

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Endbericht des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus

Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz, Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig, Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn, Jacqueline Maaß, Hannes Piepenbrink, Christopher Rahlf, Yousuf Dinar, Ineke Jäger, Ole Röntgen, Justin Ziegenbein, Noel Blunder, Marko Thiel, Jana Purgander, Sean Maroofi, Hendrik Rose, Philipp Braun, Holger Michelmann, Julia Wolf, Daniela Schneider, Abhishek Yadav, Dr. Phoebe Kuhn, Dr. Christian Barz, Dr. Immanuel Bayer, Sonja Strothmann



## **Bibliografische Informationen**

TUHH Universitätsbibliothek.

DOI 10.15480/882.15021

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0).

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten  
sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

## **IMPRESSUM**

### **Herausgeber**

Technische Universität Hamburg (TUHH),  
Institut für Verkehrsplanung und Logistik – W8  
Am Schwarzenberg-Campus 3, 21073 Hamburg  
<https://www.tuhh.de/vpl>  
Telefon +49 40 30601-3519

### **Satz & Layout**

Nadia Nabaoui-Engelhard, W8

### **Titelbild**

DREHGUT (links), Marko Thiel (rechts)

### **Fotos und Grafiken**

Wird keine Quelle angegeben, handelt es sich um eigene  
Darstellungen und Fotos.

Hamburg, 22.12.2025

## **Endbericht des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus**

Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn<sup>2</sup>,  
Jacqueline Maaß<sup>1</sup>, Hannes Piepenbrink<sup>1</sup>, Christopher Rahlf<sup>1</sup>, Yousuf Dinar<sup>1</sup>,  
Ineke Jäger<sup>1</sup>, Ole Röntgen<sup>1</sup>, Justin Ziegenbein<sup>2</sup>, Noel Blunder<sup>2</sup>, Marko Thiel<sup>2</sup>,  
Jana Purgander<sup>2</sup>, Sean Maroofi<sup>2</sup>, Hendrik Rose<sup>2</sup>, Philipp Braun<sup>2</sup>,  
Holger Michelmann<sup>3</sup>, Julia Wolf<sup>3</sup>, Daniela Schneider<sup>3</sup>, Abhishek Yadav<sup>3</sup>,  
Dr. Phoebe Kuhn<sup>4</sup>, Dr. Christian Barz<sup>4</sup>, Dr. Immanuel Bayer<sup>4</sup>, Sonja Strothmann<sup>4</sup>

2025

### **Forschungsvorhaben**

Smarte Leitstelle für automatisierte Transportroboter  
und Busse in der Stadt Lauenburg/Elbe – TaBuLa-LOGplus

### **Zuwendungsempfängerinnen**

Technische Universität Hamburg (TUHH), Interlink GmbH, Palaimon GmbH

### **Förderung**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde anteilig mit  
Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)  
gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung  
liegt bei den Autor\*innen.

### **Förderkennziffer**

45AVF3003A-C

### **Volumen des Forschungsvorhabens**

2.455.777,34 Euro (davon 2.329.813,18 Euro Förderanteil durch das BMDV)

### **Laufzeit des Forschungsvorhabens**

04/2022–12/2024

### **Unter Mitarbeit von**

Yevgen Blank<sup>2</sup>, Liss Böckler<sup>3</sup>, Ingo Gierke<sup>5</sup>, Dr. Johannes Hinkeldeyn<sup>6</sup>,  
Ellahe Khosravi<sup>2</sup>, Daniela Müller<sup>3</sup>, Benjamin Plate<sup>7</sup>, Laura Porsche<sup>1</sup>,  
Matthias Renz<sup>2</sup>, Manuel Schrick<sup>2</sup>, Julia Stargardt<sup>8</sup>, Marcel Steffen<sup>1</sup>,  
Linsey Stohr<sup>3</sup>, Dr. Sandra Tjaden<sup>1</sup>

1 Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Technische Universität Hamburg

2 Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg

3 Interlink GmbH

4 Palaimon GmbH

5 Yunex GmbH

6 KION Group

7 Stadt Lauenburg/Elbe

8 Kreis Herzogtum Lauenburg

**TUHH**

 **Interlink**

 **palaimon.io**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## INHALT

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>15</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>16</b>
<b>1 Rahmen des Forschungsvorhabens</b> .....	<b>17</b>
1.1 Vorhabensbeschreibung und Zielsetzung .....	17
1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....	20
1.2.1 Vorgängervorhaben.....	20
1.2.2 Stakeholder*innen .....	21
1.2.3 Änderung des ursprünglichen Antrags .....	22
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	22
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	23
1.4.1 Zur Durchführung des Vorhabens genutzte Konstruktionen, Verfahren, Schutzrechte, Daten und Software .....	23
1.4.2 Verwendete Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste .....	24
1.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	24
1.6 Zusammenarbeit mit weiteren externen Stellen außerhalb des Konsortiums (Netzwerke, Fachcluster etc.).....	27
<b>2 Darstellung der Inhalte des Forschungsvorhabens</b> .....	<b>28</b>
2.1 Konzeptionierung der Leitstelle .....	28
2.1.1 Identifikation der Praxisanforderungen an eine Leitstelle .....	29
2.1.2 Konzeption Leitstelle/Technische Aufsicht.....	29
2.1.3 Datenschutz und -sicherheit.....	32
2.1.4 Schnittstellenmanagement.....	34
2.1.5 Betriebskonzept.....	37
2.2 Implementierung und Erprobung der Leitstelle sowie KI-basierte Optimierung .....	40
2.2.1 Implementierung und Erprobung der Leitstelle .....	40
2.2.2 KI-basierte Optimierung .....	56
2.3 Fahrzeugentwicklung, Algorithmik und Vernetzung .....	61
2.3.1 Roboterentwicklung und KI-basierte Umfelderkennung .....	61

2.3.2	Einbindung von Bussen in die Leitstelle .....	74
2.3.3	Erprobung Roboter und KI-basierte Umfelderkennung .....	80
2.4	Sicherheitsnachweise und Ausnahmegenehmigungen.....	88
2.4.1	Ausgangssituation und rechtlicher Kontext .....	88
2.4.2	Erweiterung der Funktions- und Systembeschreibung .....	89
2.4.3	<i>Operation Scenarios</i> und <i>Operational Design Domain</i> .....	90
2.4.4	Gefährdungs- und Risikoanalysen .....	90
2.4.5	Cybersicherheit .....	91
2.4.6	Sicherheitsanalysen.....	92
2.4.7	Weiterentwicklung des Sicherheitskonzepts .....	92
2.4.8	Verifikation und Validierung.....	93
2.4.9	Begutachtung und Ausnahmegenehmigungen.....	93
2.5	Testfeldbetrieb .....	94
2.5.1	Testbetrieb 1 (22.07.24–24.07.24).....	94
2.5.2	Testbetrieb 2 (23.09.24–25.09.24).....	97
2.5.3	Testbetrieb 3 (14.10.24–17.10.24).....	98
2.5.4	Test der Leitstellenoberfläche aus Sicht der Betreibenden .....	99
2.6	Simulation.....	101
2.6.1	Methodik .....	102
2.6.2	Aufbau der Simulation.....	108
2.6.3	Szenarien .....	109
2.6.4	Ergebnisse .....	112
2.6.5	Schlussfolgerung.....	117
2.7	Wirkungsabschätzungen .....	117
2.7.1	Konzept zur Wirkungsabschätzung .....	117
2.7.2	Wirkungen im Verkehrssystem .....	119
2.7.3	Ökologische und gesellschaftliche Wirkungen.....	123
2.7.4	Ökonomische Wirkungen und Vermeidungskosten.....	128
2.8	Begleitforschung zum Forschungsvorhaben .....	136
2.8.1	Ex-ante-Begleitforschung .....	137
2.8.2	Begleitende Begleitforschung .....	139
2.8.3	Ex-post-Begleitforschung .....	140
<b>3</b>	<b>Tabellarische Zusammenfassung .....</b>	<b>142</b>
3.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen sowie Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	142
3.2	Abweichungen in der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung, Ursachen und Folgen für das Forschungsvorhaben .....	148
3.3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	149

<b>4</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....</b>	<b>151</b>
4.1	Konzeptionierung, Aufbau und Erprobung einer Leitstelle .....	151
4.2	Weiterentwicklung des automatisierten Transportroboters und Genehmigung .....	153
4.3	Einbindung von KI .....	153
4.4	Simulationen und Wirkungsabschätzung .....	154
<b>5</b>	<b>Darstellung des voraussichtlichen Nutzens .....</b>	<b>156</b>
<b>6</b>	<b>Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplans ....</b>	<b>157</b>
<b>7</b>	<b>Durchgeführte öffentlichkeitswirksame Maßnahmen .....</b>	<b>164</b>
7.1	Wissenschaftliche Veröffentlichungen .....	164
7.2	Veranstaltungen und Vorträge .....	165
7.3	Pressemitteilungen .....	167
7.4	Weitere öffentlichkeitswirksame Maßnahmen .....	168
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>169</b>
8.1	Ergebnisse und Zielerreichungsgrad.....	169
8.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie Limitationen des Forschungsvorhabens.....	172
8.3	Anforderungen und Handlungsempfehlungen.....	175
8.4	Ausblick.....	178
	<b>Dokumentenbezogenes Literaturverzeichnis .....</b>	<b>180</b>
	<b>Vorhabenbezogenes Literaturverzeichnis .....</b>	<b>188</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>194</b>

## Abbildungen

Abbildung 1.1:	Transportroboter Laura beim Einstieg in das Shuttle (TaBuLa-LOG) .....	21
Abbildung 2.1:	Betrachtete User*innen.....	29
Abbildung 2.2:	Systembestandteile, Schnittstellen und Informationsflüsse .....	31
Abbildung 2.3:	Visualisierung zu beachtender System-Schnittstellen .....	35
Abbildung 2.4:	Ablaufdiagramm Modell 1 .....	37
Abbildung 2.5:	Ablaufdiagramm Modell 2 .....	38
Abbildung 2.6:	Ablaufdiagramm Modell 3 .....	38
Abbildung 2.7:	Ablaufdiagramm Synchronisation.....	45
Abbildung 2.8:	Dashboard der Leitstelle .....	47
Abbildung 2.9:	Order Management der Leitstelle .....	48
Abbildung 2.10:	Roboter-Detail-Ansicht .....	51
Abbildung 2.11:	Karten-Einstellungen eines Projekts .....	52
Abbildung 2.12:	Roboter-Einstellungen eines Projekts.....	52
Abbildung 2.13:	Zonen-Einstellungen eines Projekts.....	53
Abbildung 2.14:	Experimentspezifische Einstellungen.....	54
Abbildung 2.15:	User-Management-Ansicht.....	54
Abbildung 2.16:	Ablauf des Leitstellentests .....	56
Abbildung 2.17:	Konzept für KI-basierte Optimierung der Flottenauslastung.....	57
Abbildung 2.18:	Systemübersicht.....	58
Abbildung 2.19:	Stochastische Optimierung .....	59
Abbildung 2.20:	Übersicht über die durchlaufenen ROS-Distributionen (ROS Wiki 2024) .....	64
Abbildung 2.21:	Neue Version der grafischen Nutzungsoberfläche des Roboters.....	64
Abbildung 2.22:	Darstellung der kalibrierten LiDAR- und Kamera-Daten.....	65
Abbildung 2.23:	Transportroboter in der Simulationsumgebung NVIDIA Isaac Sim .....	66
Abbildung 2.24:	Automatisierte Ausfahrt des Transportroboters aus dem Bus .....	67
Abbildung 2.25:	3D- und 2D-Erkennung und Tracking von Personen inklusive Skelett-Tracking.....	70
Abbildung 2.26:	Konzept und Module für die Roboter-Umfeldererkennung .....	71
Abbildung 2.27:	Schematische Darstellung Anomaliedetektion.....	73

Abbildung 2.28: Software-Architektur und funktionales Konzept der Busanwendung.....	76
Abbildung 2.29: Tablet und GPS-Gerät sind in der Fahrer*innenkabine beispielhaft während des Testbetriebs angebracht (Hr. Scheske, vhh.mobility) .....	79
Abbildung 2.30: Kartenansicht Busanwendung inklusive Beschreibung auf einem Microsoft Surface Pro mit 13-Zoll-Bildschirm .....	79
Abbildung 2.31: Demonstrator Hardware-Aufbau .....	81
Abbildung 2.32: Echtzeit-Versuchsmonitoring .....	81
Abbildung 2.33: Sicht auf Paula .....	82
Abbildung 2.34: MOT auf Kamerabild .....	83
Abbildung 2.35: Bildschirm mit Live-Vorschau .....	83
Abbildung 2.36: Person verfolgt Live-Vorschau der MOT-Ergebnisse .....	84
Abbildung 2.37: Objekt-Tracking einer laufenden Person draußen .....	85
Abbildung 2.38: Objekt-Tracking einer laufenden Person im Innenraum (mit zeitweiser Verdeckung der Person) .....	86
Abbildung 2.39: Darstellung der beiden betrachteten Testbereiche in Lauenburg/Elbe .....	95
Abbildung 2.40: Schwarzer und weißer Transportroboter während des Testbetriebs in Lauenburg/Elbe .....	95
Abbildung 2.41: Untersuchungsgebiet: Lauenburg/Elbe, Deutschland, erstellt in Aimsun .....	103
Abbildung 2.42: Laura, autonomer Lieferroboter .....	105
Abbildung 2.43: Szenario 0, Lieferung ausschließlich mit ADR .....	110
Abbildung 2.44: Szenarien 1a, 1b und 2, Zustellung durch intermodale verbesserte Zustellroboter unter Zuhilfenahme des ÖPNV .....	110
Abbildung 2.45: Szenario 3, Zustellung durch intermodale, verbesserte Zustellroboter; mehr Zustellorte mit mehr Fahrtabschnitten.....	111
Abbildung 2.46: Visualisierung des Konzepts zur Wirkungsabschätzung. ....	118
Abbildung 2.47: Einflussdiagramm des Untersuchungssystems .....	121
Abbildung 2.48: Exemplarische Bus- und Roboterroute für die Zustellung von vier Paketen .....	124
Abbildung 2.49: Darstellung der Szenarien zur Abschätzung der ökologischen Wirkung.....	125
Abbildung 2.50: Gesamtkosten des Dieselmotors aufgeschlüsselt nach Kategorien .....	131
Abbildung 2.51: Gesamtkosten des elektrischen Busses aufgeschlüsselt nach Kategorien.....	132
Abbildung 2.52: Gesamtkosten des Shuttles aufgeschlüsselt nach Kategorien .....	132
Abbildung 2.53: Gesamtkosten für Roboter und Leitstelle .....	134

Abbildung 2.54: Gegenseitiges Rollenverständnis .....	138
Abbildung 6.1: Standorte ergänzender Verkehrszählungen (Karte abgerufen über Google Maps) .....	157
Abbildung 6.2: Aufgenommene GPS-Koordinaten zur Simulation der Bus-Anwendung (Karte abgerufen über OpenStreetMap) .....	159
Abbildung 6.3: Terrestrischer Laserscanner, Kugel-Targets und die Scanpositionen des gesamten Scans .....	161
Abbildung 6.4: Ansicht des nördlichen Teils der gesamten Punktwolke in der Software Faro Scene .....	161

## Tabellen

Tabelle 1.1:	Übersicht Planung und Ablauf des Vorhabens.....	22
Tabelle 2.1:	Vergleich der drei Modelle des Betriebskonzepts .....	39
Tabelle 2.2:	Leitstellenausstattung bei Interlink.....	55
Tabelle 2.3:	Übersicht Testende .....	55
Tabelle 2.4:	Vergleich Roboter-PC-Upgrade .....	62
Tabelle 2.5:	Übersicht der an einem Knoten verfügbaren Actions der App.....	77
Tabelle 2.6:	Übersicht der InstantActions der Busanwendung .....	78
Tabelle 2.7:	Übersicht über die Szenarien des ersten Testbetriebs ....	96
Tabelle 2.8:	Übersicht über die Szenarien des zweiten Testbetriebs .....	97
Tabelle 2.9:	Übersicht über die Szenarien des dritten Testbetriebs ...	98
Tabelle 2.10:	Mobilitätsmuster auf der Busroute 338 aus der Feldstudie mit dem GPS-Datenlogger .....	103
Tabelle 2.11:	Annahmen für den autonomen Lieferroboter und Setup der Simulation.....	104
Tabelle 2.12:	Komponenten des Social-Force-Modells .....	107
Tabelle 2.13:	Aimsun-Eingaben, die in der ODD-Framework- Checkliste verwendet werden.....	108
Tabelle 2.14:	Liste der für diese Studie verwendeten Szenarien .....	109
Tabelle 2.15:	Komponenten der Einsteigezeit für die beiden unterschiedlichen Situationen in den Szenarien 1a, 1b und 2.....	112
Tabelle 2.16:	Reisezeit für die in den Szenarien kategorisierten Reiseabschnitte (in Sekunden) .....	113
Tabelle 2.17:	Anzahl der Stopps für ADR, kategorisiert in Szenarien ..	114
Tabelle 2.18:	Vom ADR zurückgelegte Strecken nach Szenarien .....	114
Tabelle 2.19:	Mittels ÖPNV zurückgelegte Strecken nach Szenarien ..	115
Tabelle 2.20:	Analyse der Verspätungsabweichung für Situation I .....	116
Tabelle 2.21:	Analyse der Verspätungsabweichung für Situation II ....	116
Tabelle 2.22:	Emissionsfaktoren .....	125
Tabelle 2.23:	Energieverbrauch der betrachteten Fahrzeuge .....	126
Tabelle 2.24:	THG-Emissionen der betrachteten Szenarien .....	127
Tabelle 2.25:	Annahmen für die Berechnung der Gesamtkosten .....	129
Tabelle 2.26:	Berechnung der Gesamtkosten pro Bus-Modell.....	130
Tabelle 2.27:	Berechnung der Gesamtkosten für Roboter und Leitstelle .....	133
Tabelle 2.28:	Gesamtkostenüberblick für die einzelnen Szenarien.....	134

Tabelle 3.1:	Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens A (TUHH).....	142
Tabelle 3.2:	Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens B (Interlink GmbH) .....	145
Tabelle 3.3:	Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens C (Palaimon GmbH).....	147
Tabelle 3.4:	Abweichungen in der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung .....	148
Tabelle 3.5:	Zahlenmäßiger Nachweis.....	149
Tabelle 5.1:	Wirtschaftliche Verwertung Teilvorhaben A–C .....	156
Tabelle 5.2:	Wissenschaftlich/technische Verwertung Teilvorhaben A–C.....	156
Tabelle 6.1:	Exemplarische Übersicht zu den Resultaten der Verkehrszählungen .....	158
Tabelle 6.2:	Übersicht der Zeiträume für die Verkehrszählungen ....	158
Tabelle 7.1:	Veröffentlichungen im unmittelbaren Rahmen des Forschungsvorhabens .....	164
Tabelle 7.2:	Veröffentlichungen im Umfeld des Forschungsvorhabens .....	165
Tabelle 7.3:	Vorträge .....	165
Tabelle 7.4:	Teilnahme an Veranstaltungen.....	166
Tabelle 7.5:	Pressemitteilungen .....	167

## Abkürzungsverzeichnis

ADR	Autonomous Delivery Robot (Autonomer Lieferroboter)
Äq	Äquivalent
AfA	Abschreibungstabellen
AFGBV	Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMDV	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CC-BY Standard	Creative Commons by Attribution
CSV	Comma-separated values (Dateiformat)
CQRS	Command Query Responsibility Segregation
CVPR	Computer Vision and Pattern Recognition
DDD	Domain Driven Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
EAI	External Agent Interface
EBIT	Ergebnis vor Zinsen und Steuern
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOL	End of Life
FTA	Fault-Tree-Analysis
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
gRPC	Google Remote Procedure Calls
GUI	Graphical User Interface
H	Haltestelle
HAP	Haupt-Arbeitspaket
HARA	Hazard Analysis and Risk Assessment
IL	Interlink GmbH
IMU	Inertial Measurement Unit
IP	Internet Protocol
ITL	Institut für Technische Logistik
KBA	Kraftfahrt Bundesamt
KI	Künstliche Intelligenz
KTH	Königlich Technische Hochschule
Laura	Lauenburgs Automatisierte Roboter Auslieferung
LiDAR	Light Detection And Ranging
LOG	LOGistik

LSA	Lichtsignalanlage
LVB	Leipziger Verkehrsbetriebe
MOT	Multiple Object Tracking
o. J.	Ohne Jahr
OBU	On-Board-Unit
ODD	Operational Design Domain
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PAL	Palaimon
PAP	Programmablaufplan
Paula	Palaimon-Laura
PEZ	Posteinlagerungszentrum
RA-P	Robotics and Automation Practice
REST	Representational State Transfer
ROS	Robot Operating System
RTK	Real-Time Kinematic
SA	Situational Awareness
SAE	Society of Automotive Engineers
SD-Modell	System Dynamics-Modell
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SOTIF	Safety of the Intended Functionality
SSAM	Surrogate Safety Assessment Modell
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
T	Tester*innen
TaBuLa	Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg
TaBuLa-LOG	Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg mit dem Zusatz „LOG“ für die Integration einer Logistik-Komponente in Form eines Transportroboters
TaBuLa-LOGplus	Smarte Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse in der Stadt Lauenburg/Elbe
TARA	Threat Analysis and Risk Assessment
TCO	Total Cost of Ownership
THG-Emissionen	Treibhausgasemissionen
TUHH	Technische Universität Hamburg
VDA	Verband der Automobilindustrie
VHH/vhh.mobility	Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH
VPL	Institut für Verkehrsplanung und Logistik
wDRIVE	Women for Datadriven Mobility
ZOB	Zentraler Omnibusbahnhof



## Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus baut auf den Erkenntnissen der beiden Vorgängervorhaben TaBuLa und TaBuLa-LOG auf, um die Automatisierung im Zusammenspiel von Personen- und Güterverkehr deutlich voranzutreiben. Ein zentrales Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer marken- und fahrzeugübergreifenden smarten Leitstelle, welche sowohl die von der TUHH (weiter)entwickelten automatisierten Transportroboter als auch die konventionellen Busse der vhh.mobility integriert. Dies bietet den Mehrwert einer optimalen Ressourcennutzung durch Bündelung der Transport- und Beförderungsaufgaben. Die Leitstelle erfüllt zudem die gesetzliche Anforderung, wonach das automatisierte Fahrzeug von einem Menschen jederzeit abgeschaltet werden kann. Dabei wurde das Thema Datenschutz und -sicherheit stets mitgedacht und beachtet. In Tests konnte die Leitstelle sowohl von Nutzenden mit Erfahrung als auch ohne Erfahrung zur Auftragserstellung und Überwachung der Fahrzeuge verwendet werden.

