39

4.4.2 Operator-App und Nutzer-App für den On-Demand-Betrieb 41

4.4.3 Systemüberwachung und Leitwarte 43

4.5 Weiterentwicklungsmöglichkeiten für On-Demand-Angebote mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen.....45

Forschungsfrage 5: Möglichkeiten und Grenzen eines „Level 5“-Betriebs im öffentlichen Straßenverkehr.....47

5.1 Neue Aufgabenstellungen für die Personenbeförderung bei einem autonomen Betrieb „Level 5“.....47

5.1.1 Soziale Akzeptanz 47

5.1.2 Soziale Kontrolle.....51

5.1.3 Barrierefreiheit.....52

5.1.4 Fazit.....56

5.2 Technische Eigenschaften und rechtliche Rahmenbedingungen für zukünftigen „Level 5“-Betrieb.....57

5.2.1 Kritische Verkehrssituationen für einen störungsfreien Level-5-Betrieb 57

5.2.2 Wesentliche Herausforderungen für das automatisierte Fahren in den Stufen 4 – 5 58

5.2.3 Welche Voraussetzungen müssen noch geschaffen werden (rechtliche Rahmenbedingungen, Akzeptanz und Umfeldanalyse)? 61

Forschungsfrage 6: Möglichkeiten und Grenzen eines wirtschaftlichen Betriebes sowie ausgewählter Anwendungsszenarien (Kostenanalyse, Analyse der Einflussfaktoren auf die

Wirtschaftlichkeit, Analyse der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle, Geschäftsmodelle zur Erzielung weiterer Ergebnisbeiträge) 62
6.1 Kosten bei der Inbetriebnahme 64
6.1.1 Kosten im Zusammenhang mit dem Fahrzeughersteller 64
6.1.2 Kosten in Bezug auf das Genehmigungsverfahren 64
6.1.3 Infrastrukturelle Maßnahmen 65
6.1.4 Übersicht der Kosten bei der Inbetriebnahme 66
6.2 Kosten pro Jahr für den laufenden Betrieb 66
6.2.1 Betriebskosten Fahrzeug 66
6.2.2 Personalkosten 67
6.2.3 Betriebskosten und Instandhaltung der Infrastruktur 67
6.2.4 Übersicht der Kosten während des laufenden Betriebs 67
6.3 Analyse der Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeit eines automatisierten Fahrbetriebs 68
6.3.1 Grundszenario für die Analyse der Einflussfaktoren 69
6.3.2 Szenario 1: Erhöhte maximale Fahrgastkapazität 71
6.3.3 Szenario 2: Szenario 1 + erhöhte Durchschnittsgeschwindigkeit 73
6.3.4 Szenario 3: Szenario 2 + Einsatz einer Technischen Aufsicht 74
6.3.5 Szenario 4: Einsatz von Fahrzeugen aus einer Serienproduktion 77
6.3.6 Fazit 79
6.4 Analyse der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle 79
6.5 Analyse ausgewählter Use-Cases für die erste und letzte Meile 82
6.5.1 Quartierserschließung 83
6.5.2 Hop-on/Hop-off-Anbindung 88
6.5.3 Erschließung von Gewerbegebieten 89
6.5.4 Pendelverkehr bei Großveranstaltungen 90
6.5.5 Fazit 91
6.6 Geschäftsmodelle zur Erzielung weiterer Ergebnisbeiträge rund um den eigentlichen Shuttle-Betrieb 91
6.6.1 Integration weiterer Dienstleistungen 91

6.6.2 Einbezug des Einzelhandels bei Fahrten in Innenstädten oder Einkaufszentren ..93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Autonome Fahrzeugshuttles der Hersteller Easy-Mile und NAVYA. 12
Abbildung 2: Autonome Fahrzeugshuttles in Modellprojekten in den Niederlanden. 12
Abbildung 3: Auszug aus der Leistungsbeschreibung/Anforderungsprofils. 13
Abbildung 4: Foliertes Shuttle der Fa. Easy-Mile EZ 10 GEN 3. 14
Abbildung 5: Fahrzeugansicht mit ausgefahrener rollstuhlgerechten Rampe.....15
Abbildung 6: Beispiele für Fahrsituationen die einen ungeplanten Fahrzeugstopp verursachen. 17
Abbildung 7: Foliertes FH-SWF Shuttle mit Hinweis auf eine max Geschwindigkeit 18 km/h. 18
Abbildung 8: Ausleitung aus dem monatlichen Statusreport des FH-SWF Shuttle. 19
Abbildung 9: Ladepunktplatzierung im a-BUS-Projekt 22
Abbildung 10: Energiefluss-Simulationsergebnis zum a-BUS mit PV-Anlage und Speicher..24
Abbildung 11: Anwendungsszenario von WLAN bzw. Wi-Fi-Mesh des Anbieters SilverNet..26
Abbildung 12: Experiment zur Videodatenübertragung über das WLAN-Mesh. 27
Abbildung 13: Kommunikation der „Echo M5“-Module mit dem WLAN -Mesh.....27
Abbildung 14: Realisiertes Funkmodul für die Mast-Montage und beispielhafte Mesh-Topologie. 28
Abbildung 15: Montierter Mast mit Funkmodul bei der Einrichtung 29
Abbildung 16: Positionierung der Funkmasten entlang der Bus-Strecke.....30
Abbildung 17: Systemkomponenten und Datenaustausch mit zentraler Datenhaltung.....31
Abbildung 18: a-BUS mit montierter Funk-Dachbox zur Einbindung in das Kommunikationssystem (links) sowie Blockschaltbild der Dachbox (rechts). 32
Abbildung 19: Vernetzungsszenario bei der C-V2X- Kommunikation im Verkehrsbereich (Quelle: www.qorvo.com). 35
Abbildung 20: Leitstelle der Märkischen Verkehrsgesellschaft MVG.....36
Abbildung 21: Kamera zur Überwachung der Fahrzeugumgebung. 38
Abbildung 22: Ansicht der Flottenmanagement-Software „EZ Maestro“. 39
Abbildung 23: Am Campus aufgestelltes Infotainmentsystem mit ausgewählten Anzeigeseiten. 40
Abbildung 24: Screenshots der Operator-App: Auswahl des Fahrzeugs (links). Übertragung der Fahrgastanzahl (mitte-links). Freigegebener OnDemand-Betrieb mit Anfrage die Fachhochschule anzufahren (mitte-rechts). Bei angenommener Anfrage, die Schaltfläche, dass das Ziel erreicht wurde (rechts). 41
Abbildung 25: Montage des Operator-Smartphones im Türbereich eines Busses für die Freihandbedienung. 42

Abbildung 26: Screenshots der Nutzer-App: Hauptmenü (oben links). Karte, auf der die Haltestellen und Busse angezeigt werden (oben mitte). Freigegebener On-Demand-Betrieb (oben rechts). Bus wurde angefordert (unten links). Bestätigte Anfrage zum Anfahren der FH (unten mitte). Meldung, dass der Bus das gewünschte Ziel erreicht hat (unten rechts).....43
Abbildung 27: Systemüberwachung mittels „Control Center a-BUS“ als Teil der Leitwarte. ..44
Abbildung 28: Altersstruktur der Umfrageteilnehmer.....48
Abbildung 29: Beschäftigungsstatus der Umfrageteilnehmer.....49
Abbildung 30: Prozentuale Antwortverteilung auf die Frage: „Würden Sie zukünftig ein selbstfahrendes (autonomes) Fahrzeug ohne Operator nutzen?“.....50
Abbildung 31: Prozentuale Antwortverteilung auf die Frage: „Welche Ausstattungsmerkmale im autonom fahrenden Bus sind für Sie interessant?“.....51
Abbildung 32: Comic zum autonomen Fahren.....57
Abbildung 33: Beispiel Busspur am HBF-Hagen.....58
Abbildung 34: Sensorik in den eingesetzten Shuttles (1).....59
Abbildung 35: Sensorik in den eingesetzten Shuttles (2).....60
Abbildung 36: Entwickelte Kostenstruktur im Verlauf des Projekts.....63
Abbildung 37: Prozentuale Anteile der Kostenparameter bei der Inbetriebnahme. 66
Abbildung 38: Prozentuale Anteile der Kostenparameter für den laufenden Betrieb. 68
Abbildung 39: Kostendeckungsgrade der vier untersuchten Szenarien. 79
Abbildung 40: Merkmale der Teststrecke „a-BUS Iserlohn – New Mobility Lab“.....80
Abbildung 41: Städtebauliches Konzept: 3. Änderung des Bebauungsplans Nr. 215 »Bernhard-Hülsmann-Weg« (Stand: 25.01.2023).....84
Abbildung 42: Erster Bauabschnitt im Neubaugebiet „Bernhard-Hülsmann-Weg“.....85
Abbildung 43: Übersicht von vereinzelten Stellplätzen für private Fahrzeuge innerhalb des Quartiers aus dem städtebaulichen Konzept (Stand: 25.01.2023). 87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Forschungsfragen im Projekt "a-BUS Iserlohn - New Mobility Lab" 10
Tabelle 2: Annahmen für das Grundszenario 70
Tabelle 3: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses im Grundszenario. 71
Tabelle 4: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses in Szenario 1. 73
Tabelle 5: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aus Szenario 1 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h. 74
Tabelle 6: Personalkosten entsprechend dem Betreuungsschlüssel von Technischer Aufsicht zu Fahrzeug. 75
Tabelle 7: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aus Szenario 2 mit einer Technischen Aufsicht, die fünf Fahrzeuge betreut. .76
Tabelle 8: Kostendeckungsgrad beim Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse mit unterschiedlichen Betreuungsschlüsseln der Technischen Aufsicht. 77
Tabelle 9: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aus Szenario 3, welches zusätzlich in Serie produziert wird. 78
Tabelle 10: Ausgewählte Anwendungsfälle zur Analyse hinsichtlich eines Betriebs automatisiert fahrender Shuttlebusse. 83
Tabelle 11: Merkmalsausprägungen im Neubaugebiet an der Bernhard-Hülsmann-Kaserne in Iserlohn.....86

Einleitung

Im Sommer 2018 hat die Landesregierung Nordrhein-Westfalen das Förderprogramm „Digitale Modellregionen in NRW“ gestartet. Ziel war es, mit übertragbaren Lösungen in den Bereichen E-Government und digitale Stadtentwicklung die Digitalisierung in den Regionen und Kommunen zu beschleunigen.

Bei dem „a-BUS Iserlohn – New Mobility Lab“ handelt es sich um eines der Projekte, welches das Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Förderprogramms in dem Zeitraum vom 01.07.2020 bis 30.06.2023 gefördert hat.

Am Beispiel der Anbindung des Hochschulcampus Iserlohn an die öffentlichen Verkehrssysteme wurde das automatisierte Fahren mit Level 4, d.h. dem vollautomatischen Betrieb, im ÖPNV anwendungsorientiert umgesetzt und mit wissenschaftlicher Begleitung erforscht. So konnten grundlegende Erkenntnisse zum Potenzial perspektivisch autonom fahrender Systeme als wirtschaftliche Lösung für „die letzte Meile" gewonnen und eine Übertragbarkeit auf ähnlich gelagerte Anwendungsfälle eröffnet werden. Es handelte sich um ein spezifisches Mobilitätsangebot für den ländlichen Raum sowie eine Quartierslösung. Das Projekt hat einen rudimentären Einstieg in „neue und innovative“ Mobilitätsformen ermöglicht.

Das Projektkonsortium, bestehend aus der Fachhochschule Südwestfalen (FH-SWF), der MVG Märkischen Verkehrsgesellschaft GmbH (MVG), der Stadtwerke Iserlohn GmbH und der Stadt Iserlohn haben im Rahmen des Förderprojektes die nachfolgenden Forschungsfragen bearbeitet, die nachfolgend beantwortet werden:

Forschungsfrage 1	Anforderungsprofile für die Beschaffung von Fahrzeugen (Mobilitätsanforderungen mit technischen und ÖPNV-Anforderungen sowie Marktübersicht)
Forschungsfrage 2	Anforderungsprofile für ein ressourceneffizientes Energiemanagement (Ladepunktplanung, Nutzung dezentral erzeugter Energie, Ermittlung von Planungsparametern)
Forschungsfrage 3	Anforderungsprofile an die Kommunikations-Infrastruktur (Technische Realisierung und Systemeigenschaften, Kennzahlen zur Ermittlung des Investitionsaufwandes, Grenzen der aktuellen Technologie)

Forschungsfrage 4	Anforderungsprofile für eine digitale Betriebsführung (Klassischer Leitstellen-Betrieb im ÖPNV, Anbindung automatisiert fahrender Fahrzeuge, Benutzerinformationssystem)
Forschungsfrage 5	Möglichkeiten und Grenzen eines „Level 5“-Betriebs im öffentlichen Straßenverkehr
Forschungsfrage 6	Möglichkeiten und Grenzen eines wirtschaftlichen Betriebes sowie ausgewählter Anwendungsszenarien (Kostenanalyse, Analyse der Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit, Analyse der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle, Geschäftsmodelle zur Erzielung weiterer Ergebnisbeiträge)

Tabelle 1: Forschungsfragen im Projekt "a-BUS Iserlohn - New Mobility Lab"

Forschungsfrage 1: Anforderungsprofile für die Beschaffung von Fahrzeugen (Mobilitätsanforderungen mit technischen Anforderungen und ÖPNV-Anforderungen sowie Marktübersicht)

1.1 Anforderungsprofile für automatisiert fahrende Fahrzeuge (abhängig von Use-Cases)

Für das a-BUS-Projekt standen bei der Wahl des passenden Beförderungsmittels (Shuttle) die folgenden Prämissen im Vordergrund:

Ein Gesamtsystem eines Anbieters,

- das bereits über eine deutsche Straßenzulassung verfügt,
- das sämtliche im Lastenheft beschriebenen, technischen Anforderungen erfüllt (Im Besonderen, einen Dauerbetrieb für das anspruchsvolle Gelände „Steigung > 14%“, ermöglicht),
- alle Sicherheitsanforderungen für ein Beförderungsmittel im ÖPNV gewährleistet,
- für den Betrieb des Shuttles alle notwendigen Software- und Hardware-Komponenten zur Verfügung stellt,
- Aus- und Weiterbildung der „Operatoren“ koordiniert und durchführt sowie
- im Rahmen der Gewährleistung bei Ausfällen jeglicher Art, eine schnelle Reaktionszeit zur Wiederaufnahme des Betriebes sicherstellt.

1.1.1 Anforderungsanalyse und Untersuchungen des Benchmarktes über automatisiert fahrende Fahrzeuge und analoge Projekte (weltweit)

Bei Zusammenstellung der Anforderungsanalyse und Untersuchung des auf dem Markt befindlichen Herstellerportfolios zum Zeitpunkt des Projektstarts (Juli 2020), stand coronabedingt eine intensive Internetrecherche im Vordergrund. Hier wurden u.a. verwandte abgeschlossene und laufende Projekte aus Deutschland sowie aus dem europäischen Ausland herangezogen. (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2) und Auflistung der Modellprojekte)

Hervorzuheben sind jedoch die Projekte „SAM“ Südwestfalen Autonom & Mobil und Autonome Shuttle Mohnheim., („die Altstadtstromer“) von denen man für das a-BUS-Projekt wichtige Informationen und Erkenntnisse schon im Vorfeld der Fahrzeugbeschaffung gewinnen konnte. Hier hat von Projektstart über die Gesamtlaufzeit ein ständiger Erfahrungsaustausch stattgefunden. Viele der Probleme des autonomen Fahrbetriebes konnten mitunter im a-BUS-Projekt verifiziert werden. Beide genannten Modellprojekte

wurden ebenfalls mit autonomen Shuttle des Herstellers Easy-Mile umgesetzt. Jedoch mit Shuttle der Vorgängergeneration (EZ-10 Gen 1+2).

Abbildung 1: Autonome Fahrzeugshuttles der Hersteller Easy-Mile und NAVYA.

Auflistung analoger Modellprojekte aus Deutschland

- Ride4All (autonomes Shuttle, Soest)
- Bad Birnbach(seit 2017,autonome Shuttle, Niederbayern)
- TaBuLa (autonome Shuttle, Lauenburg)
- Autonome Shuttle Mohnheim „ die Altstadtstromer“
- SAM Südwestfalen Autonom & Mobil

Beispiel analoger Projekte aus dem europäischen Ausland (Niederlande)

- Loppersum en Zernike Campus
- ESA ESTEC Noordwijk
- Marineterrein Amsterdam

Abbildung 2: Autonome Fahrzeugshuttles in Modellprojekten in den Niederlanden.

Die o.g. Modellprojekte aus den Niederlanden sind nur ein Auszug aus bisher abgeschlossenen und noch in Planung befindlichen Projekten aus dem Nachbarland. Einige dieser aufgeführten Projekte sind schon im Jahr 2016 gestartet. Auch hier kamen hauptsächlich autonome Shuttle der Hersteller Easy-Mile und NAVYA-ARMA zum Einsatz. Im Dezember 2019 wurde ein Bericht des Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft

„Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W)“ veröffentlicht indem ausführlich die Erfahrungen aus Sicht der eingesetzten Operatoren bei verschiedenen Projekten beleuchtet wurden und welche Lehren daraus für zukünftige Aktivitäten in puncto autonomes Fahren gezogen werden können.[1]

1.1.2 Fahrzeugbeschaffung (Lastenhefterstellung und Vergabeverfahren)

Wie schon unter Gliederungspunkt 1.1 beschrieben, wurde für das finale Vergabeverfahren zur Beschaffung eines autonomen Shuttles für das a-BUS-Projekt ein detailliertes Lastenheft zur Festlegung der Zuschlagskriterien erstellt. Dieses, beinhaltete sämtliche technischen Anforderungen sowie Spezifika der Fahrzeugbeschaffung für den Betrieb im ÖPNV, wie auch jegliche notwendigen Aspekte der Sicherheit.

Als Anhaltspunkt diente das Anforderungsprofil des unter Gliederungspunkt 1.1.1 aufgeführten Projektes in Mohnheim, das uns freundlicher Weise vom Betreiber zur Verfügung gestellt wurde.

Aufgrund vieler schon beschriebener Besonderheiten und Streckencharakteristika musste das a-BUS-Lastenheft in puncto Anforderung (z.B. permanenter Allradantrieb etc.) ergänzt bzw. erweitert werden um schlussendlich das Ausschreibungs- und Vergabeverfahren starten zu können. Zum Zeitpunkt der Beschaffung und nach Sichtung aller potentiellen Bewerber (Hersteller) blieben wie beschrieben nur die o.g. Systemhersteller von autonomen Shuttle(n) Easy-Mile ´/ NAVYA ARMA übrig, die annähernd alle geforderten Anforderungen des Lastenheftes erfüllte. Von Seiten der FH-SWF und MVG entschied man sich für 2 baugleiche Shuttle der Fa. Easy-Mile des Fahrzeugtyps EZ 10 GEN 3 (siehe Abbildung 4)

5	**Gruppe**	**Informationskriterien - Technische Angaben Fahrbetrieb**					
5.1	Informationskriterium ohne Bewertung	Antriebsart (Zahl der angetriebenen Achsen und Bauart der Elektromotoren)					Allradantrieb über 2 unabhängige asynchrone Elektromotoren
5.2	Informationskriterium ohne Bewertung	Max. Geschwindigkeit im manuellen Betrieb (Angabe in km/h)					5 km/h - reduzierte Geschwindigkeit ist Teil des EasyMile Sicherheitskonzeptes
5.3	Informationskriterium ohne Bewertung	Max. Geschwindigkeit im vollautomatisierten Betrieb (Angabe in km/h)					Mechanische Auslegung der Komponenten für maximal 45km/h, jedoch elektronisch begrenzt auf maximal 25km/h. Die maximale Betriebsgeschwindigkeit im autonomen Modus mit eingebetteter EasyMile-Software wird während des Fahrzeugeinsatzes je nach Softwarestand, Standortkonfiguration und Zulassungsprozess vermutlich für bis zu 18-20 km/h zugelassen werden.
5.4	Informationskriterium ohne Bewertung	Max. Drehmoment (Angabe in Nm) und Drehzahlbereich in dem das max. Drehmoment zur Verfügung steht (Angabe in 1/min)					max. 45 Nm Drehmoment von 0 bis 2000 U/min.
5.5	Informationskriterium ohne Bewertung	Durchschnittlicher Verbrauch oder Zyklusverbrauch (Angabe in kWh/100km)					siehe Antwort zu 1.10
5.6	Informationskriterium ohne Bewertung	Min. Wendekreis (Angabe in m)					Der optimale Wendekreis für den EZ10 beträgt 15m inkl. Sicherheitsprofil. Kleinere Wendekreise sind unter Umständen möglich.
5.7	Informationskriterium ohne Bewertung	Radstand (Angabe in m)					2800mm
5.8	Informationskriterium ohne Bewertung	Maximale fahrbare Steigung (Angabe in %)					Bis zu 15% je nach Streckenlänge / -profil. Alle Steigungsprofile von über 10% müssen bei EasyMile durch das interne Risikokommittee bestätigt werden. Siehe hierzu auch Antwort 11.1.
5.9	Informationskriterium ohne Bewertung	Betriebsmodi (z.B. Vorwärts-/ Rückwärtsfahrt, Automatisierungsstufen)					Vorwärts, Rückwährtsfahren, Manueller Modus, Manueller Modus mit ausgeschalteter Sicherheitskette für bspw. Be- / Entladen, Autonomer Modus
5.10	Informationskriterium ohne Bewertung	Bedienpanel	Screenshots und die Beschreibung aller Dialogfelder				Für einen ersten Eindruck siehe Angebotsschreiben. Ausführliche Informationen werden im Falle einer Beauftragung mit der Handbuchdokumentation zur Verfügung gestellt.
6	**Gruppe**	**Informationskriterien - Optionale Betriebsvoraussetzungen**					

Abbildung 3: Auszug aus der Leistungsbeschreibung/Anforderungsprofils.

[1] Vgl. Lessen leren van pilots met zelfrijdende shuttles in Nederland

Abbildung 4: Foliertes Shuttle der Fa. Easy-Mile EZ 10 GEN 3.

1.1.3 Umgesetzte ÖPNV-Anforderungen gemäß Lastenheft

Beim Einsatz automatisiert fahrender Shuttlebusse im ÖPNV sind neben spezifischen technischen Voraussetzungen weitere betriebsspezifische Anforderungen ins Lastenheft zu integrieren. Somit wird sichergestellt, dass die Fahrzeuge den Anforderungen der FZV, der StVZO und der BOKraft entsprechen und für die Beförderung von Personen im ÖPNV nach PBefG geeignet sind.

Im Rahmen dieses Projekts sind die Anforderungen an das Fahrzeug hinsichtlich der Nutzung im ÖPNV vom Fahrzeughersteller erfüllt. Folgendes ist diesbezüglich im Lastenheft aufgeführt:

- Rollstuhlgerechte Rampe entsprechend DIN 18040 und den Anforderungen nach BOKraft (siehe Abbildung 5)
- Rollstuhlplatz mit Rückhaltesystem gem. ECE R 107
- Vorhandensein von mindestens einem Außentaster und einem Innentaster für die manuelle Türöffnung durch die Fahrgäste, welche während der Fahrt nicht aktiv sind
- Anzeiger zur Fahrgastinformation im Fahrzeuginnenraum
- Nothämmer an den Fensterholmen gemäß der gesetzlichen Vorschrift
- Feuerlöscher und Verbandskasten im Fahrzeuginnenraum
- Notöffnungshebel für die Türen
- Außenanzeiger vorne und hinten am Fahrzeug (gem. § 33 BO-Kraft)
- Innenraumüberwachung durch Videokameras
- Sicherheitsgurte für Fahrgäste
- Software zur Verbindung des Fahrzeugs mit der Leitstelle, um betriebsrelevante Informationen jederzeit von der Leitstelle aus in Echtzeit einzusehen und zu überwachen
- Gegensprechanlage, die eine Kommunikation mit der Leitstelle aus dem Fahrzeuginnenraum ermöglicht

Abbildung 5: Fahrzeugansicht mit ausgefahrener rollstuhlgerechten Rampe.

1.1.4 Parameter für zukünftige Fahrzeuge

Zukünftig ist es erforderlich, dass die Fahrzeuge weitere Anforderungen für den Einsatz im ÖPNV erfüllen. In der aktuellen Fahrzeugausstattung kann ein Rollstuhlfahrer aufgrund der Positionierung im Fahrzeug den Haltewunschtaster nicht selbstständig bedienen. Zusätzlich müssen Rollstühle vom Operator manuell mithilfe von Befestigungsgurten fixiert werden. Demzufolge ist eine andere Positionierung des Platzes oder das Installieren von neuen Tastern notwendig.

Auf weitere Anforderungen an das Fahrzeug und dessen Ausstattung, die zum aktuellen Zeitpunkt und insbesondere im Hinblick auf einen ÖPNV-Betrieb von autonomen SAE-Level 5 klassifizierten Fahrzeugen erforderlich sind, wird im Abschnitt 5 a) genauer eingegangen. Hierzu gehört unter anderem das akustische Kennzeichnen von unmittelbar bevorstehenden Haltestellen und eine akustische Signalisierung des Fahrvorgangs.

1.3 Zulassung der Strecke und des Fahrzeugs

Für die Erlangung einer Ausnahmegenehmigung gemäß § 70 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) waren von den einzelnen Projektpartnern zahlreiche Arbeitspakete zu erledigen. Zunächst mussten von Seiten eines amtlich anerkannten Sachverständigen die Fahrzeuggutachten erstellt werden, welche mit dem Standortbewertungsbericht (Site Assessment Report - SAR) des Fahrzeugherstellers und dem Beschilderungsplan der örtlichen Verkehrsbehörde Grundlage für das Streckengutachten eines amtlich anerkannten Sachverständigen waren. Erst im Anschluss konnte die Ausnahmegenehmigung von der Bezirksregierung ausgestellt werden.

Die Erstellung eines gemeinsamen Fahrzeug-Anforderungsprofils sowie die Erlangung einer Ausnahmegenehmigung gemäß § 70 StVZO erforderten einen intensiven Austausch innerhalb des Projektkonsortiums. Es hat sich als sehr wichtig herausgestellt, dass nicht am Projekt unmittelbar Beteiligte (z.B. Bezirksregierung, amtlich anerkannter Sachverständiger, Kreispolizeibehörde) frühzeitig über die Projektvorhaben informiert und beteiligt werden. Darüber hinaus hat der intensive Erfahrungsaustausch mit Projektverantwortlichen anderer Mobilitätsprojekte dazu beigetragen, dass Arbeitspakete wesentlich schneller bearbeitet werden konnten.

1.2 Systemgrenzen und aktuelle Einschränkungen der autonomen Shuttle

Neben den systembedingten Fehlern (Software, Mechanik u. Elektrik der Shuttle), sind die folgende Ereignisse der Grund für die meisten ungeplanten Unterbrechungen des autonomen Fahrmodus:

- Verlust der Lokalisation durch Ausfall der GPS-bzw. 4G NRTK Verbindungen
- Extreme Hitze/ Überhitzung von Bordcomputern
- Kreuzung der Route mit den Routen für Krankenwagen und Feuerwehr

Weitere Beispiele für ungeplante Unterbrechungen[2] des autonomen Fahrmodus (siehe Abbildung 6) waren:

- Radfahrer im Sicherheitsraum
- Geparkte Autos auf der Strecke
- Veränderung der bebauten Umgebung auf der Route
- Temporäre „neue“ Hindernisse entlang der Route (Mülltonnen)
- Straßenvegetation (Unkraut, Zweige)
- Kleine Bewegliche Objekte wie Vögel oder Regenschirme.
- Jahreszeiten (dadurch bedingte Vegetationsänderung)

Abbildung 6: Beispiele für Fahrsituationen die einen ungeplanten Fahrzeugstopp verursachen.

[2] Ungeplante Unterbrechungen sind Unterbrechungen von dem automatischen Fahrmodus, der nicht vorprogrammierbar ist oder unerwartete Vorkommnisse aufgrund lokaler Bedingungen. Sie können durch die Software sowie durch den Fahrzeugführer verursacht werden.

1.3 Geschwindigkeit und Softwareupdates des Herstellers

Die unter 1.2 beschriebenen Systemgrenzen und ungeplanten Unterbrechungen des autonomen Fahrmodus konnten nunmehr auch im a-BUS-Projekt. anlog der Dokumentationen aus verwandten Modellprojekten zu 100% bestätigt werden. Auf zwei Besonderheiten wie o.a. Geschwindigkeit und Softwareupdates des Herstellers, soll hier kurz eingegangen werden.

Geschwindigkeit

Abbildung 7: Foliertes FH-SWF Shuttle mit Hinweis auf eine max Geschwindigkeit 18 km/h.

Generell sind von den Zulassungsbehörden in Deutschland die autonomen Shuttlesysteme bis Level 4 im öffentlichen Raum auf max. 18 km/h begrenzt. Zusätzlich obliegt es den örtlichen Zulassungsbehörden im a-BUS-Projekt (Bezirksregierung Arnsberg) unter Berücksichtigung des erfolgten Streckengutachtens und Risikoanalyse des Herstellers, bei potentiell, gefährlicher

Charakteristik die Geschwindigkeit weiter herunter zu setzen. Im Falle der Teststrecke des A-BUS ist das geschehen und die max. Geschwindigkeit auf 12 km/h reduziert worden.