Um dieses hohe Maß an Automatisierung zu erreichen, wurden die Transportroboter so weit weiterentwickelt, dass diese selbstständig in einen konventionellen Bus ein- und aus ihm aussteigen können, um vom Leitstand übermittelte Transportaufgaben zu erledigen. Zudem wurde in TaBuLa-LOGplus das Thema künstliche Intelligenz (KI) aufgenommen. Um einen sicheren Betrieb der Transportroboter in komplexen und dynamischen Umgebungen zu gewährleisten, wurden fortschrittliche KI-Methoden zur Umfelderkennung untersucht. Ziel war es, Anomalien und potenzielle Gefahren automatisiert zu erkennen und angemessen darauf zu reagieren.

Der Einfluss der Transportroboter wurde durch begleitende Analysen, Simulationen und Abschätzungen hinsichtlich der verkehrlichen, ökologischen, ökonomischen sowie gesellschaftlichen Wirkungen untersucht. Die Analyse der verkehrlichen Wirkungen nach Vester ergab, dass das System über hochaktive und aktive Variablen bewusst gesteuert werden kann und bestimmte Wirkungsbeziehungen (z. B. Angebot und Nachfrage) zu beachten sind. Die Paketzustellung mittels Transportroboter auf der letzten Meile kann ökologische und ökonomische Vorteile bieten, sofern diese mit einem elektrisch betriebenen Bus befördert werden. Aus den ergänzenden Simulationen kann ebenfalls die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Integration autonomer Transportroboter in den öffentlichen Verkehr sicher und kosteneffizient erfolgen kann.

Insgesamt war das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus der erfolgreiche nächste Schritt der Vorgängervorhaben, da es die gewonnenen Erkenntnisse weitergeführt, weiterentwickelt und neue Rahmenbedingungen einbezogen hat.

## Abstract

The TaBuLa-LOGplus project was based on the results of the two previous projects TaBuLa and TaBuLa-LOG in order to significantly advance automation in the interaction between passenger and freight transport. A central goal of the project was the development of a manufacturer- and vehicle-independent smart control centre, which integrates both the automated transport robots further developed by TUHH and the conventional buses used by vhh.mobility. This offers the added value of optimal use of resources by bundling transport and transportation tasks. The control centre also meets the legal requirement that the automated vehicle can be shut down by a human at any time. Data protection and security were always considered and taken into account. In tests, the control centre could be used by both experienced and non-experienced users for order creation and vehicle monitoring.

To achieve this high level of automation, the transport robots were further developed to the point where they can get in and out of a conventional bus independently in order to carry out transport tasks transmitted by the control centre. Additionally, the topic of artificial intelligence (AI) was included into the TaBuLa-LOGplus project. To ensure safe operation of the transport robots in complex and dynamic environments, advanced AI methods for environment detection and situational awareness were investigated. The aim was to automatically detect anomalies and potential hazards and respond appropriately. The impact of the transport robots was investigated through accompanying analyses, simulations and assessments regarding traffic, ecological, economic and social effects. The analysis of traffic effects according to Vester showed that the system can be consciously controlled via highly active and active variables and certain causal relationships (e. g. supply and demand) must be considered. Parcel delivery using transport robots on the last mile can offer ecological and economic advantages if they are transported by an electrically powered bus. The additional simulations also lead to the conclusion that the integration of autonomous transport robots into public transport can be safe and cost-efficient.

Overall, the TaBuLa-LOGplus project was the successful next step of the previous projects, as it continued, further developed and incorporated new framework conditions.

## 1 Rahmen des Forschungsvorhabens

Das nachfolgende Kapitel bietet einen kurzen Überblick über die Ausgangsbedingungen des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus. Zuerst erfolgt eine Beschreibung des Vorhabens und der Zielsetzung. Daran anschließend werden Planung und Ablauf des Vorhabens zusammengefasst sowie der wissenschaftliche und technische Stand zu Beginn des Forschungsvorhabens dargelegt. Darauf aufbauend folgt die Darstellung der wissenschaftlichen Fortschritte durch Projekte Dritter auf den betreffenden Gebieten während der Laufzeit von TaBuLa-LOGplus. Zudem wird die Zusammenarbeit mit externen Stellen aufgezeigt.

### 1.1 Vorhabensbeschreibung und Zielsetzung

Die Kombination der Bereiche Gütertransport und Personenbeförderung im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), die meist unabhängig voneinander optimiert werden, bietet viele Potenziale hinsichtlich der Bündelung und Reduzierung von Verkehren, welche ein attraktives Gesamtsystem zur Folge haben. Der Einsatz autonomer Fahrzeuge, die sich eigenständig im öffentlichen Raum bewegen, federt überdies die negativen Folgen des derzeit herrschenden Mangels an Fahrpersonal ab. Aufgrund der aktuellen Rechtslage sowie aus sicherheitsrelevanten Gründen sind Halter\*innen von autonomen Fahrzeugen aktuell dazu verpflichtet, diese von natürlichen Personen<sup>1</sup> begleiten zu lassen, welche bestimmte Anforderungen erfüllen (z. B. Fahrerlaubnis). Da dieses Szenario jedoch keine ökonomischen Vorteile bietet, ist davon langfristig abzusehen. Alternativ bietet die Gesetzgebung im Straßenverkehrsgesetz (StVG) an, das jeweilige Fahrzeug aus der Ferne von einer „Technischen Aufsicht“ überwachen zu lassen. Diese soll die Fahrzeuge für alternative Fahrmanöver freigeben (§ 1e Abs. 2 Nr. 4 StVG und Abs. 3 StVG) und deaktivieren (§ 1e Abs. 2 Nr. 8 StVG) können. Diese gesetzliche Grundlage bildet das Fundament des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus, in dem eine kombinierte Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse prototypisch entwickelt wird.

<sup>1</sup> Eine natürliche Person ist laut Bürgerlichem Gesetzbuch (BGB) jeder Mensch ab dem Zeitpunkt seiner Geburt bis zum Tod. Das Alter spielt keine Rolle.

Das Forschungsvorhaben erfolgte, aufgrund wesentlicher Änderungen, deren Hintergründe in Kapitel 1.2.3 erläutert werden, auf Basis von zwei Säulen. Säule eins bestand aus einem realen Testfeld, während die zweite Säule ein digitales Testfeld beinhaltete.

### **Säule 1: Reales Testfeld**

Ziel des realen Testfelds war die Demonstration der prototypisch implementierten Leitstelle anhand eines praktischen, real implementierten Szenarios. Bestandteile des Testfelds waren die Leitstelle, der automatisierte Transportroboter sowie ein konventioneller, manueller Bus der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (vhh.mobility). Der Bus wurde zusätzlich mit einer On-Board-Unit (OBU) ausgerüstet, um einen autonomen Bus zu simulieren.

Folgendes Szenario wurde im Testfeld betrachtet: Der automatisierte Transportroboter erhält einen Transportauftrag von der Leitstelle. Er legt Teile der Transportroute in einem manuell gesteuerten Bus zurück, der mit zusätzlicher Technik zur Kommunikation mit der Leitstelle ausgerüstet wurde. Die Leitstelle überwacht den Bus sowie den automatisierten Transportroboter anhand zur Verfügung gestellter Statusparameter und Daten der beiden Fahrzeuge. Aus der Leitstelle heraus kann in die Fahrzeugsteuerung des Transportroboters eingegriffen und dabei die vom Bus bereitgestellten Daten berücksichtigt werden.

Der Fokus lag auf der Einbindung mehrerer Agenten in eine Leitstelle sowie den sich aus der Interaktion ergebenden Mehrwerten und Synergieeffekten.

### **Säule 2: Digitales Testfeld**

Das digitale Testfeld bestand aus einer Verkehrsflusssimulation des Betriebsbereichs der smarten Agenten (Lichtsignalanlage [LSA], Buslinie, Transportroboter). Genutzt wurde das Modellierungstool Aimsun, um die im realen Testfeld erprobten Anwendungsfälle realitätsnah abzubilden.

Ziel der Simulation war die Untersuchung unterschiedlicher Szenarien, um Skalierungseffekte und deren Verkehrsauswirkungen sowie potenzielle Übertragbarkeiten auf andere geografische Räume, Fragestellungen und deren Grenzen aufzuzeigen.

### Forschungsfragen

Im Vorhaben wurden die folgenden acht Forschungsfragen gestellt und beantwortet:

- Wie kann der Realisierungsprozess einer smarten Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse von der Idee bis zur dauerhaften Umsetzung erfolgreich aktiv gestaltet werden?  
(Beantwortung in Kapitel 2.7)
- Mit welchen technischen Mitteln können die praxisrelevanten Anforderungen an eine Leitstelle auf Basis verschiedener Agenten interoperabel in eine gemeinsame Schnittstelle integriert werden?  
(Beantwortung in Kapitel 2.1)
- Welche technischen und verwaltungsrechtlichen Voraussetzungen sind für einen im öffentlichen Raum zugelassenen Betrieb hin zu SAE-Level 4 entwickelter Vehikel umzusetzen?  
(Beantwortung in Kapitel 2.4)
- Welche KI-Methoden lassen sich kombinieren, um den normalen Ereignisraum des Roboters bestmöglich zu monitoren und Anomalien zu detektieren?  
(Beantwortung in Kapitel 2.3)
- Wie können die technischen Anforderungen an eine Leitstelle für den teleoperierten Betrieb autonomer Fahrzeuge erfolgreich implementiert und darauf aufbauend der Betrieb simuliert werden?  
(Beantwortung in Kapitel 2.2)
- Welche KI-Methoden lassen sich kombinieren, wie z. B. *Gaussian Processes*, *Bayesian Statistics*, *Causal Inference*, um auf Basis von historischen Daten und Simulationsdaten die bestmögliche Vorhersagequalität zu erreichen?  
(Beantwortung in Kapitel 2.2)
- Mittels welcher Maßnahmen lassen sich der gesellschaftliche Dialog sowie die Projektkommunikation erfolgreich durchführen?  
(Beantwortung in Kapitel 7)
- Inwiefern verändert der neue Gesetzesrahmen zum autonomen Fahren die Anforderungen an das Projekt(management)?  
(Beantwortung in Kapitel 2.8)

## 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

In Kapitel 1.2 werden zunächst die beiden Vorgängervorhaben und anschließend die Stakeholder\*innen des aktuellen Forschungsvorhabens vorgestellt. Zudem werden die am ursprünglichen Antrag vorgenommenen Anpassungen beschrieben, die zur Durchführung des Forschungsvorhabens notwendig waren.

### 1.2.1 Vorgängervorhaben

Das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus knüpfte eng an die beiden Vorgängervorhaben TaBuLa-LOG (Kombinierter Personen- und Warentransport in automatisierten Shuttles) und TaBuLa (Erprobung autonomer Kleinbusse im Kreis Herzogtum Lauenburg) an. Dabei wurden die in den Vorgängervorhaben untersuchten Inhalte weiterentwickelt und an die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen angepasst.

- **TaBuLa:** Von 2018 bis 2021 wurden im Kreis Herzogtum Lauenburg die Potenziale und Hemmnisse autonomer Busse im ÖPNV unter realen Bedingungen untersucht. Ein automatisiertes Shuttle wurde dazu als Ergänzung zum vorhandenen Busliniennetz im Mischverkehr mit Fahrgästen betrieben.
- **TaBuLa-LOG:** Zwei von der Technischen Universität Hamburg (TUHH) entwickelte automatisierte Transportroboter sowie ein weiteres automatisiertes Shuttle kamen von 2020 bis 2022 hinzu. Die Transportroboter mit dem Namen Laura (für Lauenburgs **A**utomatisierte **R**oboter **A**uslieferung) hatten die Aufgabe, kleinere Güter zu befördern. Auf größeren Distanzen erfolgte die Mitfahrt in den beiden automatisierten Shuttles (Abbildung 1.1). So konnten im Verlauf des Vorhabens 4.700 Fahrgäste befördert und 3.400 Briefe sowie 50 Pakete transportiert werden.

Ausführlichere Informationen zu den beiden Vorgängervorhaben können der projektbezogenen Website (<https://www3.tuhh.de/vpl/tabula/>) und den dort verlinkten Veröffentlichungen entnommen werden.

Abbildung 1.1: Transportroboter Laura beim Einstieg in das Shuttle (TaBuLa-LOG)



Quelle: Marko Thiel

### 1.2.2 Stakeholder\*innen

Am Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus waren diverse Stakeholder\*innen in unterschiedlichen Funktionen beteiligt. Im Folgenden ist eine Aufzählung der Beteiligten in alphabetischer Reihenfolge zu finden.

#### **Partner des Forschungsvorhabens**

- Institut für Technische Logistik (ITL) der TUHH
- Institut für Verkehrsplanung und Logistik (VPL) der TUHH
- Interlink GmbH
- Palaimon GmbH

#### **Assoziierte Partner**

- KION Group
- Kreis Herzogtum Lauenburg
- Stadt Lauenburg/Elbe
- Yunex GmbH (ehemals Siemens Mobility Group)

#### **Unterauftragnehmer**

- TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG (im Folgenden als TÜV oder TÜV Nord bezeichnet)
- Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (vhh.mobility, ehemals VHH)

#### **Entwicklungspartner**

- Aimsun SLU

### 1.2.3 Änderung des ursprünglichen Antrags

Im Verlauf des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus waren Änderungen am ursprünglichen Antrag notwendig, die das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im November 2023 genehmigte. Hintergrund der Änderungen war die fehlende Verfügbarkeit der in den Vorgängervorhaben genutzten Shuttles. Diese sollten durch ein anderes Projekt im Kreis Herzogtum Lauenburg gefördert werden. Dieser Teil des Projekts wurde jedoch abgelehnt, sodass die Shuttles auch für TaBuLa-LOGplus nicht zur Verfügung standen. Als Ersatz erfolgte im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus der Einsatz eines konventionellen, manuellen Busses der vhh.mobility, der um Kommunikationstechnologie (Tablet inklusive Anwendung, OBU) erweitert wurde, damit das Fahrpersonal mit der Leitstelle kommunizieren kann. Daraus ergaben sich inhaltliche und zeitliche Änderungen am Antrag. Es entstanden eine kostenneutrale Verlängerung der Laufzeit des Forschungsvorhabens um sechs Monate sowie Verschiebungen in den Mitteln des Forschungsvorhabens und in der Bearbeitung.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß Förderantrag und -bescheid wurden Meilensteine für das Forschungsvorhaben festgelegt. Ein ausführlicher Terminplan wurde erstellt, um den Verlauf des Forschungsvorhabens, die Abhängigkeiten und die Risiken zu beobachten. Die folgenden Meilensteine kennzeichnen den Verlauf (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Übersicht Planung und Ablauf des Vorhabens

Meilenstein Nr.	Geplanter Termin	Ziel	Tatsächlicher Termin
1	06/2022	Infrastruktur ist erweitert/angepasst	entfällt durch die Nutzung manueller Busse
2	06/2023	Gesamtkonzept vorhanden	06/2023
3	12/2023	Abgleich der Schnittstellen/Ausrichtung für Entwicklung der Prototypen	12/2023
4	06/2024	Konzeption Leitstelle ist abgeschlossen	06/2024
5	09/2024	Abschätzung der Kosten für Leitstelle und Betrieb abgeschlossen	09/2024
6	12/2024	Präsentation und Erprobung der Prototypen und Teildemonstratoren	12/2024

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Leitstellen mit der Aufgabe, Fahrzeugflotten zu überwachen und zu managen, sind bei Verkehrsunternehmen und Mobilitätsanbietenden eine etablierte Instanz. Im konventionellen Betrieb laufen an diesem Standort die Betriebsabläufe des Unternehmens zusammen, damit diese gebündelt und gesteuert werden können. Verwendung finden rechnergestützte Betriebsleitsysteme, die u. a. Leitstelle und Fahrpersonal/Fahrzeug verbinden.

Die Integration autonomer Fahrzeuge in eine Leitstelle wurde bereits mehrfach untersucht (z. B. in den Projekten HEAT, EASY und SMO). Durch die Shuttle-Herstellenden werden neben den Fahrzeugen auch Flottenmanagementsysteme angeboten (z. B. EZFleet von EasyMile), mit deren Hilfe die Betreibenden die Shuttles aus der Ferne überwachen können.

Durch die Novelle des StVG von 2021 hat der Gesetzgeber die rechtlichen Grundlagen für einen Betrieb von Fahrzeugen ohne fahrzeugführende Person vor Ort geschaffen, wenn diese in einem festgelegten Betriebsbereich verkehren (§ 1e StVG). Voraussetzung für diesen Betrieb ist die Überwachung durch eine sogenannte Technische Aufsicht (eine neu zu schaffende Position), die eine Fernüberwachung sicherstellt und unter Umständen eingreifen kann. Erste Tests diesbezüglich wurden bereits durchgeführt: Im Rahmen des Projekts NAF-Bus erfolgte der Betrieb eines Fahrzeugs nach SAE-Level 4 auf einem Privatgelände ohne fahrzeugführende Person (EurA AG o. J.).

Die bereits durchgeführten Projekte befassten sich, soweit bekannt, mit der Integration von Fahrzeugen desselben Verkehrsträgers in eine Leitstelle. Für ein optimiertes Gesamtsystem sind weitere Forschungen notwendig, die dafür Sorge tragen, dass die Leitstelle unter den vielseitigen Umgebungsbedingungen und Verkehrssituationen im Regelbetrieb funktioniert und sowohl marken- als auch verkehrsträgerunabhängig ist.

### 1.4.1 Zur Durchführung des Vorhabens genutzte Konstruktionen, Verfahren, Schutzrechte, Daten und Software

Die Transportroboter stammen aus dem Vorgängervorhaben TaBuLa-LOG (siehe Gertz et al. 2022). Sie wurden im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus aus kommerziell erhältlichen Komponenten weiterentwickelt. Es wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte genutzt. Die verwendete Software basiert auf Open-Source-Angeboten, welche für die Nutzung in den verwendeten Betriebssystemen (z. B. *Robot Operating System* und *Ubuntu Linux*) geeignet sind.

Die konventionellen, manuellen Busse wurden von der vhh.mobility bereitgestellt und durch eine OBU sowie eine von der TUHH programmierte Tablet-App ergänzt, die auf einem Tablet am Arbeitsplatz des Fahrpersonals installiert wurde, um eine Kommunikation mit der Leitstelle zu ermöglichen.

Im Forschungsvorhaben ist es nicht vorgesehen, eigene Patente oder Schutzrechte anzumelden. Die Ergebnisse sollen *Open Source* zur Verfügung gestellt werden.

#### 1.4.2 Verwendete Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste

Im Forschungsvorhaben wurde umfangreich auf internationale Literatur zurückgegriffen. Eine Auswahl ist unter „Vorhabenbezogenes Literaturverzeichnis“ (ab Seite 188) aufgeführt.

### 1.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus zeichnet sich, wie das Vorgängervorhaben TaBuLa-LOG, durch die Kombination von Personenbeförderung im ÖPNV und Gütertransport mit einem automatisierten Transportroboter aus. Während sich weltweit mehrere Projekte mit den einzelnen Bestandteilen (automatisierte Shuttles, automatisierte Transportroboter, künstliche Intelligenz, Leitstelle, kombinierte Verkehre) befassen, sind der Ansatz einer automatisierten Transportkette und deren Erprobung in einem Testfeldbetrieb einzigartig.

#### **Fortschritte auf dem Gebiet der automatisierten Transportroboter**

Die folgenden relevanten Fortschritte wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens bekannt:

- Ziele des Projekts **myLOG MOL** sind die Entwicklung und die Erprobung eines durch 5G gestützten autonomen Liefersystems mit Transportrobotern (Gestalt Robotics 2022).
- Im Projekt **R4R** sollen durch Fahrradfahrende Daten erhoben werden, um multimodale Karten für autonome Mikromobile erstellen zu können (BMDV 2022a).

- Damit autonome Mikromobile Gehwege nutzen können, wird im Projekt **GehwegNavi** ein Datensatz erstellt, damit diese Fahrzeuge auf Gehwegen sicher navigieren können (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg [HAW Hamburg] 2024).
- Im Rahmen des Projekts **RoboTraces** wurden Akzeptanzkriterien für autonome Mikromobile auf Geh- und Fußwegen erfasst (BMDV 2022b).
- Das Unternehmen REWE testete gemeinsam mit dem TÜV Süd, der Stadt Hamburg und den beiden Start-ups Cartken und LastMile im Rahmen eines dreimonatigen Testbetriebs ein autonomes Lieferkonzept in Hamburg (Wegner 2023).

#### **Fortschritte auf dem Gebiet der kombinierten Verkehre**

Die folgenden relevanten Fortschritte wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens bekannt:

- Im Projekt **LogiSmile** wurden ein autonomes Hubfahrzeug und ein kleineres autonomes Zustellgerät entwickelt (Technische Universität Braunschweig 2024).
- Ziel des Projekts **Kombinom\_2** ist die Entwicklung eines simulationsbasierten Entscheidungsunterstützungssystems für autonome, kombinierte Transportkonzepte (Frankfurt University of Applied Sciences 2023).

#### **Fortschritte auf dem Gebiet des automatisierten ÖPNV**

Die folgenden relevanten Fortschritte wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens bekannt:

- Im Projekt **ALBUS** sollen drei autonome Standardlinienbusse (mit 50 Steh- und Sitzplätzen) in der Region Hannover im Linienverkehr betrieben werden (BMDV 2023a).
- Das Projekt **MINGA** aus München untersucht verschiedene Formen des autonomen öffentlichen Verkehrs: On-Demand-Verkehr, Linienbetrieb eines automatisierten Solobusses sowie Betrieb eines Bus-Platoons, bei dem ein Bus automatisch einem anderen Bus mit Fahrpersonal folgt (Münchner Verkehrsgesellschaft mbH [MVG] 2024).
- Der Betrieb einer gemischten On-Demand-Flotte mit manuell gesteuerten und autonomen Fahrzeugen inklusive des Einsatzes einer Technischen Aufsicht ist Teil des Projekts **AHOI** (BMDV 2023b).

### **Fortschritte auf dem Gebiet der Leitstelle für autonome Fahrzeuge**

Die folgenden relevanten Fortschritte wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens bekannt:

- Kerninhalte des Projekts **ABSOLUT II** sind technische, organisatorische und rechtliche Fragestellungen in Bezug auf die Technische Aufsicht und die Leitstelle (Leipziger Verkehrsbetriebe [LVB] GmbH 2023).
- Im Rahmen des Projekts **ÖV-Leitmotif-KI** wurde ein sicherheitsgerechtes und standardisiertes Referenzmodell entwickelt, damit autonome Fahrzeuge in den öffentlichen Verkehr integriert werden können (BMDV 2022c).
- Im Projekt **KIS'M** soll ein fahrerloses Fahrzeug unter Berücksichtigung des Gesetzes zum autonomen Fahren im Bedarfsverkehr erprobt werden (BMDV 2023c).
- Das Projekt **SMO II** befasste sich mit der KI-unterstützten vollständigen Automation. Dazu erfolgte u. a. ein Testbetrieb ohne Operator, bei dem das Fahrzeug durch eine Leitstelle aus der Ferne überwacht wurde (Nuts One GmbH 2023).

### **Fortschritte auf dem Gebiet der KI im Rahmen des autonomen Fahrens**

Diverse Projekte befassen sich mit den Möglichkeiten von KI im Rahmen des autonomen Fahrens:

- Im Projekt **KoSi** wurde untersucht, wie beim autonomen Fahren die Sicherheit unter Zuhilfenahme von KI verbessert werden kann (BMDV 2021).
- Das Projekt **VIDETEC-2** befasst sich mit der Erhöhung der Verkehrssicherheit, indem durch eine KI alle Verkehrsteilnehmer\*innen zuverlässig erkannt, ihre Bewegungen prognostiziert und die Ergebnisse an autonome Fahrzeuge weitergegeben werden (BMDV 2023d).
- Bestandteil des Projekts **KI\_CAM** ist die automatische Erkennung von Gefahrensituationen auf Autobahnen durch Verkehrskameras mittels KI (BMDV 2023e).
- Die Vorhersage von Belegungszuständen von ÖPNV-Fahrzeugen mittels KI ist das Ziel des Projekts **Fahrbar20** (BMDV 2023f).
- Im Projekt **OPTmicro** werden offen zugängliche Trainingsdaten für KI erhoben, die autonome Mikromobile einschließen (BMDV 2023g).
- Objektlokalisierung und -erkennung mittels KI bilden den Gegenstand des Projekts **DeepStreet-M**, in dem ein robuster Bilderkennungsalgorithmus sowie ein System zur Aufarbeitung der Daten entwickelt werden (BMDV 2023h).

## 1.6 Zusammenarbeit mit weiteren externen Stellen außerhalb des Konsortiums (Netzwerke, Fachcluster etc.)

Die Partnerinnen des Forschungsvorhabens – die Technische Universität Hamburg (TUHH), die Interlink GmbH und die Palaimon GmbH – bringen sich in diverse Netzwerke und Fachcluster ein. Sie stehen in einem regelmäßigen Austausch und nehmen an entsprechenden Veranstaltungen teil.

Das **Netzwerk Intelligent Move**, das von der e-mobil BW koordiniert wird, befasst sich mit den Potenzialen und Herausforderungen der digitalen Mobilität. In Baden-Württemberg kommen verschiedene namhafte Akteur\*innen in drei Arbeitsgruppen zusammen, um den Wissenstransfer zu gewährleisten (<https://www.e-mobilbw.de/netzwerke/netzwerk-intelligent-move>).

Das Frauennetzwerk **Women for Datadriven Mobility (wDRIVE)** des BMDV ermöglicht den Mitgliedern eine fachliche Vernetzung und bietet exklusive Veranstaltungen. Durch digitale Formate fördert das Netzwerk den Austausch, den Wissenstransfer und die Zusammenarbeit zwischen Frauen in der datenzentrierten Mobilitätsbranche (<https://emmett.io/wdm>).

Aus den Vorgängervorhaben besteht ein **Netzwerk** an Kontakten, die weiterhin gepflegt und genutzt werden. Das Team steht im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus in einem regen Austausch mit anderen Projekten (z. B. AHOI, myLOG MOL) und entwickelt dieses Netzwerk weiter. Durch diesen Dialog entsteht ein themenbezogenes Netzwerk, das als Anlaufstelle für spezifische Fragen herangezogen werden kann.

## 2 Darstellung der Inhalte des Forschungsvorhabens

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über die im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus untersuchten Inhalte zur Implementierung einer prototypischen Leitstelle für ÖPNV-Fahrzeuge und autonome Transportroboter, die zur Kombination von Personenbeförderung und Gütertransport verkehren. Des Weiteren werden die technische Weiterentwicklung der von der TUHH entwickelten Transportroboter und die mögliche Verwendung von KI zur Umfelderkennung beschrieben. Die Kapitel sind zur besseren Nachvollziehbarkeit thematisch sortiert und folgen nicht zwingend der Struktur der Arbeitspakete (AP). Einleitend wird die Konzeptionierung, anschließend Implementierung und Erprobung der Leitstelle beschrieben. Die Weiterentwicklung der Transportroboter sowie die Aufrüstung der konventionellen Busse werden im Anschluss dargelegt, bevor auf den Genehmigungs- und Zulassungsprozess sowie letztlich auf den Testfeldbetrieb der Komponenten (Leitstelle, Transportroboter, konventioneller Bus) eingegangen wird. Ergänzend werden die im Forschungsvorhaben durchgeführten Simulationen sowie vorgenommenen Wirkungsabschätzungen beschrieben.

### 2.1 Konzeptionierung der Leitstelle

Die Konzeptionierung einer Leitstelle war Bestandteil von Haupt-Arbeitspaket (HAP) 2. Dazu wurden im ersten Schritt die Praxisanforderungen an eine Leitstelle identifiziert. Dies erfolgte durch mehrere Workshops im Team, bei denen mithilfe von *Persona* und *User Stories* die Anforderungen abgeleitet wurden. Dabei flossen zum einen die Erfahrungen aus den Vorgängervorhaben und zum anderen Informationen aus dem Austausch mit anderen Projekten ein. Auf dieser Basis wurde eine Leitstelle für kombinierte Personenbeförderung und Gütertransport inklusive Technischer Aufsicht zur Überwachung und Koordination des Betriebs konzipiert. Ergänzt wird dieser Baustein durch das Thema Datenschutz und Datensicherheit, damit die Kommunikation zwischen Leitstelle und Fahrzeugen geschützt erfolgt. Zur Verknüpfung des Gesamtsystems wurde ein Schnittstellenmanagement entwickelt und umgesetzt (siehe Kapitel 2.1.4). Abgerundet wird das HAP durch die Entwicklung eines Betriebskonzepts.

**Forschungsfrage:** Mit welchen technischen Mitteln können die praxisrelevanten Anforderungen an eine Leitstelle auf Basis verschiedener Agenten interoperabel in eine gemeinsame Schnittstelle integriert werden?

### 2.1.1 Identifikation der Praxisanforderungen an eine Leitstelle

Zur Identifikation der Praxisanforderungen an die Leitstelle wurden im ersten Schritt Rollen/Personen ermittelt und definiert (siehe Abbildung 2.1), die in Bezug zu den automatisierten Fahrzeugen und der Leitstelle stehen. Für diese wurden jeweils *User Stories* erstellt. Dafür wurde nach dem folgenden Format vorgegangen: *As a user, I want to be able to do a function, so that I will get these benefits* (Als Nutzende\*r möchte ich *diese Funktion*, um *diesen Vorteil davon zu haben*). Die in folgender Grafik dargestellten zwölf User\*innen wurden betrachtet.

Abbildung 2.1: Betrachtete User\*innen



Aus deren *User Stories* wurden die Anforderungen an die Leitstellensoftware, den Transportroboter sowie softwareunabhängige Anforderungen abgeleitet. Diese sind in die weitere Bearbeitung eingeflossen.

### 2.1.2 Konzeption Leitstelle/Technische Aufsicht

Zur Konzeptionierung der Leitstelle inklusive Technischer Aufsicht wurde zu Beginn die Ist-Situation im ÖPNV, in der Transportlogistik und der Gütermithnahme im ÖPNV abgebildet. Dazu erfolgten eine Recherche der rechtlichen Grundlagen sowie eine Zusammenstellung der Prozesse in der Personenbeförderung und im Gütertransport. Nachfolgend wurden die Veränderungen beschrieben, die sich durch das Gesetz zum autonomen Fahren ergeben. Dazu gehört die Bereitstellung einer Technischen Aufsicht, die im StVG als Voraussetzung für den Betrieb autonomer Fahrzeuge ohne Begleitperson vor Ort gefordert wird. Das StVG sowie die Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung (AFGBV) definieren für diese Person Aufgaben, Pflichten und Anforderungen. Zudem wird erläutert, welche Personen die Technische Aufsicht in der Ausübung ihrer Aufgaben unterstützen dürfen.

Die folgenden, kursiv gesetzten Absätze zum rechtlichen Stand wurden der im Rahmen des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus erstellten Veröffentlichung von Wolf et al. (2024) entnommen:

*Gemäß § 1 f Abs. 2 StVG hat die technische Aufsicht verschiedene Pflichten, welche nachfolgend kurzgefasst aufgelistet werden:*

- *Vom Fahrzeugsystem übermittelte alternative Fahrmanöver und bereitgestellte Daten prüfen, bewerten und bei gegebener Verkehrssicherheit freischalten*
- *Unverzögliche Deaktivierung der autonomen Fahrfunktion bei Anzeige durch das Fahrzeugsystem*
- *Bewertung der Signale der technischen Ausrüstung zum Funktionsstatus*
- *Einleitung eventuell erforderlicher Maßnahmen zur Verkehrssicherung*
- *Kontaktaufnahme mit den Insassen des Kraftfahrzeugs*

*Ergänzt werden diese Punkte durch § 14 Abs. 3 AFGBV. Dort wird beschrieben, welche Aufgaben die technische Aufsicht in Bezug auf ein Fahrzeug im risikominimalen Zustand hat.*

- *Untersuchung der Auslösung und der Notwendigkeit des risikominimalen Zustands des Kraftfahrzeugs*
- *Beendigung des risikominimalen Zustands*
- *Manuelle Übernahme der Fahraufgabe, bei Defekten am Fahrzeug*
- *Entfernung des Fahrzeugs aus dem Straßenraum bei Gefährdung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs veranlassen*

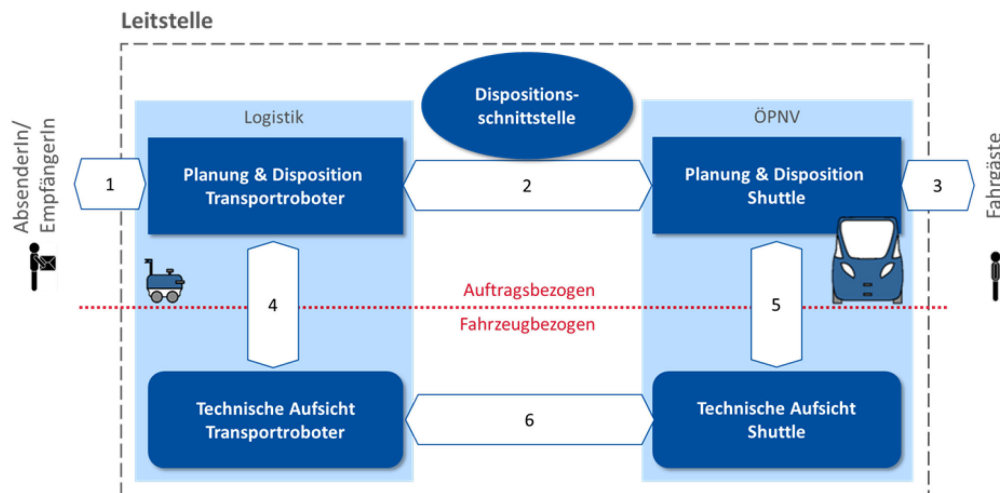
*Neben den Aufgaben und Pflichten einer technischen Aufsicht werden in § 14 Abs. 1 AFGBV auch die Anforderungen an diese natürliche Person definiert. So muss diese einen Abschluss in einer der Fachrichtungen „Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Elektrotechnik, Luft- und Raumfahrttechnik oder Luftfahrzeugtechnik [...] als Diplom-Ingenieur, Diplom-Ingenieur (FH), Ingenieur (graduiert), Bachelor, Master oder staatlich geprüfter Techniker“ vorweisen. Zudem sollte die Person bei den Herstellern des Fahrzeugs mit autonomer Fahrfunktion eine Schulung absolvieren sowie im Besitz eines gültigen Führerscheins in der Fahrerlaubnisklasse sein, welcher das Fahrzeug mit autonomer Fahrfunktion entspricht. Die Zuverlässigkeit der technischen Aufsicht wird durch die Vorlage eines Führungszeugnisses sowie Auskünfte aus dem Fahrerlaubnisregister und dem Fahreignungsregister geprüft. Eine solche gesetzliche Anforderung gibt es für den manuellen Betrieb von Fahrzeugflotten nicht.*

*Zur Bewältigung ihrer Aufgaben darf die technische Aufsicht weitere natürliche Personen einsetzen, welche gewisse Anforderungen nach § 14 Abs. 2 AFGBV erfüllen müssen. Dazu gehören mindestens drei Jahre Berufserfahrung im Verkehrs- oder Kraftfahrzeugwesen und regelmäßige (mindestens jährliche) Teilnahmen an Herstellerschulungen in Bezug auf den Umgang mit dem Kraftfahrzeug. Wesentliche Veränderungen am Kraftfahrzeug oder der autonomen Fahrfunktion sind ebenfalls [in diesen Schulungen] zu behandeln. Der Abschluss der Schulung erfolgt durch eine praktische Prüfung inklusive simulierter Betriebsstörungen. Ist die Freigabe von Fahrmanövern oder ein manueller Fahrbetrieb vorgesehen, ist eine gültige Fahrerlaubnis in der Klasse des autonomen Fahrzeugs vorgesehen. (Wolf et al. 2024: 70 ff.)*

Aus den vorangegangenen Erkenntnissen konnte abgeleitet werden, dass es für jeden Fahrzeugtyp eine eigene Technische Aufsicht sowie eine Planungs-

und Dispositionseinheiten geben sollte. Diesen identifizierten Systembestandteilen wurden die definierten Aufgaben (z. B. Überwachung der Fahrzeuge, Koordination Fahrzeugeinsatz) zugeordnet und die Schnittstellen zwischen den Elementen definiert (siehe Abbildung 2.2).

Abbildung 2.2: Systembestandteile, Schnittstellen und Informationsflüsse



Quelle: Wolf et al. (2024: 81)

Die fünf Systembestandteile der Leitstelle können in unterschiedlicher Konstellation Akteur\*innen zugeordnet, durch diese angeboten, konzipiert und programmiert oder betrieben werden. Aus diesem Grund wurden fünf Grob-Szenarien erstellt, die eine unterschiedliche Zuordnung zu Organisationseinheiten aufweisen (zentral bis dezentral). Den Szenarien wurden Vor- und Nachteile zugeordnet und auf dieser Basis ein Szenario für die Anwendung im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus ausgewählt.

Das gewählte zentrale Szenario beschreibt die Bündelung aller Leitstellenaufgaben bei einer Instanz, sodass die Technische Aufsicht sowie die Planung und Disposition von Aufträgen in dem Leitstellenprototypen zentral abgebildet werden. Durch den kleinen Rahmen (zwei Roboter sowie ein Bus) werden Planung und Disposition in Form eines Auftragsmanagements realisiert. Das Flottenmanagement sowie Optimierungsansätze sind nicht hinterlegt. Mithilfe des Leitstellen-Prototyps wird es somit möglich sein, die Fahrzeuge zu überwachen, die Statusparameter einzelner Roboter im Blick zu haben, in die Fahrzeugsteuerung einzugreifen sowie Aufträge anzulegen.