Bei einer Stichprobenbefragen der eigentlichen Zielgruppe (Studenten der FH-SWF) des A-BUS, wurde unter anderem immer wieder der Punkt (geringe Geschwindigkeit) als störend empfunden und genannt. Das, dies kein subjektives Empfinden der Studenten war, belegen die Daten aus dem monatlichen Fahrzeugbericht, der eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ca. 3-3,5 km/h, also unter Schrittgeschwindigkeit ausweist. (siehe Abbildung 8)

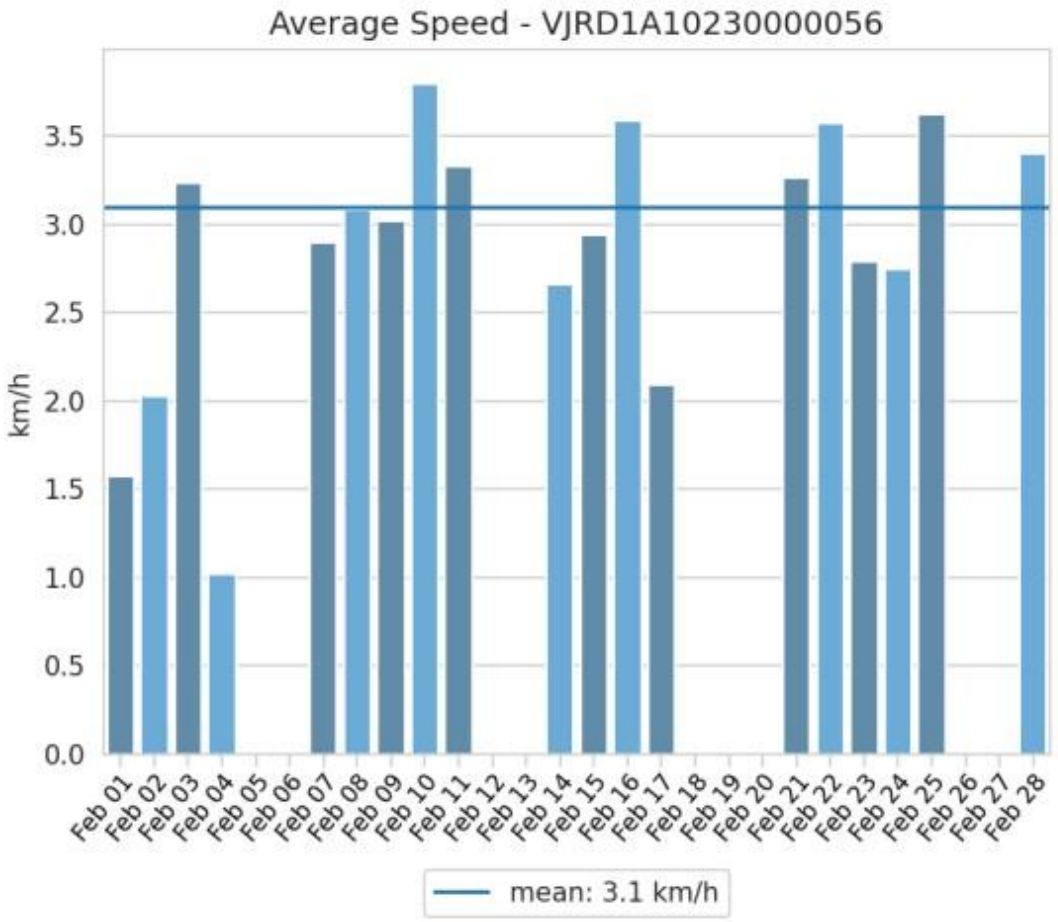


Abbildung 8: Ausleitung aus dem monatlichen Statusreport des FH-SWF Shuttle.

Softwareupdates des Herstellers

Nach Auslieferung und Streckenfreigabe sind beide Easy-Mile Shuttle im August 2020 für den Betrieb freigegeben worden. Der damalige Softwarestand des Herstellers Easy-Mile wurde mit (Voyager 10.0) angegeben. Man versicherte uns den jeweiligen, weiterentwickelten Softwarestand in regelmäßigen Abständen zu implementieren. Nach ca. 1-jähriger Betriebsführung der Shuttle lag schon ein weiter entwickelter Softwarestand (Voyager 13.1) vor, der nie auf den a-BUS-Shuttle(n) zum Einsatz gelangte. Dieser Softwarestand beinhaltete auch die Möglichkeit einer Hinderniserkennung und autonomer Umfahrung des Shuttles.

Grund: Dieser Softwarestand hätte die hintere Bremseinheit des Shuttles inaktiviert und kam aus Sicherheitsgründen und der topographischen Besonderheiten der a-BUS-Teststrecke nicht zur Erprobung.

1.4 Fazit

Allgemein

Zukünftig wird sowohl auf dem Gebiet des Personenverkehrs als auch für die Logistik der Weg des „autonomen Fahrens“ nur über die konsequente Weiterentwicklung aller für den Fahrbetrieb nötigen Komponenten (Fahrzeugtechnik, Elektrik, Sensorik, Kamera und LIDAR-Systeme, Software und Digitalisierung unter immer stärker Einbeziehung der KI erfolgen, um im nächsten Schritt (zuerst wahrscheinlich in der Logistik) den ausgereiften „Level 4“ Modus zu erreichen. Hierbei wird der Weg von Digitalisierung + elektrischer Antrieb + autonom, der Faktor (Fahrer/Operator), völlig entfernt. Nur so, lässt sich mittelfristig auch ein wirtschaftlicher Erfolg des autonomen Fahrens darstellen.

a-BUS Iserlohn

- Die beschriebenen (softwarebedingten) Ausfälle bzw. ungeplanten Unterbrechungen des autonomen Fahrmodus sollten vom Hersteller kontinuierlich weiterentwickelt werden.
- System „sensibel-unsensiblerer“ und somit störunempfindlicher gegen äußere Bedingungen gestalten. (Laub, Schnee, Gräser…etc.)
- Selbstständiges Erkennen und Verlassen der Route unter Wahrung der Sicherheitsaspekte. (Eigenständige, autonome Hindernisumfahrung)
- Durch Kommunikation und Radarauswertung der unmittelbar am Verkehr beteiligten Fahrzeuge und Personen sollte ein (eigenständiges, autonomes „Links-rechts-Abbiegen“) möglich sein.

Neben der ständigen Weiterentwicklung der Software um das autonome Fahren auf einen sicheren, nächsten Level zu bringen, ist es gerade wie im a-BUS-Projekt verifiziert für „kleinere Anbieter“ des Gesamtsystems wie z.B. Easy-Mile extrem wichtig, das „reine Fahren“ auf einen automotiven Standard zu bringen. Hier sollte eine enge Zusammenarbeit mit den führenden Fahrzeugherstellern (OEM`s wie: BMW, VW, Daimler…) und deren Zulieferern (Tier1 wie: Bosch, ZF, Continental…) erfolgen um in Puncto Standardisierung im Fahrzeugbau (Module, CLAR, MQB, MLB…) sowohl eine Qualitätserhöhung und gute Ersatzteilversorgung zu erzielen.

Forschungsfrage 2: Anforderungsprofile für ein ressourceneffizientes Energiemanagement (Ladepunktplanung, Nutzung dezentral erzeugter Energie, Ermittlung von Planungsparametern)

2.1 Ladepunktplanung

Ein intelligentes und ressourcenschonendes Energiemanagement wird zum einen durch die technischen Eigenschaften von Ladeeinrichtung und Shuttle sowie zum anderen durch die zurückzulegende Fahrstrecke bestimmt. Die optimale Ladepunktplatzierung wird auf Basis der technischen Eigenschaften geplant.

Die Nachtladung des Shuttles ist der wichtigste Baustein, damit die Fahrtroute mit einem Akkuladezustand von 100% gestartet werden kann. Da über die Nachtstandzeit hinreichend Ladezeit zur Verfügung steht, kann auf eine Schnellladung verzichtet werden. Zu empfehlen ist hier eine mögliche Ladeleistung von bis zu 22 kW AC, die auch bei öffentlichen Ladeeinrichtungen derzeit Stand der Technik ist. In dem a-BUS-Projekt wurde der Ladepunkt 1 entsprechend an dem Nachtstandort des Shuttles realisiert, auf dem Parkplatz der FH am Frauenstuhlweg. Ausgewählt wurde hierfür eine Wallbox vom Typ AMTRON des Herstellers Mennekes, der eine Ladeleistung von bis zu 22 kW AC ermöglicht.

Die weitere Ladepunktplanung ergibt sich aus dem Verhältnis der Streckenlänge zur Akkukapazität unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Energieverbrauchs des Shuttles. Starke Anstiege oder Gefälle im Streckenverlauf werden im durchschnittlichen Energieverbrauch des Shuttles berücksichtigt. Dieser ist bei steigungsintensiven Strecken höher als die Herstellerangabe, bei Fahrstrecken mit großem Gefällanteil wird der Energieverbrauch geringer als die Herstellerangabe ausfallen. Es sind daher stets die individuellen und projektbezogenen Parameter zu beachten. Für den a-BUS ergab sich aufgrund der Streckenlänge von ca. 1,5 km kein Bedarf, eine Zwischenlademöglichkeit entlang der Strecke zu errichten. Der Ladepunkt 2 wurde daher an der Haltestelle am Stadtbahnhof realisiert. Auf diesem Wege wurde die Nachladung des Shuttles während der Pausenzeit des Operators ermöglicht. Für den Ladepunkt 2 wurde eine Ladesäule vom Typ eStation smart des Herstellers Innogy mit einer möglichen Ladeleistung von 2 x 22 kW AC ausgewählt und errichtet. Dadurch konnten in besonderen Einsatzfällen auch beide Shuttle gleichzeitig geladen werden.

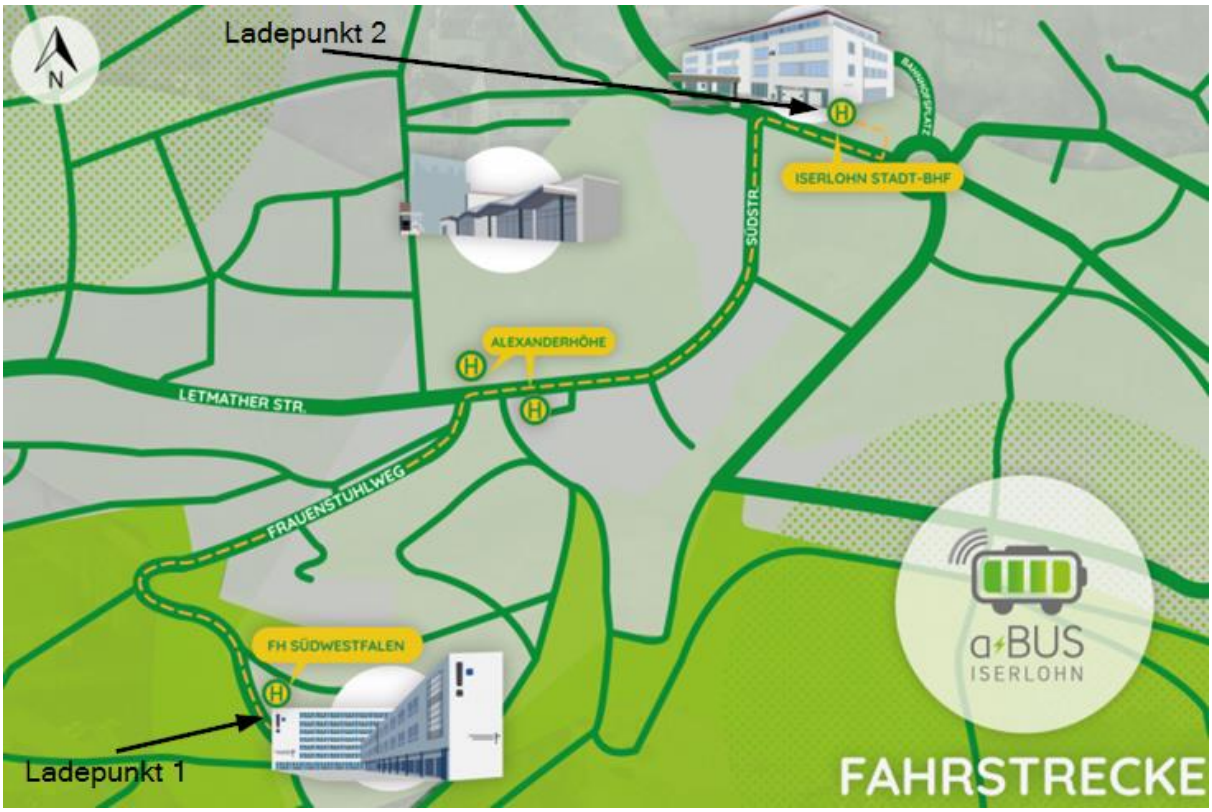


Abbildung 9: Ladepunktplatzierung im a-BUS-Projekt

2.2 Ermittlung von Planungsparametern

Die Ermittlung von Planungsparametern für die Ladepunktplanung ist sehr individuell. Die Ladepunktplanung für den a-BUS wurde bereits in Kapitel 2.1 hinreichend erläutert. Um die Wirksamkeit weiterer Planungsparameter zu verdeutlichen, wird nun eine bespielhafte Festlegung eines Nachladepunktes auf Basis von Daten aus dem a-BUS-Projekt in Kombination mit einer fiktiven Strecke durchgeführt, die deutlich länger als die a-BUS-Strecke ist.

Es wird angenommen, dass der a-BUS mit einem Akkuladezustand von 100% seine Route antritt. Der durchschnittliche Verbrauch des a-BUS-Shuttle lag über den Projektzeitraum bei ca. 1,25 kWh/km. Aus planerischer Sicht sollte ein Akkuladezustand von 20% während des Fahrteinsatzes nicht unterschritten werden, um das Risiko eines Fahrzeugstillstands aufgrund eines leeren Akkus zu minimieren. Aus den genannten Rahmenbedingungen lässt sich ermitteln, dass das Shuttle nach einer zurückgelegten Strecke von 24,3 km seinen kritischen Akkuladezustand von 20% erreicht und daher in diesem räumlichen Umfeld ein Nachladepunkt geplant werden sollte. Dem Shuttle ist an dem Nachladepunkt die erforderliche Ladezeit zur Verfügung zu stellen. Dies ist in der Routenplanung entsprechend zu berücksichtigen. Bei der Nachladung muss möglichst viel Energie in möglichst kurzer Zeit

übertragen werden. Aus diesem Grund ist hier die Nutzung einer Schnellladung mit > 50 kW DC zu empfehlen. Das Shuttle sowie der Ladepunkt sollten hierauf ausgelegt sein. Dies ist ein Ansatzpunkt, der bei der Ladetechnik des a-BUS noch nicht berücksichtig ist, für die Weiterentwicklung der Shuttle aber ein wichtiger Faktor ist.

Für die mittelfristige Weiterentwicklung sollten Möglichkeiten des kontaktlosen Ladens geprüft und angewandt werden, um das Handling der Ladevorgänge zu erleichtern. Auch im Hinblick auf einen zukünftigen Fahrbetrieb ohne Operator wäre das eine zwingende Voraussetzung. Für das kontaktlose Laden bietet die induktive Ladetechnik im Preis-Leistungsvergleich Vorteile gegenüber der robotergestützten Ladetechnik.

2.3 Nutzung dezentral erzeugter Energie

Eine auf Nachhaltigkeit und Umweltbewusstsein ausgerichtete Ladestrategie setzt die Nutzung von regenerativ erzeugter Energie voraus. Zu empfehlen ist hierfür vorrangig die Nutzung von PV-Strom. Bei der Standortauswahl der Ladeplätze ist folglich auch die mögliche Platzierung einer PV-Anlage bereits im Vorfeld zu berücksichtigen. Damit insbesondere bei der Nachtladung die Deckungslücke zwischen Erzeugungs- und Verbrauchslastgang angemessen berücksichtigt wird, empfiehlt sich die Installation eines Speichers.

Im a-BUS-Projekt wurde mittels der Simulationssoftware PV*SOL das Optimum zwischen Autarkiegrad und Wirtschaftlichkeit ermittelt. Hier wurde in einem iterativen Prozess die eingespeiste und durch den a-BUS genutzte Energie den Errichtungskosten der Anlage, hier PV-Anlage und Speicher, gegenübergestellt. Der Speicher wäre in diesem Fall auf zwei Drittel der Akkukapazität auszulegen. Auch wenn diese Kennzahl fallabhängig variieren kann, ist eine Übertragbarkeit der Größenordnung auf vergleichbare Projekte möglich. Die nachfolgende Abbildung erläutert das Simulationsergebnis im Detail:

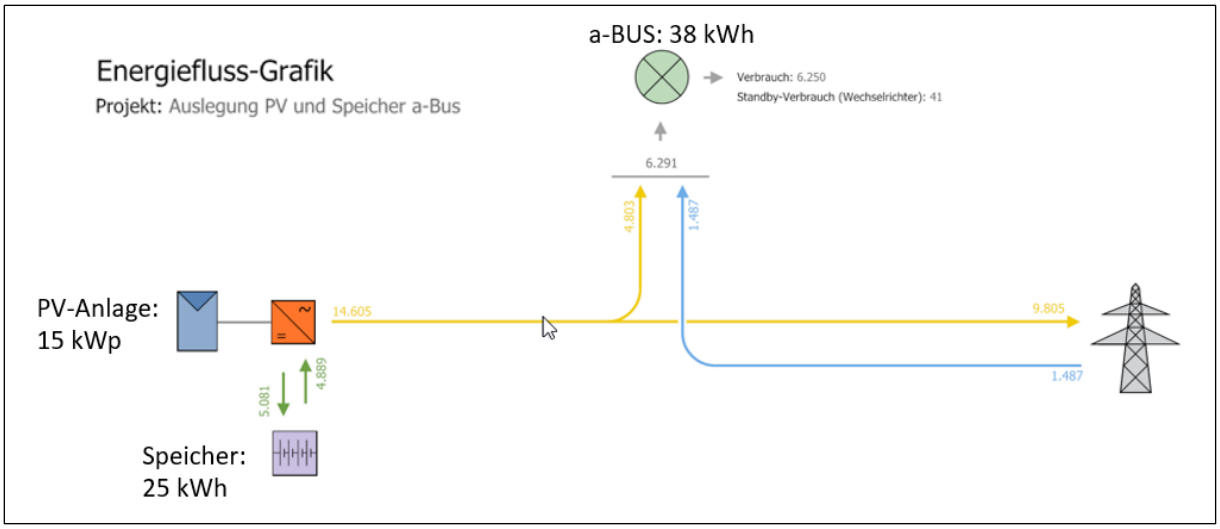


Abbildung 10: Energiefluss-Simulationsergebnis zum a-BUS mit PV-Anlage und Speicher.

Forschungsfrage 3: Anforderungsprofile an die Kommunikations-Infrastruktur (Technische Realisierung und Systemeigenschaften, Kennzahlen zur Ermittlung des Investitionsaufwandes, Grenzen der aktuellen Technologie)

3.1 Technische Realisierung und Systemeigenschaften

Ein automatisierter Fahrbetrieb von Shuttles bzw. Bussen gelingt nach dem Stand der Technik nur mit der Bereitstellung infrastruktureller Voraussetzungen wie einer hochverfügbaren Kommunikationsverbindung, da die Fahrzeuge für die Lokalisierung und die Fahrplanung / Navigation ständig Daten mit den Servern des Fahrzeuganbieters austauschen müssen. Die zum Zeitraum der Projektbearbeitung verfügbaren Fahrzeuge nutzen als Kommunikationslösung Mobilfunk nach dem Standard LTE. Ist am geplanten Einsatzort eine solche Mobilfunkverbindung nicht verfügbar oder von schlechter Verbindungsqualität, ist die Nutzung automatisiert fahrender Busse nicht möglich. Jedoch ist gerade in kleineren Städten und im ländlichen Bereich – dies ist das vornehmliche Einsatzszenario im a-BUS-Projekt – eine hochverfügbare Mobilfunkverbindung oft nicht verfügbar. Daher war ein technologischer Schwerpunkt im Projekt die Entwicklung einer robusten, drahtlosen und sicheren Kommunikationsinfrastruktur. Diese Infrastruktur vernetzt den Bus bzw. alle eingesetzten Busse mit der virtuellen Leitstelle, den Haltestellen und den Nutzern.

Wichtige Aspekte für das Kommunikationssystem sind eine hohe Verfügbarkeit, geringe Latenzen und eine möglichst hohe Bandbreite für die Datenübertragung, so dass auch optional eine Videodatenübertragung möglich ist. Geeignet für das vorgesehene Einsatzszenario sind sogenannte vermaschte Netzwerke mit dem Einsatz von Netzwerkknoten, die eine hohe Reichweite bis in den Kilometerbereich unterstützen. Durch das vermaschte Netz können die Busse auf ihrer Strecke immer sicher eine Funkgegenstelle finden und Daten drahtlos bidirektional übertragen. Zum Einsatz kommen Funkknoten, die im 2,4 GHz- und 5 GHz-Band arbeiten. Um die Zuverlässigkeit und damit auch die Ausfallsicherheit des Kommunikationssystems weiter zu erhöhen, wurde eine weitere redundante Funktechnik eingesetzt, die im Sub-1-GHz-Bereich arbeitet. Der Einsatz ist als Fallback-Option gedacht. Diese Funktechnik kommt mit weniger Netzwerkknoten aus, unterstützt jedoch auch nur eine geringere Bandbreite. Wird ein Problem bei der standardmäßig genutzten Funkkommunikation erkannt, erfolgt automatisch die Nutzung des Ersatznetzwerkes, sodass betriebsrelevante Daten immer noch übertragen werden können. In den folgenden Abschnitten werden die beiden entwickelten Funksysteme beschrieben.

3.1.1 Hauptkommunikationssystem auf WLAN-Basis

Das Hauptkommunikationssystem besteht aus WLAN-Knoten, die ein vermaschtes Netzwerk bilden können, um entlang einer längeren Strecke und in der Fläche ein Netzwerk flexibel aufzuspannen. Als Ergebnis einer Technologierecherche wurden Netzwerkkomponenten des Unternehmens SilverNet für den Netzwerkaufbau ausgesucht, da die technischen Daten gut mit dem Anforderungsprofil wie u.a. große Reichweite und hoher Datendurchsatz übereinstimmen und auch Einsatzszenarien im städtischen Bereich laut Anbieter vorgesehen sind. Abbildung 11 zeigt ein beispielhaftes Vernetzungsszenario von SilverNet-Komponenten.

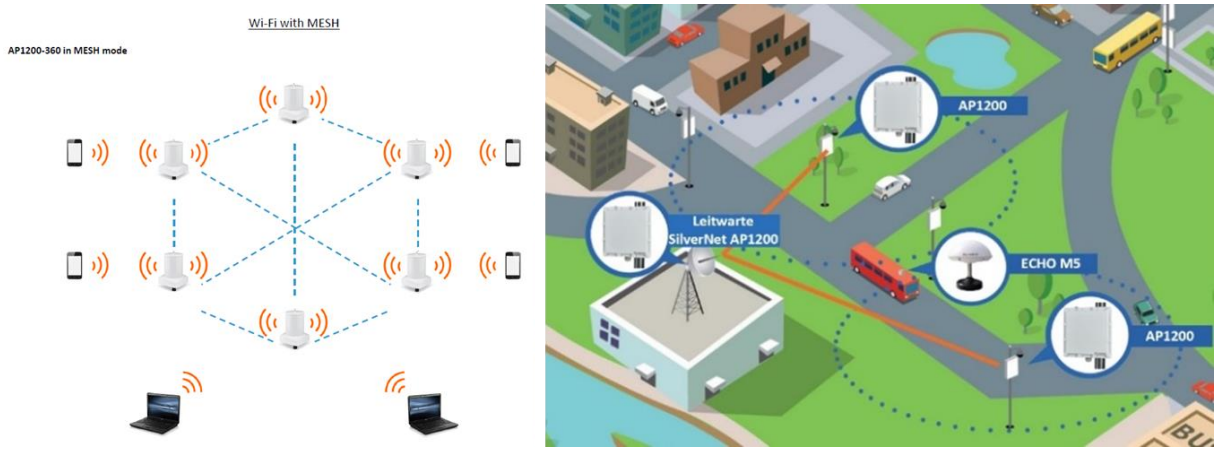


Abbildung 11: Anwendungsszenario von WLAN bzw. Wi-Fi-Mesh des Anbieters SilverNet.

Als Infrastrukturknoten werden die Module SilverNet AP1200 eingesetzt. Diese unterstützen als sogenannte „Dual band Access Points" Datenraten von bis zu 500 Mbps bei Nutzung des 5 GHz-Bandes und bis zu 240 Mbps bei 2.4 GHz. Als mobile Knoten werden die „Echo M5"-Module eingesetzt, die mit 360°-Rundantenne auch auf den Bussen als Teil der Kommunikationsbox genutzt werden.

Im Rahmen der Performanzanalyse wurden u.a. Reichweiten- und Durchsatztests gemacht. Innerhalb des SilverNet-Netzwerkes über die Infrastrukturknoten konnte regelmäßig ein Datendurchsatz von 400…500 Mbit/s erzielt werden. Neben reinen Durchsatzmessungen mittels Testpaketen wurde auch die Videodatenübertragung im Praxistest erprobt. Dafür wurden über mehrere Knoten Videodaten in Full-HD-Auflösung von einem fahrenden Roboter zu einer Leitstelle übertragen. Dabei wurde die Framerate ausgewertet sowie untersucht, ob es zu Unterbrechungen beim Videodatenstrom beim Wechsel des Access-Points kommt. Diese Wechsel konnten ohne auffällige Verzögerungszeit bei der Videodatenübertragung durchgeführt werden. Die dabei erzielte Framerate lag stets

zwischen 24 und 25 Frames/s. Abbildung 12 zeigt das Experiment mit der Videodatenübertragung von fahrenden Robotern.

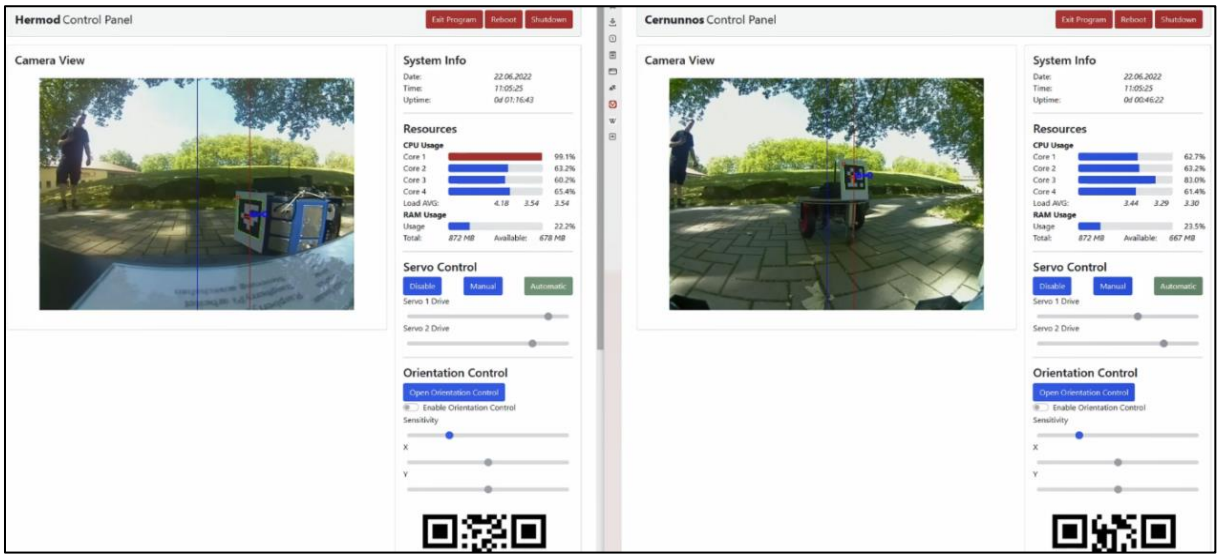
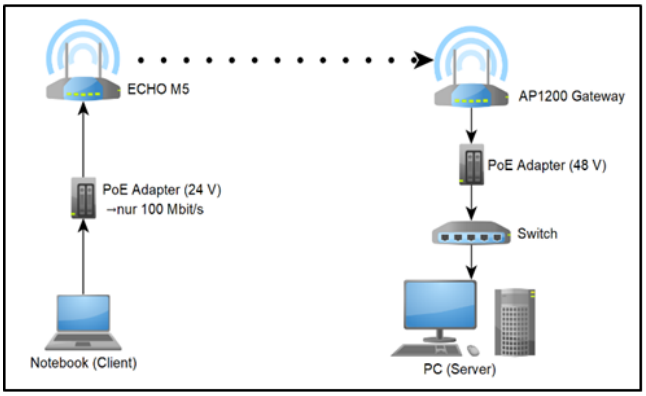


Abbildung 12: Experiment zur Videodatenübertragung über das WLAN-Mesh.

Zur Anbindung der Busse an das WLAN-Mesh wurden die Module „Echo M5“ von SilverNet eingesetzt, da die Antennen eine 360°-Abstrahlcharakteristik haben. Der Anschluss dieser Module erfolgt lokal über einen PoE-Adapter, so dass damit auch die Energieversorgung realisiert wird. Da dieser Adapter nur eine Datenrate von nominell 100 Mbit/s unterstützt, wird nicht die volle Datenrate des WLAN-Mesh genutzt. Dies stellt jedoch für die Anwendung im Projekt keine Einschränkung dar, da die erzielbare Datenrate für die Anwendung im Projekt inklusive Videoübertragung völlig ausreichend ist. Abbildung 13 zeigt die Einbindung der Echo-M5-Module in das Netzwerk und die in Experimenten erzielte Datenrate.



Nr.	Verbindung	Entfernung	durchschn. Datenrate
1	ECHO M5 → Gateway	0 m	94 Mbit/s
2	ECHO M5 → Gateway	200 m	94 Mbit/s
3	ECHO M5 → Gateway	400 m	60 Mbit/s
4	ECHO M5 → Gateway	600 m	12 Mbit/s
5	ECHO M5 → Gateway	750 m	39 Mbit/s
6	ECHO M5 → Gateway	850 m	5 Mbit/s

Abbildung 13: Kommunikation der „Echo M5“-Module mit dem WLAN -Mesh.