### Konzept für eine prototypische Umsetzung

Um für die Erprobung des ausgewählten Szenarios eine prototypische Leitstelle in einem realen Testumfeld entwickeln zu können, musste zunächst ein Umsetzungskonzept entworfen werden. Das Umsetzungskonzept für die Leitstelle im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus sieht die prototypische Entwicklung und Erprobung einer zentralen Einheit vor, die die Koordination

und Synchronisation multimodaler Agenten im öffentlichen Raum ermöglicht. Diese Agenten umfassen sowohl Transportroboter als auch einen mit Sensorik ausgestatteten ÖPNV-Linienbus. Das Konzept vereint alle Leitstellenelemente, wie Technische Aufsicht sowie Planung und Disposition aller Fahrzeuge, in einer zentralen Einheit und bildet so die Grundlage für die Überwachung und Steuerung der Fahrzeuge anhand von Statusparametern, Fahraufträgen und Synchronisationsaufgaben.

Das Konzept der Leitstelle fokussiert die Bereiche Mobilfunkanbindung, Kartendarstellung und Integration eines ÖPNV-Busses. Die Mobilfunkanbindung erfordert die Einrichtung sicherer Kommunikationsmechanismen, während die Kartendarstellung eine präzise Lokalisierung mittels GPS-Signalen ermöglicht. Voraussetzung der Integration eines konventionellen ÖPNV-Busses ist die Bereitstellung wesentlicher Fahrzeugparameter über geeignete Schnittstellen, um eine Synchronisation zwischen Bussen und Robotern zu gewährleisten.

Ein weiteres Ziel des Konzepts ist es, die Bedienbarkeit der Leitstelle durch benutzungs-freundliche Oberflächen zu erleichtern, sodass ungeschultes Personal nach einer einführenden Schulung den Leitstellenbetrieb effektiv steuern kann. Die intuitive Gestaltung der Benutzungsoberfläche sowie Mechanismen zur Vereinfachung der Freigabe von Prozessschritten sollen die operative Effizienz erhöhen.

Zur Verbesserung der Sicherheitsfunktionen und zur Unterstützung der Fehlerbehebung während des Testbetriebs erfolgt eine umfangreiche Datenaufzeichnung bzw. -visualisierung. Neben den primären Mitteilungen werden auch vorhabenspezifische Prozessdaten erfasst, die wichtige Einblicke für künftige Optimierungen bieten können.

Dieses Umsetzungskonzept stellt somit die Grundlagen für einen effektiven und automatisierten Betrieb eines kombinierten Personen- und Güterverkehrssystems im öffentlichen Raum dar und sieht spezielle Anpassungen bestehender Softwarelösungen zur Erfüllung der Anforderungen im Rahmen von TaBuLa-LOGplus vor.

Das gesamte Dokument des Umsetzungskonzepts ist in Anlage 1 an diesen Bericht angehängt.

### 2.1.3 Datenschutz und -sicherheit

#### **Datenschutz im Kontext der KI-gestützten Umfelderkennung**

In der Konzeption der KI-gestützten Umfelderkennung des Roboters müssen insbesondere der Datenschutz und Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden, da die Umfelderkennung auf Videobilddaten der Roboterumgebung basiert. Diese können personenbezogene Daten beinhalten und müssen daher entweder anonymisiert oder deren Erfassung vermieden werden.

Die konzeptionelle Ausarbeitung der Umfelderkennung berücksichtigt den Datenschutz in Form eines „Secure-by-Design-Ansatzes“. Das Konzept beinhaltet die KI-basierte Echtzeitauswertung der Videobilddaten auf einem Endgerät, das lokal am Roboter montiert werden kann. Resultierend entfallen eine Übertragung an die und das Abspeichern von Bilddaten in der Leitstelle. An die Leitstelle wird lediglich ein Status über die Umfelderkennung übertragen: entweder „Normalbetrieb“ oder „detektierte Anomalie“. Zudem werden der Status und die auf dem Gerät lokal extrahierten Bewegungsmuster in einer Cloud gespeichert. Die Bewegungsmuster erhalten keine personenbezogenen Daten und können für weiteres Training der KI und damit verbundener Modellverbesserung und Erfahrungsschatzerweiterung genutzt werden.

### **Datenschutz im Kontext des Roboterbetriebs**

Die Verarbeitung personenbezogener Daten beim Betrieb der Roboter erfolgt in drei anwendungsspezifischen Nutzungskontexten:

1. Interne Navigationsalgorithmen des Roboters,
2. Übertragung eines Videostreams in die Leitstelle,
3. Aufzeichnung und Publikation von Daten zu Forschungszwecken.

Für diese drei Anwendungen wurden in Kooperation mit einer auf Datenschutz spezialisierten Anwaltskanzlei (datenschutz nord GmbH) die im Folgenden zusammengefassten Maßnahmen abgeleitet und anschließend bewertet. Das Hamburgische Datenschutzgesetz sowie das Hamburgische Hochschulgesetz bildeten die rechtlichen Grundlagen.

Zunächst wurden sämtliche Sensoren identifiziert, die im datenschutzrechtlichen Sinn personenbezogene Daten erfassen. Die eingesetzten Roboter verfügen insbesondere über horizontal an Front- und Heckseite angebrachte RGB-Stereokameras. Die umlaufend montierten Kameras zur Nahfeldüberwachung zeichnen ausschließlich den Bodenbereich rund um den Roboter auf. Die zentral auf den Robotern montierten 3D-Laserscanner besitzen eine so geringe Auflösung, dass sich persönliche Identifikationsmerkmale nicht ableiten lassen. Auch Kfz-Kennzeichen sind in den Sensordaten des Laserscanners nicht erkennbar. Ergänzend zu der auf den Robotern verbauten Sensorik wurde ein terrestrischer Laserscanner eingesetzt, um ein 3D-Modell des Campus der TU Hamburg zu erstellen. Im Rahmen dieses Scanprozesses wurden hochauflösende Punktwolken sowie begleitende RGB-Bilddaten erfasst, die zur Einfärbung der Punktwolke dienen. Im Gegensatz zu den auf den Robotern montierten Laserscannern sind neben den Bilddaten insofern auch die Laserscans aus datenschutzrechtlicher Sicht relevant, als sie aufgrund ihrer höheren Auflösung potenziell Rückschlüsse auf personenbezogene Merkmale zulassen.

Alle zu Beginn aufgeführten Datenverarbeitungen stützten sich auf die Grundsätze der Datenminimierung und Speicherbegrenzung. Entsprechende technische und organisatorische Maßnahmen (TOM) stellten die Einhaltung dieser Prinzipien sicher. Für die Aufzeichnung der Forschungsdaten wurden Stoßzeiten vermieden und der Aufnahmebereich auf den Campus der TU Hamburg beschränkt. Zur Überwachung der Roboter durch den Leitstand wurde die Videoübertragung nur auf den Einsteigeprozess begrenzt, der zudem außerhalb des regulären Linienverkehrs nur mit zum Vorhaben gehörigen Fahrgäst\*innen stattfand. Die aufgezeichneten Videodaten lagen bis zur Anonymisierung sicher unter Verschluss und wurden nach der Anonymisierung innerhalb von 72 Stunden sicher gelöscht.

Darüber hinaus galt der Transparenz große Aufmerksamkeit. Die Nutzung von Kameras in den Robotern wurde durch Kamera-Piktogramme gekennzeichnet. Zudem trugen die Begleitpersonen einen gut sichtbaren Videohinweis, der neben Ansprechpartner\*innen und Rechtsgrundlage auch per QR-Code auf die Datenschutzhinweise nach Art. 13 DSGVO verwies.

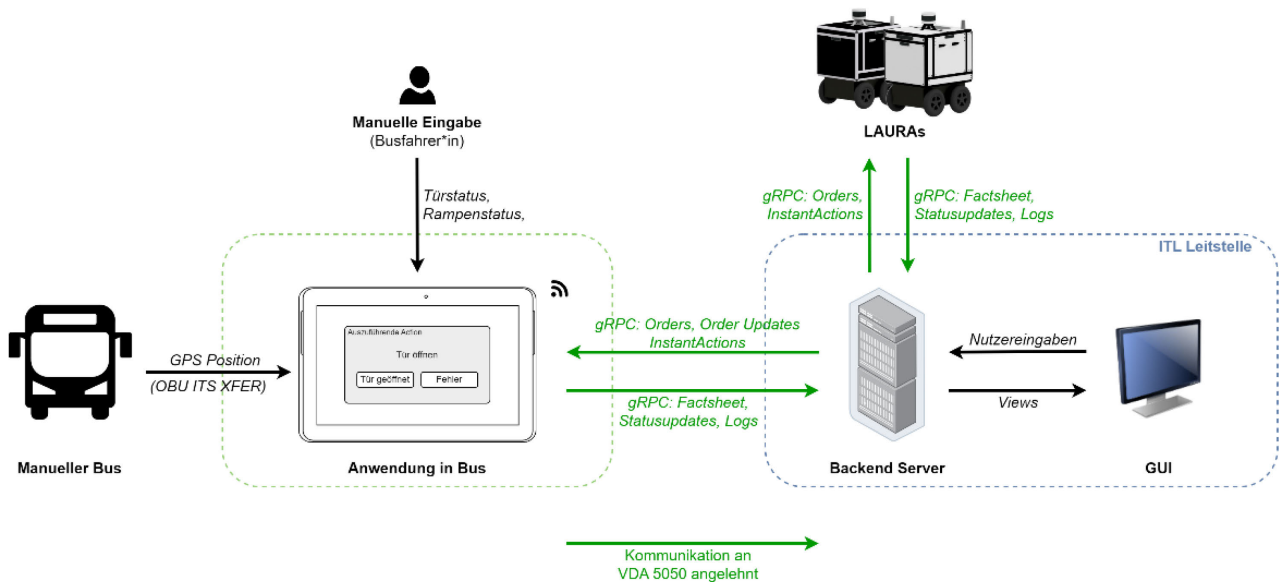
Eine von der datenschutz nord GmbH durchgeführte Schwellenwertanalyse kam zu dem Ergebnis, dass eine Datenschutzfolgenabschätzung nicht erforderlich ist. Nach einer umfassenden Bewertung wurde festgestellt, dass die Verarbeitung personenbezogener Daten im beschriebenen Kontext und Umfang den geltenden datenschutzrechtlichen Anforderungen entspricht.

#### 2.1.4 Schnittstellenmanagement

Ein Schnittstellendokument wurde verfasst, um die diversen technischen Schnittstellen zwischen den verschiedenen Agenten und der Leitstelle zu dokumentieren. Dieses Dokument dient als Grundlage für die Entwicklung einer Anwendung zur Aufrüstung der Busse für den automatisierten Ein- und Ausstieg der Roboter sowie der Weiterentwicklung der Transportroboter. Es beschreibt übergreifend technische Aspekte und Anforderungen. Das Schnittstellendokument ist zentral darauf ausgelegt, die für die Integration von Fahrzeugen (z. B. Transportroboter, Busanwendung) in das System der Leitstelle erforderlichen Konzepte und Kommunikationsstandards sowie das Verbindungsframework zu erläutern. Die im Schnittstellendokument beschriebenen Konzepte und Grundlagen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt und in Kapitel 2.2.1 detailliert erläutert, um die Implementierung der Leitstelle zu verdeutlichen. Auf Nachfrage kann das Gesamtdokument zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 2.3 zeigt die relevanten Schnittstellen, die bei der Einbindung der Transportroboter sowie des Busses in die Leitstelle zu beachten und zu organisieren waren.

Abbildung 2.3: Visualisierung zu beachtender System-Schnittstellen



Ein wesentlicher Bestandteil des Schnittstellendokuments ist die detaillierte Aufschlüsselung des Standards VDA 5050 (Verband der Automobilindustrie e. V. [VDA] 2024). Dieser Standard definiert die Kommunikationsprotokolle, die den Austausch von Auftragsdaten und Statusupdates zwischen der Leitstelle und autonomen Transportfahrzeugen regeln. Eine präzise Definition erfolgt in Kapitel 2.2.1. Das Schnittstellendokument beschreibt auch, wie diese Protokolle bei der Simulation eines autonomen Busses angewendet werden können. Dieser Teil wird durch die vom VPL entwickelte Anwendung zur Buseinbindung umgesetzt. Durch die Nutzung der VDA 5050 wird eine systematische und einheitliche Kommunikation ermöglicht, die für die Synchronisation und den Betrieb der Transportfahrzeuge unerlässlich ist.

Darüber hinaus wird gRPC (*Google Remote Procedure Calls*), ein modernes Open-Source-Kommunikationsframework, vorgestellt. Es wird auf die Notwendigkeit eingegangen, dieses Framework zur Etablierung der Datenverbindung zwischen der Bus-Anwendung und dem Backend der Leitstelle zu nutzen. gRPC ermöglicht durch seine Verwendung von *Protocol Buffers* eine effiziente und plattformübergreifende Kommunikation.

Das Schnittstellendokument legt überdies die funktionalen Anforderungen an die einzubindenden Fahrzeuge fest. Diese umfassen sowohl automatisierte Positions- und Status-Updates, die auf GPS-Daten und dem aktuellen Fahrzeugstatus (Auftragsstatus, Batteriestand etc.) basieren, als auch die Möglichkeit, durch Nutzer\*inneneingaben verschiedene Zustandsänderungen und Aktionen zu steuern.

Ein weiterer Aspekt des Schnittstellendokuments ist die detaillierte Beschreibung des generellen Prozessablaufs, der bei der Übermittlung von Aufträgen an eingebundene Agenten sowie bei der Verarbeitung dieser Aufträge durch das Fahrzeug berücksichtigt werden muss. Hierbei wird die Struktur der Datenübermittlung, bestehend aus *Nodes*, *Edges* und *Actions*, umfassend erläutert (siehe Abschnitt 2.2.1). Auf Basis dieser generellen Beschreibung des Prozessablaufs wurde ein Programmablaufplan (PAP) erstellt und für die Entwicklung der Busanwendung bereitgestellt. In Kapitel 2.3.2 wird dieser thematisch erneut aufgegriffen und in Anlage 5 ist der gesamte PAP dargestellt.

Insgesamt bietet das Schnittstellendokument eine tiefgehende technische Anleitung für die Einbindung von Fahrzeugen in das vom ITL entwickelte Logistik-Leitsystem. Es dient als Referenzpunkt für Entwickler\*innen und Ingenieur\*innen, die mit der Aufgabe betraut sind, die notwendigen Kommunikationsschnittstellen und Prozesse zu implementieren. Das Schnittstellendokument verdeutlicht die Komplexität und die Interdependenzen zwischen den Systemkomponenten, die für die erfolgreiche Verbindung zwischen Fahrzeugen und der entwickelten Leitstelle entscheidend sind.

Neben Schnittstellen zur Einbindung der verschiedenen Fahrzeuge in die Leitstelle galt es auch, solche Schnittstellen zu beachten, die zwischen den Transportrobotern des ITL und der KI-basierten Umfelderkennung von Palaimon entstanden sind. Palaimon entwickelte ein Schnittstellenkonzept für die Übergabe des Signals an den Roboter. Die Integration in den Roboter erfolgte über die Prüfung der technischen Machbarkeit der Systemschnittstellen (Übergabe des Safe-Mode-Signals). Dafür wurde auf bewährte Standards wie REST-Schnittstellen und WLAN (*Wireless Local Area Network*) gesetzt. Hier wurden von ITL-Seite notwendige Maßnahmen kommuniziert, die für eine Kompatibilität der Schnittstellen zwischen der Umfelderkennung sowie den Transportrobotern notwendig sind.

### 2.1.5 Betriebskonzept

Zu Zeiten, in denen Busse schwach ausgelastet sind und nur aufgrund der Betriebspflicht verkehren, bietet sich die Gütermithnahme im ÖPNV an, um Zusatzeinnahmen zu generieren. Um Verkehrs- und Logistikunternehmen Ansätze für die Umsetzung der Gütermithnahme im ÖPNV zur Verfügung zu stellen, wurden drei Modelle für den Betrieb ausgearbeitet:

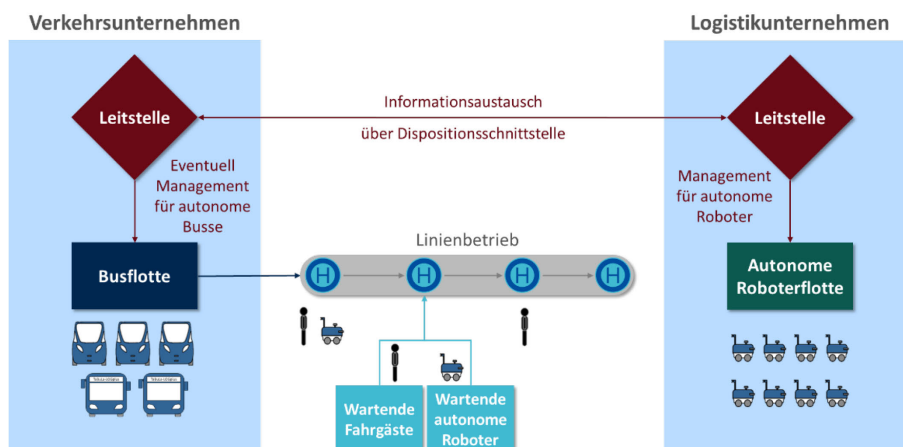
- Modell 1: Verkehrsunternehmen bietet Stellfläche an.
- Modell 2: Verkehrsunternehmen bietet die Buchung der Roboter an.
- Modell 3: Externes Unternehmen als Schnittstelle zwischen Verkehrs- und Logistikunternehmen.

Alle drei Modelle stellen sich derselben Herausforderung: Rechtlich gesehen ist die Gütermithnahme im ÖPNV erlaubt, jedoch sind die Plätze für Personen reserviert. Somit kann nicht sichergestellt werden, dass der Transport eines Roboters in einem bestimmten Bus erfolgen kann. Alternativ kann ein bestimmtes Zeitfenster für den Transport vorgegeben werden.

#### 2.1.5.1 Modell 1

Im ersten Modell bucht das Logistikunternehmen beim Verkehrsunternehmen eine Stellfläche in einem Bus (siehe Abbildung 2.4). Beide Unternehmen agieren ansonsten unabhängig und nutzen ihre eigene Infrastruktur. Dies impliziert die Ansiedlung der Busflotte inklusive Leitstelle und die Ansiedlung der Roboterflotte und -leitstelle beim Logistikunternehmen. Über eine Schnittstelle werden Informationen zwischen den Leitstellen geteilt (z. B. über Platzkapazitäten, Echtzeit-Fahrpläne etc.).

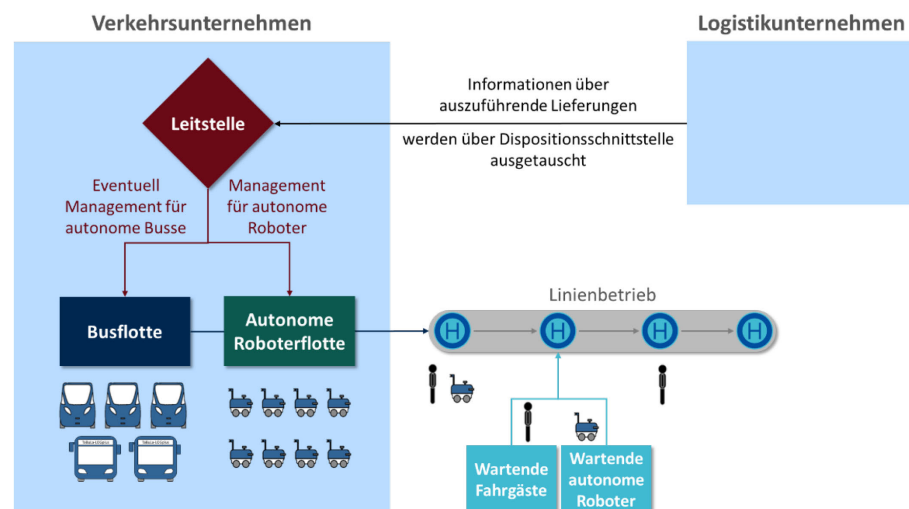
Abbildung 2.4: Ablaufdiagramm Modell 1



## 2.1.5.2 Modell 2

Im zweiten Modell (siehe Abbildung 2.5) übernimmt das Verkehrsunternehmen den Betrieb der Roboter. Das Logistikunternehmen teilt dazu die Lieferdaten mit dem Verkehrsunternehmen, das die Flotte von Bussen und Robotern betreibt. In diesem Modell betreibt das Verkehrsunternehmen eine zentrale Leitstelle für Busse und Roboter.

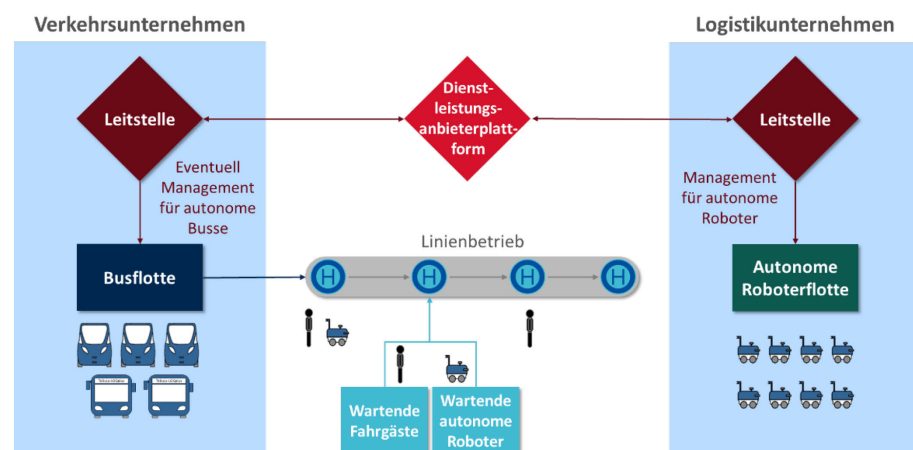
Abbildung 2.5: Ablaufdiagramm Modell 2



## 2.1.5.3 Modell 3

Das dritte Modell (siehe Abbildung 2.6) zeichnet sich dadurch aus, dass das Logistikunternehmen über eine unabhängige Buchungsplattform einen Stellplatz in einem Bus bucht. Die Verwaltung der Bus- und Roboterflotten erfolgt komplett getrennt. Die Kommunikation zwischen beiden Unternehmen findet ausschließlich über die Buchungsplattform statt.

Abbildung 2.6: Ablaufdiagramm Modell 3



## 2.1.5.4 Vergleich der Modelle

Die nachfolgende Tabelle 2.1 nennt für die drei vorgestellten Modelle jeweils drei Vor- und drei Nachteile. Je nach Ausgestaltung des Systems können die Vor- und Nachteile unterschiedliche Gewichtungen haben sowie weitere hinzukommen.

Tabelle 2.1: Vergleich der drei Modelle des Betriebskonzepts

Modell	Vorteile	Nachteile
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus auf die Kernkompetenzen der Unternehmen</li> <li>• Unabhängige Aktionen voneinander möglich</li> <li>• Niedrigster Umsetzungsaufwand im Vergleich zu den anderen beiden Modellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doppelte Leitstellen-Infrastruktur</li> <li>• Erhöhter Koordinationsaufwand für das Verkehrsunternehmen bei mehreren Logistikunternehmen</li> <li>• Mögliche Schnittstellen-/Synchronisierungsprobleme</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weitgehend keine doppelte Infrastruktur</li> <li>• Bündelung bedingt Kosteneinsparung</li> <li>• Durch eine Leitstelle verminderte Schnittstellen-/Synchronisierungsprobleme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsunternehmen wird zu einem Zusteller und benötigt zusätzliche Kompetenzen</li> <li>• Höhere Anschaffungs- und Betriebskosten für das Verkehrsunternehmen</li> <li>• Logistikunternehmen ist für die Zustellung auf das Verkehrsunternehmen angewiesen</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus auf die Kernkompetenzen der Unternehmen</li> <li>• Bündelung Anfragen und Angebote über den externen Dienstleister</li> <li>• Integration verschiedener Logistikunternehmen und Verkehrsunternehmen möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusätzlich Kosten durch externen Dienstleister</li> <li>• Erhöhte Gesamtkomplexität durch weiteres Unternehmen</li> <li>• Mögliche Schnittstellen-/Synchronisierungsprobleme</li> </ul>

## 2.2 Implementierung und Erprobung der Leitstelle sowie KI-basierte Optimierung

Das HAP 4 bestand neben den Simulationen (Kapitel 2.6) aus der Implementierung und Erprobung der Leitstelle sowie der KI-basierten Optimierung der Flottenauslastung, damit Leerläufe und Warenstaus vermieden werden können. Zuerst erfolgten dazu der technische Aufbau der Leitstelle und die Einbindung der Transportroboter und der konventionellen Busse. Während des Testfeldbetriebs (Kapitel 2.5) fand neben der Erprobung des Roboters ebenfalls die Erprobung der Leitstelle statt. Ergänzt wurde die Thematik um eine KI-basierte Optimierung.

**Forschungsfrage:** Wie können die technischen Anforderungen an eine Leitstelle für den teleoperierten Betrieb autonomer Fahrzeuge erfolgreich implementiert und darauf aufbauend der Betrieb simuliert werden?

### 2.2.1 Implementierung und Erprobung der Leitstelle

In diesem Kapitel werden Implementierung und Erprobung der Leitstelle beschrieben. Dies erfolgte sowohl aus einer technischen Perspektive als auch mit dem Fokus auf den\*die Betreiber\*in/ÖPNV. Im ersten Unterkapitel wird die grundlegende Konzeption des Leitstellen-Prototyps beschrieben. Aufbauend darauf werden Erläuterungen zum Synchronisationskonzept, dann ein Einblick in die Leitstellen-Nutzungsoberfläche gegeben. Im Anschluss werden der Aufbau einer Leitstelle bei Interlink sowie die Rahmenbedingungen der Tests aus Sicht der Betreibenden aufgezeigt.

#### 2.2.1.1 Grundlegende Konzepte des Leitstellen-Prototypen

##### **Der Kommunikationsstandard VDA 5050**

Der Leitstellen-Prototyp wurde in Anlehnung an den industriellen Kommunikationsstandard der VDA 5050 entwickelt. Die VDA 5050 fokussiert auf den Austausch von Auftrags- und Statusdaten zwischen einer zentralen Leitsteuerung und Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) in intralogistischen Prozessen. Der Standard ermöglicht eine einheitliche Schnittstelle für die Integration verschiedener FTF-Systeme durch die Definition von Elementen und Abläufen, die für die Steuerung und Koordination von Transportaufträgen erforderlich sind.

Ein Auftrag, auch *Order* genannt, basiert auf einem Graphenmodell, bestehend aus *Nodes* (Knoten) und *Edges* (Kanten), die die Ziele und Wege des Fahrzeugs im Raum darstellen. Die *Nodes* fungieren als Ziele, während die *Edges* die Verbindung zwischen diesen Zielen aufzeigen. Mit beiden Elementen können *Actions* verknüpft werden, die als spezifische Aufgaben des Fahrzeugs auf dem jeweiligen Segment fungieren. *Actions* an einem *Node*

beinhalten Aktivitäten, die an einem bestimmten Ort durchgeführt werden sollen, wie z. B. das Öffnen von Türen oder das Warten auf Passagiere.

Ein besonderes Merkmal der VDA 5050 ist die Fähigkeit zur Durchführung von *InstantActions*, die unabhängig von der aktuellen Position oder Tätigkeit des Fahrzeugs durchgeführt werden können, z. B. sofortiges Anhalten oder Fortsetzen eines Auftrags.

Der Prozess zur Erfüllung einer Order erfordert das sukzessive Durchfahren aller *Nodes* und *Edges* sowie die Ausführung der damit verknüpften *Actions*. Bestimmte Aufgaben wie State-Updates stellen sicher, dass der aktuelle Status des Fahrzeugs kontinuierlich an die Leitstelle berichtet wird. Diese Updates erfolgen bei relevanten Ereignissen, wie der Ankunft an einem *Node*, oder bei Fehlern.

Zusammenfassend vereinfacht die VDA 5050 den Informationsaustausch innerhalb heterogener FTF-Flotten, indem sie einen standardisierten und strukturierten Kommunikationsrahmen bietet, der Flexibilität und Interoperabilität fördert.

### **Grundlegende Architektur der Leitstelle**

Wie in Abbildung 2.3 auf S. 35 dargestellt bildet der Backend-Server der Leitstelle das zentrale Bindeglied zwischen den eingebundenen Fahrzeugen auf der einen Seite und der Nutzungsoberfläche auf der anderen. Die Implementierung des Leitstellen-Backends wird durch eine Reihe von Komponenten realisiert, die auf den Prinzipien von *Event Sourcing*, *Command Query Responsibility Segregation (CQRS)* und *Domain Driven Design (DDD)* basieren. Als Datenbanksystem zur Umsetzung des Event-Sourcing-Konzepts wurde MongoDB ausgewählt (MongoDB 2024).

Zur Kommunikation zwischen Backend-Server und Frontend-Nutzungsoberfläche wird eine Kombination von REST- (*Representational State Transfer*) sowie Web-Socket-Schnittstellen genutzt. Hierbei werden Web-Sockets für kontinuierlichen Informationsaustausch, wie beispielsweise Status-Updates der Fahrzeuge, verwendet. Die REST-Schnittstelle dient dem Austausch einmalig auftretender Informationen, wie bspw. Nutzer\*inneneingaben aus dem Leitstellen-Frontend. Die einzige Verbindung zwischen eingebundenen Fahrzeugen und dem Frontend, die nicht über das Backend erfolgt, ist die Übermittlung der Kamera-Streams über eine direkte Web-Socket-Schnittstelle zwischen dem Frontend und dem jeweiligen Fahrzeug.

Das Frontend der Leitstelle wurde als React-Anwendung umgesetzt (React 2024). React ist eine Bibliothek für die Entwicklung webbasierter Benutzungsoberflächen. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass die Benutzungsoberfläche in wiederverwendbare Komponenten zerlegt wird. Die Komponenten stehen in hierarchischen Beziehungen zueinander und können eigenständig getestet und aktualisiert werden. Dies verbessert die Wartung und Skalierbarkeit der Anwendung. Des Weiteren profitieren React-

Anwendungen von schnellen Ladezeiten, da stets nur diejenigen Komponenten der Benutzungsoberfläche aktualisiert werden, die sich geändert haben.

Zu Test- und Entwicklungszwecken wurden zwei mobile Rechner als permanente Frontend- und Backend-Rechner eingerichtet. So konnte gewährleistet werden, dass zu jeder Zeit ein funktionierender Stand der Leitstelle einsatzbereit war und auch für Tests oder Entwicklungsarbeiten in Lauenburg genutzt werden konnte. Die Leitstelle wurde iterativ im Zusammenspiel mit den Transportrobotern getestet, worauf in Abschnitt 2.3.3 näher eingegangen wird. Integrative Tests mit der Busanwendung fanden ebenfalls regelmäßig statt (siehe Abschnitt 2.3.2).

Um die Verbindung der Fahrzeuge mit der Leitstelle sowie einen Fernzugriff auf die Nutzungsoberfläche zu ermöglichen, wurden Mobilfunkmodule sowie ein von der Technischen Universität Hamburg bereitgestellter VPN-Service genutzt. Mithilfe dieses Services konnten alle Agenten auch über Mobilfunk in ein Netzwerk gebracht werden, innerhalb dessen eine direkte verschlüsselte Kommunikation und Identifikation über IP-Adressen möglich ist. Der Fernzugriff auf die Leitstellen-Nutzungsoberfläche wurde u. a. für die in Abschnitt 2.5.4 beschriebenen Tests genutzt und ermöglicht einen Zugriff auf die Nutzungsoberfläche der Leitstelle von jedem Ort mit Internetanbindung ohne die Notwendigkeit, eigene Server betreiben zu müssen.

### **REST- und Web-Socket-Verbindungen**

Die Übermittlung der Nutzer\*inneneingaben vom Frontend an das Backend geschieht mithilfe einer REST-Schnittstelle. REST ist eine Architektur für den Datenaustausch zwischen Systemen über das Internet. Dabei werden HTTP-Protokolle verwendet, um Informationen zwischen Client (Frontend) und Server (Backend) auszutauschen. Mit REST-Schnittstellen können Daten bereitgestellt oder abgerufen werden. Dazu werden standardisierte Operationen wie GET für das Abrufen und POST für das Senden genutzt. Dies macht REST zu einer weitverbreiteten Methode, um die Kommunikation zwischen verschiedenen Webdiensten und Anwendungen zu ermöglichen.

Die Umsetzung der Web-Socket-Schnittstellen erfolgt mithilfe von *Remote Procedure Calls* (RPC) (gRPC 2024). gRPC ist ein modernes Open-Source-Framework für Hochleistungs-RPCs, das flexibel in unterschiedlichen Umgebungen betrieben werden kann. Es ermöglicht effiziente Verbindungen von Diensten innerhalb und zwischen Rechenzentren und eignet sich ebenso zur Verbindung von Geräten, mobilen Anwendungen und Browsern mit Backend-Diensten. gRPC basiert auf sogenannten *Protocol Buffers*, einem von Google entwickelten Serialisierungsmechanismus zur Definition strukturierter Datenformate. Diese .proto-Dateien dienen als zentrale, sprachübergreifende Definition des Datenschemas für die Kommunikation über gRPC.

Beim Verbindungsaufbau zu einem Backend-Server öffnet ein *Client*, beispielsweise ein Roboter, eine gRPC-Verbindung. Der Roboter führt *Calls* für verschiedene in der Protobuf-Datei definierte Stream-Services aus, wie beispielsweise „*getOrders*“ oder „*postStateUpdate*“. Diese Services ermöglichen den Austausch von Aufträgen (Orders), Status-Updates, Aktionen oder Log-Nachrichten und zwischen Fahrzeug und Backend.

Für eine erfolgreiche Verbindung müssen alle definierten Service-Streams aktiv laufen und eine korrekte Identifikation des Roboters durch das Backend anhand der IP-Adresse vorliegen. Das Backend fordert zudem gemäß VDA 5050 das sogenannte *Factsheet* des Roboters an, in dem die fahrzeugspezifisch verfügbaren Funktionen und Aktionen definiert sind. Eine Session gilt erst als verbunden, wenn alle Streams aktiv sind und das Backend das *Factsheet* des Roboters erfolgreich empfangen hat. Bei Abbruch eines Streams endet die Session und der Roboter initiiert einen erneuten Verbindungsaufbau.

Durch dieses strukturierte und systematische Kommunikationsmodell ermöglicht gRPC eine zuverlässige und effiziente Datenübertragung in verteilten Systemen.

#### 2.2.1.2 Synchronisationskonzept

Um das Ein- und Aussteigen eines Roboters in den Bus automatisch über die Leitstelle koordiniert umsetzen zu können, müssen die Aufträge bzw. die einzelnen Aktionen der involvierten Fahrzeuge synchronisiert werden. Das gesamte Konzept der Synchronisation von zwei Fahrzeugen über die Leitstelle ist in Abbildung 2.7 auf S. 45 dargestellt. Der Roboter darf den Einsteigevorgang nur starten, wenn der Bus an der Haltestelle bereitsteht, und der Bus darf erst abfahren, nachdem der Roboter eingestiegen ist. Dazu muss der Bus an die Leitstelle kommunizieren, dass er an der Haltestelle angekommen ist, und der Roboter muss bereits vorher seinen Wunsch zum Ein- oder Aussteigen mitgeteilt haben. Dies erfolgt über sogenannte Synchronisationslisten.

Für jede Haltestelle H gibt es zwei Listen:

- „*shuttleReady\_H*“ ist die Liste für Busse, die an der Haltestelle H bereitstehen.
- „*shuttleBoarding\_H*“ ist die Liste für Roboter, die an der Haltestelle H in einen Bus ein- oder aus ihm aussteigen möchten.

Durch die Eintragung in die Liste signalisiert ein Fahrzeug allen anderen Fahrzeugen seinen aktuellen Zustand. Sobald es diesen Zustand verlässt, trägt es sich wieder aus der entsprechenden Liste aus. Das Ein- und Austragen wird durch die Aktionen „*JoinSynclList*“ und „*LeaveSynclList*“ umgesetzt.

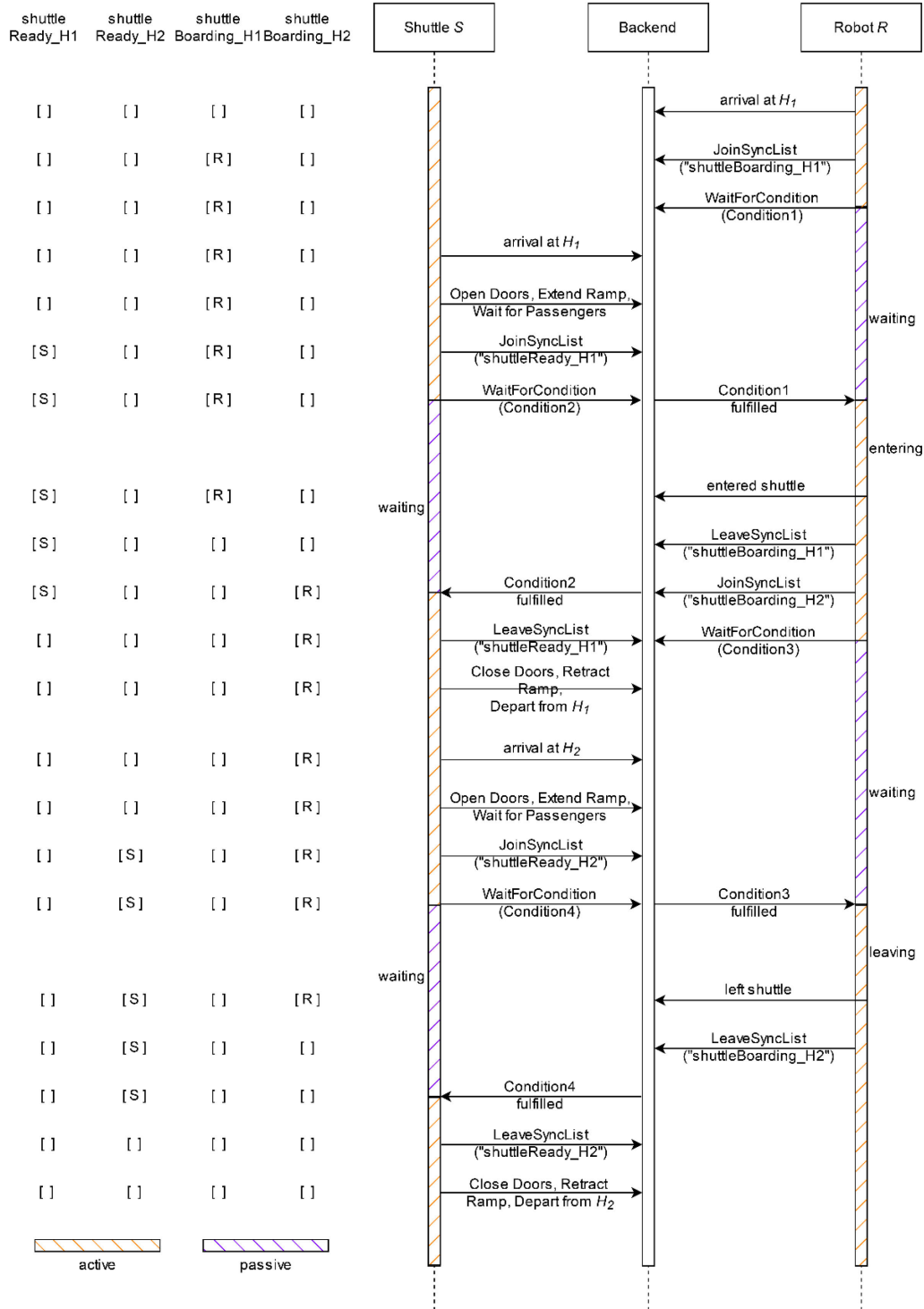
Die für die Synchronisation erforderlichen Zustandsinformationen werden so in den Synchronisationslisten bereitgestellt. Die Fahrzeuge müssen nun auf entsprechende Bedingungen warten, um den Ein- oder Ausstiegsvorgang zu starten. Bedingungen können so definiert sein, dass eine Synchronisationsliste leer oder eine bestimmte Anzahl von Eintragungen enthalten sein muss. Alle nachfolgenden Aktionen des Auftrags werden erst ausgeführt, sobald die definierte Bedingung erfüllt ist. Dies wird durch die Aktion „*WaitForTrigger*“ umgesetzt. Der Roboter wartet an der Haltestelle *H*, bis die zugehörige Synchronisationsliste *shuttleReady\_H* einen Eintrag enthält, was bedeutet, dass ein Bus an der aktuellen Haltestelle verfügbar und für einen Einstieg bereit ist.