Bei Distanzen von bis zu 200 m konnte mit 94 Mbit/s immer die nahezu optimale Datenrate (100 Mbit/s) bei der Kommunikation zwischen Bus und Infrastrukturnetzwerk erzielt werden. Bei größeren Entfernungen nimmt die erreichbare Datenrate ab. Dieses Ergebnis wurde für

die Planung der Platzierung der Netzwerkknoten entlang der Strecke entsprechend berücksichtigt, siehe Gliederungspunkt 3.1.3.

3.1.2 Backup-Kommunikationssystem im Sub-1-GHz-Band

Für die Realisierung eines robusten Kommunikationssystems wurde das WLAN-System von SilverNet ergänzt um ein Backup-Kommunikationssystem, welches automatisch zum Einsatz kommt, wenn das Hauptsystem ausfallen sollte. Für den Fall, dass dort Störungen auftreten, übernimmt das Backup-Kommunikationssystems wichtige Basisfunktionen in der Funkkommunikation. Für den Aufbau des Backup-Systems wurden die Module „SX 868 RF“ von XBee ausgewählt. Durch die Nutzung des Sub-1-GHz-Bandes bei 868 MHz ergeben sich sehr gute Kommunikationseigenschaften wie geringe Dämpfung durch Hindernisse und große Reichweite. Auch wird eine Mesh-Topologie unterstützt, so dass bei entsprechender Platzierung der Knoten in der Umgebung der Ausfall einzelner Knoten kompensiert werden kann. Laut Hersteller sind abhängig von gewählter Modulationsart bis zu 80 kbit/s Datendurchsatz bei einer Entfernung von bis zu 14,5 km mit einer entsprechenden Antenne erreichbar, wobei der Optimierungsfokus gegensätzlich entweder auf Reichweite oder auf Durchsatz liegt. Messungen auf freiem Feld haben einen Datendurchsatz von bis zu 23,7 kbit/s bei einer Reichweite von gut 2 km ergeben. Messungen mit Hindernissen wie Autos und Gebäude wurden zunächst auf dem Hochschulcampus durchgeführt. Dabei ergab sich nur eine geringe Durchsatzreduzierung bei geringen Entfernungen der Knoten (21,9 kbit/s bei 250 m Non-Line-of-Sight). Bei einer größeren Entfernung von 1,5 km mit Hindernis ist die Datenrate auf 4,1 kbit/s heruntergegangen. Daher wurde als Entwurfsrandbedingung ein Knotenabstand von kleiner 250 m gewählt.

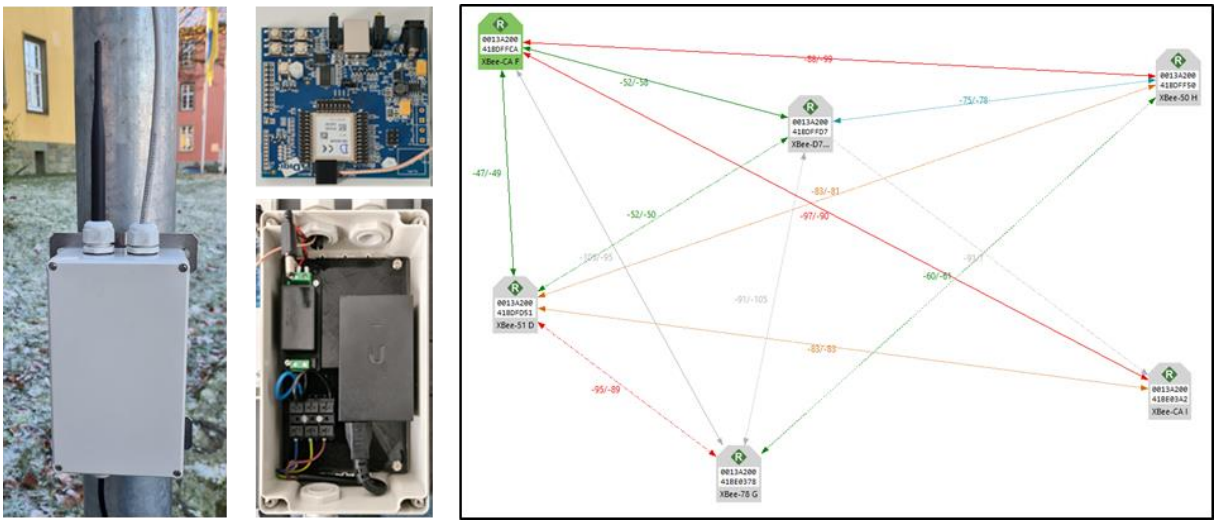


Abbildung 14: Realisiertes Funkmodul für die Mast-Montage und beispielhafte Mesh-Topologie.

Abbildung 14 zeigt einen aufgebauten Kommunikationsknoten mit Stromversorgung sowie ein typisches vermaschtes Netzwerk mit den SX 868 RF Modulen.

3.1.3 Knoteninstallation entlang der Strecke

Basierend auf den Ergebnissen der Performanztests der beiden Funksysteme wurden Knotenpositionen entlang der Strecke in Absprache mit den Stadtwerken ausgewählt. Zum einen wurde die Knotenposition so gewählt, dass in der Regel immer eine Sichtverbindung zwischen Bus und Infrastrukturknoten möglich ist. Zum anderen musste an der Knotenposition eine Energieversorgung zur Verfügung stehen, um die Funkknoten versorgen zu können. Abbildung 15 zeigt einen Kartenausschnitt zwischen Campus und Stadtbahnhof Iserlohn mit Festlegung der Installationsmasten.

Abbildung 15: Montierter Mast mit Funkmodul bei der Einrichtung

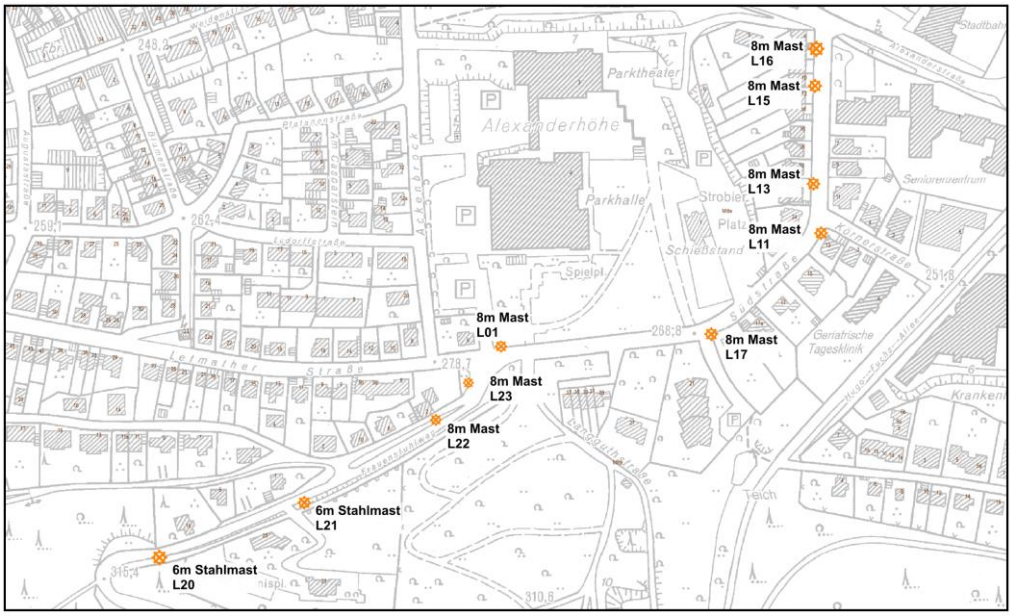


Abbildung 16: Positionierung der Funkmasten entlang der Bus-Strecke.

Die Funkknoten sind vandalismussicher in einigen Metern Höhe montiert, siehe Abbildung 15 rechts.

3.1.4 Kommunikationsinfrastruktur und angebundene Systemkomponenten

Die in den Gliederungspunkt 3.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Haupt- und Backup-Netzwerkkomponenten bilden den wesentlichen Teil der gesamten drahtlosen Kommunikationsinfrastruktur. Angebunden sind die Busse als mobile Teilnehmer, die Leitwarte zur Systemüberwachung, die Informationsterminals an den Endhaltestellen Campus und Stadtbahnhof sowie die Smartphones von Bus-Operatoren und Bus-Nutzern zur Anforderung eines Fahrzeugs im On-Demand-Betrieb. Abbildung 17 zeigt die beschriebenen Systemkomponenten. Die Datenhaltung erfolgt für den konsistenten Datenaustausch in einer Cloud-basierten Firebase-Datenbank. Bei der Firebase-Datenbank handelt es sich um eine Echtzeitdatenbank, welche durch ihre geringe Latenz eine schnelle und reibungslose Kommunikation zwischen den Endsystemen sicherstellt.

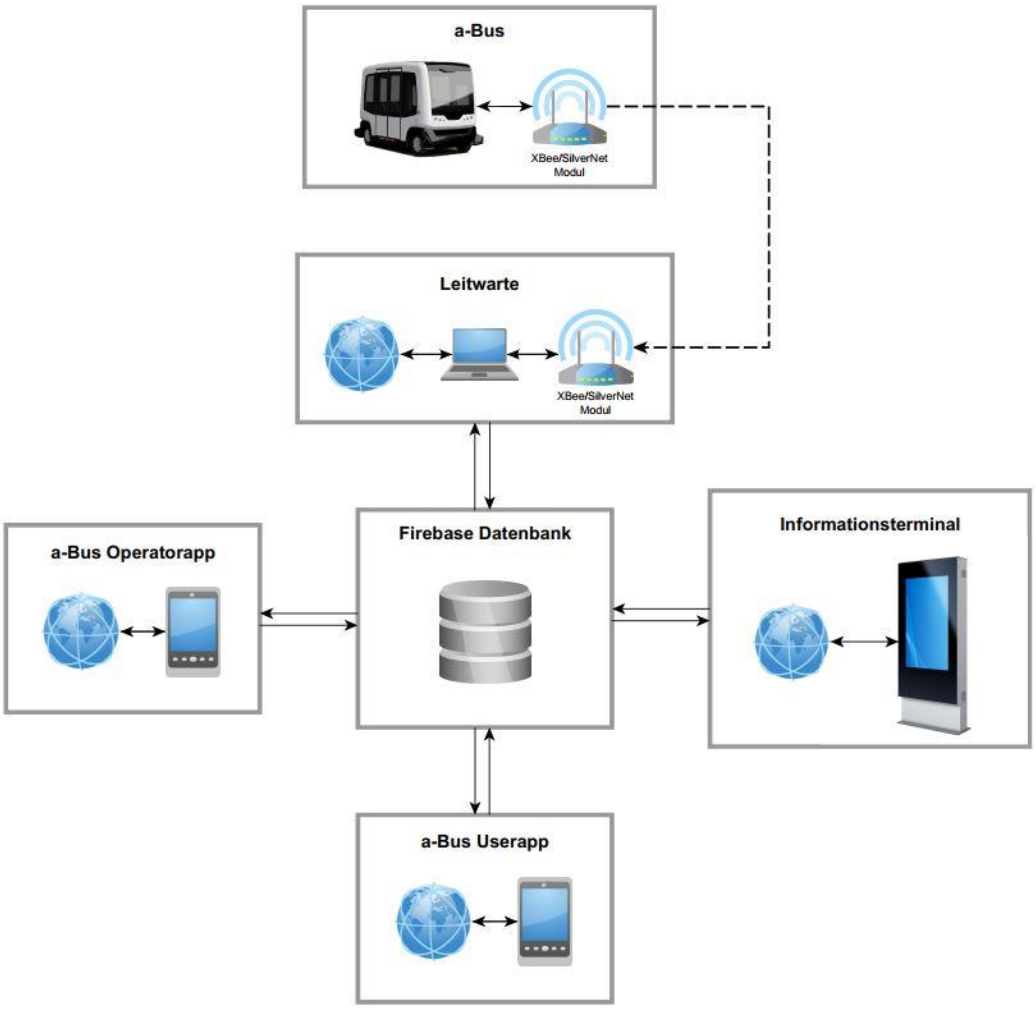
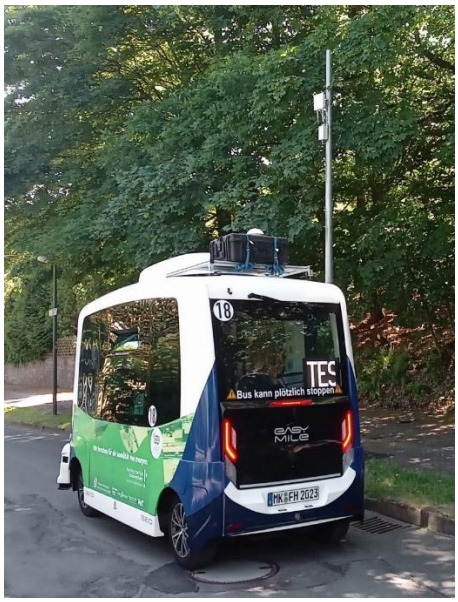


Abbildung 17: Systemkomponenten und Datenaustausch mit zentraler Datenhaltung.

Ein Bus ist nach Abbildung 17 über das Mesh-Kommunikationssystem an die Leitwarte angebunden. In der Regel erfolgt dabei die Kommunikation über das Hauptnetzwerk (SilverNet). Wird ein Ausfall dieses Netzwerkes detektiert, wird automatisiert auf das Backupnetzwerk (Xbee) umgeschaltet. Die Netzwerküberwachung sowie die Aufnahme von Fahrzeugdaten erfolgt über eine Funk-Dachbox, die auf dem Bus montiert ist, siehe Abbildung 18. Hauptkomponente der Dachbox ist ein Industrie-PC, der die Netzwerküberwachung übernimmt und die Kommunikation steuert, d.h. im Fehlerfall auf das zuvor beschriebene Backupnetzwerk umschaltet. Zudem werden über den PC lokale Zustandsdaten und die Position erfasst und mit an die Leitwarte für die Fernüberwachung übertragen. Damit für die Montage der Dachbox kein Eingriff in das elektrische Energieversorgungssystem erfolgen muss, wird die Box autark über einen lokalen Akkumulator versorgt, der die Box tagsüber mit Energie versorgt.



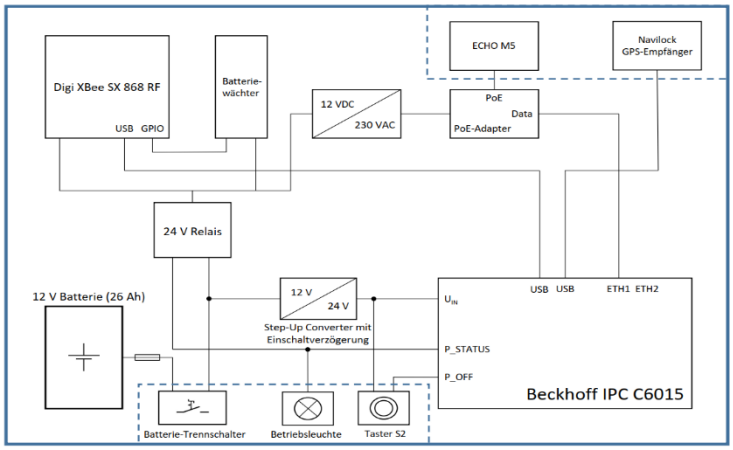


Abbildung 18: a-BUS mit montierter Funk-Dachbox zur Einbindung in das Kommunikationssystem (links) sowie Blockschaltbild der Dachbox (rechts).

3.2 Kennzahlen zum Investitionsaufwand für das Kommunikationssystem

Hauptbestandteil des Kommunikationssystems sind die Infrastruktur-Netzwerkknoten entlang der Bus-Fahrstrecke. Bei der Analyse des Hauptkommunikationssystems hat sich als Empfehlung ergeben, dass etwa alle 250 m ein Funkmodul installiert werden sollte. Zudem sollte an Knickstellen bzw. Kurven ein Knoten aufgebaut werden. Im Projekt wurde die Module von SilverNet zu Nettokosten von etwa 1000 € pro Stück erworben. Bei längeren Strecken und entsprechend höherer Stückzahl sollten sich Rabatte ergeben. Zudem ist auch jedes Fahrzeug mit Netzwerkknoten auszustatten und ein Industrie-PC für die Netzwerkanbindung vorzusehen. Dabei sind für den Netzwerkknoten ebenfalls etwa 1000 € anzusetzen sowie für den PC etwa 1500 €. Die Kosten für die Leitwarte werden hier nicht extra aufgeführt, da bei ÖPNV-Anbietern oft entsprechende Rechner-Technik vorhanden ist. Ist für einen Testbetrieb eine (einfache) Leitwarte erforderlich, sind 1000 € für die Funktechnik und etwa 2000 € für die PC-Ausstattung erforderlich. Sollen Infoterminals wie im vorliegenden Projekt genutzt werden, entstehen pro Terminal Kosten von etwa 25.000 € (inklusive Funkmodul). Für die Funkmodulkonfiguration und Netzwerkeinrichtung wird von Kosten von 100 € pro Modul ausgegangen. Wartung- und Energiekosten sowie Kosten für den Betrieb der Cloud zur Datenhaltung sind projektspezifisch zu ermitteln. Bezogen auf das a-BUS-Projekt ergeben sich nachfolgend aufgeführte Investitionskosten für das Kommunikationssystem.

Parameter:

$n_{Funk,WLAN} = 6$	Anzahl der WLAN-Funkknoten (SilverNet)
$n_{Funk,XBee} = 6$	Anzahl der Sub-1GHz--Funkknoten (XBee)
$n_{Bus} = 2$	Anzahl der automatisiert fahrenden Busse
$n_{Infoterm} = 2$	Anzahl der Infoterminals (Haltestellen-Anzeigesystem)
$n_{Leit} = 1$	Leitwarte ja (=1), nein (=0)
$k_{Funk,WLAN} = 1.000€$	Kosten pro WLAN-Funkknoten (SilverNet)
$k_{Funk,XBee} = 50€$	Kosten pro Sub-1GHz--Funkknoten (XBee)
$k_{Bus} = 2.500€$	Kosten für Funkmodul und PC pro Bus
$k_{Infoterm} = 25.000€$	Kosten pro Infoterminal (inkl. Funktechnik)
$k_{Leit} = 3.000€$	Kosten für Leitwarte (nur Funkmodul und ein PC)
$k_{Einr} = 100€$	Kosten für Netzwerkknoteneinrichtung

Damit ergeben sich die Investitionskosten $K_{Kommunikationssystem}$ für das Kommunikationssystem zu

$$\begin{aligned} K_{Kommunikationssystem} &= n_{Funk,WLAN} * k_{Funk,WLAN} + \\ &\quad n_{Funk,XBee} * k_{Funk,XBee} + \\ &\quad n_{Bus} * k_{Bus} + \\ &\quad n_{Infoterm} * k_{Infoterm} + \\ &\quad n_{Leit} * k_{Leit} + \\ &\quad (n_{Funk,XBee} + n_{Funk,WLAN} + n_{Bus} + n_{Infoterm} + n_{Leit}) * k_{Einr} \\ &= 6 \cdot 1.000€ + 6 \cdot 50€ + 2 \cdot 2.500€ + 2 \cdot 25.000€ + \\ &\quad 1 \cdot 3.000€ + (6 + 6 + 2 + 2 + 1) \cdot 100€ \\ &= 66.000€ . \end{aligned}$$

Zu beachten ist, dass bis auf die Kosten für die Knotenkonfiguration keine Software-Entwicklungskosten in der Berechnung enthalten sind. Weitere Entwicklungskosten, die Projektspezifisch anfallen, sind die Kosten für die Leitstelle, den On-Demand-Betrieb, die Anzeige auf den Infotainment-Terminals, die Cloud-Datenbank sowie die Apps für Nutzer und Operator. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einer größeren Verbreitung der Mesh-Funktechnik für den städtischen Einsatz die Hardwarekosten ggf. noch geringer sind. Zu beachten sind aber hier die im folgenden Abschnitt aufgezeigten Grenzen der Technologie.

3.3 Grenzen der aktuellen Technologie (WLAN-Mesh)

Die im Projekt genutzten Shuttles benötigen eine stabile Mobilfunkverbindung, um kontinuierlich Daten mit den Servern der Fahrzeughersteller auszutauschen. Das Einsatzszenario im Projekt sieht die Nutzung automatisiert fahrender Busse in Mittelzentren und im ländlichen Raum vor. Da in diesen Umgebungen nicht immer eine stabile breitbandige Mobilfunkabdeckung gegeben ist, wurde untersucht wie und mit welchem Aufwand eine robuste Kommunikationsinfrastruktur aufgebaut werden kann. Zum Zeitpunkt der Projektdefinition im Jahr 2019 erschienen auf WLAN-Mesh basierte Kommunikationssysteme als aussichtreiche Technologien. Es gibt WLAN-Mesh-Lösungen wie das im Projekt genutzte System von SilverNet. Aber leider hat sich kein herstellerübergreifender WLAN-Mesh-Standard entwickelt, so dass aktuell auf dem Markt befindliche Systeme von unterschiedlichen Herstellern in der Regel nicht kompatibel sind.

Als Teil des WLAN-Standards wurde bereits 2010 der Standard IEEE 802.11p spezifiziert, der die Vernetzung von Fahrzeugen zum Ziel hat. Realisiert werden sollte damit eine Kommunikationslösung für sogenannte intelligente Verkehrssysteme (engl. ITS – Intelligent Transport Systems) mit Reichweiten von einigen 100 Metern. Bei dem System fehlt jedoch eine übergeordnete Kommunikationsinfrastruktur, um beispielsweise Leitstellen anzubinden, so dass die WLAN-Systeme um eine passende Infrastruktur ergänzt werden müssen, was die Systemkomplexität erhöht und die Kosten steigert. Aufgrund der genannten Nachteile und aktueller Weiterentwicklungen (und Ausbau) des Mobilfunkstandards 5G scheint der Mobilfunk-Standard Cellular V2X (C-V2X) ein aussichtreicher Kandidat für die zukünftige verbreitete Vernetzung von Fahrzeugen. Abbildung 19 zeigt typische Netzwerkteilnehmer bei der C-V2X-Kommunikation, die lokal um weitere Technologien wie NB-IoT ergänzt werden können.

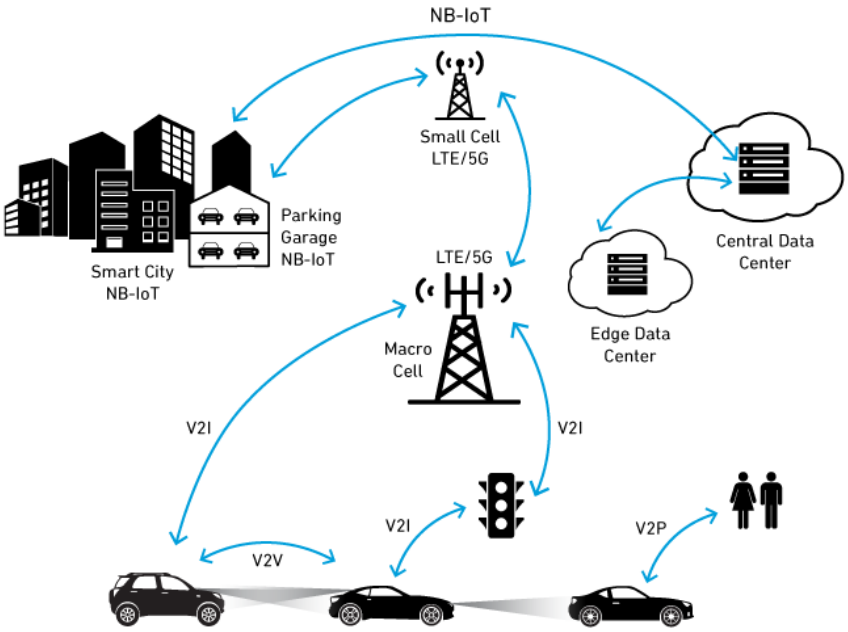


Abbildung 19: Vernetzungsszenario bei der C-V2X- Kommunikation im Verkehrsbereich (Quelle: www.qorvo.com).

Die zelluläre Lösung C-V2X ist mobilfunkbasiert und kann im älteren LTE-Netz sowie im Nachfolgenetz 5G genutzt werden. Vorteil gegenüber WLANp sind die höhere Reichweite, die zellenübergreifende Kommunikationsinfrastruktur und bei 5G insbesondere die kurzen Latenzen. Mit zunehmender Verbreitung der 5G-Mobilfunknetze wird perspektivisch auch die breite Vernetzung im Verkehrsraum (V2X – Vehicle to Everything) mit der Funktechnik umgesetzt werden. Bevor 5G flächendeckend im ländlichen Raum zur Verfügung steht, können für räumlich begrenzte Mobilitätsprojekte 5G-Inselnetze, sogenannte Campusnetze, eingerichtet werden. Dabei wird ein eigenständiges 5G-Netz zum Testen individueller Anwendungsfälle installiert und Komponenten im Projekt können von den Vorteilen von 5G profitieren. Die Ergebnisse lassen sich später weitgehend auf die Systemnutzung in öffentlichen 5G-Netzen übertragen.

Forschungsfrage 4: Anforderungsprofile für eine digitale Betriebsführung (Klassischer Leitstellen-Betrieb im ÖPNV, Anbindung automatisiert fahrender Fahrzeuge, Benutzerinformationssystem)

4.1 Einleitung: Aufgaben und Anforderungen eines Leitsystems (allgemein)

Stand der Technik bei den Verkehrsunternehmen ist ein rechnergesteuertes Betriebsleitsystem (ITCS) für den Betrieb von Bussen, Straßenbahnen und auch U-Bahnen. Im Rahmen der Beantwortung dieser Forschungsfrage werden Leitsysteme aus zwei Sichtweisen betrachtet. Dies ist zum einen die Einbindung automatisiert fahrender Fahrzeuge in bestehende Systeme von typischen ÖPNV-Anbietern mit den neuen Aufgaben und Anforderungen, die sich durch den Betrieb dieser Fahrzeuge ergeben, siehe Abschnitte 4.1 bis 4.3. Die andere Sichtweise behandelt die Fahrzeug- und Systemüberwachung des im Projekt entwickelten Kommunikationssystems mit Anbindung der Busse und der Infotainmentsysteme inklusive der für den On-Demand-Betrieb entwickelten Nutzer- und Operator-Apps, siehe Abschnitt 4.4.

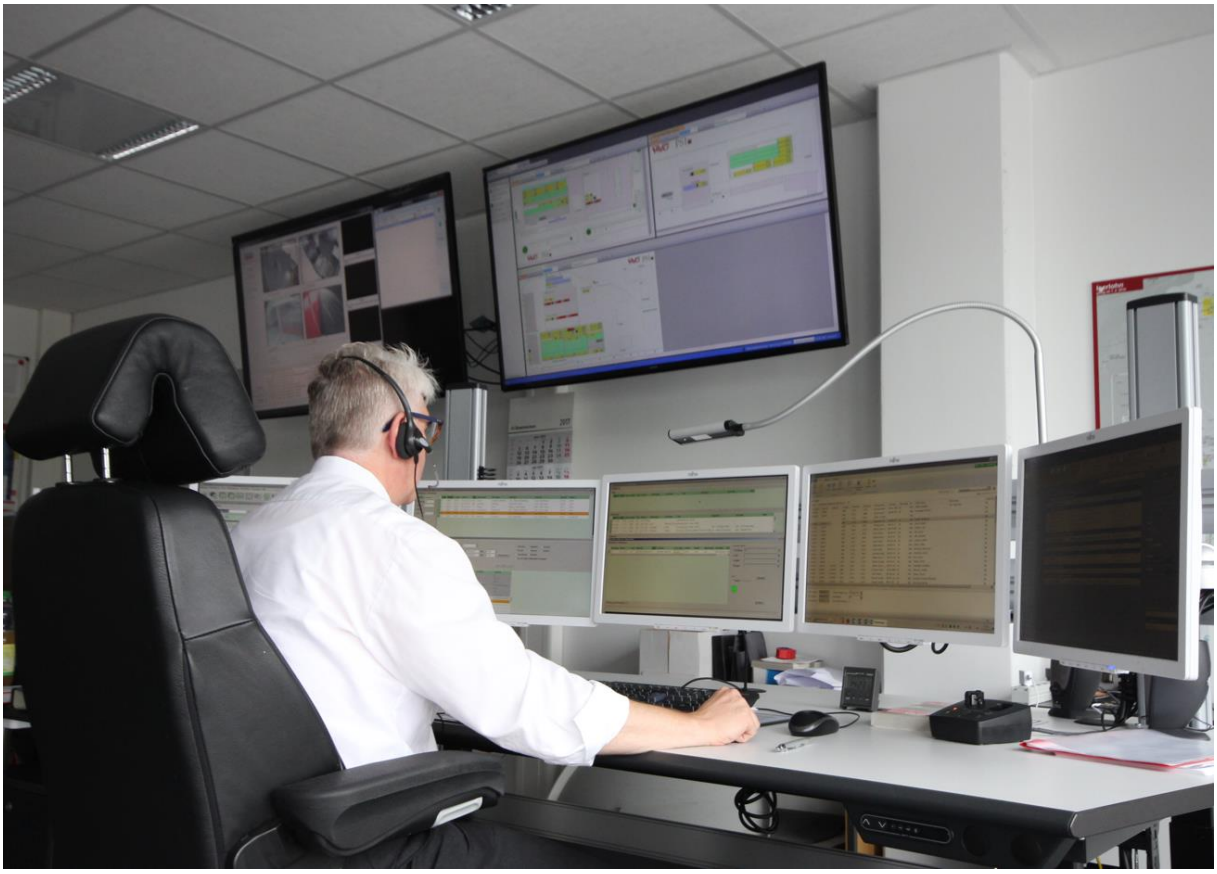


Abbildung 20: Leitstelle der Märkischen Verkehrsgesellschaft MVG.