Der Bus hingegen fährt an der Haltestelle *H* nur ab, wenn die Synchronisationsliste *shuttleBoarding\_H* leer ist. Dies impliziert, dass kein Roboter den Ein- oder Ausstiegsprozess durchführen muss. Die Koordination der Ein- und Ausstiege im beschriebenen Synchronisationskonzept verhindert einen automatischen Halt der Busse an Bushaltestellen ohne Roboter, da hier die Synchronisationsliste keine Einträge enthält.

Der Betriebsablauf für den Ein- oder Ausstiegsprozess für den Bus ist an jeder Haltestelle *H* identisch und wird hier am Beispiel von Haltestelle *H1* dargestellt (siehe Abbildung 2.7).

- Ankunft des Busses an *H1*
- Türen öffnen, Rampe ausfahren, Warten auf den Ein- und Ausstieg von Passagieren
- Eintragen in die Synchronisationsliste *shuttleReady\_H1*
- Auf Bedingung warten: *shuttleBoarding\_H1* soll leer sein.
  - Ist kein Roboter an der Haltestelle *H1*, ist die Bedingung automatisch erfüllt.
  - Sind einer oder mehrere Roboter in der Synchronisationsliste eingetragen, wartet der Bus, bis alle Roboter wieder aus der Liste ausgetragen sind (nach abgeschlossener Ein- oder Ausfahrt).
- Austragen aus der Synchronisationsliste *shuttleReady\_H1*
- Rampe einfahren, Türen schließen
- Abfahrt des Busses von *H1*
- Für *H2* wiederholt sich dieser Ablauf.

Abbildung 2.7: Ablaufdiagramm Synchronisation



Der Ablauf für den Roboter am Beispiel vom Einstieg an Haltestelle H1 und Ausstieg an Haltestelle H2 (siehe Abbildung 2.7):

- Ankunft des Roboters an H1
- Eintragen in die Synchronisationsliste *shuttleBoarding\_H1*
- Auf Bedingung warten: *shuttleReady\_H1* soll Eintrag enthalten.
  - Der Roboter wartet, bis die Liste für bereitstehende Busse einen Eintrag hat und dementsprechend ein zur Einfahrt bereitstehender Bus an der Haltestelle verfügbar ist.
- Einfahrt des Roboters in den Bus
- Austragen aus der Synchronisationsliste *shuttleBoarding\_H1*
- Eintragen in die Synchronisationsliste *shuttleBoarding\_H2*
  - Sobald der Roboter sich aus der Synchronisationsliste für die Starthaltstelle austrägt, trägt er sich in die Synchronisationsliste für die Zielhaltestelle ein und signalisiert dem Bus so den Wunsch, dort auszusteigen.
- Auf Bedingung warten: *shuttleReady\_H2* soll Eintrag enthalten.
  - Der Roboter wartet, bis das Shuttle an der Zielhaltestelle angekommen ist und sich hier in die Synchronisationsliste *shuttleReady\_H2* eingetragen hat.
- Ausfahrt des Roboters aus dem Bus
- Austragen aus der Synchronisationsliste *shuttleBoarding\_H2*
  - Der Roboter trägt sich aus der Synchronisationsliste aus und signalisiert dem Bus somit, dass der Ausstieg abgeschlossen ist.

### 2.2.1.3 Überblick über die Leitstellen-Nutzungsoberfläche

Die Nutzungsoberfläche der Leitstelle umfasst verschiedene Ansichten zur Überwachung der eingebundenen Fahrzeuge, Möglichkeiten zum Eingriff in die Fahrzeugsteuerung (bspw. durch das Anlegen von Fahrziel-Vorgaben bzw. Aufträgen oder durch Fernsteuerung) sowie projekt- und experiment-spezifische Einstellungen. Darüber hinaus besteht in jeder Ansicht die Möglichkeit, laufende Experimente zu starten oder zu pausieren (grüner Button, entweder mit „Play“- oder „Pause“-Symbol) sowie endgültig abzubrechen („Stop All“-Button).

#### **Dashboard**

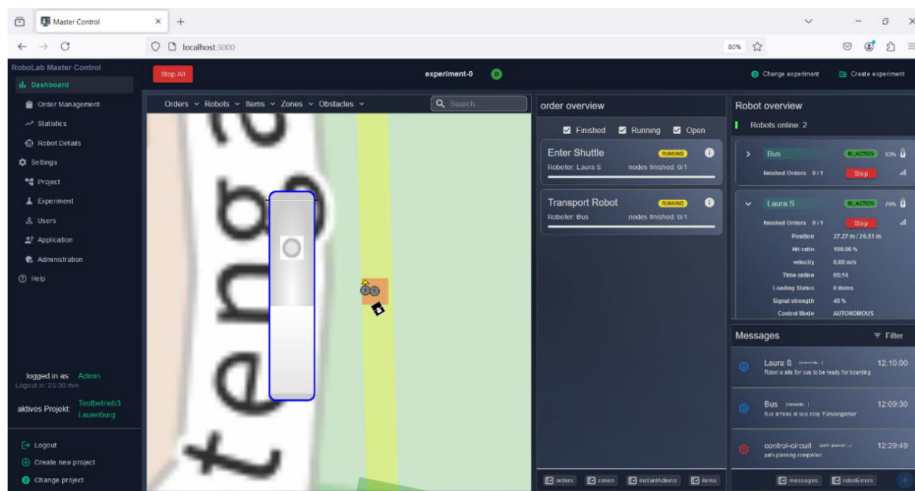
Das Dashboard ist die Hauptseite der Leitstelle und wird unmittelbar nach dem Nutzer\*innen-Login und der Projektauswahl angezeigt (siehe Abbildung 2.8). Es kann jederzeit über die Schaltfläche „Dashboard“ aufgerufen werden. Das Dashboard bietet einen Überblick über das aktuelle Experiment, indem es alle zugehörigen Aufträge, Roboter und Zonen auf der Karte anzeigt und deren übermittelte Parameterwerte darstellt.

Im Rahmen des Leitsystems umfasst ein Experiment den Fahrplan des Busses sowie alle Roboter-Aufträge eines Betriebstags. Der Name des aktuell ausgewählten Experiments und ein Button zu dessen Start werden in der

Kopfzeile angezeigt. Das Experiment kann über die Schaltflächen „*Change experiment*“ geändert werden. Für einen besseren Überblick über die Karte können die anzuzeigenden Symbole im Kopf der Karte gefiltert werden.

Im unteren Teil der Seite befinden sich Tabs für „*orders*“, „*instant actions*“, „*items*“ und „*zones*“, um zwischen Tabs mit detaillierten Informationen und übermittelten Parameterwerten der überwachten Instanzen zu wechseln. Durch Klicken auf ein Symbol in der Karte werden ebenfalls der entsprechende Tab und die bestehenden Informationen zur angeklickten Instanz geöffnet. Der Tab *orders* bietet einen Überblick über den Fortschritt des Auftrags und Informationen über den Status der zugehörigen Knoten und Kanten. *Instant actions* listet die Sofortaktionen, die nach dem relevanten Roboter gefiltert werden können, und *items* die Objekte und Container, die Teil des Experiments sind, sowie ihre aktuellen Positionen. Der Tab *zones* zeigt die Liste der mit dem Experiment verbundenen Zonen sowie der Gegenstände und Roboter, die sich in jeder Zone befinden.

Abbildung 2.8: Dashboard der Leitstelle



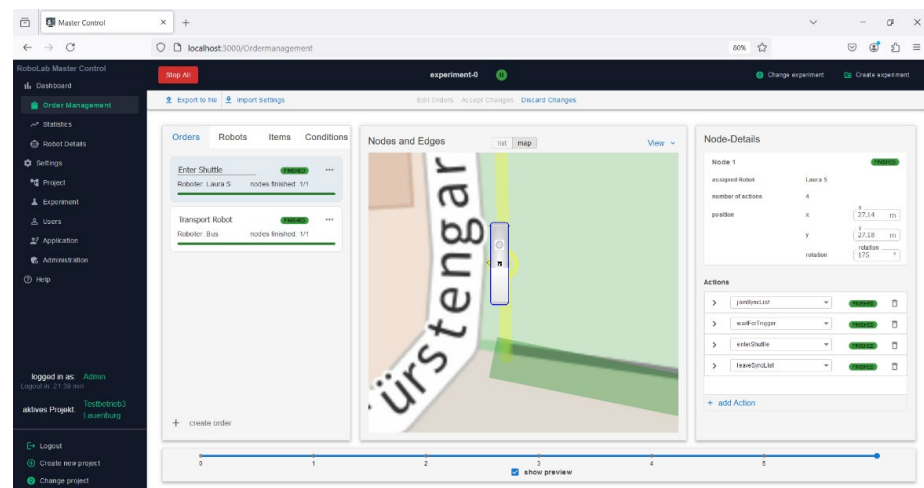
Im Gegensatz zur Übersicht über Aufträge oder Gegenstände ist die Roboterübersicht immer sichtbar, um sicherzustellen, dass Abweichungen im Prozess in Bezug auf den Roboter leicht erkennbar sind. Hier existiert für jeden Roboter ein Button „*Stop*“, um den entsprechenden Roboter in kritischen Situationen sofort zum Stehen zu bringen. In der unteren rechten Ecke der Ansicht werden Nachrichten mit wichtigen Informationen angezeigt.

## Order Management

Anlegen und Bearbeiten von Aufträgen erfolgen im *Order Management* (siehe Abbildung 2.9). Um Aufträge anzulegen und zu bearbeiten, muss zunächst der Bearbeitungsmodus über „*Edit Orders*“ aktiviert werden. Danach erscheinen einige neue Schaltflächen zur Bearbeitung. Alle Änderungen an den Aufträgen müssen später mit „*Accept Changes*“ bestätigt oder mit „*Discard Changes*“ verworfen werden. Das *Order Management* zeigt links eine Ansicht mit Listen der angelegten Aufträge, Roboter, Objekte und Bedingungen. In der Mitte gibt es eine Darstellung der Knoten und Kanten der Aufträge als Liste oder auf der Karte. Rechts werden detaillierte Informationen zu den ausgewählten Knoten, Kanten oder Robotern dargestellt. Die Leiste am unteren Bildrand ermöglicht eine Vorschau der definierten Aufträge zur Vorhersage zukünftiger Ereignisse.

In der „*Create Order*“-Ansicht werden neue Aufträge in der Auftragsliste auf der linken Seite erstellt. Ein neuer Auftrag ist zunächst leer und enthält weder Knoten noch Kanten. Ausgewählte Aufträge zeigen alle zugehörigen Knoten und Kanten (Abbildung 2.9). Knoten können durch Anklicken von „*Add Node*“ in der Listenansicht oder durch Doppelklick in der Kartenansicht erstellt werden. Die Kanten zwischen den Knoten werden automatisch durch das System erstellt. Nach dem Erstellen eines neuen Knotens öffnen sich dessen Details auf der rechten Seite. Die Position des Knotens kann über diese Knotendetails oder durch Verschieben des Knotens in der Kartenansicht angepasst werden. Die Knotendetails werden auch zum Erstellen und Bearbeiten von Aktionen verwendet. Neue Aktionen können mit der Schaltfläche „*add Action*“ erstellt werden. In der Aktionsliste erscheint eine leere Aktion mit einem Dropdown-Menü zur Auswahl einer verfügbaren Aktion. Die Menge der verfügbaren Aktionen ist im *Factsheet* definiert. Die Anzahl der Aktionen pro Knoten ist frei wählbar.

Abbildung 2.9: Order Management der Leitstelle



Einzelnen Kanten können auch über die Kantendetails Aktionen zugewiesen werden. Eine Kante kann über die Liste oder die Karte ausgewählt werden. Diese Kantenaktionen werden so lange ausgeführt, wie sich der Roboter auf der Kante befindet.

Einige Kombinationen von Knoten und Aktionen werden im Anwendungsfall häufig wiederholt. Zu diesem Zweck wurden sogenannte *Snippets* erstellt, die automatisch die erforderlichen Knoten und zugehörigen Aktionen für ein ausgewähltes Roboterverhalten generieren. So gibt es die *Snippets* für das Bedienen einer Haltestelle und für den Ein- und Ausstieg. Diese sind durch einen Rechtsklick auf eine Zone oder über die *Robot Details* auswählbar.

### **Robot Details**

Die „*Robot Details*“-Ansicht (siehe Abbildung 2.10) ermöglicht eine detaillierte Überwachung und Fernsteuerung einzelner Roboter. Die Nutzungsoberfläche ist in Abschnitte mit jeweils spezifischen Informationen und Kontrollmöglichkeiten unterteilt.

**Roboterwahl und einfache Statusanzeige:** Oben links (Kasten 1) können Nutzende zwischen verschiedenen Robotern wechseln (z. B. „*Laura S*“). Oben mittig können der Status des Roboters („*IN\_ACTION*“) sowie die Betriebszeit abgelesen werden.

**Kamera-Stream und Fernsteuerung:** Im zentralen linken Teil (Kasten 2) der Ansicht können Live-Kamerabilder des Roboters angezeigt werden, sofern dieser Kamerabilder übermittelt. Unmittelbar unter dem Kamerabild ist ein Bereich für die Fernsteuerung des Roboters aus der Leitstelle vorhanden. Hier kann per Klick auf „*Request remote-control*“ (Kasten 3) die autonome Fahrt des Roboters unterbrochen und in den manuellen Modus umgeschaltet werden, der standardmäßig eine Steuerung über die Pfeiltasten des Leitstellen-Rechners zulässt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Funktion ohne eine nähere Begutachtung der zuständigen Kontrollinstanzen nicht im öffentlichen Raum eingesetzt werden darf und daher in gesicherter Umgebung (z. B. Versuchshalle ITL) getestet wurde. Unter „*Change key layout*“ (Kasten 4) kann die Tastenvergabe zur Steuerung angepasst werden. Während der Fernsteuerung eines Roboters aus der Leitstelle kann die Begleitperson vor Ort weiterhin permanent die Kontrolle über den Roboter erlangen.

**Auftragsübersicht:** Rechts neben der Kamera-Ansicht (Kasten 5) befindet sich die Übersicht der dem ausgewählten Roboter zugeordneten Aufträge („*order overview*“). Der Status des gesamten aktuellen Auftrags sowie der einzelnen Auftragsknoten und -kanten (in diesem Fall nur ein Knoten „*Node 1*“) wird ebenfalls angezeigt. In diesem Fall befindet der Roboter sich auf dem Weg zu *Node 1*. Wird dieser erreicht und der Roboter beginnt, die Aufgaben auszuführen, die an diesem Knoten angelegt wurden, ändert sich die Statusanzeige des Knotens von „*WAITING*“ auf „*RUNNING*“. Sind alle

Aufgaben des Knotens erfüllt, ändert sich sowohl die Statusanzeige für den gesamten Auftrag als auch für den Knoten zu „FINISHED“.

**Roboterinformationen und Spezifikationen:** Rechts im „Specification“-Abschnitt (Kasten 6) sind Informationen über den Roboter und seine verfügbaren Aktionen abrufbar. Zu den möglichen Befehlen gehören beispielsweise die Standardfunktionen „*factsheetRequest*“ (Anfrage des aktuellen VDA-5050-Factsheets des Roboters), „*requestRemoteControl*“ (Anfrage zur Fernsteuerung) und „*releaseRemoteControl*“ (Freigabe der Steuerung). Diese Funktionen erleichtern die Interaktion und Kontrolle über den Roboter. Darüber hinaus finden sich in diesem Bereich auch roboterspezifische Funktionen wie hier „*detectApriltag*“ oder – in der Abbildung nicht gezeigt – „*enterShuttle*“ bzw. „*exitShuttle*“.

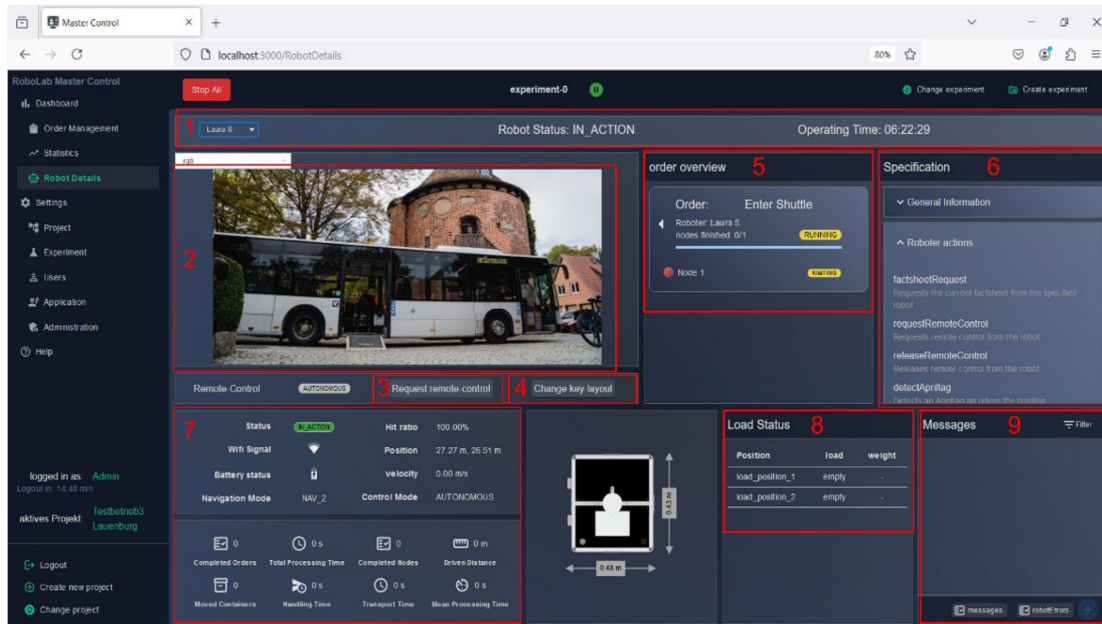
**Detaillierter Systemstatus und Statistiken:** Der Bereich unten links (Kasten 7) zeigt Systemstatistiken, wie die Signalstärke der Verbindung des Roboters, den Batteriestatus, die Geschwindigkeit des Roboters und den aktuellen Navigationsmodus. Des Weiteren werden Leistungsdaten wie „*Completed Orders*“, „*Driven Distance*“ und „*Total Processing Time*“ angezeigt, um Nutzenden einen schnellen Überblick über die Effektivität des Roboters darstellen zu können.

**Beladungsstatus:** Der Bereich in Kasten 8 zeigt – falls erfasst – den Status der Ladung des Roboters an. Dies kann dazu beitragen, die Belegung der Roboter oder Busse sowie die Masse der transportierten Objekte im Blick zu behalten. In diesem Beispiel sind beide Ladepositionen leer oder nicht erfasst.

**Nachrichten und Fehlermeldungen:** Ein Nachrichtenfeld (Kasten 9) auf der rechten unteren Seite zeigt aktuelle Systemnachrichten und Fehler an. Eine Filterfunktion ist nützlich, um Echtzeit-Benachrichtigungen und mögliche Fehler zu überwachen und entsprechend zu reagieren. Hier werden alle an die Leitstelle übermittelten Log-Nachrichten der Roboter dargestellt.

Zusammengefasst ermöglicht die Robot-Details-Ansicht eine detaillierte Überwachung und Steuerung mobiler Roboter, einschließlich Auftragsüberwachung, Steuerungsoptionen, Systemstatus- sowie Ladeinformationen. Es wird eine klare Trennung zwischen Überwachungs- und Steuerungselementen gewährleistet, sodass Bedienung und Kontrolle des Roboters sicher und effizient durchgeführt werden können.

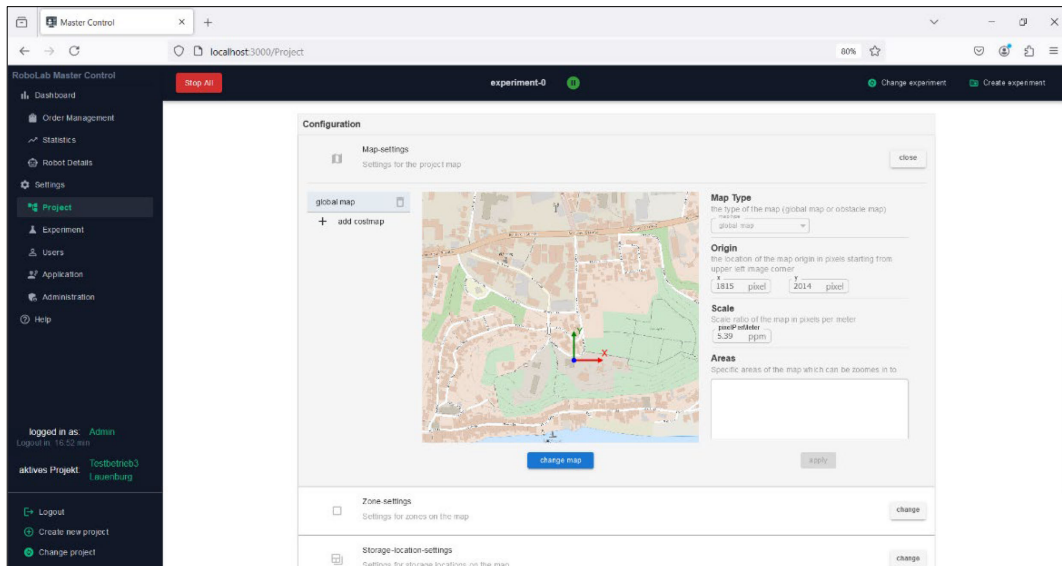
Abbildung 2.10: Roboter-Detail-Ansicht



## Projekteinstellungen

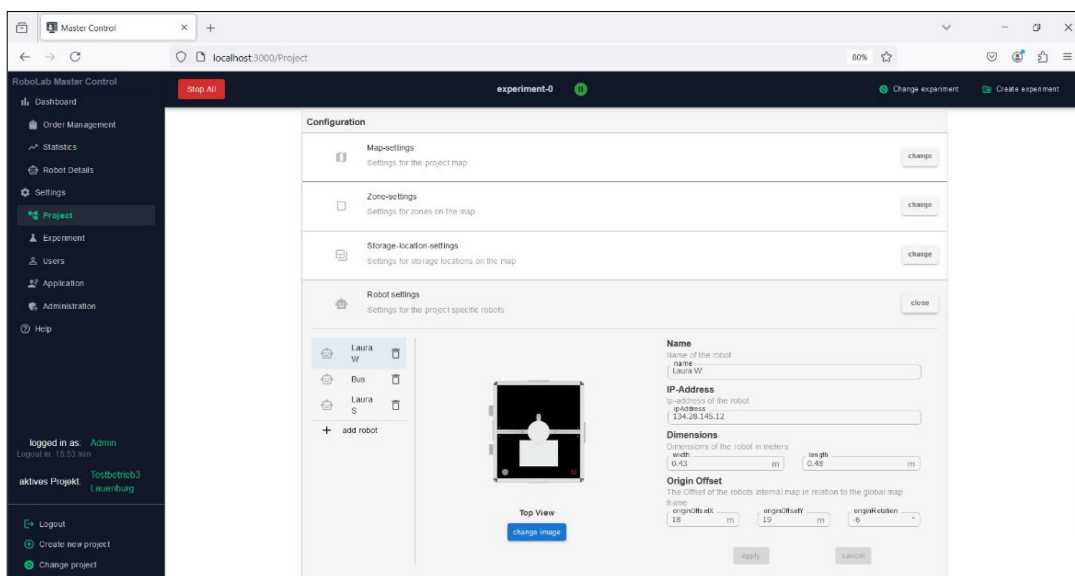
Auf Projektebene veränderte Einstellungen gelten für alle Experimente eines Projekts. Verschiedene Projekte stellen unterschiedliche Szenarien dar, die in verschiedenen Gebieten stattfinden können. Eine Nutzung der Kombination aus Roboter und Leitstelle an einem anderen Ort, vorstellbar z. B. bei der Erweiterung des Betriebsgebiets, ermöglicht folgendes Vorgehen: Zunächst muss eine entsprechende Karte des projektspezifischen Gebietes definiert werden, indem über „change map“ eine neue Karte als Bild im png-Format hochgeladen wird (siehe Abbildung 2.11). Der Ursprung der Karte kann verändert werden, um den Bezugspunkt für alle Koordinaten anzupassen. Der Maßstab gibt an, wie viele Kartenpixel einem Meter entsprechen, um eine korrekte Darstellung des realen Szenarios zu gewährleisten. Eine Voraussetzung für die Funktionalität der Karte ist, dass der Maßstab über die gesamte Karte einheitlich akkurat vorliegt, sodass für jede Position auf einer Roboterkarte auch der entsprechende Punkt in der Karte der Nutzungsoberfläche berechnet werden kann und umgekehrt. Nur so kann gewährleistet werden, dass bspw. Auftragsknoten an der richtigen Stelle gesetzt oder Roboter auch an ihrer tatsächlichen Position dargestellt werden.

Abbildung 2.11: Karten-Einstellungen eines Projekts



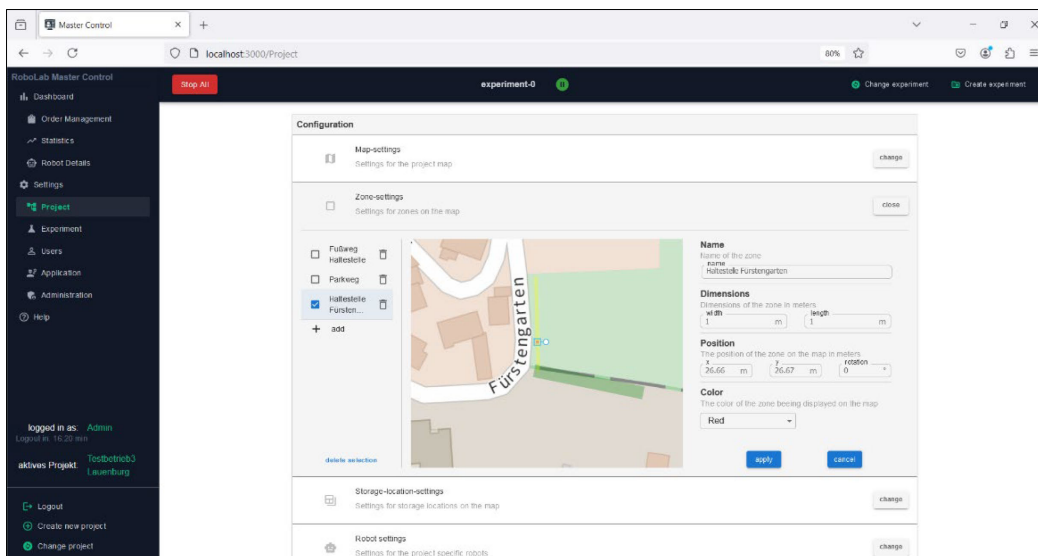
Die Robotereinstellungen in den Projekteinstellungen ermöglichen das Erstellen, Löschen und Ändern von Robotern, wobei jeder Roboter eindeutig benannt und über eine IP-Adresse mit dem realen Roboter verknüpft wird (siehe Abbildung 2.12). Der Ursprungs-Offset und die „*origin rotation*“ beschreiben Differenzen und Drehungen zwischen den Koordinatensystemen der Roboterkarte und der Karte des Frontends. Die Draufsicht kann für jeden einzelnen Roboter angepasst werden, um sie optisch voneinander unterscheiden zu können.

Abbildung 2.12: Roboter-Einstellungen eines Projekts



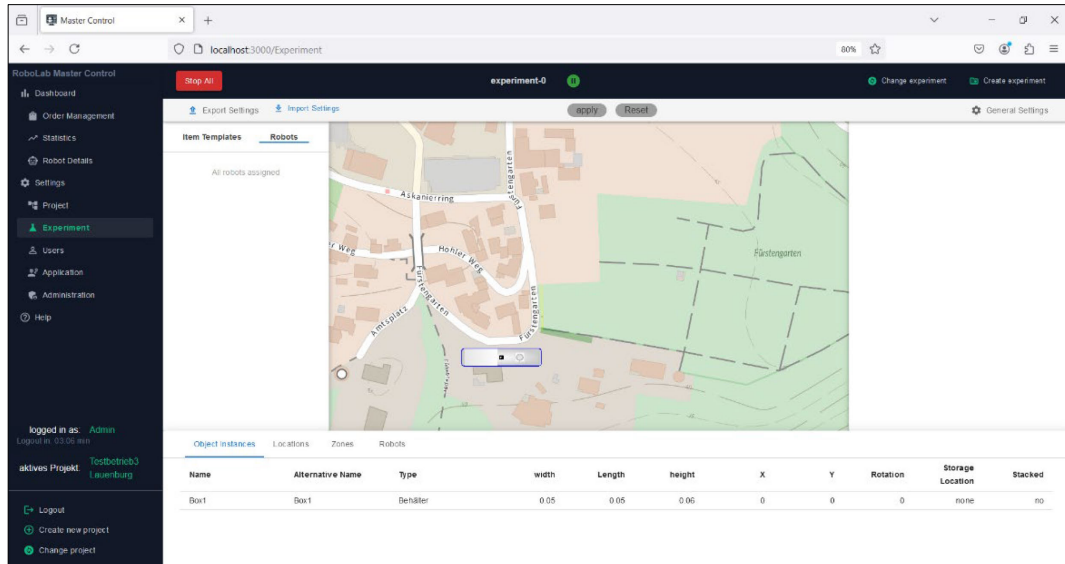
Es gilt, das Anlegen von Aufträgen zu vermeiden, die von einem Fahrzeug nicht erfolgreich bearbeitet werden können, da sie bspw. in einem Bereich außerhalb der Navigations-Karte des Roboters liegen. Dafür kann in den generellen Projekt-Einstellungen ausgewählt werden, dass Auftragsknoten nur innerhalb von Zonen angelegt werden können. Um die Erstellung von Knoten nur für bestimmte Orte zu erlauben, können sogenannte Zonen verwendet werden. Sie können erstellt, gelöscht und in der Liste der Zonen in den Projekteinstellungen zur Änderung ausgewählt werden (siehe Abbildung 2.13). Die ausgewählte Zone kann in Größe, Drehung und Positionierung angepasst werden. Außerdem dienen Eingabefelder dazu, Namen und Farbe der Zonen zu ändern, damit sie leicht erkennbar und unterscheidbar sind.

Abbildung 2.13: Zonen-Einstellungen eines Projekts



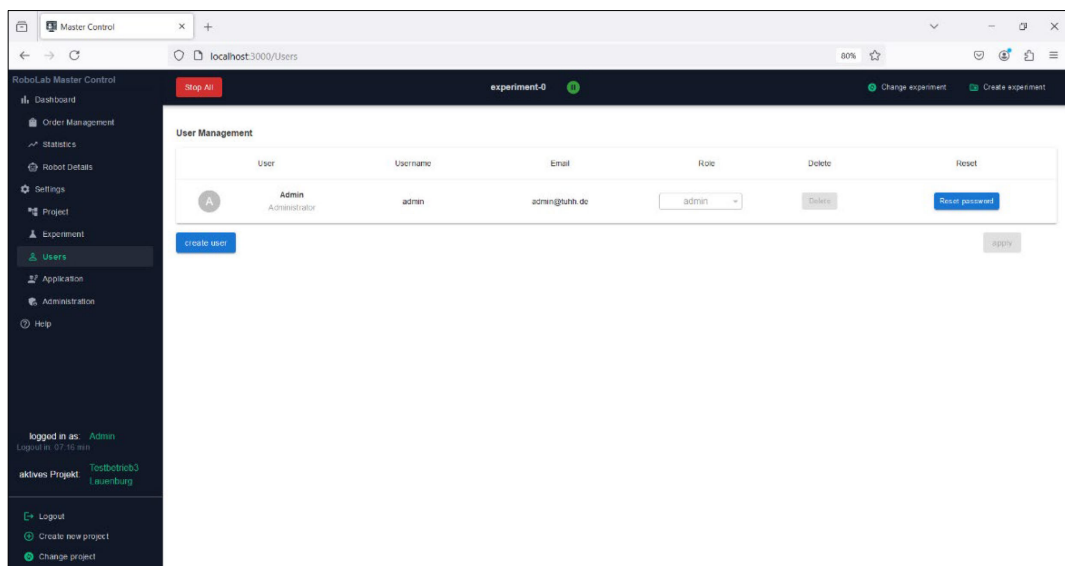
Neben den Projekt-Einstellungen, die für alle angelegten Experimente gelten, können auch auf der Ebene einzelner Experimente Einstellungen vorgenommen werden (siehe Abbildung 2.14). Einzelne Roboter können Experimenten hinzugefügt oder beispielsweise Zonen für individuelle Projekte angepasst werden. Wichtig hierbei ist, dass ein erstellter Auftrag nur dann einem Roboter zugewiesen werden kann, wenn dieser Roboter auch dem aktiven Experiment zugeordnet ist, was in den Experiment-Einstellungen unter dem Reiter „Robots“ vorgenommen werden kann. Im Beispiel sind bereits alle Roboter dem Experiment zugeordnet und werden entsprechend im Karten-Ursprung angezeigt.

Abbildung 2.14: Experimentspezifische Einstellungen



Die Leitstelle umfasst auch ein Benutzer\*innen-Management (*User Management*), mit dessen Hilfe der Zugriff von Nutzenden in bestimmten Rollen auf die Leitstelle begrenzt werden kann (siehe Abbildung 2.15). So kann gewährleistet werden, dass bei Bedarf einige sicherheitskritische Einstellungen oder Aktivitäten nur von entsprechend geschultem Personal vorgenommen werden können.

Abbildung 2.15: User-Management-Ansicht



#### 2.2.1.4 Aufbau einer Leitstelle bei Interlink

Zum Aufbau einer Leitstelle bei Interlink wurden zwei Leitstellenarbeitsplätze ausgerüstet, einer als Büro-Arbeitsplatz, der andere als mobiler Arbeitsplatz. Zur Identifikation der benötigten Hardware wurden die an sie gestellten Anforderungen auf Basis der Leitstellensoftware beschrieben. Im Anschluss erfolgte die Beschaffung der in der folgenden Tabelle aufgelisteten Komponenten.

Tabelle 2.2: Leitstellenausstattung bei Interlink

Einsatzform	Gerät	Typ
Büro-Arbeitsplatz	Notebook	Lenovo ThinkPad P14s
Büro-Arbeitsplatz	Monitor	LG27UP650-W
Büro-Arbeitsplatz	Monitor Stand Alone	Samsung Flip Pro WM65B
Mobiler Arbeitsplatz	Notebook	Lenovo ThinkPad P14s
Mobiler Arbeitsplatz	Monitor	Asus ZenScreen MB16AHP
Mobiler Arbeitsplatz	Hotspot	NetGear NightHawk M2

#### 2.2.1.5 Erprobung der Leitstelle mit Fokus auf Betreiber\*in/ÖPNV

Die Leitstelle wurde während des dritten Testfeldbetriebs von fünf Interlink-Mitarbeiter\*innen getestet. Das Ziel bestand darin zu testen, wie die jeweiligen Bedienenden mit unterschiedlichen Vorerfahrungen mit dem Interface zurechtkommen und die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit während der Bedienung zu bewerten. Zudem diente der Test als Sicherstellung des Fernzugriffs auf die Leitstelle.

#### Tester\*innen (T)

Die Tests wurden von fünf Tester\*innen mit unterschiedlichen fachlichen Hintergründen sowie Erfahrungen mit der Leitstellenoberfläche durchgeführt. Die Testenden stammten aus vier Bundesländern: Baden-Württemberg, Berlin, Brandenburg und Hamburg. Die Roboter, die im Rahmen dieser Tests zu steuern und zu überwachen waren, befanden sich in Lauenburg/Elbe. Einen Überblick über die fünf Personen gibt Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Übersicht Testende

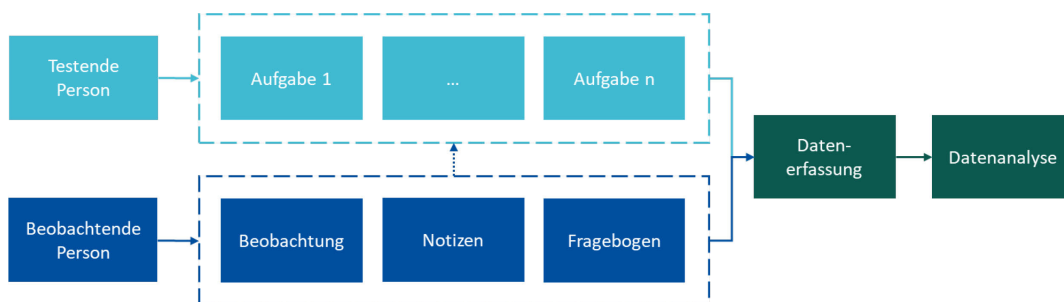
Nr.	Erfahrung mit der Leitstelle	Ausbildung
T 1	Nein	Sozialwissenschaften Verkehrswesen
T 2	Nein	Naturwissenschaften Verkehrswesen
T 3	Hatte bereits einen guten Überblick über die Funktionalität der Software	Verkehrswesen
T 4	Übersicht durch Kurzanleitung zur Leitstelle	Wirtschaftswissenschaften
T 5	Übersicht durch Kurzanleitung zur Leitstelle	Wirtschaftswissenschaften

### Methodik

Für den Test wurde ein methodisch gemischter Ansatz aus drei Methoden verwendet: Aufgabenerfüllung, Think-Aloud-Protokoll und 5-Punkte-Likert-Fragebogen.

Die Personen sollten jeweils eine Aufgabenliste abarbeiten (Anlage 2). Währenddessen wurden sie von einer Person beobachtet, die Notizen anfertigte, eine weitere unterstützte die Testenden bei der Bearbeitung und stand für Rückfragen zur Verfügung. Vor Ort in Lauenburg/Elbe waren zwei Personen vom ITL am Test beteiligt. Sie beaufsichtigten den Transportroboter und unterstützten bei den Leitstellentests. Die Testenden arbeiteten nach dem Think-Aloud-Prinzip, d. h., sie sprachen ihre Gedankengänge und Entscheidungsprozesse laut aus. Im Nachgang zu den Tests wurden die Testenden zu ihrer Zufriedenheit befragt und konnten den Test auf einer 5-Punkte-Likert-Skala bewerten. Abbildung 2.16 zeigt eine schematische Darstellung des Ablaufs.

Abbildung 2.16: Ablauf des Leitstellentests



Die beobachtende Person erfasst die Daten durch quantitative Metriken und durch qualitatives Feedback. Analysiert wurden anschließend Usability-Probleme und die Benutzer\*innenzufriedenheit. Auf dieser Basis wurden Empfehlungen zur Verbesserung der Nutzer\*innenerfahrung gegeben.

Die Ergebnisse der Tests sind Kapitel 2.5.4 zu entnehmen.

### 2.2.2 KI-basierte Optimierung

**Forschungsfrage:** Welche KI-Methoden lassen sich kombinieren, wie z. B. *Gaussian Processes*, *Bayesian Statistics*, *Causal Inference*, um auf Basis von historischen Daten und Simulationsdaten die bestmögliche Vorhersagequalität zu erreichen?