Mit einem klassischen Betriebsleitsystem wird der Betrieb der verschiedenen Fahrzeuge gesteuert und überwacht. Zu den Aufgaben des Leitsystems gehört auch die Ansteuerung und Aktualisierung der Abfahrtsmonitore an den Haltestellen. Die Positionen der Fahrzeuge können in Echtzeit überwacht werden, Verspätungen werden angezeigt und Störungen lassen sich schnell erkennen, um darauf zielgerichtet reagieren zu können, indem z.B. Umleitungspläne aktiviert werden.

4.2 Technische Details des Leitsystems der MVG

Die Märkische Verkehrsgesellschaft MVG nutzt als Leitsystem „MOBILE-ITCS“ des Herstellers INIT. Für den Betrieb des Hintergrundsystems sind acht Server erforderlich. Basierend auf Windows Server 2012 R2 und Versant Datenbanken stellt das System die nötigen Prozesse für die Anwendungs-Applikationen zur Verfügung. Folgende Funktionen werden zusätzlich zu den dispositiven Maßnahmen und Überwachungsfunktionen des ITCS realisiert: Zentrale Datenhaltung, GIS-Server sowie Depotdatenversorgung, Schnittstelle zum Fahr- und Dienstplanprogramm, Funkgesprächsserver (SIP), Hintergrundsystem für die mobile Leitstellensoftware MOBILEmodi und die statistische Auswertung der Betriebsabläufe via MOBILEstatistics.

In der Betriebsstelle in Lüdenscheid stehen drei Leitstellenarbeitsplätze zur Verfügung, die zur Koordinierung des ÖPNV genutzt werden. Die Verkehrsmeister nutzen vier mobile Leitstellenarbeitsplätze über Android-Tablets (MOBILEmodi) im Außendienst.

An die MVG Leitstelle sind ca. 300 Fahrzeuge angebunden. Die Datenversorgung aller Fahrzeuge erfolgt in einem Hybridbetrieb aus WLAN und Mobilfunk (4G). In Zusammenarbeit mit dem Aufgabenträger sowie den Kommunen des Kreises wird ein dynamisches Fahrgastinformationssystem an 46 ausgewählten Haltestellen betrieben.

Die Märkische Verkehrsgesellschaft ist an die Datendrehscheibe des VRR angebunden. Diese ermöglicht die Bereitstellung der Ist-Abfahrtszeiten in elektronischen Fahrplanauskünften oder in Mobilitäts-Apps. Zusätzlich können Abfahrtzeiten angrenzender Verkehrsbetriebe auf den DFI’s dargestellt werden, sofern die Leitstellen angrenzender Verkehrsunternehmen dies unterstützen.

4.3 Funktionen der Fahrzeughersteller-Software

Der Fahrzeughersteller EasyMile bietet mit „EZ Maestro“ eine eigene Flottenmanagement-Software für seine Fahrzeuge an, bei der neben den klassischen Funktionen einer Leitstellen-Software weitere speziell für den autonomen Betrieb entwickelte Funktionen

angeboten werden. Die browserbasierte Software beinhaltet ein Echtzeit-Kontrollzentrum zur Überwachung von Fahrzeugen, eine Zuordnung von Routen (Missionen) an die Fahrzeuge und Datenanalysetools zur Analyse und Berichterstattung über die Flottenleistung. Informationen zur Geschwindigkeit, der Route (Mission), der aktuell angefahrenen Haltestelle und dem Batteriestatus werden in Echtzeit aufgeführt. Über eine Gegensprachanlage und eine Kamera innerhalb des Fahrzeugs kann mit Fahrgästen kommuniziert werden. Über entsprechende Bedienelemente kann die Heizung und Klimaanlage, sowie der Scheibenwischer, die Hupe und die Lichter aktiviert werden. Bei Gefahrensituationen besteht die Möglichkeit, einen Not-Stopp des Fahrzeugs auszulösen. Die am Fahrzeug vorne und hinten angebrachten Kameras ermöglichen die Überwachung der Umgebung des Fahrzeugs.

Abbildung 21: Kamera zur Überwachung der Fahrzeugumgebung.

Da eine Integration in die bestehende Leitstellenarchitektur nicht ohne weiteren Aufwand möglich war, hat im Rahmen dieses Projekts ein Prallelbetrieb stattgefunden. Langfristig erweist sich eine Schnittstelle zwischen den beiden Leitsystemen als präferierte Lösung.

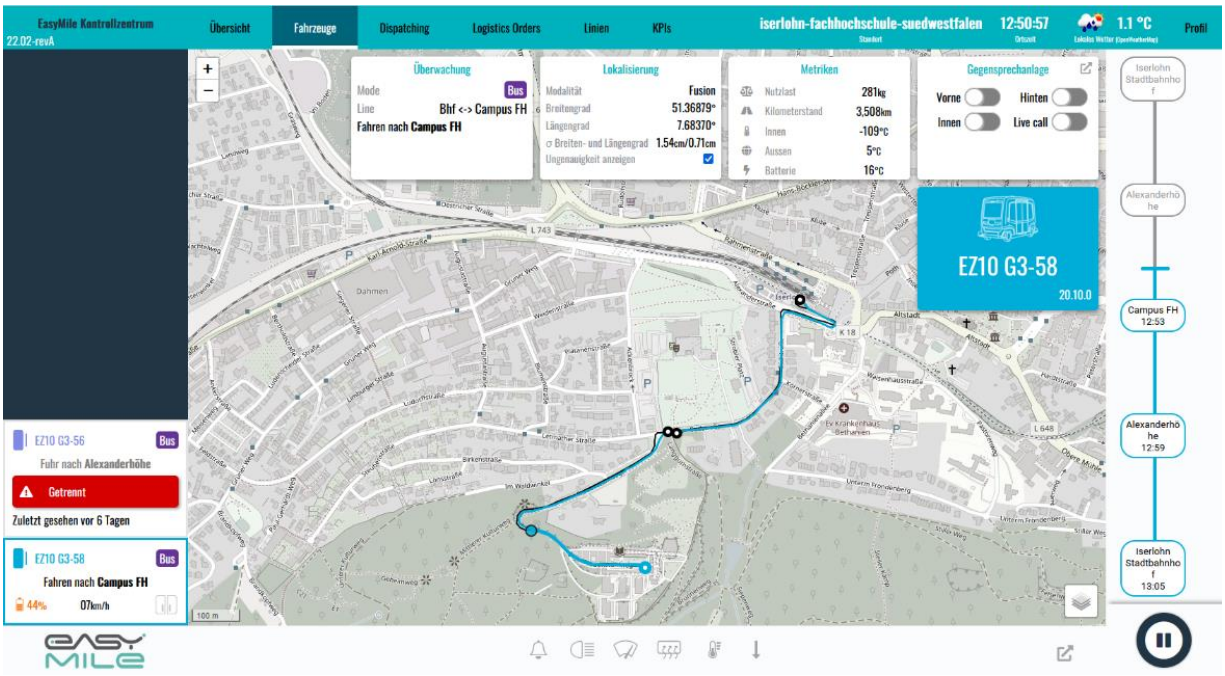


Abbildung 22: Ansicht der Flottenmanagement-Software „EZ Maestro“.

4.4 a-BUS-Benutzerinformationssystem

Für die Realisierung des On-Demand-Betriebes der Busse und die Bereitstellung von Informationen für Nutzer zu Verfügbarkeit, Ankunft, etc. der Fahrzeuge wurde ein Benutzerinformationssystem entwickelt, welches die aufgebaute Kommunikationsinfrastruktur nutzt, siehe Kapitel 3. Wesentliche Komponenten aus Nutzersicht sind die Benutzerinformationsanzeigen, d.h. die Infotainmentsysteme an den Endhaltestellen Campus und Stadtbahnhof. Zudem kann der Nutzer die an den Infotainmentsystemen dargestellten Inhalte auch mit einem Smartphone mittels Nutzer-App abrufen.

4.4.1 Infotainmentsysteme an den Haltestellen

An den Endhaltestellen wird jeweils ein Outdoor-Monitorsystem mit 55″-Touch-Bildschirm eingesetzt. Die Darstellung der Inhalte erfolgt mittels des Xibo Digital Signage Systems und einem lokalen Server, welcher für die Synchronisation von Informationen mit der Datenbank zuständig ist. Das Xibo System kombiniert das einfache Erstellen von digitalen Inhalten für Bildschirme und das Verwalten von mehreren digitalen Anzeigetafeln. Abbildung 23 zeigt die am Campus aufgestellte Stele.

Abbildung 23: Am Campus aufgestelltes Infotainmentsystem mit ausgewählten Anzeigeseiten.

Die auf der Stele angezeigten Inhalte bestehen aus fünf Seiten, die zeitgesteuert durchlaufen werden. Alternativ kann ein Nutzer über Touch-Navigationsflächen zwischen den Seiten wechseln. Einige Seiten zeigen Informationen zum a-BUS-Projekt. Auf einer Seite wird die Fahrstrecke der Busse dargestellt sowie der Einsatzstatus beider Busse inklusive derer Position. Sofern vom Operator aktiviert, wird die Busauslastung angegeben. Für die konsistente echtzeitnahe Darstellung werden die Buszustandsdaten aus der Cloud-Datenbank abgerufen, siehe Abbildung 17 im Gliederungspunkt 3.1.4. Im unteren Bereich der Anzeige ist mittig ausgerichtet ein „On Demand“-Touch-Feld. Hierüber kann ein Fahrgast einen Bus zur jeweiligen Haltestelle anfordern. Zeitgleich wird die Anfrage in der Datenbank mit Standort und Zeitstempel hinterlegt. Da der On-Demand-Betrieb durch die verpflichtende Einsetzung eines Operators im Bus noch nicht vollständig automatisiert werden kann, muss der Operator die Bus-Anforderung aktuell händisch über eine Operator-App mittels Smartphone bestätigen. Zudem kann ein Nutzer neben der Verwendung der Stele eine Bus-Anfrage über die Nutzer-App anfordern. Kann der Operator eine Bus-Anfrage positiv bestätigen, bekommt der Fahrgast dies an der Stele bzw. in der App angezeigt. Die detaillierten Funktionen werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.4.2 Operator-App und Nutzer-App für den On-Demand-Betrieb

Der On-Demand-Betrieb wird über den Bus-Operator in der Operator-App aktiviert. Hierzu wird in der App zunächst der jeweilige Bus ausgewählt, wie es in Abbildung 24 (links) zu sehen ist. Sobald die Auswahl bestätigt wurde, beginnt die App mit der Übertragung der GPS-Koordinaten an die Firebase-Datenbank. Zusätzlich wird ein entsprechender Zeitstempel hinterlegt. Neben den automatisch gespeicherten GPS-Koordinaten kann der Operator die Anzahl der Fahrgäste eintragen, siehe Abbildung 24 (mitte-links). Diese Information wird ebenfalls mit einem Zeitstempel in der Datenbank gespeichert.

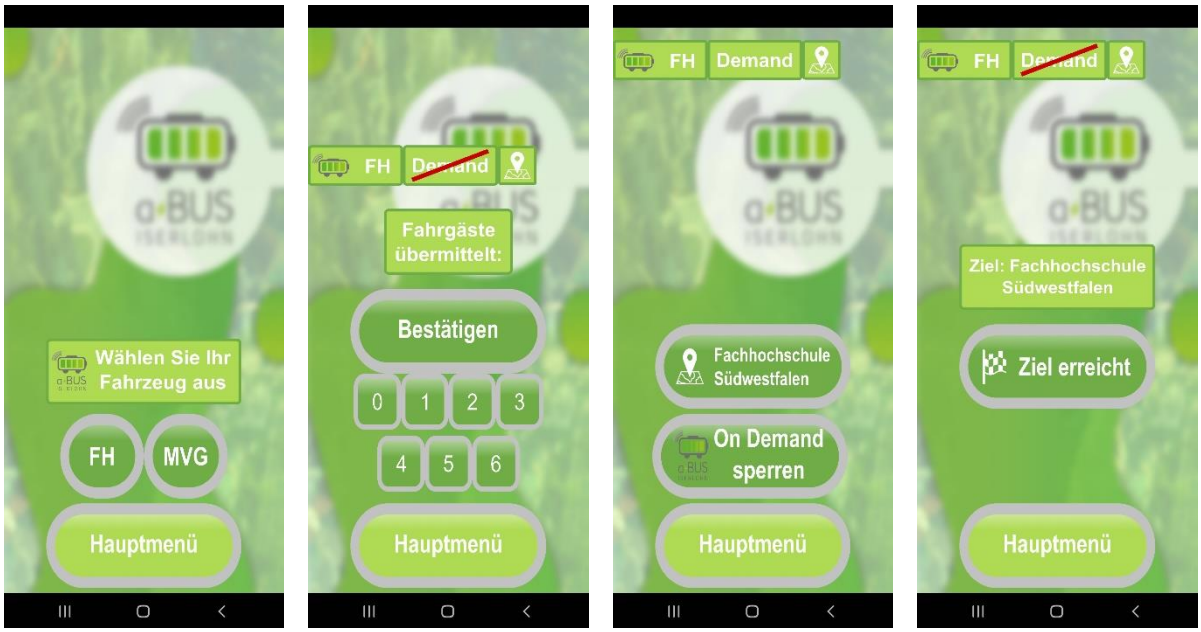


Abbildung 24: Screenshots der Operator-App: Auswahl des Fahrzeugs (links). Übertragung der Fahrgastanzahl (mitte-links). Freigegebener OnDemand-Betrieb mit Anfrage die Fachhochschule anzufahren (mitte-rechts). Bei angenommener Anfrage, die Schaltfläche, dass das Ziel erreicht wurde (rechts).

Der On-Demand-Betrieb kann von jedem Operator separat freigegeben werden. Ist er freigegeben, kann der Fahrgast eine entsprechende Bus-Anfrage stellen und diese wird dann wie in Abbildung 24 (mitte-rechts) für den Operator dargestellt. Kann der Operator die Anfrage annehmen, bestätigt dieser den entsprechenden Button. Anschließend ändert sich die Oberfläche zu dem in Abbildung 24 (rechts) dargestellten Bild. Hier wird das ausgewählte Ziel angezeigt und ein Button zur Bestätigung, dass das Ziel erreicht wurde. Wenn der Operator das vom Fahrgast gewünschte Ziel anfährt, wird der Fahrgast (Nutzer) über die App oder Stele benachrichtigt, dass der angefragte Bus unterwegs ist. Soll die Anfrage nicht angenommen werden, kann der Operator die Schaltfläche „On Demand sperren“ betätigen. Der Nutzer erhält eine entsprechende Benachrichtigung.

Damit der Operator die Operator-App möglichst einfach bedienen kann und die Verwendung StVO-konform ist, wurden die entsprechenden Smartphones in den Türbereichen der Busse montiert, siehe Abbildung 25.

Abbildung 25: Montage des Operator-Smartphones im Türbereich eines Busses für die Freihandbedienung.

Die Nutzer-App hat zwei wesentliche Funktionen. Zum einen dient sie der Anzeige der Position der Busse und Haltestellen, zum anderen bietet sie die Möglichkeit einer Anfrage eines Busses als Teil des On-Demand-Betriebs. In Abbildung 26 (oben links) wird das Hauptmenü angezeigt, was die oben genannten Punkte beinhaltet. Die Karte mit den Haltestellen und Bussen wird wie in Abbildung 26 (oben mitte) dargestellt.

Ist der On-Demand-Betrieb freigegeben worden und hat der Nutzer im Hauptmenü den Anfrage-Button betätigt, wechselt die Oberfläche auf die Haltestellenauswahl wie in Abbildung 26 (oben rechts) abgebildet. Dort kann der gewünschte Abholort bzw. Anfahrtsort ausgewählt werden. Ist eine entsprechende Anfrage gestellt worden, wird über einen banner in der App die Anfrage bestätigt, wie in Abbildung 26 (unten links) aufgezeigt. Wurde die Anfrage vom Operator angenommen, wird dem Nutzer angezeigt, dass der Bus die zuvor ausgewählte Haltestelle anfährt, siehe Abbildung 26 (unten mitte). Bei Erreichen des Abholorts wird dies ebenfalls in der App bestätigt. Dies ist in Abbildung 26 (unten rechts) dargestellt.

Die Zustände der Busse, die Anfragen sowie Operator-Bestätigungen werden über die Firebase-Datenbank unter den verschiedenen Endgeräten wie den Stelen und den Smartphones ausgetauscht. Durch die zentrale Datenhaltung ist eine konsistente

Informationsdarstellung und das Einbinden von weiteren Endsystemen, wie beispielsweise einer Webseite, effizient möglich.

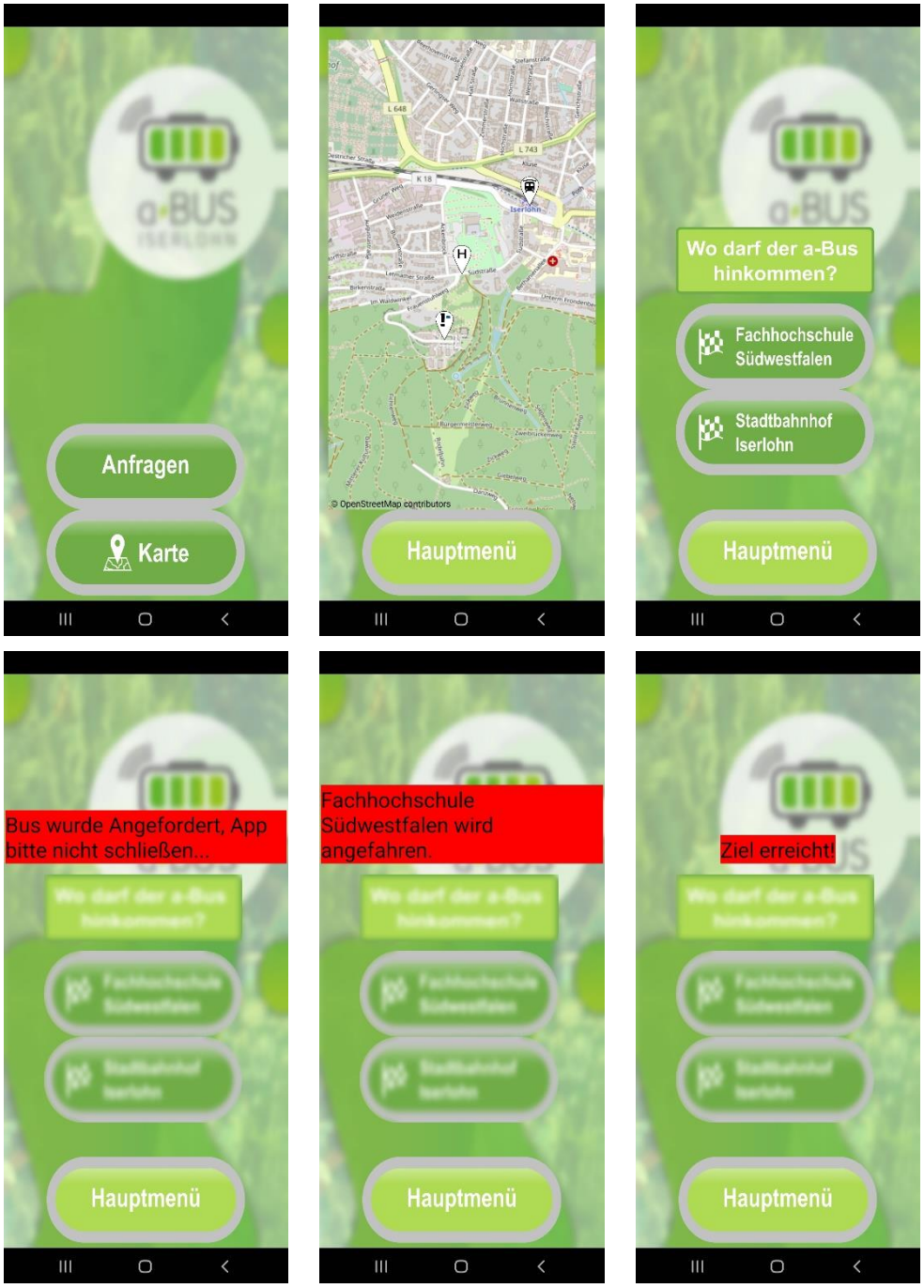


Abbildung 26: Screenshots der Nutzer-App: Hauptmenü (oben links). Karte, auf der die Haltestellen und Busse angezeigt werden (oben mitte). Freigegebener On-Demand-Betrieb (oben rechts). Bus wurde angefordert (unten links). Bestätigte Anfrage zum Anfahren der FH (unten mitte). Meldung, dass der Bus das gewünschte Ziel erreicht hat (unten rechts).

4.4.3 Systemüberwachung und Leitwarte

Die Systemüberwachung, d.h. die Erfassung des Zustandes der Busse und des Kommunikationsnetzwerkes mit Erreichbarkeit aller Netzwerkteilnehmer, wird in der

Leitwarte realisiert. Diese Leitwarte ist nicht Teil des Leitsystems der MVG, siehe Abschnitt 4.2, sondern innerhalb der Hochschule für den Betrieb der Busse realisiert. Die Leitwarte besteht im Wesentlichen aus einem PC, der die Daten in der Cloud analysiert und grafisch aufbereitet. Abbildung 27 zeigt das „Control Center a-BUS“ und spiegelt alle wichtigen Informationen des gesamten a-BUS-Netzwerks, die auch teileweise auf den Stelen bzw. der Nutzer-App angezeigt werden.

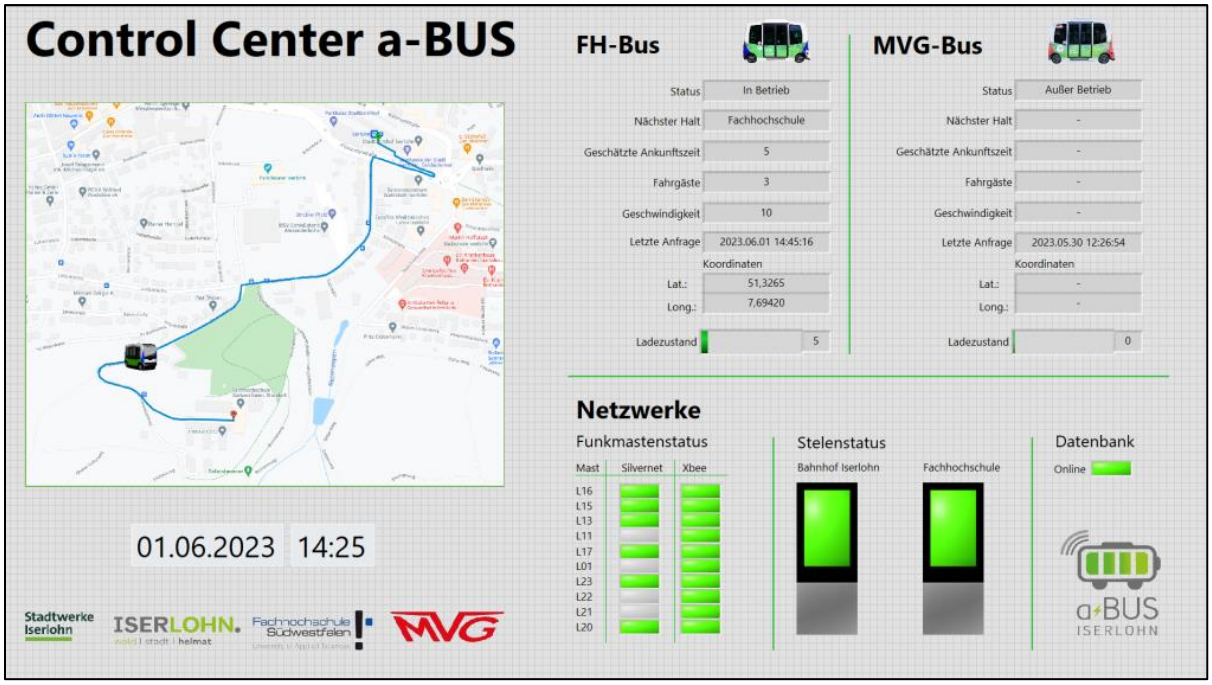


Abbildung 27: Systemüberwachung mittels „Control Center a-BUS“ als Teil der Leitwarte.

Eine weitere Funktion ist die Überwachung der Funktion der Netzwerkknoten sowie die Erreichbarkeit der Stelen. Der Ausfall einzelner Systemkomponenten wird farblich angezeigt. Eine weitere Funktion der Leitwarte ist eine statistische Auswertung der Bus-Fahrdaten. Mittels Python-Skripten werden Fahrzeiten und Fahrstrecken aus den Daten der Datenbank extrahiert sowie die Fahrgastzahlen aufbereitet.

Die vorliegende Realisierung des Benutzerinformationssystems mit Auswertung der Zustandsdaten ist als Prototypenlösung für das neu entwickelte Kommunikations- und Infotainmentsystem zu verstehen, um projektbezogene Auswertungen zu ermöglichen. Eine kommerzielle Lösung sollte etablierte Leitstellensysteme als technologische Basis haben, geeignete Schnittstellen zur einfachen Anbindung fahrzeugherstellerspezifischer Flottenmanagementsoftware besitzen und auch eine Schnittstelle zu Fahrgastinformationssystemen wie DELPHI bedienen können.

4.5 Weiterentwicklungsmöglichkeiten für On-Demand-Angebote mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen

Im Zuge dieses Projekts wurde ein ÖPNV-Angebot in Form eines On-Demand-Verkehrs realisiert. Diese Angebotsform definiert sich durch einen bedarfsgesteuerten Einsatz der Fahrzeuge. Fahrgäste können hierbei das Mobilitätsangebot über unterschiedliche Buchungsplattformen auf Abruf anfordern. Fahrten erfolgen ohne einen fixen Fahrplan und in der Regel ohne eine festgelegte Routenführung. Mithilfe von Logarithmen werden ähnliche Fahrten gebündelt und entsprechende Routen ermittelt, sodass die Fahrgastnachfrage an unterschiedlichen Standorten effizient bedient werden kann.

Grundsätzlich lassen sich dabei folgende Angebotsformen unterscheiden:

1. Bedarfslinienverkehr
2. Richtungsbandbetrieb
3. Sektorbetrieb
4. Flächenbetrieb

Beim Bedarfslinienverkehr (1.) wird eine linienförmige Streckenführung bedarfsorientiert angefahren. Dies entspricht der Angebotsform, wie sie in diesem Projekt umgesetzt wurde. Eine weitere Angebotsform stellt der Richtungsbandbetrieb (2.) dar. Hier wird ein korridorförmiges Bedienungsgebiet (meistens mit einer festen Start- und Zielhaltestelle) angefahren. Zwischen den zwei festen Haltestellen liegen mehrere Bedarfshaltestellen, welche flexibel ja nach Nachfrage in einem vorgegebenen Zeitfenster angefahren werden. Somit gibt es keine feste Linienbindung, sondern nur feste Bedarfshaltestellen. Beim Sektorbetrieb (3.) gibt es in der Regel eine feste Haltestelle und mehrere Bedarfshaltestellen. Beim Flächenbetrieb (4.) gibt es keinen Fahrplan und keine Linienbindung mehr.[3]

Im Rahmen der in diesem Projekt umgesetzten Technologie bewegen sich die automatisierten Fahrzeuge de facto wie auf einer virtuellen Schiene auf einer vorher eingemessenen Strecke. Zur Realisierung eines über einen reinen Linienbedarfsverkehr hinausgehenden Angebotes ist es denkbar, den Linienweg an vorab fest definierten Knotenpunkte zu verzweigen und die sich dann ergebenden unterschiedlichen Linienabschnitte je nach Bedarf zu einer Streckenführung zu kombinieren. Die Linienabschnitte müssen vorab eingemessen werden, so dass jeder Teilabschnitt wieder als virtuelle Schiene darstellbar ist. Wenn eine technische Schnittstelle zwischen der On-Demand- und Fahrzeughersteller-Software geschaffen wird, die je nach On-Demand Anfrage die als virtuelle Schienen hinterlegten Teilabschnitte zu einer passenden Route (Mission) zusammensetzen kann, lassen sich auch mit der hier eingesetzten Technologie

[3] Vgl. BMVI, Mobilitäts- und Angebotsstrategien in ländlichen Räumen (2016), S.23-28.

bedarfsorientiert zusammengesetzte Routenführungen in einem automatisierten Betrieb realisieren.

Eine derartige On-Demand Lösung wird aktuell beispielsweise bei dem Projekt „HEAL“ in Bad Birnbach bereits umgesetzt. Hier besteht eine Schnittstelle zwischen On-Demand- und Fahrzeugherstellersoftware. Über eine App oder per Telefon können Fahrgäste eine Fahrt anfordern. Diese Informationen werden von der App an die On-Demand-Software weitergeleitet, die daraufhin das Routen- und Flottenmanagement übernimmt und den Fahrauftrag an das Fahrzeug schickt. Somit kann ein flexibler On-Demand-Verkehr mit EasyMile Shuttlebussen bereits heute unter Einbezug externer Unternehmen umgesetzt werden.

In aktuellen Projekten zeigt sich, dass ein immer größeres Forschungsinteresse an flexiblen On-Demand-Lösungen besteht. Auch beim Forschungsprojekt „SHOW“ in Karlsruhe werden zum aktuellen Zeitpunkt automatisiert fahrende Shuttlebusse derartig betrieben.[4] Als Beispiel für ein zukünftiges Projekt lässt sich die Hamburger Hochbahn AG aufführen, die in Zusammenarbeit mit der HOLON GmbH einen solchen Einsatz 2024 in Hamburg plant.[5]

[4] https://www.fzi.de/2022/12/14/autonome-shuttles-kehren-zurueck-auf-karlsruhes-strassen-forschungsprojekt-show-startet-mit-fzi-shuttles-ab-dezember-in-karlsruhe/, abgerufen am: 19.06.2023
[5] https://www.hochbahn.de/de/projekte/autonome-on-demand-shuttles, abgerufen am: 01.06.2023

Forschungsfrage 5: Möglichkeiten und Grenzen eines „Level 5“-Betriebs im öffentlichen Straßenverkehr

5.1 Neue Aufgabenstellungen für die Personenbeförderung bei einem autonomen Betrieb „Level 5“

SAE-Level 5 klassifizierte Fahrzeuge fahren vollständig autonom und ohne Operator an Bord. Im Hinblick auf die Personenbeförderung im ÖPNV ergeben sich dadurch gänzlich neue Herausforderungen. Der folgende Abschnitt untersucht, welche neuen Aufgabenstellungen in Bezug zur sozialen Akzeptanz, sozialen Kontrolle und der Barrierefreiheit entstehen.

5.1.1 Soziale Akzeptanz

Einen entscheidenden Faktor für einen erfolgreichen Betrieb von autonomen Fahrzeugen im ÖPNV stellt die soziale Akzeptanz dar. In unterschiedlichen Studien wurde bereits untersucht, inwiefern automatisierte Fahrzeuge von der Bevölkerung akzeptiert werden. Das Marktforschungsinstitut der Hochschule Heilbronn befragt seit 2016 jährlich rund 830 Bürger aus Heilbronn und Umgebung in Form einer Online-Umfrage. Das Ergebnis der neusten Befragung aus 2022 zeigt, dass sich die Akzeptanz gegenüber autonom fahrender Shuttlebusse erhöht. 53 % bewerten selbst fahrende und sich selbst steuernde Busse mit Elektroantrieb für den Personentransport als (eher) positiv. Gleichzeitig halten bishernur 34 % die autonomen Elektrobusse für vertrauenswürdig und nur 39 % für sicher.[6] In einer weiteren Studie wurden 542 Bürger aus Hof, Rehau und Kronach befragt. Hier lässt sich eine ausgeprägte Nutzungsbereitschaft in der Bevölkerung erkennen. Gleichzeitig besteht aktuell eine überhöhte Erwartungshaltung bezüglich flexibler Abfahrtszeiten, Taktdichte, Pünktlichkeit und den Angeboten in Randzeiten.[7]

In einer Studie der Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH wurde das wahrgenommene Sicherheitsempfinden der Fahrgäste auf einem fahrerlosen Shuttlebus ohne Operator untersucht. Überwacht hat die Testfahrten ein Supervisor in einer Leitzentrale. Bei dem Shuttlebus handelt es sich um das Modell EZ10 der 2. Generation von EasyMile. Bei insgesamt vier Testfahrten wurden jeweils unterschiedliche Testszenarien mit den Fahrgästen durchgeführt. Das Resultat offenbart, dass sich alle Fahrgäste entweder

[6] Vgl. Vanessa Offermann (2022), Marktforschungsinstitut der Hochschule Heilbronn führt Umfrage zum autonomen Fahren in Heilbronn und Umgebung durch, https://idw-online.de/de/news800314, abgerufen am: 21.10.2022

[7] Vgl. Wilde, M., Rebhan, J. Fahrerlose Shuttles im öffentlichen Personennahverkehr: Akzeptanz und Einstellung in der Bevölkerung. Standort 46, 2–8 (2022). https://doi.org/10.1007/s00548-021-00746-2, abgerufen am: 21.10.2022

sicher oder sehr sicher fühlen. Die Testfahrten haben dazu beigetragen, dass die Fahrgäste eine hohe Akzeptanz entwickelt haben. Als wichtigste Faktoren, die zum Sicherheitsempfinden beitragen, werden der Fahrstil des Fahrzeugs und das Vertrauen in die Technik genannt. Gleichzeitig geben 47% an, dass die Möglichkeit, Kontakt mit einer Leitstelle aufzubauen, ihr Sicherheitsgefühl stärkt.[8] Aus dieser Studie lässt sich ableiten, dass positive Erfahrungen mit dieser Technologie dafür sorgen, dass solche Fahrzeuge eine erhöhte soziale Akzeptanz erfahren.

Auch im Rahmen des Projekts „a-BUS Iserlohn – New Mobility Lab“ ist eine Akzeptanzanalyse bei Fahrgästen und Anwohnern in Form einer schriftlichen Befragung durchgeführt worden. Die Fahrgastbefragung hat im Zeitraum vom 16.09.2022 bis zum 01.04.2023 stattgefunden. Teilgenommen haben insgesamt 62 Fahrgäste. Bei der Anwohnerbefragung wurde die Umfrage postalisch an 270 Personen verschickt. Die Rücklaufquote beträgt 33 %, was einer Teilnahme von 89 Personen entspricht. Bei der Fahrgastbefragung sind 60 % der Befragten zwischen unter 17 Jahren bis 24 Jahre alt und ein Großteil der Befragten sind Studenten, Auszubildende oder Schüler. Bei der Anwohnerbefragung stellt man hingegen fest, dass mehr als die Hälfte über 60 Jahre alt und eine signifikante Mehrheit Berufstätige und Rentner sind (siehe Abbildungen 28 & 29).

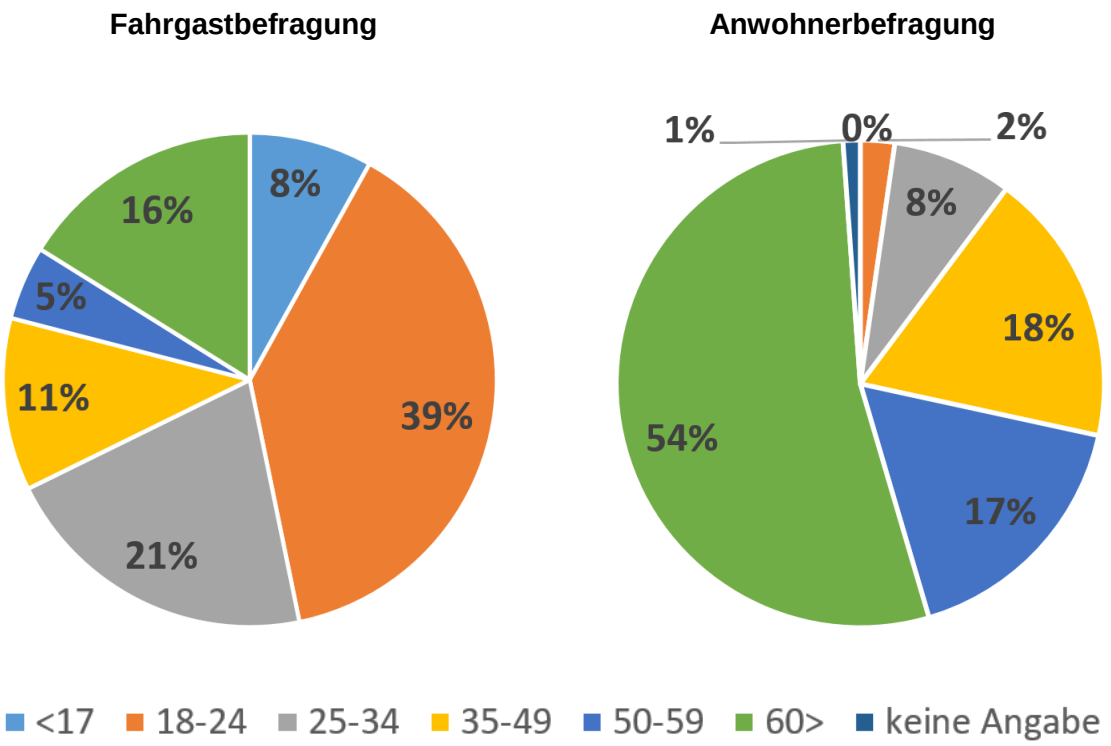


Abbildung 28: Altersstruktur der Umfrageteilnehmer.

[8] Vgl. Luger-Bazinger C, Zankl C, Klieber K, Hornung-Prähauser V, Rehrl K. Factors Influencing and Contributing to Perceived Safety of Passengers during Driverless Shuttle Rides. *Future Transportation*. 2021; 1(3):657-671. https://doi.org/10.3390/futuretransp1030035, abgerufen am: 21.10.2022

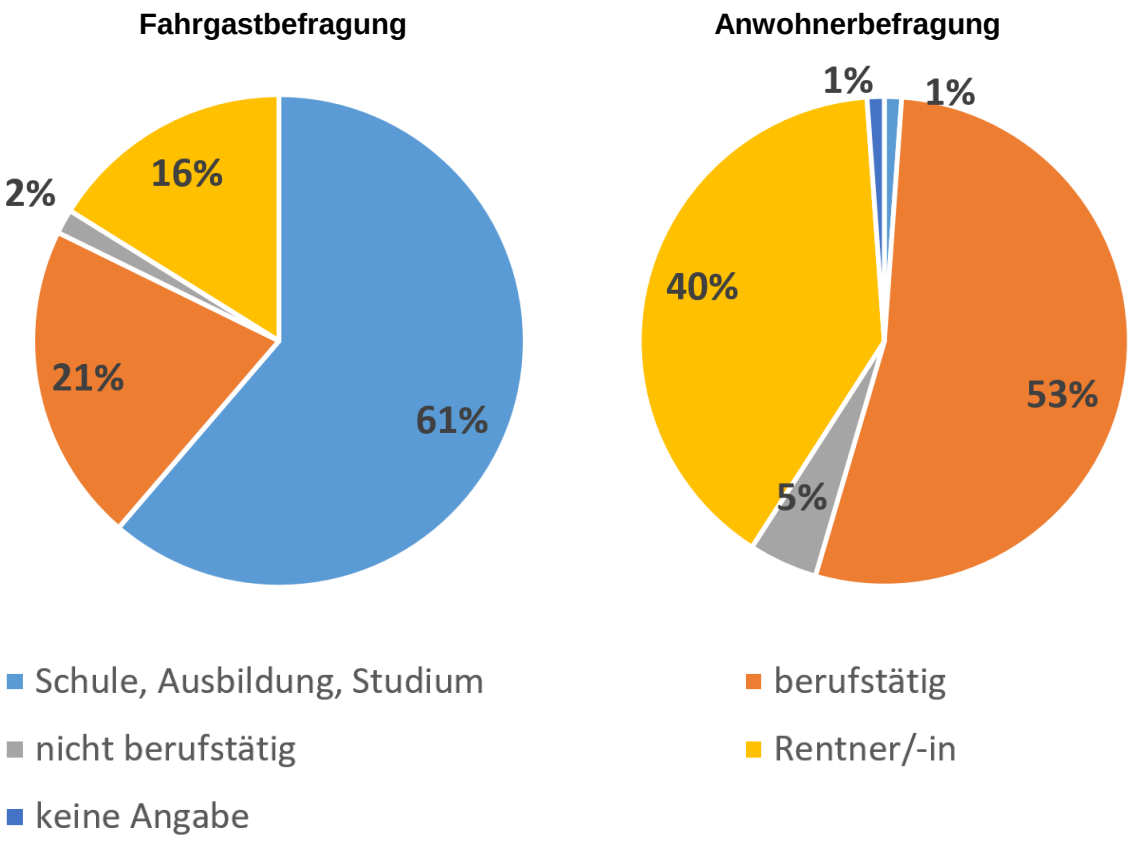


Abbildung 29: Beschäftigungsstatus der Umfrageteilnehmer.

Zu der Frage, wie sicher sich die Fahrgäste während der Fahrt mit Operator gefühlt haben, geben bei der Fahrgastbefragung 92 % an, dass sie sich sehr sicher oder sich fühlen. Demgegenüber fühlen sich lediglich 58 % der Anwohner sehr sicher oder sicher. Zu beachten gilt dabei, dass von den Anwohnern nur 25 % den a-BUS genutzt haben Als Gründe für ein unsicheres Fahrgefühl wird die steile Streckenführung und der Fahrstil des Fahrzeugs aufgeführt.

Weiterführend ist untersucht worden, in wie fern sich der automatisierte Fahrbetrieb des a-BUS auf die Wohnqualität ausgewirkt hat. Die Mehrheit von 53 % gibt dabei an, dass der a-BUS keine Auswirkungen auf die Wohnqualität hat. 9 % haben eine geringfügige oder eine wesentliche Verbesserung wahrgenommen. Die restlichen 38 % haben jedoch eine geringfügige oder wesentliche Verschlechterung wahrgenommen. Die geringe Geschwindigkeit und der Fahrstil des automatisiert fahrenden Shuttlebusses sind dabei vermehrt als Gründe aufgeführt worden. Zusätzlich wird angemerkt, dass häufig Staus entstehen.

Im Rahmen der Fahrgastbefragung wurden zwei zusätzliche Fragestellungen in Bezug zu einer zukünftigen Nutzung solcher Fahrzeuge auch ohne Operator und in Bezug zu

Ausstattungsmerkmalen im Fahrzeug eingefügt. Die Resultate offenbaren, dass 80 % der Befragten sich eher oder auf jeden Fall vorstellen können, in Zukunft automatisiert fahrende Fahrzeuge ohne Operator zu nutzen (siehe Abbildung 30). Als Begründung wurde beispielsweise aufgeführt, dass das automatisierte Fahren eine erhöhte Sicherheit aufweist. Zusätzlich besteht Vertrauen in die technologische Entwicklung. Dennoch gibt es Bedenken hinsichtlich fehleranfälliger und unzuverlässiger Technik in den Fahrzeugen.

In Abbildung 31 wird ersichtlich, dass die Fahrgäste weitere Ansprüche an die Fahrzeugausstattung haben. Hier besteht primär der Wunsch nach gesonderten Abstellflächen für Taschen und Gepäck.

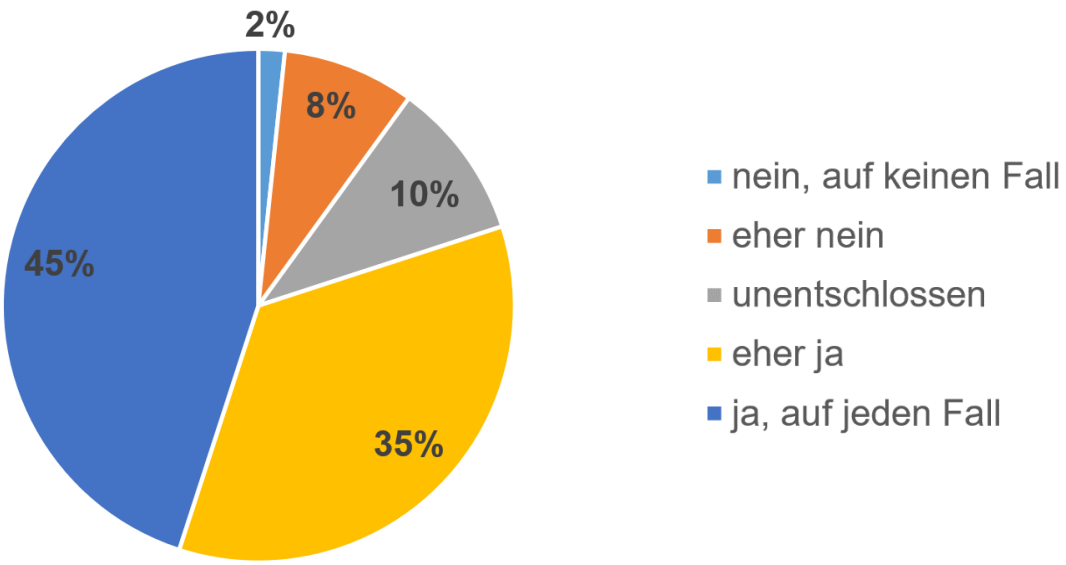


Abbildung 30: Prozentuale Antwortverteilung auf die Frage: „Würden Sie zukünftig ein selbstfahrendes (autonomes) Fahrzeug ohne Operator nutzen?“.

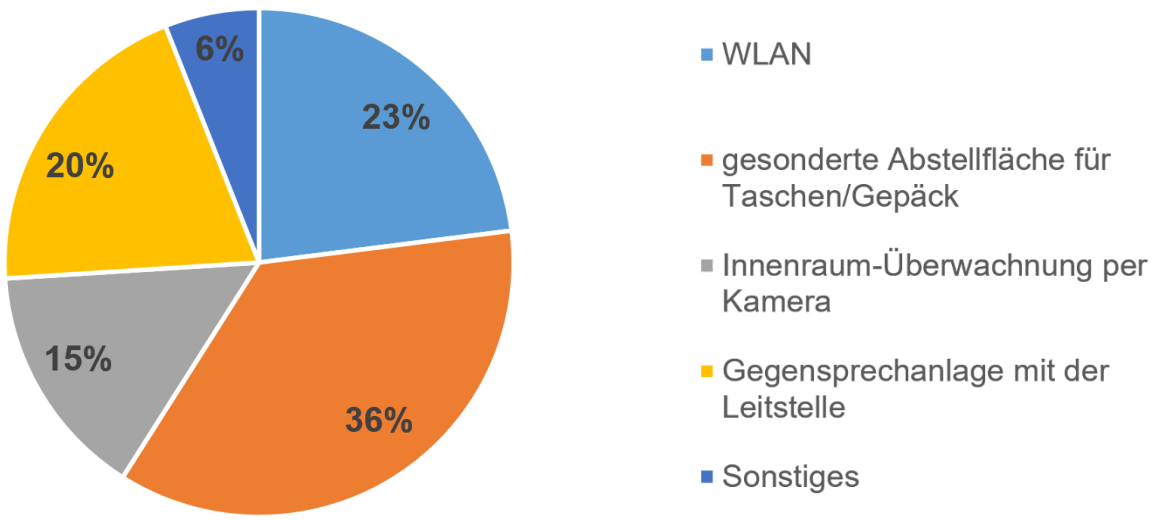


Abbildung 31: Prozentuale Antwortverteilung auf die Frage: „Welche Ausstattungsmerkmale im autonom fahrenden Bus sind für Sie interessant?“.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass bei den Fahrgästen eine hohe Akzeptanz sowie eine positive Einstellung zum autonomen Fahren vorhanden ist. Ausblickend auf die Zukunft sind weitere Entwicklungen hinsichtlich des Fahrstils und der Geschwindigkeit notwendig, um auch bei den Anwohnern eine erhöhte Akzeptanz zu erreichen und die Wohnqualität zu verbessern.

5.1.2 Soziale Kontrolle

Die Aufgabe der Operatoren besteht grundlegend darin, das Verkehrsgeschehen aufmerksam zu beobachten, um bei Gefahrensituationen, Störungen und Hindernissen manuell eingreifen zu können. Neben diesen Aufgaben besitzen die Operatoren die Funktion, soziale Kontrolle auszuüben. Im Folgenden werden mögliche Maßnahmen beim Wegfall des Fahrzeugbegleiters untersucht.

Kameras und Mikrofone werden bereits heute dafür eingesetzt, um ein stärkeres Sicherheitsgefühl bei den Fahrgästen zu schaffen und kriminelle Handlungen, wie zum Beispiel Vandalismus und Auseinandersetzungen zwischen Fahrgästen vorzubeugen. Das Land Nordrhein-Westfalen stellt zum Beispiel bis 2024 zehn Millionen Euro für die Ausstattung der Bahnhöfe in Nordrhein-Westfalen zur Verfügung. Diese Maßnahme soll dafür sorgen, dass sich die Menschen an den Bahnhöfen wohler fühlen, da mithilfe des Einsatzes von Videotechnik die Hemmschwelle für Gewalttaten, Vandalismus und Graffiti gesenkt wird.[9] Beim Auftreten von kriminellen Handlungen können mithilfe der Videotechnik

[9] https://www.land.nrw/pressemitteilung/verkehrsministerium-investiert-10-millionen-euro-sicherheit-bahnhoefen-bis-2024, abgerufen am: 24.10.2022

die Daten ausgewertet und die Täter leichter erfasst werden. Bei akuten Notfällen reagieren diese Systeme jedoch nicht automatisch, um die Situation zu entschärfen oder Hilfe zu holen.

Zur Erhöhung der Sicherheit in Bus und Bahn haben Forschende innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekts „InREAKT“ bereits von 2013-2016 ein automatisiertes Alarmsystem erarbeitet. Mithilfe von Kameras, Geräuschsensoren und mechanischen Sensoren sollen drohende Gefahren unter Einhaltung des Datenschutzes automatisch vom System erkannt und die Leitstelle informiert werden.[10] Bei vollständig autonomen Fahrzeugen bieten derartige Systeme die Möglichkeit, soziale Kontrolle ohne eine Begleitperson im Fahrzeug auszuüben. Die Installation eines Bedienelements im Fahrzeug zur Kontaktaufnahme über eine Gegensprechanlage mit der Leitstelle sorgt für zusätzliche Sicherheit. Besonders abends und nachts empfinden die Fahrgäste die Nutzung des ÖPNVs als unsicher.[11] Zu diesen Zeiten ist es vorstellbar, den Einsatz von Sicherheitskräften in Erwägung zu ziehen.

Weitere Herausforderungen ergeben sich im Zusammenhang mit medizinischen Notfällen bei Fahrgästen innerhalb des Fahrzeugs. In diesem Kontext ergibt sich die Frage, wie die Fahrzeuge in diesen Situationen reagieren. Im Hinblick auf die Zukunft besteht die Möglichkeit, dass die Fahrzeuge mithilfe von intelligenten Softwarelösungen, Kameratechnik und Sensorik solche Situationen unter Einhaltung des Datenschutzes automatisch erkennen und Hilfe rufen. Zur Implementierung und Umsetzung solcher Lösungen ist weitere Forschung notwendig. Der Aspekt der Zuverlässigkeit bekommt dabei eine große Bedeutung.

5.1.3 Barrierefreiheit

Hinsichtlich der Beförderung von Fahrgästen in einem voll autonomen Betrieb treten neben den gesetzlichen Bestimmungen zur Barrierefreiheit im ÖPNV weitere Anforderungen an das Fahrzeug und dessen Ausstattung, die Infrastruktur und an Serviceangeboten auf. Insbesondere für blinde und sehbehinderten Personen stellt das Zwei-Sinne-Prinzip die Grundlage dar. Es besagt, dass mindestens zwei der drei Sinne Sehen, Hören und Tasten angesprochen werden. In den folgenden Abschnitten werden diese zusätzlichen Anforderungen näher betrachtet.

---

[10] https://www.sifo.de/sifo/de/projekte/gesellschaft/urbane-sicherheit/inreakt/inreakt-integrierte-hilfe-reak-ehung-der-sicherheit-des-oepnv.html, abgerufen am: 25.10.2022

11 Vgl. Rölle, D. (2004), S.2. Sicherheitsgefühle im ÖPNV - die Perspektive der Verkehrsunternehmen. In H.-J. Kerner & E. Marks (Hrsg.), Internetdokumentation Deutscher Präventionstag. Hannover.

5.1.3.1 Anforderungen an Haltestellen

Blinde und sehbehinderte Fahrgäste benötigen zur Orientierung an Haltestellen Kennzeichnungen in Form von Auffindungsstreifen und Einstiegsfeldern, um die Position für den Fahrzeugeinstieg zu erkennen. Diese Bodenindikatoren sind durch die DIN 32984 in Deutschland genormt.

Um Personen ohne Smartphones Echtzeitdaten der Fahrzeuge zur Verfügung zu stellen, können Haltestellen mit einer Sprachausgabe ausgestattet werden. Eine derartige Ausstattung bietet zusätzlich die Möglichkeit, Fahrgäste direkt mit der Kundenzentrale in Verbindung zu setzen. Über eine automatische Sprachausgabe an der Haltestelle werden bei Ankunft der Fahrzeuge Informationen zur Linie an die Kunden weitergegeben. Somit wird verhindert, dass blinde und sehbehinderte Personen nicht erkennen können, um welche Linie es sich handelt. Eine Vereinheitlichung der Gestaltung unterschiedlicher Haltestellen sorgt für eine vereinfachte Nutzbarkeit für Fahrgäste.[12]

5.1.3.2 Anforderungen an das Fahrzeug und dessen Ausstattung sowie das Serviceangebot

Bei einem Mobilitätsangebot mit vollständig autonom und ohne Fahrzeugbegleiter fahrenden Fahrzeugen im ÖPNV ergeben sich Anforderungen, die bereits bei der Herstellung und der Entwicklung der Fahrzeuge und der Software beachtet werden müssen. Einige Aspekte wie beispielsweise eine Rampe, die für Rollstuhlfahrer per Knopfdruck ausgefahren und durch ein akustisches Signal begleitet wird, sind bereits realisiert. Andere Eigenschaften, auf die im Folgenden eingegangen wird, finden bisher noch keine Anwendung.

Fahrgastinformationen

Während des a-BUS-Projekts wurden Fahrgastinformationen über die Operatoren an die Fahrgäste weitergeleitet. Informationen zur nächsten Haltestelle wurden zusätzlich über ein Display im Fahrzeug dargestellt. Bei einem ÖPNV-Betrieb mit SAE-Level 5 klassifizierten Fahrzeugen ist eine entsprechende Software notwendig, um durch akustische Ansagen Informationen zur Linie, Fahrtrichtung, der nächsten Haltestelle, Anschlussmöglichkeiten und betrieblichen Störungen an die Fahrgäste zu kommunizieren. Ein hoher Kontrast und eine große Schriftgröße an Anzeigen und Kennzeichnungen sorgen dafür, dass seheingeschränkte Personen diese besser wahrnehmen können. Ein vollständig beleuchteter Innenraum erhöht diesen Effekt. Eine Außenansage mit Informationen zur Linie

[12] Vgl. Böckler, Musialik (2022, S.32) [Handlungsempfehlungen zur barrierefreien Nutzbarkeit von autonom fahrenden Straßenfahrzeugen im ÖPNV; In: Journal für Mobilität und Verkehr, Ausgabe 12]

und zur Fahrtrichtung stellt eine weitere Anforderung dar, wenn nicht bereits alle Haltestellen mit einer solchen Funktion ausgestattet sind. In Bezug zu tauben und höreingeschränkten Personen ist die Kommunikation mit der Leitstelle aus dem Fahrzeuginnenraum aktuell nicht realisierbar. Aus diesem Grund erweist sich der Einsatz eines Displays mit allen wichtigen Informationen als sinnvoll. Perspektivisch wäre es möglich, die Kommunikation über eine eingebaute Kamera im Fahrzeug zu ermöglichen. Die Blindensprache könnte der Leitstelle mithilfe eines automatischen Online-Dolmetscher-Dienstes übersetzt werden und umgekehrt genauso. Auch hier führt eine Standardisierung dieser Funktionen und Bauelemente in unterschiedlichen Fahrzeugen zu einer vereinfachten Nutzbarkeit für die Fahrgäste.[13]

Fahrzeugtüren

Akustische Signale an den Fahrzeugtüren ermöglichen Menschen mit Sehbehinderung ein einfaches Auffinden des Einstiegsortes. Ein weiteres akustisches Signal bei der Türfreigabe hilft diesen Personen dabei, zu erkennen, wann sich die Türen öffnen. Perspektivisch ist hier auch der Einsatz von Smartphone-Apps vorstellbar, bei dem die App den Nutzern dabei hilft, die richtige Tür aufzufinden und anschließend automatisch zu öffnen.[14] Neben einem taktilen Feedback bei Betätigung der Bedienelemente im und am Fahrzeug kann ein Signalton Gewissheit schaffen, dass der Tastendruck bestätigt wurde. Bei dem Einsatz von Touchscreens besteht die Gefahr, dass es zu unbeabsichtigten Aktivierungen von Funktionen kommt. Für blinde und seheingeschränkte Fahrgäste ist eine sinnvolle Nutzung von Touchscreens nicht gegeben. Alternativ besteht die Möglichkeit Force-Sense oder Force-Feedback-Anzeigen zu verwenden.[15]

Akustische Signalisierung des Fahrvorgangs

Batterieelektrische Fahrzeuge senken den durch den Straßenverkehr verursachten Lärm in Städten. Für eine barrierefreie Nutzung des ÖPNVs für blinde und sehbehinderte Personen sind dennoch akustische Geräusche notwendig, anhand derer die Anwesenheit der autonomen Fahrzeuge erkannt werden kann. Das sogenannte Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) dient dazu, dass elektrische geräuscharme Fahrzeuge künstlich erzeugte akustische Signale von sich geben. Fahrvorgänge wie Anfahren, langsamer Werden, Beschleunigen, Rückwärtsfahren und Stehenbleiben werden akustisch signalisiert.

[13] Vgl. Böckler, Musialik (2022), S.30 f. [Handlungsempfehlungen zur barrierefreien Nutzbarkeit von autonom fahrenden Straßenfahrzeugen im ÖPNV; In: Journal für Mobilität und Verkehr, Ausgabe 12]

[14] Vgl. ÖV-App für Blinde und Sehbehinderte (2018), https://www.trapezegroup.de/de/news/text/oev-app-fuer-blinde-und-sehbehinderte/, abgerufen am: 04.10.2022

[15] Vgl. Erwin Denninghaus (2022), S. 12f., Autonomous and connected vehicles and visual impairment: opportunities and challenges (European Blind Union (EBU). 6 rue Gager-Gabillot, 75015 Paris [France])

Standgeräusche sorgen dafür, dass im ÖPNV betriebene Fahrzeuge, welche sich an einer Haltestelle befinden, von sehbehinderten Personen erkannt werden können. Einen weiteren Faktor stellt die Prävention von Verkehrsunfällen dar. Besonders bei geringen Geschwindigkeiten von Fahrzeugen mit niedrigem Schallpegel scheinen erhöhte Risiken für Unfälle mit Passanten aufzutreten. Auch wenn der Zusammenhang von Unfällen mit der Geräuscharmut von Fahrzeugen nicht unumstritten belegt werden kann, erscheint der Einsatz von AVAS unter Aspekten der Verkehrssicherheit als sinnvoll.[16]

Bezahlung

Bei einem vollständig autonomen Betrieb befindet sich kein Fahrer oder Operator mehr im Fahrzeug, bei dem Fahrkarten gekauft werden könnten, sodass neue Möglichkeiten zum Bezahlen notwendig sind. Bereits heute gibt es diverse Smartphone-Apps, die es nicht nur ermöglichen Fahrten zu planen und Echtzeitdaten über die Ankunft der Busse zu erhalten, sondern auch eine Bezahlfunktion beinhalten. Mithilfe dieser Funktion lassen sich alle Arten von Tickets vorab über die App mit unterschiedlichen Zahlungsmethoden wie z.B. PayPal, Kreditkarte oder Amazon Pay bezahlen.[17] Im Gegensatz zu klassischen Tarifen ermöglicht beispielsweise der eTarif „eezy.nrw“ in Nordrhein-Westfalen eine Berechnung der Fahrtkosten per Luftlinienkilometer. Dafür müssen sich Fahrgäste bei Fahrtantritt einchecken und beim Ausstieg wieder auschecken. Während der Fahrt benötigt die App eine Freigabe des Standorts, um so die Luftlinienkilometer berechnen zu können.[18] Über die Standortfunktion besteht auch die Möglichkeit, auf ein manuelles Auschecken zu verzichten. Die App erkennt dabei, dass sich der Fahrgast nicht mehr im Fahrzeug befindet. Eine barrierefreie Gestaltung solcher Apps ermöglicht es auch sehbehinderten Menschen diese zu nutzen. Für Fahrgäste ohne Smartphone sind weiterhin alternative Bezahlmethoden erforderlich.

Weitere Fragestellungen ergeben sich hinsichtlich der Ticketkontrolle, wie diese perspektivisch umgesetzt werden kann. Zunächst ist ein Einsatz von Fahrkartenkontrolleuren vorstellbar. In Zukunft hingegen könnten automatisierte Systeme diese Aufgabe übernehmen.

[16] Vgl. Boenke, D., et al. "Lärmtechnische Bewertung des Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS)(UBA FB 000572)." *UMWELTBUNDESAMT, TEXTE* 122, 2021 (2021).
[17] Vgl. KVB-App, abgerufen am: 18.10.2022
[18] https://www.land.nrw/pressemitteilung/eezynrw-kommt, abgerufen am: 18.10.2022

5.1.4 Fazit

Aus der Übertragung der Betriebsführungspraxis eines „Level 4“-Fahrzeugs für die Personenbeförderung hin zum autonomen Betrieb „Level 5“ ergeben sich hinsichtlich der Barrierefreiheit zahlreiche neue Anforderungen. Insbesondere die Schaffung einer barrierefreien Nutzbarkeit des ÖPNVs für sehbehinderte und blinde Personen erweist sich als sehr umfangreich. Aktuell liegen bereits viele Ansätze vor, die dies ermöglichen können. Smartphone-Apps haben das Potenzial, in Zukunft einen großen Beitrag zu diesem Thema beizutragen. Für Besitzer eines Smartphones kann zudem die Möglichkeit geschaffen werden, über eine App zu bezahlen. Für Personen ohne Smartphones sind alternative Bezahlmethoden notwendig. Einige der Ansätze lassen sich bereits heute umsetzen und tragen auch zum Fortschreiten der Barrierefreiheit im klassischen Betrieb bei. Weitere Forschung kann dazu beitragen, neue Konzepte herauszuarbeiten und umzusetzen.

5.2 Technische Eigenschaften und rechtliche Rahmenbedingungen für zukünftigen „Level 5“-Betrieb

Insbesondere Netzunterbrechungen und daraus resultierende Probleme bei der Lokalisierung der Fahrzeuge haben sich im Rahmen des a-BUS-Betriebs als wesentliches Hemmnis für einen störungsfreien automatisierten Betrieb manifestiert. Probleme traten insbesondere im Bereich der Campus-Anfahrt (Waldnähe mit schwacher / instabiler Netzabdeckung) auf. Eine stabile und unterbrechungsfreie Netzanbindung ist eine zwingende Voraussetzung für den vollautomatisierten bzw. autonomen Betrieb der Fahrzeuge. Diese ist vor allem in ländlichen Regionen heute noch nicht erfüllt. Entsprechende Lösungsansätze bestehen in einer optimierten Netzabdeckung und/oder dem Vorhandensein eines Backup-Systems für die Datenkommunikation und Fahrzeuglokalisierung.

Abbildung 32: Comic zum autonomen Fahren

5.2.1 Kritische Verkehrssituationen für einen störungsfreien Level-5-Betrieb

Im Rahmen des Shuttelbetriebes konnten einige Verkehrssituationen identifiziert werden, die nach heutigen Stand der in den Fahrzeugen verbauten Technik noch nicht automatisiert und damit ohne manuellen Eingriff sicher beherrscht werden können. Unter anderem können die folgenden – auf der Grundlage der gemachten Erfahrungen aus dem Streckenbetrieb – Situationen benannt werden:

- Abbiegesituationen mit Gegenverkehr ohne Ampelsteuerung

- Abbiegesituationen mit Kreuzung von Verkehrswegen anderer Verkehrsteilnehmer (z.B. Radweg,Fußgängerweg)
- Kreisverkehre ohne Ampelsteuerung
- Verkehrswege mit großer Heterogenität an Verkehrsobjekten (insbesondere mit „schwächeren“ Verkehrsteilnehmern, wie z.B. Fußgänger*innen und Radfahrer*innen)
- temporäre Fremdobjekte in der ausgewiesenen Verkehrsfläche.

Abbildung 33: Beispiel Busspur am HBF-Hagen.

Das Bild zeigt hierzu beispielhaft ein (nicht von der im Projekt befahrenen Strecke stammendes) Beispiel, in dem eine Busspur (orangefarbene Linie) eine stark befahrende Straße mit 2 Verkehrsrichtungen kreuzt und wo mit Hilfe einer Ampelsteuerung ein sicherer Verkehr auf der (heute ausschließlich manuell befahrenen) Busspur erreicht wird. Dies wäre auch für einen automatisierten Busbetrieb eine praktikable und betriebssichere Lösung.

5.2.2 Wesentliche Herausforderungen für das automatisierte Fahren in den Stufen 4 – 5

Die nachfolgend benannten Situationen müssen für einen Betrieb in den Automatisierungsstufen 4 und 5 sicher beherrscht werden. Sie stellen – heute noch nicht in ausreichendem Maß vorhandene – Anforderungen an die Sensorik, die Situationsinterpretation sowie an die Fahrstrategieplanung und -realisierung:

- sichere Umgebungswahrnehmung bei unterschiedlichsten Wetter- und Lichtverhältnissen

- Steigerung der Zuverlässigkeit in der Situationserkennung und der Situationsinterpretation
- Teilnahme von automatisierten Fahrzeugen in komplexen Verkehrssituationen
- Nachweis hinreichender Sicherheit der Systeme (Validierung).

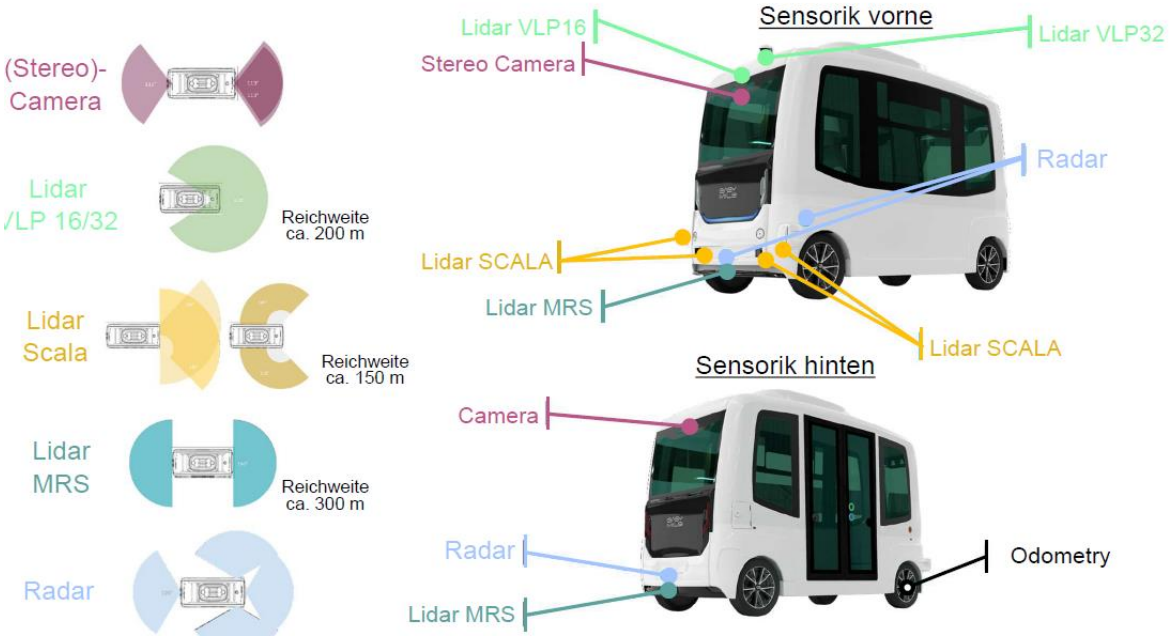


Abbildung 34: Sensorik in den eingesetzten Shuttles (1).

Abbildung 34 zeigt die heute in den Shuttles verbauten Sensoren. Obwohl von einigen Herstellern im Bereich automatisiert fahrender PKW heute der Weg über (im Wesentlichen) kamera-gestützte Sensorsysteme gewählt wird, muss davon ausgegangen werden, dass bezüglich der Sensorik auch in der Zukunft die in den eingesetzten Shuttles verwendete Strategie der Nutzung unterschiedlicher physikalischer Effekte mit nachfolgender Sensordatenfusion zielführend sein wird.

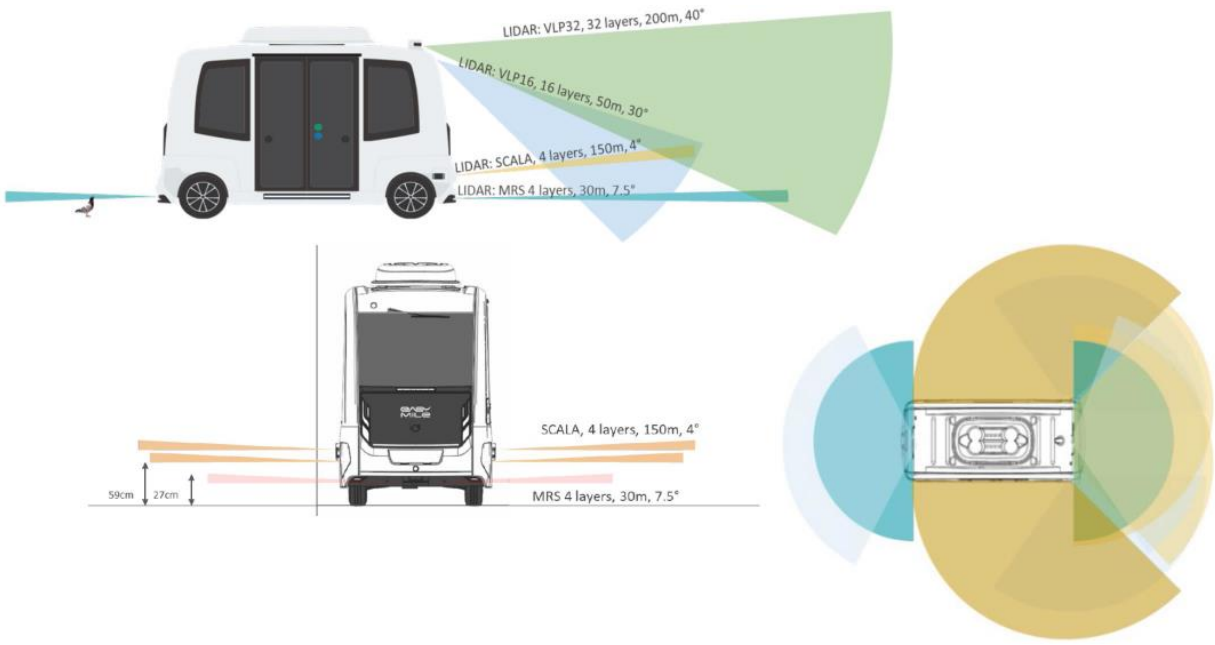


Abbildung 35: Sensorik in den eingesetzten Shuttles (2).

Als besonders kritisch gilt nach heutigem Stand der Nachweis der hinreichenden Sicherheit der im Fahrzeug verbauten Systeme. Die Herausforderungen sind im Einzelnen:

- es existieren keine ausreichend abgesicherten, auf Kennzahlen basierenden Maßstäbe, um kritische Situationen unter Einbeziehung von Unsicherheiten und Fehlverhalten Dritter sicher zu bewerten
- Problematik mit vertretbarem Testaufwand für jede Situation und ihre möglichen Entwicklungen die Auftrittswahrscheinlichkeit von Schäden zu ermitteln und Handlungsoptionen so abzustimmen, dass sich ein „zumutbares Risiko“ ergibt

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, bestehen unterschiedliche Lösungsoptionen:

1.) Evolution => schrittweise Einführung neuer Funktionalitäten
2.) Alternative Testwerkzeuge => statt Realfahrt Absicherung durch X-in-the-Loop
3.) Raffung der Testfälle,

wobei insbesondere der Option 1 (evolutionäre Weiterentwicklung automatisierter Fahrfunktionen) heute die größten Potenziale für eine Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens eingeräumt werden. Diese evolutionäre Entwicklung wird flankiert durch effiziente Testverfahren, in denen auf unterschiedlichen Ebenen virtuelle Umgebungen zum Einsatz kommen (X-in-the-Loop) und Potenziale zur Raffung von Testfällen genutzt werden.

5.2.3 Welche Voraussetzungen müssen noch geschaffen werden (rechtliche Rahmenbedingungen, Akzeptanz und Umfeldanalyse)?

Nach heutigem Stand ist ein Fahren im öffentlichen Raum in den Stufen 4 und 5 noch nicht, oder nur mit entsprechenden Ausnahmegenehmigungen möglich. Mit den Empfehlungen der Ethikkommission der Bundesregierung zum automatisierten Fahren besteht eine gute Grundlage, um den entsprechenden Rechtsrahmen zeitnah zu schaffen.

Insgesamt lassen sich die folgenden Punkte in diesem Kontext benennen:

- Erweiterung des Rechtsrahmens zur Ermöglichung des Level-5-Betriebs im öffentlichen Verkehrsraum
- Umsetzung der Empfehlungen der Ethikkommission zum automatisierten Fahren[1)] in dem zu schaffenden Rechtsrahmen
- Ausschöpfung des Geschwindigkeitspotenzials als notwendige Voraussetzung für eine breitflächige Akzeptanz von Nutzer*innen und anderen Verkehrsteilnehmer*innen
- Berücksichtigung der vorgenannten für einen weitgehend störungsfreien Level-5-Betrieb notwendigen Anforderungen an die Verkehrsführung im Rahmen der Verkehrsplanung.

Forschungsfrage 6: Möglichkeiten und Grenzen eines wirtschaftlichen Betriebes sowie ausgewählter Anwendungsszenarien (Kostenanalyse, Analyse der Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit, Analyse der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle, Geschäftsmodelle zur Erzielung weiterer Ergebnisbeiträge)

Beim Einsatz automatisiert fahrender Fahrzeuge entstehen diverse Kosten bei der Anschaffung und während des laufenden Betriebs. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 36 die Kostenstruktur und die einzelnen Kostenfaktoren dargestellt. Um eine Vorstellung über die Kostendimensionen zu erlangen, werden nachfolgend die im Rahmen des Projekts entstandenen Kosten aufgezeigt.

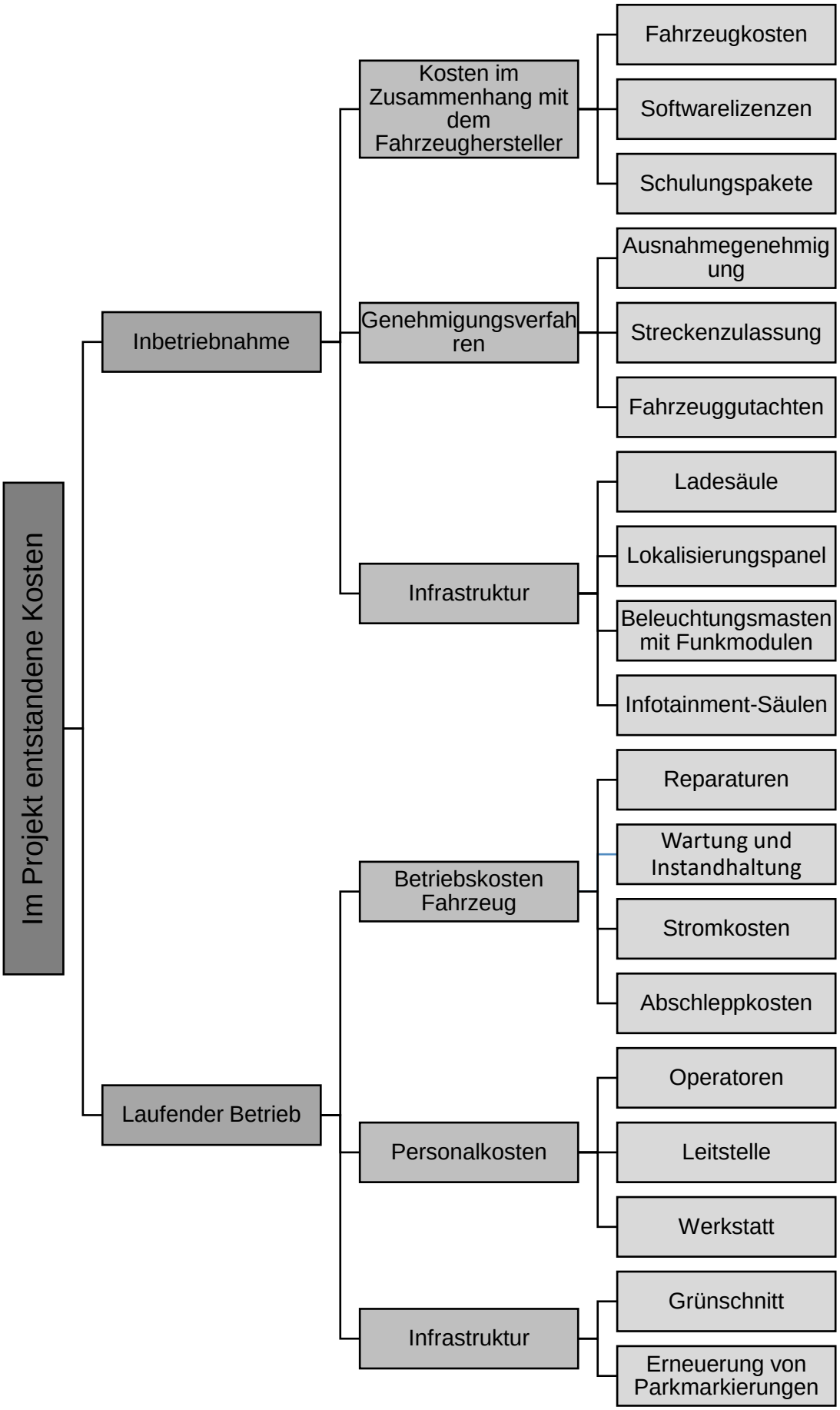


Abbildung 36: Entwickelte Kostenstruktur im Verlauf des Projekts.

6.1 Kosten bei der Inbetriebnahme

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Kosten bei der Inbetriebnahme eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aufgezeigt und beschrieben. Die Gliederung orientiert sich dabei an der Kostenstruktur aus Abbildung 36.

6.1.1 Kosten im Zusammenhang mit dem Fahrzeughersteller

Aktuell handelt es sich bei automatisiert fahrenden Shuttlebussen um Einzelanfertigungen. Im Vergleich zu manuell betriebenen Elektro-Fahrzeugen besitzen diese Fahrzeuge eine umfangreiche Sensorik. Neben den reinen Fahrzeugkosten fallen bei der Beschaffung zusätzliche Kosten an, die für einen automatisierten Betrieb notwendig sind. Das Leistungspaket beinhaltet dabei folgende Punkte:

- Fahrzeug (inkl. Basis-Sicherungssatz + Fernbedienung)
- Lizenzgebühren für Navigations- und Flottenmanagementsoftware
- Gebühren für jährliche Wartung der Softwares
- Operatorenschulung (3 Operatoren + 1 Chief Operator)
- NRTK Abonnement
- Mobile Daten Flatrate 3G/4G 1GB
- Koordination von EasyMile Services & Ansprechpartner
- Transport
- Hinteres LED Display am Fahrzeug
- Vorderes LED Display am Fahrzeug

Die Leasingkosten für das Fahrzeug inklusive dem Leistungspaket betragen für eine Betriebsdauer von zwei Jahren ca. 235.000 €.

6.1.2 Kosten in Bezug auf das Genehmigungsverfahren

Für die Zulassung automatisiert fahrender Fahrzeuge auf der Strecke ist ein Fahrzeuggutachten durch einen amtlich anerkannten Sachverständigen notwendig. Der Fahrzeughersteller erstellt einen Bericht zur Bewertung der Strecke (Site Assessment Report), welcher als Grundlage für die Streckenzulassung dient. Hier werden vom Fahrzeughersteller Risikoabschätzungen zu einzelnen Abschnitten auf der Strecke erstellt. Erschwerende Faktoren werden aufgeführt und empfohlene Maßnahmen zur Abmilderung des Risikos werden aufgeführt. Dazu zählen beispielsweise erforderliche Beschilderungen

entlang der Strecke und Geschwindigkeitsbegrenzungen der Fahrzeuge auf verschiedenen Streckenabschnitten. Mithilfe dieses Site Assessment Reports (SAR) erstellt die örtliche Verkehrsbehörde einen Beschilderungsplan mit allen für die Fahrtstrecke relevanten Verkehrsschildern (Lokalisierungspanels, Hinweis- und Haltestellenschilder, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Parkverbote). Nach Abnahme der Strecke und der Erstellung eines Streckengutachtens wird eine Ausnahmegenehmigung gemäß § 70 StVZO von der zuständigen Bezirksregierung ausgestellt. Die Kosten für ein solches Fahrzeuggutachten und für die Streckenzulassung betragen ca. 10.000 €.

6.1.3 Infrastrukturelle Maßnahmen

Bevor ein Betrieb der Fahrzeuge stattfinden kann, sind weitere infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich. Als eine Risikominderungsmaßnahme wurden vor der Inbetriebnahme der automatisiert fahrenden Shuttlebusse an jedem Einfahrtspunkt auf die Fahrtstrecke Hinweisschilder angebracht, um andere Verkehrsteilnehmer auf die Präsenz der Shuttlebusse aufmerksam zu machen.

Zur Lokalisierung nutzen die Fahrzeuge permanente Strukturen auf der Fahrtstrecke. Um in Bereichen mit viel Vegetation und ohne feste Strukturen das Risiko des Verlustes der Lokalisierung zu verringern, wurden Lokalisierungspanel in Form von rechteckigen Schildern an diesen Punkten installiert.

Im Projektinteresse ist eine zusätzliche Haltestelle am Stadtbahnhof Iserlohn errichtet worden. Laut dem Fahrzeughersteller liegen Haltestellen im Idealfall neben einem Bordstein, welcher sich maximal 20 cm über dem Straßenniveau befindet. Um einen barrierefreien Einstieg und das ausfahren der Rampe für Rollstuhlfahrer zu ermöglichen, wurde diese Haltestelle mit einem Bordstein versehen.

An den Haltestellen „Iserlohn Stadtbahnhof“ und „FH Südwestfalen“ ist jeweils eine Infotainmentsäule installiert worden, worüber Fahrgäste den aktuellen Standort der Shuttlebusse auf einer digitalen Karte einsehen können. Zusätzlich wird angezeigt, wann die Fahrzeuge die Haltestellen erreichen und es besteht die Möglichkeit, eine Fahrt anzufordern. Somit konnte ein On-Demand-Betrieb gewährleistet werden.

Als Abstellhalle für die Fahrzeuge nach Betriebsende diente eine Halle der Fachhochschule Südwestfalen, wodurch keine zusätzlichen Kosten entstanden sind. Um auch in den Warte- und Pausenzeiten die Fahrzeuge zu laden, wurde an der Haltestelle „Iserlohn Stadtbahnhof“ eine Ladesäule errichtet. Die Gesamtkosten für die aufgeführten infrastrukturellen Maßnahmen belaufen sich dabei auf ca. 30.000 €.

6.1.4 Übersicht der Kosten bei der Inbetriebnahme

Bei einer Projektlaufzeit von zwei Jahren fallen bei der Inbetriebnahme eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses insgesamt folgende Kosten an:

1. Kosten im Zusammenhang mit dem Fahrzeughersteller: ca. 235.000 €
2. Kosten für infrastrukturelle Maßnahmen: ca. 30.000 €
3. Kosten in Bezug auf das Genehmigungsverfahren: ca. 10.000 €

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 37 die prozentualen Anteile der einzelnen Kostenparameter dargestellt.

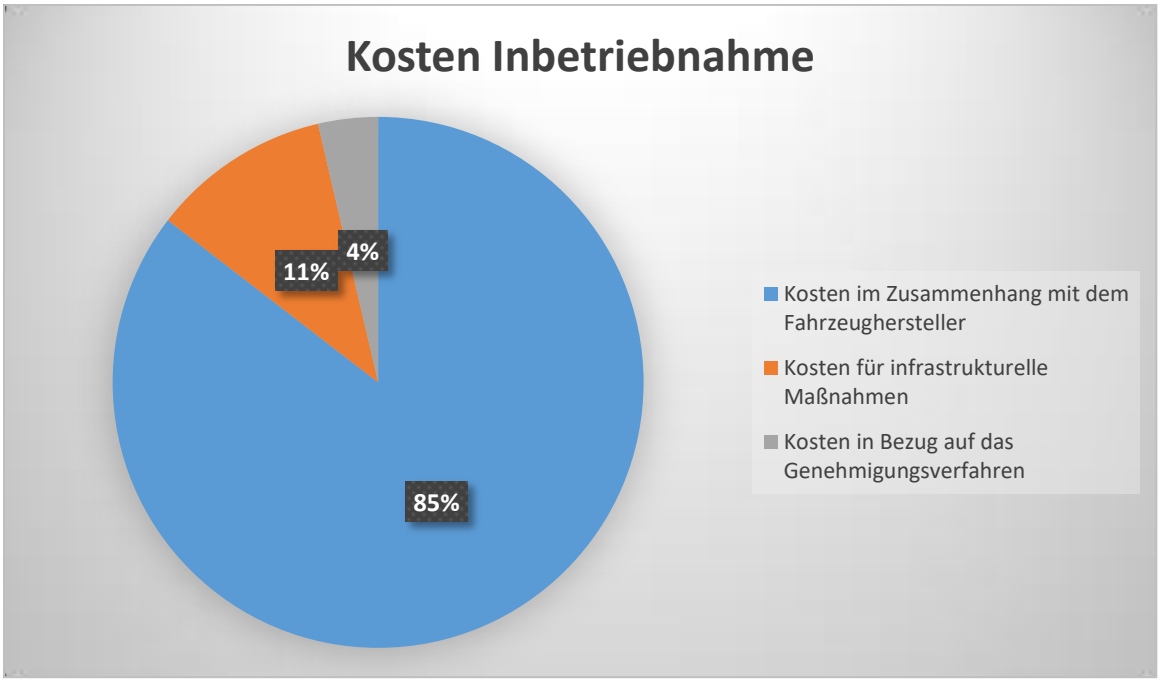


Abbildung 37: Prozentuale Anteile der Kostenparameter bei der Inbetriebnahme.

6.2 Kosten pro Jahr für den laufenden Betrieb

Der folgende Abschnitt beschreibt und präsentiert die jährlichen Kosten während des laufenden Betriebs eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses. Die Gliederung orientiert sich dabei an der Kostenstruktur aus Abbildung 36.

6.2.1 Betriebskosten Fahrzeug

Die Betriebskosten für die automatisiert fahrenden Shuttlebusse setzen sich insbesondere aus den Kosten für Wartung, Instandhaltung und Strom zusammen. Für den Transport des Fahrzeugs zu diversen Veranstaltungen oder zur Betriebshalle muss zusätzlich ein

Anhänger angeschafft werden. Der Stromverbrauch der Fahrzeuge hängt sehr stark davon ab, in wie fern Klimaanlage und Heizung genutzt werden. In der kalten Jahreszeit und bei sehr hohen Temperaturen entsteht ein deutlich gesteigerter Verbrauch. Auf der im Rahmen dieses Projekts ausgewählten Teststrecke belaufen sich die Stromkosten pro Fahrzeug auf ca. 4.000 € pro Jahr.

Die Kosten für Wartung und Instandhaltung eines Fahrzeugs (abzüglich der Personalkosten) belaufen sich jährlich auf ca. 5.000 €.

6.2.2 Personalkosten

Personalkosten fallen für Operatoren, Leitstellen- und Werkstattmitarbeiter an. Neben Lohnkosten ergeben sich für die genannten Beschäftigtengruppen weitere Ausgaben für vorgeschriebene Schulungen. Bezüglich der Operatoren gilt zu beachten, dass die ununterbrochene Einsatzzeit aufgrund von rechtlichen Rahmenbedingungen, welche in der Ausnahmegenehmigung fest definiert sind, nicht mehr als zwei Stunden betragen darf. Die tägliche Einsatzzeit darf acht Stunden nicht überschreiten. Infolgedessen beträgt die kumulierte Pausenzeit innerhalb eines Dienstes eine Stunde. Für den Personalaufwand während des Betriebs eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses ohne Projektmanagement und -leitung entstehen jährlich Kosten in Höhe von ca. 85.000 €.

6.2.3 Betriebskosten und Instandhaltung der Infrastruktur

Für die beiden Infotainmentsäulen entstehen Betriebskosten in Form von Strom- und Wartungskosten. Für die Durchführung von Softwareupdates und bei Ausfällen der Infotainmentsäulen ist ein zusätzlicher Mitarbeiter erforderlich. Aufgrund von starker Vegetation muss ein regelmäßiger Grünschnitt auf der Teststrecke durchgeführt werden. Dadurch kann ein reibungsloser Betrieb ohne Stopps aufgrund von auf die Strecke ragender Vegetation gewährleistet werden. Für die Betriebskosten und Instandhaltung der Infrastruktur fallen hierdurch jährlich ca. 3.000 € an Kosten an.

6.2.4 Übersicht der Kosten während des laufenden Betriebs

Für den laufenden Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses, der werktags täglich acht Stunden im Einsatz ist, fallen summiert jährlich folgende Kosten an:

1. Personalkosten (Operator, Werkstattmitarbeiter, Leitstelle): ca. 85.000 €
2. Betriebskosten für ein Fahrzeug: ca. 9.000 €
3. Betriebskosten und Instandhaltung der Infrastruktur: ca. 3.000 €

Die prozentualen Anteile der einzelnen Kostenparameter sind in Abbildung 38 dargestellt.

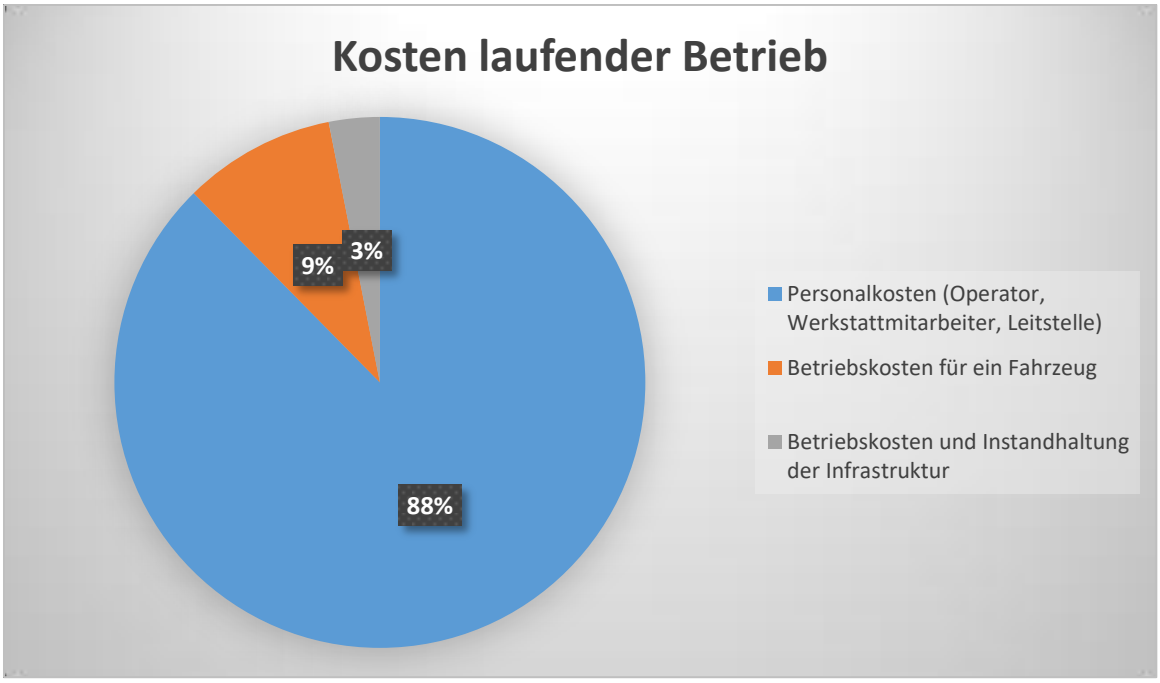


Abbildung 38: Prozentuale Anteile der Kostenparameter für den laufenden Betrieb.

6.3 Analyse der Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeit eines automatisierten Fahrbetriebs

Die Wirtschaftlichkeit eines Betriebs automatisiert fahrender Shuttlebusse im ÖPNV hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren und Kostenpositionen ab. Eine allgemeine Weiterentwicklung im Bereich der automatisierten Mobilität kann Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit für den Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse im ÖPNV haben. Perspektivisch ist es demnach vorstellbar, dass die Fahrzeuge nicht mehr in Einzelproduktion, sondern in einer Serienproduktion hergestellt werden. Rechtliche Rahmenbedingungen können für eine Vereinfachung der Einführung eines Betriebs mit automatisiert fahrenden Shuttlebussen sorgen und gleichzeitig die Weichen für einen Einsatz der Fahrzeuge ohne Operator und ggfs. ohne Technische Aufsicht stellen. In diesem Zusammenhang muss jedoch auch eine Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik erfolgen, sodass ein effektiver und sicherer Einsatz ohne Fahrzeugbegleiter gewährleistet werden kann. Bei einer Anpassung verschiedener Fahrzeugparameter oder der Anschaffung mehrerer automatisiert fahrender Shuttlebusse können zudem Skaleneffekte entstehen.

Im folgenden Abschnitt werden mithilfe von verschiedenen Szenarien perspektivisch vorstellbare Veränderungen der aufgeführten Einflussfaktoren auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Betriebs automatisiert fahrender Shuttlebusse näher analysiert. Um

diese näher analysieren zu können, wird ein theoretisches Modell geschaffen. Ein Grundszenario mit fest definierten Annahmen dient als Ausgangsbasis der Analyse. Als Vergleichswert wird der Kostendeckungsgrad verwendet.

6.3.1 Grundszenario für die Analyse der Einflussfaktoren

Das Grundszenario definiert einen Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses im ÖPNV hinsichtlich Betriebsdauer, Einsatzzeiten, gefahrener Strecke, Geschwindigkeit, Auslastung der Fahrzeuge und der entstehenden Kosten sowie Einnahmen. Dabei werden folgende theoretische Annahmen getroffen, die als Basis für die weitere Untersuchung dienen:

	Annahme
Projektlaufzeit	3 Jahre
Betriebszeiten	250 Tage im Jahr 7 Stunden kommerzieller Betrieb pro Tag (aufgrund von Pausenzeiten)
Personalkosten pro Jahr und Shuttlebus	85.000 €
Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzeugs	9 km/h
Zurückgelegte Strecke pro Tag	63 km
Fahrgastkapazität	6 Personen
Auslastung der Fahrgastkapazität	Jederzeit 50 %
Einnahmen pro Personenkilometer	0,50 €
Betriebskosten Fahrzeug pro Jahr	9.000 €

Kosten für Infrastruktur	30.000 €
Laufende Kosten der Infrastruktur	3.000 €
Genehmigungskosten	10.000 €
Anschaffungskosten	300.000 €
Restwert nach drei Jahren	50.000 €

Tabelle 2: Annahmen für das Grundszenario

Mit den aufgeführten Annahmen ergibt sich für das Grundszenario ein Kostendeckungsgrad von:

12,2 %

Dieser Wert dient als Grundlage für den Vergleich mit den anschließend aufgeführten Szenarien. Zur Nachvollziehbarkeit wird hier die Rechnung aufgeführt:

Einnahmen:

- Pro Personenkilometer: 0,50 € / Pkm
- Pro Tag: 0,50 € * 63 km * 3 Fahrgäste = 94,50 €
- Pro Jahr: 94,50 € * 250 Betriebstage = 23.625 €
- Nach 3 Jahren Betrieb: 23.625 € * 3 Jahre = 70.875 €

Kosten:

- Inbetriebnahme (für eine Laufzeit von 3 Jahren):
    1. 300.000 € Fahrzeugbeschaffung − 50.000 € Restwert
       + 30.000 € Infrastruktur + 10.000 € Genehmigung
       = 290.000 €
- Laufender Betrieb:
    1. Pro Jahr:
       85.000 € Personalkosten
       + 9.000 € Betriebskosten Fahrzeug

+ 3.000 € Laufende Kosten der Infrastruktur

= 97.000 €

2. Nach 3 Jahren Betrieb:

   97.000 € x 3 Jahre = 291.000 €

Kostendeckungsgrad:

- 70.875 € Einnahmen / (290.000 € Kosten Inbetriebnahme + 291.000 € Kosten laufender Betrieb)

  = ca. 12,2 %

	Einsatz eines Shuttlebusses unter Einbezug der Grundannahmen
Kosten Inbetriebnahme	290.000 €
Kosten laufender Betrieb	291.000 €
Einnahmen	70.875 €
Kostendeckungsgrad	12,2 %

Tabelle 3: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses im Grundszenario.

6.3.2 Szenario 1: Erhöhte maximale Fahrgastkapazität

Im Nachfolgenden wird ein Szenario aufgeführt, bei dem ein automatisiert fahrender Shuttlebus mit einer erhöhten Fahrgastkapazität eingesetzt werden soll. Die Kapazität dieses fiktiven Shuttlebusses umfasst 15 Personen. Zusätzlich zu den Grundannahmen wird die Annahme gestellt, dass für die Beschaffung eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs mit einer Fahrgastkapazität von 15 Personen 25 % höhere Kosten anfallen. Der Restwert des Fahrzeugs erhöht sich ebenfalls um 25 %. Die Betriebskosten für das Fahrzeug sind gleichzeitig 10 % höher als bei den kleinen Shuttlebussen mit einer Fahrgastkapazität von sechs Personen. Die in Bezug zum Genehmigungsverfahren und der Infrastruktur angefallenen Kosten bleiben hiervon unbeeinflusst. Bei diesem Szenario ergibt sich ein Kostendeckungsgrad von:

27,4 %

Nachfolgend der Rechenweg:

Einnahmen:

- Pro Personenkilometer: 0,50 € / Pkm
- Pro Tag: 0,50 € * 63 km * **7,5** Fahrgäste = 236,25 €
- Pro Jahr: 236,25 € * 250 Betriebstage = 59.062,50 €
- Nach 3 Jahren Betrieb: 59.062,50 € * 3 Jahre = 177.187,50 €

Kosten:

- Inbetriebnahme (für eine Laufzeit von 3 Jahren):
  1. (300.000 € Fahrzeugbeschaffung − 50.000 € Restwert)
     * **1,25**
     + 30.000 € Infrastruktur + 10.000 € Genehmigung
     = 352.500 €
- Laufender Betrieb:
  1. Pro Jahr:
     85.000 € Personalkosten
     + 9.000 € Betriebskosten Fahrzeug * **1,1**
     + 3.000 € Laufende Kosten der Infrastruktur
     = 97.900 €
  2. Nach 3 Jahren Betrieb:
     97.900 € x 3 Jahre = 293.700 €

Kostendeckungsgrad:

- 177.187,50 € Einnahmen / (352.500 € Kosten Inbetriebnahme + 293.700 € Kosten laufender Betrieb)
  = ca. 27,4 %

	Shuttlebus mit einer Fahrgastkapazität von 15 Personen
Kosten Inbetriebnahme	352.500 €

Kosten laufender Betrieb	293.700 €
Einnahmen	177.187,50 €
Kostendeckungsgrad	27,4 %

Tabelle 4: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses in Szenario 1.

6.3.3 Szenario 2: Szenario 1 + erhöhte Durchschnittsgeschwindigkeit

In diesem Szenario wird ein automatisiert fahrender Shuttlebus aus Szenario 1 (Fahrgastkapazität von 15 Personen) mit einer erhöhten Maximalgeschwindigkeit eingesetzt. Vorausgesetzt ist dabei, dass die Fahrzeuge die technischen Anforderungen für einen sicheren und effizienten Betrieb erfüllen. Es wird angenommen, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge 15 km/h beträgt und somit insgesamt eine Strecke von 105 km pro Tag zurückgelegt wird. Zusätzliche Mehrkosten für die Fahrzeugbeschaffung und die Betriebskosten werden hier nicht veranlasst. Die Kosten belaufen sich auf dieselbe Höhe wie in Szenario 1. In diesem Szenario mit erhöhter Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt der Kostendeckungsgrad:

45,7 %

Es ergibt sich folgende Rechnung:

Einnahmen:

- Pro Personenkilometer: 0,50 € / Pkm
- Pro Tag: 0,50 € * **<u>105 km</u>** * 7,5 Fahrgäste = 393,75 €
- Pro Jahr: 393,75 € * 250 Betriebstage = 98.437,50 €
- Nach 3 Jahren Betrieb: 98.437,50€ * 3 Jahre = 295.312,50 €

Kosten:

- Inbetriebnahme (für eine Laufzeit von 3 Jahren):
    1. (300.000 € Fahrzeugbeschaffung − 50.000 € Restwert)
       * 1,25
       + 30.000 € Infrastruktur + 10.000 € Genehmigung
       = 352.500 €

- Laufender Betrieb:
    1. Pro Jahr:
       85.000 € Personalkosten
       + 9.000 € Betriebskosten Fahrzeug * **1,1**
       + 3.000 € Laufende Kosten der Infrastruktur
       = 97.900 €
    2. Nach 3 Jahren Betrieb:
       97.900 € x 3 Jahre = 293.700 €

Kostendeckungsgrad:

- 295.312,50 € Einnahmen / (352.500 € Kosten Inbetriebnahme + 293.700 € Kosten laufender Betrieb)
  = ca. 45,7 %

	Szenario 1 + Shuttlebus mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h
Kosten Inbetriebnahme	352.500 €
Kosten laufender Betrieb	293.700 €
Einnahmen	295.312,50 €
Kostendeckungsgrad	45,7 %

Tabelle 5: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aus Szenario 1 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h.

6.3.4 Szenario 3: Szenario 2 + Einsatz einer Technischen Aufsicht

Unter der Annahme, dass durch technologischen Fortschritt und klaren rechtlichen Rahmenbedingungen ein Betrieb ohne Operatoren möglich ist, wird im Folgenden untersucht, welchen Einfluss zusätzlich eine Technische Aufsicht auf die Wirtschaftlichkeit eines Betriebs automatisiert fahrender Shuttlebusse im ÖPNV haben kann. In diesem Fall entfällt der Operator im Fahrzeug und wird durch eine Technische Aufsicht ersetzt. Wenn wir davon ausgehen, dass so wie es die aktuelle Gesetzgebung gemäß § 14 Absatz 1 AFGBV vorgibt, die Person, welche diese Position besetzt, über einen Abschluss als Diplom-

Ingenieur, Bachelor oder staatlich geprüfter Techniker besitzen muss, ist mit höheren Lohnkosten im Vergleich zu den Lohnkosten eines Operators zu rechnen. Demnach wäre bei einer 1-zu-1 Betreuung von Technischer Aufsicht und Fahrzeug ein Betrieb dieser Fahrzeuge unwirtschaftlicher als mit Operatoren an Bord.

Unter der Prämisse, dass eine Technische Aufsicht 30 % mehr Lohn gezahlt bekommt als ein Operator, ergeben sich bei unterschiedlichen Betreuungsschlüssel folgende jährliche Personalkosten je Fahrzeug:

Anzahl betreuter Fahrzeuge durch eine Technische Aufsicht	Personalkosten pro Jahr für die Technische Aufsicht je Fahrzeug
1	78.000 €
2	39.000 €
3	26.000 €
4	19.500 €
5	15.600 €
6	13.000 €
7	11.140 €

Tabelle 6: Personalkosten entsprechend dem Betreuungsschlüssel von Technischer Aufsicht zu Fahrzeug.

Um nun zu beurteilen, in wie fern die Einführung einer Technischen Aufsicht sich auf den Kostendeckungsgrad auswirkt, wird auf Grundlage der Fahrzeuge aus Szenario 2 (Fahrgastkapazität von 15 Personen und eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h) die Berechnung durchgeführt. Des Weiteren wird angenommen, dass eine Technische Aufsicht fünf Fahrzeuge betreut. Dadurch ergibt sich ein Kostendeckungsgrad von:

57,6 %

Nachfolgend der dazugehörige Rechenweg:

Einnahmen:

- Pro Personenkilometer: 0,50 € / Pkm
- Pro Tag: 0,50 € * 105 km * 7,5 Fahrgäste = 393,75 €
- Pro Jahr: 393,75 € * 250 Betriebstage = 98.437,50 €
- Nach 3 Jahren Betrieb: 98.437,50€ * 3 Jahre = 295.312,50 €

Kosten:

- Inbetriebnahme (für eine Laufzeit von 3 Jahren):
    1. (300.000 € Fahrzeugbeschaffung − 50.000 € Restwert)
       * 1,25
       + 30.000 € Infrastruktur
       + 10.000 € Genehmigung
       = 352.500 €
- Laufender Betrieb:
    1. Pro Jahr:
       85.000 € Personalkosten – **44.400 € Wegfall Operator** + 9.000 € Betriebskosten Fahrzeug * 1,1
       + 3.000 € Laufende Kosten der Infrastruktur
       = 53.500 €
    2. Nach 3 Jahren Betrieb:
       53.500 € x 3 Jahre = 160.500 €

Kostendeckungsgrad:

- 295.312,50 € Einnahmen / (352.500 € Kosten Inbetriebnahme + 160.500 € Kosten laufender Betrieb)
  = ca. 57,6 %

	Szenario 2 + Betrieb mit Technischer Aufsicht (Betreuung von fünf Fahrzeugen)
Kosten Inbetriebnahme	352.500 €
Kosten laufender Betrieb	160.500 €
Einnahmen	295.312,50 €
Kostendeckungsgrad	57,6 %

Tabelle 7: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aus Szenario 2 mit einer Technischen Aufsicht, die fünf Fahrzeuge betreut.

In Tabelle 8 wird zusätzlich aufgezeigt, in wie fern sich der Kostendeckungsgrad durch den jeweiligen Betreuungsschlüssel von Technischer Aufsicht zu Fahrzeugen verbessert.

	Kostendeckungsgrad
Betreuung von 2 Fahrzeugen	50,6 %
Betreuung von 3 Fahrzeugen	54,3 %
Betreuung von 4 Fahrzeugen	56,3 %
Betreuung von 5 Fahrzeugen	57,6 %
Betreuung von 6 Fahrzeugen	58,5 %

Tabelle 8: Kostendeckungsgrad beim Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse mit unterschiedlichen Betreuungsschlüsseln der Technischen Aufsicht.

6.3.5 Szenario 4: Einsatz von Fahrzeugen aus einer Serienproduktion

Bisher werden automatisiert fahrende Shuttlebusse als Einzelanfertigungen produziert, was zu hohen Kosten führt. Aufgrund dessen wird in diesem Szenario untersucht, inwiefern eine Serienproduktion den Kostendeckungsgrad zusätzlich beeinflusst. Hierfür werden 20 % geringere Kosten für die Beschaffung von in Serie produzierten Fahrzeugen angenommen. Der Restwert des Fahrzeugs sinkt ebenfalls um 20 %. Ausgangspunkt sind Fahrzeuge aus Szenario 3. Durch die geringeren Beschaffungskosten ergibt sich folglich ein Kostendeckungsgrad von:

65,6 %

Der Rechenprozess sieht wie folgt aus:

Einnahmen:

- Pro Personenkilometer: 0,50 € / Pkm
- Pro Tag: 0,50 € * 105 km * 7,5 Fahrgäste = 393,75 €
- Pro Jahr: 393,75 € * 250 Betriebstage = 98.437,50 €
- Nach 3 Jahren Betrieb: 98.437,50€ * 3 Jahre = 295.312,50 €

Kosten:

- Inbetriebnahme (für eine Laufzeit von 3 Jahren):
    1. (300.000 € Fahrzeugbeschaffung − 50.000 € Restwert)
       * 1,25 * **0,8**
       + 30.000 € Infrastruktur
       + 10.000 € Genehmigung
       = 290.000 €
- Laufender Betrieb:
    1. Pro Jahr:
       85.000 € Personalkosten – 44.400 € Wegfall Operator
       + 9.000 € Betriebskosten Fahrzeug * 1,1
       + 3.000 € Laufende Kosten der Infrastruktur = 53.500 €
    2. Nach 3 Jahren Betrieb:
       53.500 € x 3 Jahre = 160.500 €

Kostendeckungsgrad:

- 295.312,50 € Einnahmen / (290.000 € Kosten Inbetriebnahme + 160.500 € Kosten laufender Betrieb)
  = ca. 65,6 %

	Szenario 3 + Fahrzeuge aus Serienproduktion
Kosten Inbetriebnahme	290.000 €
Kosten laufender Betrieb	160.500 €
Einnahmen	295.312,50 €
Kostendeckungsgrad	65,6 %

Tabelle 9: Kosten und Einnahmen für den Betrieb eines automatisiert fahrenden Shuttlebusses aus Szenario 3, welches zusätzlich in Serie produziert wird.

6.3.6 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von automatisiert fahrenden Shuttlebussen im ÖPNV zeigen auf, dass ein wirtschaftlicher Erfolg von unterschiedlichen Faktoren abhängt.

Sobald mehrere der untersuchten Variablen entsprechend modifiziert sind, besteht das Potenzial, eine deutliche Steigerung der Kostendeckung zu erreichen. In Abbildung 39 wird dies veranschaulicht, indem die Kostendeckungsgrade der einzelnen Szenarien dargestellt werden.

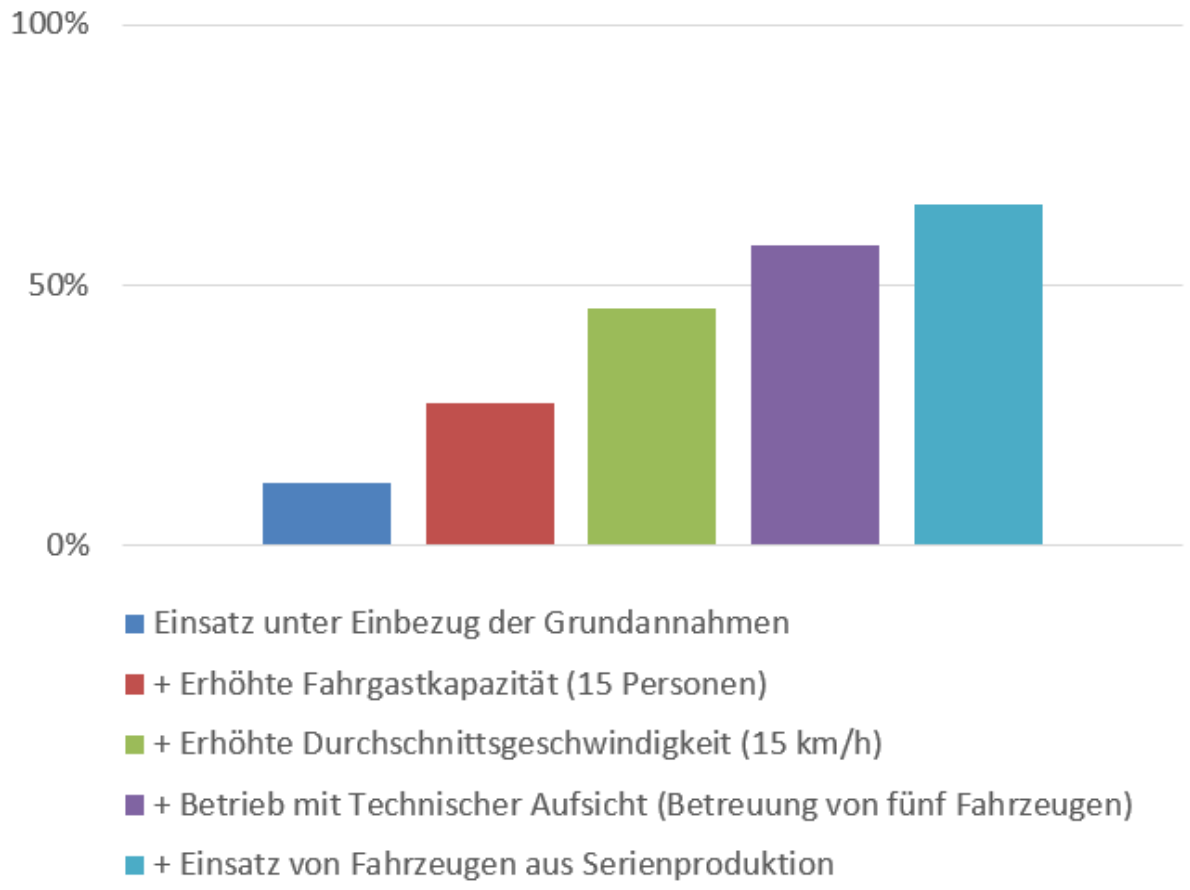
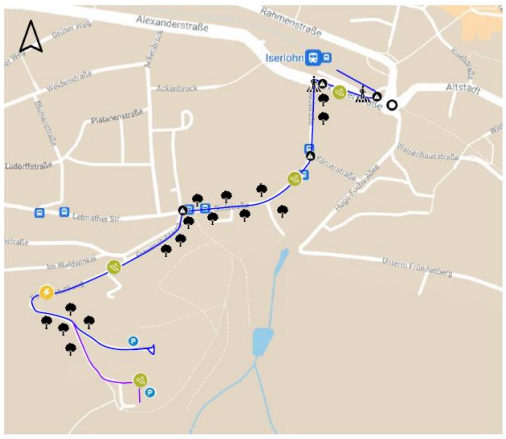


Abbildung 39: Kostendeckungsgrade der vier untersuchten Szenarien.

6.4 Analyse der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle

Während des 21-monatigen Betriebs der automatisiert fahrenden Shuttlebusse auf der rund 1,5 km langen Teststrecke konnten Systemschwächen der Fahrzeuge erörtert werden, aus denen Merkmale zur Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle abgeleitet werden können. Ergänzend zu den erlangten Erfahrungen aus diesem Projekt, lassen sich Merkmale

zur Beurteilung der Eignung der Strecke für die Fahrzeuge aus dem vom Fahrzeughersteller erstellten Site Assessment Report (SAR) entnehmen (siehe Abbildung 40).



Qualität der Lokalisierung			
	1 Zonen ohne Strukturelemente		
Konfiguration der Strecke			
	Verkehr typ: Zweispurigen Straße		
	3 Geneigte Ebene > 5%	30	Geschwindigkeitsbegrenzungen
	0 Bereich mit schlechte zustand der Straße		
	2 Parkplätze		0 Verkehrsschwelle
	Straßenbreite > 3.5 m		
	Vegetation: annehmbar		
Kreuzungen			
	1 Kreisverkehr		0 Stop
	4 Yield		2 Fußgängerübergang

Ort

Iserlohn, Germany

AF Betriebsstrecke

AF Strecke zum Lager

Abbildung 40: Merkmale der Teststrecke „a-BUS Iserlohn – New Mobility Lab“.

Anhand der während der Projektlaufzeit erlangten Erfahrungen und des SAR lässt sich bezüglich der **Fahrbahnmerkmale und der infrastrukturellen Gegebenheiten** folgende Merkmalsliste zur Beurteilung der Eignung des Einsatzgebiets für den Einsatz von automatisiert fahrenden Shuttlebussen ableiten:

1. **Streckenlänge + Steigung**

   Aufgrund der geringen Maximalgeschwindigkeit der automatisiert fahrenden Shuttlebusse sind kürzere Strecken zu bevorzugen. Somit kann die Reisezeit möglichst kurzgehalten werden und Haltestellen können mit einer höheren Frequenz angefahren werden.

2. **Maximale Geschwindigkeit auf der Strecke**

   Strecken mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h oder höher stellen für die Fahrzeuge eine Herausforderung dar. Erst ab Tempo-30-Zonen oder Spielstraßen ist gewährleistet, dass die Fahrzeuge keine oder nur eine geringe Verkehrsbehinderung für andere Verkehrsteilnehmer darstellen.

3. **Verkehrsführung (Kreuzungen, Ampelanlagen, Kreisverkehre, Fußgängerüberwege)**

   Für eine bessere Integration der Shuttlebusse im Einsatzgebiet sind einfache und eindeutige Verkehrsführungen auf der Strecke von Vorteil. Durch sichtbare Fahrbahn- und Parkmarkierungen kann tendenziell die Anzahl Falschparker auf der Strecke verringert werden, die den Betrieb des Fahrzeugs behindern könnten.

4. **Verkehrsaufkommen**

   Ein hohes Verkehrsaufkommen führt in der Regel zu mehr Behinderungen während des Betriebs, weshalb sich eine Strecke mit einem geringen Aufkommen an Verkehrsteilnehmern besser eignet. Auch unvorhergesehene Notstopps des Fahrzeugs durch rasante Überholmanöver anderer Verkehrsteilnehmer können somit reduziert werden.

5. **Straßenbreite**

   Die Straßenbreite sollte ausreichend breit sein, um die Shuttlebusse sicher in den Verkehr zu integrieren. Zu schmale Straße könnten zu Konflikten mit anderen Verkehrsteilnehmern führen.

6. **Vegetation**

   Eine nicht oder gering vorhandene Vegetation entlang der Strecke senkt die Störanfälligkeit und das Auslösen von Stopps oder Notstopps der Fahrzeuge. Darüber hinaus muss kein regelmäßiger Grünschnitt erfolgen.

7. **Netzabdeckung GPS + mobiles Breitband**

   Hinsichtlich der Lokalisierung der Fahrzeuge ist für einen störungsfreien Betrieb im jeweiligen Einsatzgebiet eine hohe Netzabdeckung von GPS und mobilem Breitband erforderlich.

Hinsichtlich der **Fahrgastnachfrage** auf der Strecke lassen sich zwei weitere Merkmale ableiten:

8. **Nachfragevolumen**

   Angesichts der beschränkten Fahrgastkapazität der Fahrzeuge ist eine Strecke zu wählen, auf der die Nachfrage ebenfalls eher gering ist und vom Fahrzeug abgedeckt werden kann.

9. **Verteilung der Nachfrage über den Tag**

   Im Optimalfall ist die Fahrgastnachfrage auf der Strecke gleichmäßig über den Tag verteilt. Eine hohe Nachfrage zu Stoßzeiten kann nicht nur aufgrund der geringen Fahrgastkapazität, sondern auch bedingt durch die geringe Geschwindigkeit und den damit einhergehenden langen Wartezeiten nicht abgedeckt werden.

Diese Merkmalsliste dient insbesondere zur Beurteilung individueller Einsatzgebiete. Allgemeine Anwendungsgebiete, wie zum Beispiel ein Pendelverkehr bei Großveranstaltungen, kann nicht mithilfe der erarbeiteten Merkmale vollumfänglich beurteilt werden. Es gilt zu beachten, dass bei unterschiedlichen Einsatzgebieten für den gleichen Anwendungsfall die Merkmale anders ausgeprägt sein können.

6.5 Analyse ausgewählter Use-Cases für die erste und letzte Meile

Bei der ersten und letzten Meile handelt es sich um den Teil der Reise, bei der die Fahrgäste vom Startpunkt aus zur nächstgelegenen Verkehrsanbindung oder umgekehrt von der letzten Verkehrsanbindung zu ihrem Ziel befördert werden. Solch ein Angebot steigert die Attraktivität des ÖPNVs und ermöglicht insbesondere mobilitätseingeschränkten Personen den Zugang zu öffentlichen Verkehrsmitteln. Automatisiert fahrende Shuttlebusse können hier als sichere und praktische Lösung dienen.

In dieser Analyse werden ausgewählte Anwendungsfälle (siehe Tabelle 10) für die erste und letzte Meile hinsichtlich der Eignung für den Einsatz von automatisiert fahrenden Shuttlebussen untersucht. Der Fokus bei der Untersuchung liegt darauf, welche Vorteile durch einen derartigen Betrieb im jeweiligen Anwendungsfall entstehen und inwiefern sich die Anwendungsfälle für den Einsatz der Fahrzeuge eignen. Die vorab erarbeitete Merkmalsliste wird nachfolgend nur im Zusammenhang mit einem konkreten Fallbeispiel vollständig aufgeführt, da die Merkmalsausprägungen je nach individuellem Einsatzgebiet stark variieren können.

Use-Case-Cluster	Anwendungsbeispiel
Quartierserschließung	Wohngebiete, ländliche Randgebiete
Hop-on/Hop-off-Anbindung	Innenstädte, Outlet Center, etc.
Erschließung von Gewerbegebieten	Mobility Hubs, Transport von der letzten Bushaltestelle zu den einzelnen Firmengeländen
Pendelverkehr bei Großveranstaltungen	Konzerte, Sportveranstaltungen, etc.

Tabelle 10: Ausgewählte Anwendungsfälle zur Analyse hinsichtlich eines Betriebs automatisiert fahrender Shuttlebusse.

6.5.1 Quartierserschließung

Die Analyse für die Quartierserschließung wird nachfolgend am Beispiel des Neubaugebiets an der Bernhard-Hülsmann-Kaserne in Iserlohn aufgeführt. Zunächst wird das Gebiet vorgestellt, um daraufhin eine Bewertung der Eignung für den Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse abzugeben.

Beschreibung des Neubaugebiets Bernhard-Hülsmann-Kaserne

Die ehemalige Bernhard-Hülsmann-Kaserne wurde bis in die neunziger Jahre als Fachschule der Luftwaffe genutzt und ist bisher nur teilweise bebaut. Das etwa 10 ha große ausgewiesene Wohngebiet im Bebauungsplan Nr. 215 „Bernhard-Hülsmann-Weg“ (siehe Abbildung 41) ist bisher noch unbebaut. Der Bebauungsplan zeigt die derzeitige Planung zur Schaffung eines Neubaugebiets (Stand 25.01.2023) auf. Neben zwei Quartiersgaragen mit insgesamt rund 350 Stellplätzen sind zusätzlich optional zwei Mobilitätshubs vorgesehen.

Abbildung 41: Städtebauliches Konzept: 3. Änderung des Bebauungsplans Nr. 215 »Bernhard-Hülsmann-Weg« (Stand: 25.01.2023).

Im ersten Bauabschnitt (siehe Abbildung 42) ist eine Bebauung von rund 60 Wohnungen vorgesehen, wobei der Großteil für seniorenorientiertes oder Mehr-Generationen-Wohnen angedacht ist. Ein dreigeschossiges Gebäudeensemble mit bis zu 50 Seniorenwohnungen soll im Westen der Max-Planck-Straße entstehen. Östlich der Max-Planck-Straße sollen Einzel- und Doppelhäuser errichtet werden.

Abbildung 42: Erster Bauabschnitt im Neubaugebiet „Bernhard-Hülsmann-Weg“.

Bei der Schaffung dieses Neubaugebiets wurden unter anderem folgende Ziele gesetzt:

- Errichtung von Ein- und Mehrfamilienhäusern zur Schaffung eines vielfältigen Wohnraums.
- Barrierefreies Leben innerhalb des Neubaugebiets.
- Energieoptimierte und klimaangepasste Siedlung.
- Unterschiedliche Mobilitätsangebote und kurze Wege.
- Errichtung einer öffentlichen grünen Infrastruktur.[19]

[19] https://www.stadtprojekt.com/projekte/alle-projekte/waldstadtquartier.php, abgerufen am: 04.04.2023

Merkmalsausprägungen im Quartier

Auf Grundlage der bisherigen Planung lassen sich folgende Merkmalsausprägungen in dem Neubaugebiet ableiten:

Merkmale	**Ausprägung**
Streckenlänge + Steigung	- Geringe Steigungen - Kurze Streckenlängen innerhalb des Neubaugebiets
Max. Geschwindigkeit auf der Strecke	- Tempo-30-Zone
Verkehrsführung	- Zum derzeitigen Zeitpunkt können keine genauen Angaben zur Verkehrsführung getroffen werden - Grundsätzlich gilt die Regel „rechts vor links“ - Keine Ampeln und voraussichtlich keine Kreisverkehre
Verkehrsaufkommen	- Erhöhtes Verkehrsaufkommen zu Stoßzeiten morgens und abends - Über den Tag verteilt eher geringes Verkehrsaufkommen
Straßenbreite	- Moderate Straßenbreite
Vegetation	- Vegetation vorhanden
Nachfragevolumen	- Mäßiges Nachfragevolumen
Verteilung der Nachfrage über den Tag	- Werktags höhere Nachfrage morgens und abends aufgrund von Berufstätigen, Studenten und Schülern - Am Wochenende verteilt sich die Nachfrage über den Tag - Voraussichtlich nachts am Wochenende eine geringe Nachfrage
Netzabdeckung GPS + mobiles Breitband	- Gute Netzabdeckung von GPS und mobilem Breitband

Tabelle 11: Merkmalsausprägungen im Neubaugebiet an der Bernhard-Hülsmann-Kaserne in Iserlohn.

Trotz voraussichtlich ausgeprägter Vegetation und Kreuzungen, an denen die Regel „rechts vor links“ gilt, sind die Bedingungen der Strecke für den Betrieb von automatisiert fahrenden

Shuttlebussen als gut zu bewerten. Ein regelmäßiger Grünschnitt wird unter Umständen notwendig sein, kann aber zum derzeitigen Stand noch nicht abschließend beurteilt werden. Die Fläche des Gebiets weist eine Größe auf, die gut von den Fahrzeugen bedient werden kann. Dadurch entstehen nur kurze Fahrtzeiten innerhalb des Quartiers. Quartiersgaragen (siehe Abbildung 43) sorgen dafür, dass Straßen zum Großteil frei von parkenden Autos sind und somit tendenziell weniger Störungen aufgrund falsch parkender Fahrzeuge entstehen.

Abbildung 43: Übersicht von vereinzelten Stellplätzen für private Fahrzeuge innerhalb des Quartiers aus dem städtebaulichen Konzept (Stand: 25.01.2023).

Vorteile eines Betriebs automatisiert fahrender Shuttlebusse

An Mobilitätshubs in der Nähe der Quartiersgaragen könnten die Shuttlebusse eingesetzt werden, um Anwohner zu ihren einzelnen Wohnungen zu befördern und somit den Verkehr im Quartier zu entlasten. Der batterielektrische Antrieb der Fahrzeuge unterstützt das Vorhaben eines energieoptimierten und klimaangepassten Quartiers. Es werden weniger Emissionen verursacht und die Luft innerhalb der Siedlung wird rein gehalten. Ein On-Demand Betrieb trägt zur Flexibilität bei, sodass die Fahrzeuge auf Anfrage gebucht werden können und dadurch keine unnötigen Haltestellen angefahren werden müssen. Hierbei besteht die Möglichkeit, die automtaisiert fahrenden Shuttlebusse je nach Betriebsart direkt zur eigenen Haustür oder zu unterschiedlichen virtuellen Haltestellen anzufordern. Ein Ansatz zur Attraktivitätssteigerung des generellen ÖPNV-Angebots stellt eine zusätzliche

Verbindung zu einem ÖPNV-Knotenpunkt dar, von dem aus die Anwohner einen direkten Anschluss zum Linienverkehr erhalten. Somit wird ein Anschluss sowohl zu den privaten Fahrzeugen in den Quartiersgaragen, als auch zum regulären ÖPNV gewährleistet. Insbesondere mobilitätseingeschränkte Personen erhalten einen einfacheren Zugang zum ÖPNV, da hiedruch lange Fußwege entfallen. Unter Anbetracht der Planung Seniorenwohnungen in diesem speziellen Quartier zu errichten, steigert ein solches Angebot zusätzlich die Attraktivität.

6.5.2 Hop-on/Hop-off-Anbindung

Hop-on/Hop-off-Anbindungen funktionieren nach dem Prinzip, dass Fahrgäste an einer beliebigen Haltestelle aussteigen können und später wieder die Möglichkeit haben, in einem anderen Bus die Reise fortzusetzen. Mit den gekauften Tickets stehen ihnen unbegrenzte Fahrten für einen oder mehrere Tage zur Verfügung. Die Busse fahren dabei auf einer kreisförmigen fixen Route und halten an festen Haltestellen. Insbesondere in Großstädten wird eine solche Anbindung angeboten, bei der die Sehenswürdigkeiten der Stadt abgefahren werden.[20]

Aktuell findet man Hop-on/Hop-off Anbindungen demnach häufig in sehr touristischen Städten vor. Die Kunden sind Touristen, die das Bedürfnis haben, die Stadt und ihre Sehenswürdigkeiten zu erkunden. In solchen Einsatzgebieten herrscht grundsätzlich ein hohes Personen- und Verkehrsaufkommen, sodass hier keine optimalen Bedingungen für den Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse gegeben sind. In Gebieten mit einem mäßigen Tourismus hingegen, bei dem eine über den Tag hindurch relativ gleichbleibende Nachfrage besteht, bietet sich eine Integration dieser Fahrzeuge für Sightseeing-Touren an. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Orte zu befahren, die aufgrund der Fahrzeuggröße von regulären Bussen nicht erschlossen werden können. Durch ein aktives Werben für den Einsatz der innovativen automatisiert fahrenden Shuttlebusse kann zusätzlich das Interesse der Touristen erhöht werden. Auf der anderen Seite beschränkt sich das Einsatzgebiet aufgrund der geringen Maximalgeschwindigkeit der Fahrzeuge auf nur kleinere Gebiete. Infolgedessen kann es vorkommen, dass nicht alle Sehenswürdigkeiten der Stadt abgefahren werden können. Demnach sollte auch hier der Einsatz automatisiert fahrender Shuttlebusse vorab gut geplant und analysiert werden. Herauszuarbeiten ist dabei, inwiefern das Gebiet hierfür geeignet ist und wie man die Fahrzeuge darin effektiv einsetzen kann.

Neben diesen klassischen Hop-on/Hop-off Anbindungen, bei denen Busse an zentralen Punkten und Sehenswürdigkeiten verkehren und den Fahrgästen ermöglichen, an

[20] https://www.stadtrundfahrt.com/hopon-hopoff/, abgerufen am: 28.02.2023

verschiedenen Haltestellen ein- und auszusteigen, können weitere Ansätze mit automatisiert fahrenden Shuttlebussen verfolgt werden.

Ein weiterer Ansatz könnte so aussehen, dass Fahrgäste mit automatisiert fahrenden Shuttlebussen von Knotenpunkten des ÖPNVs in Zentrumnähe zu unterschiedlichen Gebieten des Stadtzentrums befördert werden. Auch Park & Ride Lösungen, bei denen die Fahrzeuge zwischen dezentral gelegenen Parkplätzen und dem Stadtzentrum eingesetzt werden, sind vorstellbar.

6.5.3 Erschließung von Gewerbegebieten

In Gewerbegebieten entsteht zumeist ein hoher Flächenverbrauch für Parkplätze durch individuell anreisende Arbeitnehmer. Gleichzeitig werden Gewerbegebiete oft nicht vollständig vom ÖPNV erschlossen. Als Lösung für diese beiden Aspekte kann ein Einsatz von automatisiert fahrenden Shuttlebussen dienen.

Mit dem ÖPNV angereiste Mitarbeiter werden dabei an der letzten Haltestelle vor dem Gewerbegebiet von den automatisiert fahrenden Shuttlebussen zu den einzelnen Firmengeländen befördert. Daraus resultierend wird der ÖPNV insgesamt attraktiver gestaltet, da Linienbusse keine unnötigen Umwege ins Gewerbegebiet fahren müssen. Somit entstehen für Fahrgäste mit einem Beförderungsziel außerhalb des Gewerbegebiets kürzere Fahrtzeiten. Das Errichten von Mobility Hubs dient sowohl als Lösungsansatz für Arbeitnehmer, die mit öffentlichen Verkehrsmitteln anreisen, als auch für individual Anreisenden. Von diesem zentralen Standort aus werden alle Mitarbeiter zu den einzelnen Firmengeländen transportiert. Dies führt dazu, dass Unternehmen deutlich weniger Fläche für Parkplätze verbrauchen müssen. Der getaktete Verkehr der einzelnen Shuttlebusse im Gewerbegebiet trägt zusätzlich zur Entlastung des Verkehrsaufkommens bei.

Aufgrund des zumeist hohen Aufkommen an LKWs in Gewerbegebieten, sind breitere Fahrbahnen erforderlich. Dies stellt eine gute Voraussetzung für einen effizienten Betrieb von automatisiert fahrenden Shuttlebussen dar. Das hohe Personenaufkommen werktags zu den unterschiedlichen Schichtbeginnen und -enden der Mitarbeiter könnte hingegen negative Auswirkungen auf den Betrieb haben. Insbesondere bei der Errichtung von Mobility Hubs muss mit einer hohen Nachfrage zur Beförderung gerechnet werden. Je nach Größe des Gewerbegebiets bietet es sich an, mehrere Shuttlebusse einzusetzen. Um höhere Nachfragen abdecken zu können, ist es sinnvoll, eine Belegung der fünf Stehplätze im Shuttlebus anzustreben. Ob dies umsetzbar ist, hängt jedoch von der Strecke und rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Ein hohes Verkehrsaufkommen zu diesen Zeiten könnte ebenfalls einen Störfaktor für den Betrieb darstellen.

Um trotz hohen Verkehrsaufkommen einen effizienten Betrieb zu gewährleisten, kann bereits bei der Errichtung von neuen Gewerbegebieten der Einsatz solcher Fahrzeuge von Anfang an mitgedacht und geplant werden. So kann unter Berücksichtigung der verschiedenen Merkmale auf der Strecke eine passende Infrastruktur von vorn herein geschaffen werden.

6.5.4 Pendelverkehr bei Großveranstaltungen

Die Eignung von automatisiert fahrenden Shuttlebussen für den Pendelverkehr bei Großveranstaltungen hängt stark von der Veranstaltung und den jeweiligen Anforderungen ab. Bei Veranstaltungen wie beispielsweise Konzerten oder Sportveranstaltungen kommt es zu einer hohen Anzahl an Fahrgästen, die zu bestimmten Stoßzeiten zum Veranstaltungsgelände hin- und wieder zurückbefördert werden müssen. Eine maximale Fahrgastkapazität von sechs Personen könnte dabei eine Herausforderung darstellen und zu Überlastungen oder langen Wartezeiten führen. In einem solchen Fall müsste dementsprechend die Anzahl der Shuttlebusse angepasst werden. In Bezug zur Effizienz und Wirtschaftlichkeit muss an dieser Stelle abgewägt werden, ob ein Einsatz von Fahrzeugen mit einer erhöhten Fahrgastkapazität zielführender ist. Hierbei sollte auch die ausgewählte Strecke berücksichtigt werden.

Fermer stellt das hohe Verkehrsaufkommen einen zu berücksichtigen Faktor dar, da die Fahrzeuge nicht in der Lage sind, unerwartete Hindernisse zu erkennen und auf diese zu reagieren. Dies könnte zur Konsequenz haben, dass unnötige Notstopps ausgelöst werden oder das Fahrzeug vor Hindernissen stehen bleibt. Deshalb ist es wichtig, dass die Infrastruktur auf den Einsatz dieser Fahrzeuge ausgelegt ist und das Verkehrsmanagement Maßnahmen trifft, um einen effizienten und sicheren Betrieb zu garantieren.

Bessere Voraussetzungen für den Einsatz automatisierter Shuttlebusse stellen Veranstaltungen dar, bei denen sich die Nachfrage zur Personenbeförderung über den Tag gleichmäßig verteilt. Die Anzahl der Shuttlebusse kann auf einem konstanten Niveau gehalten werden, sodass Überlastungen und lange Wartezeiten entfallen. Zusätzlich wirkt sich die geringe maximale Fahrgastkapazität weniger problematisch auf den Betrieb aus. Auch das Verkehrsaufkommen ist hierdurch gleichmäßig über den Tag verteilt, sodass es tendenziell zu weniger unerwarteten Hindernissen kommt. Dennoch empfiehlt es sich, Maßnahmen bezüglich des Verkehrs und der Infrastruktur in Bezug zum Einsatz dieser Fahrzeuge zu treffen.

Schlussendlich kann festgehalten werden, dass beim Betrieb von automatisiert fahrenden Shuttlebussen als Pendelverkehr bei Großveranstaltungen spezielle Anforderungen berücksichtigt und entsprechende Maßnahmen zur Sicherheit und Effizienz getroffen werden

müssen. Großveranstaltungen, bei denen zu Stoßzeiten ein hohes Personenaufkommen auftritt, gehen grundsätzlich mit größeren Herausforderungen einher. In diesem Fall sollten weitere Lösungen zur Personenbeförderung mit in Anbetracht gezogen werden. Veranstaltungen mit einer über den Tag gleichmäßig verteilten Nachfrage sind hingegen grundsätzlich besser für den Einsatz dieser Fahrzeuge geeignet.

6.5.5 Fazit

Die Analyse der einzelnen Anwendungsgebiete für den Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse im ÖPNV zeigt auf, dass die Fahrzeuge sinnvoll eingesetzt werden können, wenn bestimmte Anforderungen erfüllt sind. Die auf Grundlage der eingesetzten Fahrzeugtechnologie erstellte Merkmalsliste ermöglicht die Identifikation geeigneter Strecken für den Einsatz der Fahrzeuge. Somit kann eine geeignete Einschätzung der Tauglichkeit des jeweiligen Einsatzgebietes getroffen und ggfs. Maßnahmen zur Gewährleistung eines störungsfreien Betriebs vorab geplant werden.

Mithilfe automatisiert fahrender Fahrzeuge können bisher vom ÖPNV nicht erfasste Gebiete erschlossen werden, wodurch ein attraktiveres Angebot für Fahrgäste entstehen kann. Dies führt tendenziell zu einer gesteigerten Nachfrage im Gesamtsystem ÖPNV, was zu positiven Effekten bezüglich der Wirtschaftlichkeit führen kann.

6.6 Geschäftsmodelle zur Erzielung weiterer Ergebnisbeiträge rund um den eigentlichen Shuttle-Betrieb

Ein Betrieb von automatisiert fahrenden Shuttlebussen im ÖPNV hat das Potenzial, das Mobilitätsangebot zu verbessern und neue Angebote zu schaffen. Im folgenden Abschnitt werden zwei Geschäftsmodelle vorgestellt, die im Zusammenhang mit dem Einsatz automatisiert fahrender Shuttlebusse entwickelt werden könnten.

6.6.1 Integration weiterer Dienstleistungen

Diese Art von Geschäftsmodell zielt darauf ab, Versand- und Lieferdienstleistungen in den ÖPNV zu integrieren, um somit eine neue Einnahmequelle zu schaffen und gleichzeitig das Verkehrsaufkommen auf den Straßen zu senken. Diesem Ansatz steht auch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) offen gegenüber. Sie haben sich als Ziel gesetzt, die hohe Schadstoff- und Lärmbelastung in Städten zu senken und gleichzeitig

die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss zu verbessern.[21] Insbesondere die Kombination aus Personen- und Gütertransport innerhalb eines automatisierten Betriebs könnte in diesen Belangen seinen Teil dazu beitragen. Für die erfolgreiche Umsetzung sind jedoch einige technische Voraussetzungen, Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Betriebs sowie der Akzeptanz der Fahrgäste und Kunden, an denen die Ware geliefert wird, zu berücksichtigen.

Das Projekt „TaBuLa-LOG“ hat diese Art Geschäftsmodell in der Praxis im öffentlichen Raum in Lauenburg/Elb untersucht und erforscht. Dabei ist neben automatisiert fahrenden Shuttlebussen ein Lieferroboter, welcher die erste Meile vom Postlager zum Shuttlebus und die letzte Meile vom Shuttlebus zur Lieferadresse bewältigt, für den Versand interner behördlicher Post eingesetzt worden.[22] Vor der Inbetriebnahme müssen Sicherheitsanalysen durchgeführt, eine Ausnahmegenehmigung für den Betrieb von Lieferrobotern im öffentlichen Raum beantragt und zusätzlich infrastrukturelle Maßnahmen durchgeführt werden. Dazu zählen z.B. der Bau eines Unterstands und zusätzlicher Ladeinfrastruktur und ein Ausbau von barrierefreien Wegen und Haltestellen. Zur Kommunikation zwischen Fahrzeug, Mensch und Infrastruktur kann eine WLAN- und Bluetooth-Verbindung genutzt werden. Zusätzlich ist weiterhin eine gute Abdeckung des Mobilfunknetzes und eine genaue Satellitenortung für einen stabilen automatisierten Betrieb notwendig. Die Kosten für einen solchen Betrieb sind im Verhältnis zum Nutzen aufgrund von niedrigem Automatisierungsgrad und fehlender Serienproduktion sehr hoch. Somit ist zum aktuellen Zeitpunkt kein wirtschaftlicher Betrieb realisierbar. Die Akzeptanz der Fahrgäste muss genauso wie beim regulären Betrieb automatisiert fahrender Shuttlebusse im ÖPNV weiter gesteigert werden. Durch eine Fahrgastbefragung im Projekt Tabula-LOG konnten die Erkenntnisse erzielt werden, dass eine grundsätzlich positive Grundeinstellung vorliegt, aber weiterhin Bedenken beim Wegfall der Begleitperson vorhanden sind.[23] Als Handlungsempfehlungen für den automatisierten und gemeinsamen Transport von Personen und Gütern werden Verbesserungen der Wetterfestigkeit und Fahrstabilität sowie ein modularer Transportaufbau aufgeführt. Für einen flexiblen Einsatz der Tramsportroboter ist ein ausreichender Betriebsradius erforderlich, sodass Baustellen und Hindernisse den Gütertransport nicht behindern. Bezüglich des Genehmigungsverfahrens fehlen derzeitig standardisierte rechtliche Rahmenbedingungen, welche die Einführung eines solchen Betriebs erleichtern könnten.

[21] https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/warentransport-via-oepnv.html, abgerufen am: 21.02.2023
[22] https://www.tabulashuttle.de/tabula-log/, abgerufen am: 13.02.2023
[23] Vgl. Gertz, C., Kreutzfeldt, J., Flämig, H., Hinckeldeyn, J., Maaß, J. B., Grote, M., Tjaden, S., Thiel, M., Schrick, M., Stargardt, J., Michelmann, H., Wolf, J., Böckler, L., Rosenberger, K., Blunder, N. M., Ziegenbein, J., Purgander, J., Lohse, J., & Weber, L. (2022), S. 134 f. *Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG*. TUHH Universitätsbibliothek. https://doi.org/10.15480/882.4536

Wie auch in dieser Arbeit bereits aufgeführt, wird eine Softwareschnittstelle als erforderlich betrachtet.[24]

Neben dem Transport von Post sind unterschiedliche Use-Cases für die Integration von Dienstleistungen in den ÖPNV mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen vorstellbar. Lebensmitteleinkäufe könnten beispielsweise innerhalb eines bestimmten Gebiets von solchen Robotern durchgeführt, bzw. vorgepackte Einkäufe abgeholt werden und dann innerhalb von automatisiert fahrenden Shuttlebussen im ÖPNV transportiert und zum Auftraggeber des Einkaufs hingebracht werden. Weitere mögliche Anwendungsfälle sind Medikamentenlieferungen, Essensbestellungen oder ein Einsatz in der Quartierslogistik.[25] Unabhängig von einem automatisierten Betrieb wird in dem Projekt „UCKER Warentakt“ ein Transportdienst für Bücher aus regionalen Buchhandlungen durch Linienbusse in der Uckermark angeboten. Der Kunde hat dabei die Möglichkeit, telefonisch oder per E-Mail in ausgewählten Buchhandlungen Bücher zu bestellen, welche per zu einem Landhandel in einer kleinen Gemeinde geliefert werden. Hier kann die Ware daraufhin vom Kunden abgeholt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Hermes-Retouren an ausgewählten Bushaltestellen direkt beim Busfahrer abzugeben.[26]

In Anbrecht eines klassischen Linienverkehrs, ist ein Einsatz größerer Flotten sinnvoll, damit der Lieferroboter im Anschluss an der nächstgelegenen Haltestelle vom ursprünglichen Lieferziel von einem anderen Shuttlebus wieder eingesammelt und transportiert werden kann. Dadurch entstehen keine zusätzlichen Wartezeiten, bei denen auf den Lieferroboter gewartet werden muss, bis er sich wieder an der Haltestelle befindet. Solch ein Einsatz der Fahrzeuge könnte ebenfalls auf den Einzelhandel in einzelnen Städten ausgeweitet werden. Perspektivisch bietet dieses Geschäftsmodell Potenzial für einen wirtschaftlicheren Betrieb von automatisiert fahrenden Fahrzeugen und kann gleichzeitig dafür sorgen, das Verkehrsaufkommen zu senken und die Sicherheit zu steigern.

6.6.2 Einbezug des Einzelhandels bei Fahrten in Innenstädten oder Einkaufszentren

Aufgrund der geringen Größe der automatisiert fahrenden Shuttlebusse ist ein Betrieb in Fußgängerzonen in Innenstädten grundsätzlich vorstellbar. Dies würde Fahrgästen die Möglichkeit bieten, innerhalb des Stadtzentrums zwischen verschiedenen Einzelhändlern

[24] Vgl. Gertz, C., Kreutzfeldt, J., Flämig, H., Hinckeldeyn, J., Maaß, J. B., Grote, M., Tjaden, S., Thiel, M., Schrick, M., Stargardt, J., Michelmann, H., Wolf, J., Böckler, L., Rosenberger, K., Blunder, N. M., Ziegenbein, J., Purgander, J., Lohse, J., & Weber, L. (2022), S. 138 ff. *Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG*. TUHH Universitätsbibliothek. https://doi.org/10.15480/882.4536

[25] Vgl. Gertz, C., Kreutzfeldt, J., Flämig, H., Hinckeldeyn, J., Maaß, J. B., Grote, M., Tjaden, S., Thiel, M., Schrick, M., Stargardt, J., Michelmann, H., Wolf, J., Böckler, L., Rosenberger, K., Blunder, N. M., Ziegenbein, J., Purgander, J., Lohse, J., & Weber, L. (2022), S. 120. *Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG*. TUHH Universitätsbibliothek. https://doi.org/10.15480/882.4536

[26] https://uckerwarentakt.de/, abgerufen am: 20.05.2023

befördert zu werden. Sobald sich die Fahrzeuge in der Nähe des Ladenlokals unterschiedlicher Einkaufsgeschäfte befinden, könnte entsprechende Werbung mit zum Teil aktuellen Angeboten auf verschiedenen Displays im Innenraum präsentiert werden. Die Finanzierung geschieht hierbei über Verträge mit den verschiedenen Einzelhändlern, die für die Werbung in den Fahrzeugen bezahlen. Alternativ oder zusätzlich besteht die Möglichkeit in Kooperation mit den Einzelhändlern, die Ticketkosten für die Fahrt mit den Shuttlebussen als Gutschein zur Einlösung in den verschiedenen Ladenlokalen zu nutzen, sodass dem Fahrgast der Ticketpreis für die Personenbeförderung wieder gutgeschrieben wird. Für ein solches Geschäftsmodell ist zum derzeitigen Stand eine Anpassung der Innenraumausstattung der Shuttlebusse mit großen Displays zum Anzeigen von Werbung notwendig. Um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, sollten hier insbesondere die in Gliederungspunkt 6.4 genannten Merkmale für eine gute Integration der Fahrzeuge in einem bestimmten Einsatzgebiet berücksichtigt werden.