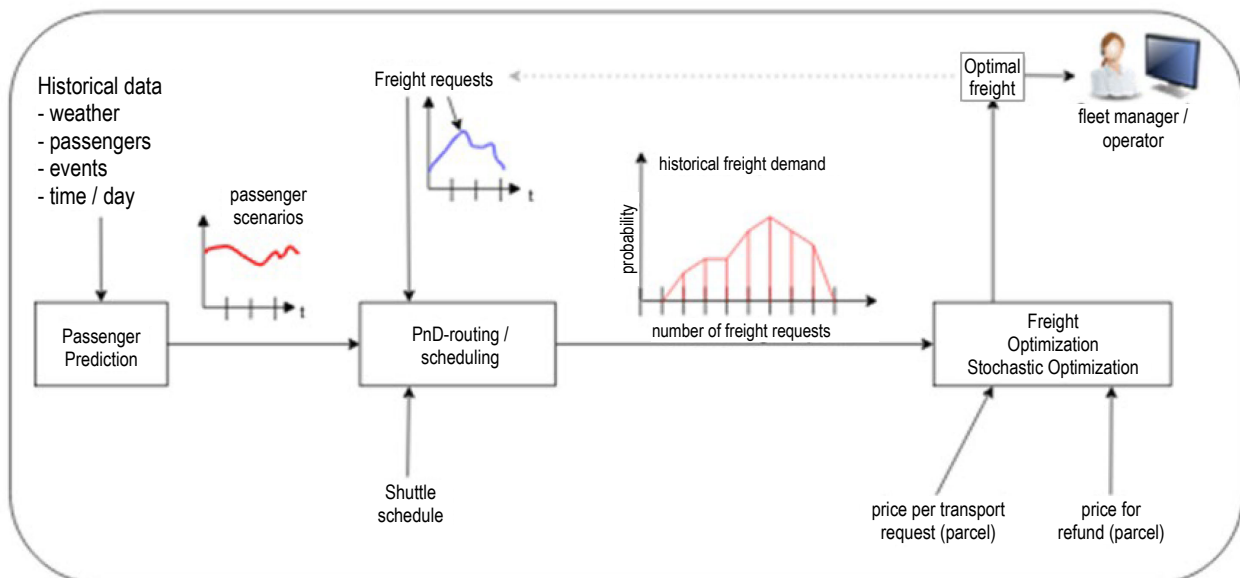
AP 4.2 befasste sich mit der KI-basierten Optimierung der Flottenauslastung. Das Ziel war die Optimierung der Frachtkapazität, um Leerläufe und Warenstaus zu vermeiden. Diese Optimierung adressiert die Zufriedenheit der Kund\*innen, die den Gütertransport in Auftrag geben, sowie der Passagier\*innen, die keine zusätzlichen Wartezeiten infolge des integrierten

Gütertransports erfahren sollen. Zudem sind bei der Optimierung die Reduktion von Lagerkosten und die Maximierung der Transporteinnahmen wichtig.

Bei der KI-basierten Optimierung der Flottenauslastung zur Vermeidung von Warenstaus und Leerläufen wurde ein System betrachtet, das aus einer Flotte von autonomen Shuttles und Transportrobotern besteht, die durch eine Leitstelle koordiniert und überwacht wird. Ziel der Optimierung war es, ein Tool für Betreiber\*innen zu schaffen, das den Güterverkehr durch bestmögliche Ausnutzung freier Kapazitäten optimiert, was in einer globalen Perspektive analog zur Optimierung des Profits gesehen werden kann.

Für die Lösung und Konzeption wurde das folgende System betrachtet: Die Shuttles bewegen sich auf einem Netz von Verkehrslinien und fahren nach einem festen Zeitplan. Die Flotte von Transportrobotern bewegt sich autonom auf kurzen Strecken, um Güter bei Endverbraucher\*innen abzuholen und abzuliefern. Für längere Fahrwege nutzt die Roboterflotte den Shuttleverkehr. Das Passagier\*innenaufkommen ist mit Unsicherheiten behaftet und es wird die Annahme getroffen, dass Personenbeförderung immer Vorrang gegenüber dem Robotertransport hat.

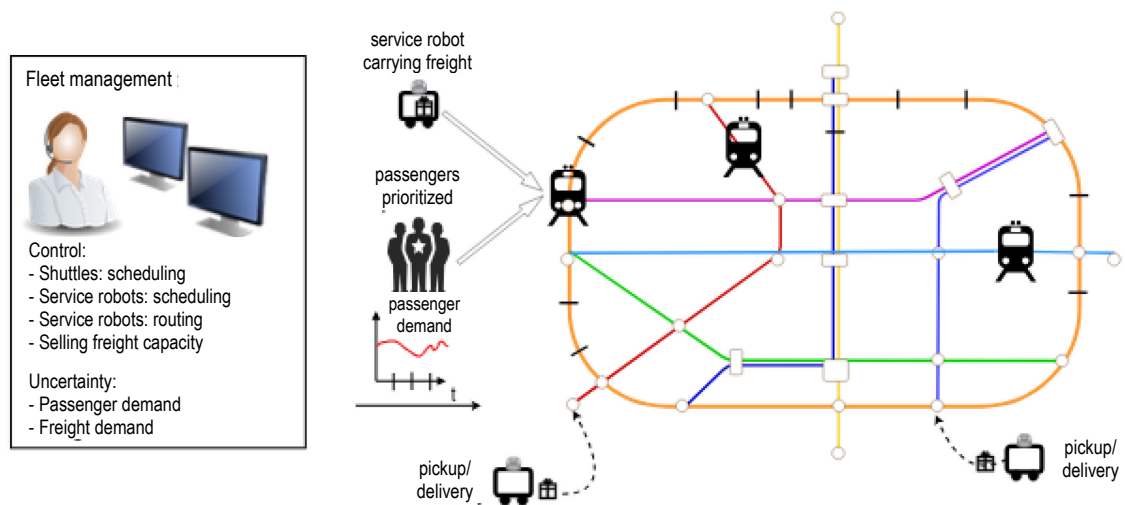
Abbildung 2.17: Konzept für KI-basierte Optimierung der Flottenauslastung



Die größten Herausforderungen stellten das unsicherheitsbehaftete Passagier\*innenaufkommen, das von vielen Faktoren abhängt und im Voraus nicht bekannt ist, sowie die Priorisierung der Personenbeförderung gegenüber dem Gütertransport dar, die in der Optimierung berücksichtigt werden muss. Dies führt zu einer wirtschaftlichen Perspektive: Wie kann die überschüssige Kapazität eines Personenverkehrssystems optimal auf dem Güterverkehrsmarkt platziert werden?

Um diese Frage zu beantworten, hat Palaimon ein Tool entwickelt, das der\*dem Flottenmanager\*in hilft, eine strategische Entscheidung hinsichtlich der Menge an Frachtkapazitäten zu treffen, die in mittel- bis langfristiger Zukunft (Zeitraum Monat bis Jahr) auf dem Markt verkauft werden kann. Konzept, Methodik, Implementierung und Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

Abbildung 2.18: Systemübersicht



## Konzept der Frachttransportoptimierung und Ergebnisse

### *Annahmen, Herausforderungen und Ziele*

Eine grundlegende Annahme der Optimierung ist die Priorisierung der Personenbeförderung vor dem Gütertransport. Sind alle Plätze im Shuttle von Passagier\*innen besetzt, kann der Transportroboter nicht in das Shuttle „einsteigen“.

Das Passagier\*innenaufkommen unterliegt grundsätzlich Schwankungen und Unsicherheiten, die einen großen Einfluss auf die freien Transportkapazitäten haben. Das unsicherheitsbehaftete Passagier\*innenaufkommen ist von vielen Parametern abhängig, wie z. B.

- Wetter,
- Tag/Zeit,
- besonderen Ereignissen,
- Route/Linie.

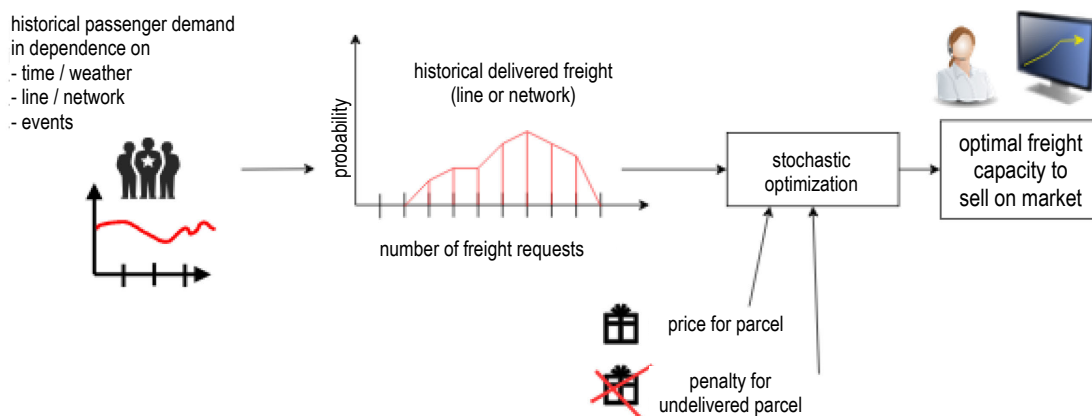
Ziel der Entwicklung ist es, die\*den Flottenmanager\*in bei der mittel- und langfristigen Planung von Transportkapazitäten zu unterstützen, wobei zwischen Leerläufen und der Unfähigkeit, verkaufte Frachtanfragen zu erfüllen, abgewogen wird.

### Implementierung des Modells – Konzept

Im Flottenmanagement muss strategisch entschieden werden, wie viele Transportanfragen angenommen werden können, bevor die verfügbare Transportkapazität bekannt ist. Hierbei sollen Leerfahrten vermieden und verkaufte Frachtanfragen erfüllt werden, um die Zufriedenheit der Güterkund\*innen zu gewährleisten.

Um zu bestimmen, welche Menge an Frachtkapazität mittel- bis langfristig auf dem Markt verkauft werden kann, wird eine stochastische Optimierung durchgeführt. Das Konzept ist in folgender Grafik dargestellt.

Abbildung 2.19: Stochastische Optimierung



Neben dem unsicherheitsbehafteten Passagier\*innenaufkommen ist die Anzahl der möglichen Frachtzustellungen unbekannt. Im Rahmen des Arbeitspakets wird jedoch angenommen, dass die Verteilung von durchgeführtem Gütertransport aus historischen Daten bekannt ist, bzw. wird diese in einem späteren Schritt durch eine Simulation des Gütertransports erstellt.

Die stochastische Optimierung wird über ein Newsvendor-Modell gelöst. Dieses mathematische Modell kommt im Bereich des Produktionsmanagements und der angewandten Wirtschaftswissenschaft häufig zur Anwendung, um optimale Bestandsmengen zu ermitteln. Es besteht in vielen Variationen.

### Implementierung des Modells – mathematische Formulierung

Das Newsvendor-Modell umfasst die folgende mathematische Beschreibung:

$$\begin{aligned} \min \quad & cx + \sum_{\omega \in \Omega} p[\omega] [-qy_{\omega} - rw_{\omega}] \\ \text{s. t.} \quad & y_{\omega} \leq d_{\omega} \quad \forall \omega \in \Omega \\ & y_{\omega} + w_{\omega} \leq x \quad \forall \omega \in \Omega \\ & y_{\omega}, w_{\omega} \geq 0 \quad \forall \omega \in \Omega \\ & 0 \leq x \leq u \end{aligned}$$

Hierbei wird das Modell durch die aufgeführten Parameter definiert:

- x Anzahl der angenommenen Transportanfragen
- q Gewinn pro durchgeführtem Transport
- c Transportkosten pro durchgeführtem Transport
- r Strafzahlung für zu spät/nicht durchgeführte Transporte
- $d_{\omega}$  (Zufallsvariable) Anzahl der durchgeführten Transporte in Szenario  $\omega$
- u obere Transportkapazitätsgrenze

Als Vereinfachung wird angenommen, dass alle Transporte die gleichen Transportkosten und -erlöse sowie die gleiche Strafzahlung für eine zu späte/nicht erfolgte Zustellung haben. Im Ergebnis wird die Kapazitätsmenge bestimmt, bei welcher der Erwartungswert des Gewinns maximal über alle Szenarien ist. Somit ergibt das stochastische Programm eine Maximierung der Gesamteinnahmen bei gleichzeitiger Gewährleistung der priorisierten Fahrgastbeförderung unter Einhaltung einer hohen Servicequalität für die Passagier\*innen sowie die Kund\*innen des Gütertransports.

Um die Optimierung mit diesem Modell durchzuführen, werden Daten des durchgeführten Gütertransports in einem repräsentativen Zeitraum benötigt.

Die Hauptannahmen bei der Entwicklung der Lösung lauteten:

1. Der Bus verkehrt auf einer Ringlinie, insbesondere wird während einer Tour keine Station mehrfach angefahren. Ausnahme ist das Depot, an dem jede Tour beginnt und endet.
2. Es wird keine Güterübergabe zwischen den Buslinien erlaubt, d. h., es erfolgt keine Optimierung des Routentransports über mehrere Buslinien.
3. Zeit für die letzte Meile des Gütertransports (Pickup zur Busstation und von der Busstation zur *Delivery Station*) bleibt zunächst unberücksichtigt, kann aber durch eine zusätzliche Einschränkung integriert werden (siehe *Full Bus Implementation*, die eine komplette Tour ausschließt).

Palaimons Beitrag zur KI-basierten Optimierung erweitert das vorgestellte Modell um zwei wesentliche Aspekte:

- Vorhersage der optimalen Transportkapazität und des zugehörigen Gewinns: Das Modell von Palaimon kann verwendet werden, um die optimale Transportkapazität für verschiedene Tagesszenarien vorherzusagen und den zugehörigen Gewinn zu bestimmen. Dies kann zur Optimierung der Flottengröße und der Ressourcennutzung beitragen.
- Optimaler Zeitplan für den Transportrobotereinsatz: Das Modell von Palaimon kann verwendet werden, um einen optimalen Zeitplan für den Transportrobotereinsatz unter Berücksichtigung des priorisierten Personentransports zu erstellen. Dies kann zur Reduzierung der Wartezeiten der Fahrgäste und zur Optimierung der Gesamtdauer der Transportaufträge beitragen.

## 2.3 Fahrzeugentwicklung, Algorithmik und Vernetzung

HAP 3 umfasste die Fahrzeugentwicklung, die Algorithmik und die Vernetzung. Weitere Bestandteile waren die Sicherheitsnachweise und Ausnahmegenehmigungen (Kapitel 2.4) sowie der Testfeldbetrieb (Kapitel 2.5). Dieses Kapitel beschreibt die Weiterentwicklung der Transportroboter, die KI-basierte Umfelderkennung, die Aufrüstung der Busse sowie die Erprobung des Systems.

### 2.3.1 Roboterentwicklung und KI-basierte Umfelderkennung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde am ITL die Weiterentwicklung der Transportroboterplattform Laura, bekannt aus dem Vorgängervorhaben TaBuLa-LOG, intensiv vorangetrieben. Zu Beginn des Vorhabens wurde ein umfassendes Umsetzungskonzept entwickelt, das die notwendigen Schritte zur Integration der Roboter in die Leitstelle beschreibt (siehe Anlage 1). Dieses Konzept berücksichtigt Maßnahmen zur Optimierung und Stabilisierung der automatisierten Fahrten sowie die Anforderungen für die automatisierte Ein- und Ausfahrt in Busse oder automatisierte Shuttles. Ein übergeordnetes Ziel bilden die Abnahme und die Genehmigung der Roboter, wobei deren Automatisierungsgrad in Richtung SAE-Level 4 entwickelt wurde, sodass Eingriffe der Begleitperson minimiert werden.

### 2.3.1.1 Hardware- und Software-Anpassungen der Transportroboter

#### Hardware-Anpassungen

Die im Umsetzungskonzept beschriebenen Anpassungen wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens realisiert und durch zusätzliche, entwicklungsbedingte Veränderungen ergänzt. Einen Teil des Konzepts bilden auch die Modernisierung und die Erweiterung der Hardware. Hierzu wurde ein RTK-GNSS-System vom Typ Emlid Reach M2 integriert. RTK steht für „Real-Time-Kinematic“ und stellt eine präzise satellitenbasierte Echtzeitlokalisierung der Roboter bereit. Ergänzend wurde ein Funkmodul installiert, um die Verbindung zur mitgelieferten Basisstation Emlid Reach RS2+ sicherzustellen. Diese Kombination ermöglicht eine zentimetergenaue Satellitenortung mittels Korrektursignalen von einer oder mehreren Basisstationen und stellt eine Alternative oder Ergänzung zur vorhandenen auf LiDAR (*Light Detection and Ranging*) basierenden Lokalisierung dar. Die Korrektursignale können wahlweise über das Mobilfunknetzwerk und den sogenannten SAPOS-Service (Satellitenpositionierung) bezogen werden. Alternativ können Korrektursignale mittels des Funkmoduls von der mitgelieferten Basisstation empfangen werden. Allerdings setzt dies eine Einmessung der Basisstation im Betriebsgebiet über einen Zeitraum von mehreren Stunden voraus, weshalb der SAPOS-Dienst genutzt wurde.

Des Weiteren erforderte der Bedarf an gesteigerter Rechenleistung für anspruchsvolle Aufgaben wie die Lokalisierung, Hinderniserkennung sowie den Shuttle-Boarding-Prozess die Einführung eines neuen, leistungsfähigeren Hauptsteuerungsrechners. Der neu implementierte Rechner ersetzt sowohl den bisherigen Onbot-PC, der für die Motorsteuerung verantwortlich war, als auch den Pokini, der die allgemeinen Roboterfunktionen steuerte. Eine Übersicht über die Leistungsdaten der bisherigen und der neuen Recheneinheit findet sich in der nachfolgenden Tabelle.

Tabelle 2.4: Vergleich Roboter-PC-Upgrade

Kategorie	Pokini	Hauptsteuerungsrechner
Prozessorleistung	Intel Core i7-7600U (2 × 2,8 GHz bis zu 3,90 GHz)	Intel Core i9-13900T (16 Kerne, 1,4 GHz bis zu 4,9 GHz)
Arbeitsspeicher	32 GB DDR4	64 GB DDR5
Festplattenspeicher	256 GB	1 TB

Die bisherige Grafikeinheit wurde durch das neueste Modell ausgetauscht, um den aktuellen Stand der Technik in der Robotik weiterhin zu gewährleisten. Verbaut ist nun ein NVIDIA Jetson Orin AGX Developer Kit. Das Upgrade der Rechner ermöglicht einerseits die Nutzung sowohl der 2D- als auch 3D-Daten der vier Intel-RealSense-Kameras und der zwei Stereolabs

ZED2 in Kombination mit der 3D-Punktwolke des LiDAR zur Hinderniserkennung. Andererseits können auf dem NVIDIA-Orin-Grafikrechner Echtzeit-KI-Anwendungen effizient implementiert werden, um beispielsweise eine Erkennung und Verfolgung von Personen in 2D- und 3D-Sensordaten zu ermöglichen (siehe Abschnitt 2.3.1.4). Beide Rechner sind nun unterhalb des Laderaums angebracht, anstatt wie zuvor hinten oben am Roboter, und bringen dabei eine erhöhte Kippsicherheit durch die niedrigere Schwerpunktlage mit sich. Infolge des Einbaus der beiden leistungsstärkeren Recheneinheiten musste die Kühlleistung erhöht werden. Hierfür wurden vier weitere Lüfter an den Seiten von Laura verbaut. Somit verfügt der Roboter nun über je fünf Lüfter pro Seite.

Zur Gewährleistung einer reibungslosen Verbindung mit der Leitstelle wurde ein 5G-Mobilfunkmodul in beiden Robotern verbaut, das die bisher verbauten 4G-Module ersetzt. Notwendig wurde dies aufgrund von Problemen mit der notwendigen Übertragungsbandbreite des 4G-Netzes in Lauenburg. Zur Überprüfung der Qualität der Netzabdeckung wurden zu Beginn des Forschungsvorhabens Messungen in Lauenburg durchgeführt, die eine schlechte Abdeckung durch das 4G-Netz in Teilen des Betriebsgebiets ergaben.

Da ein Ziel des Vorhabens die Reduzierung der Begleitpersonen und der notwendigen Eingriffe im Vergleich zum Vorgängervorhaben ist, wurde zusätzlich ein Display mit besserer Auflösung verbaut. So kann die Begleitperson leichter kritische Zustände erkennen und bei Bedarf eingreifen.

### **Software-Anpassungen**

Im Zuge der Weiterentwicklung der Transportroboterplattform erfolgte zunächst ein Softwareupgrade für beide Roboter. Dabei wurde das Betriebssystem auf Ubuntu 20.04 und das genutzte Robotik-Framework auf ROS (*Robot Operating System*) Noetic aktualisiert. Zusätzlich wurde der ITL-Robotik-Softwarestack erweitert, um eine Steuerung grundlegender Roboterfunktionen (z. B. Navigation, *April Tag Detection*, *Map Handling*, GNSS) sowie die Einbindung in die Leitstelle zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden alle weiteren vorhabensspezifischen Funktionen in einen separaten Softwarestack übertragen.

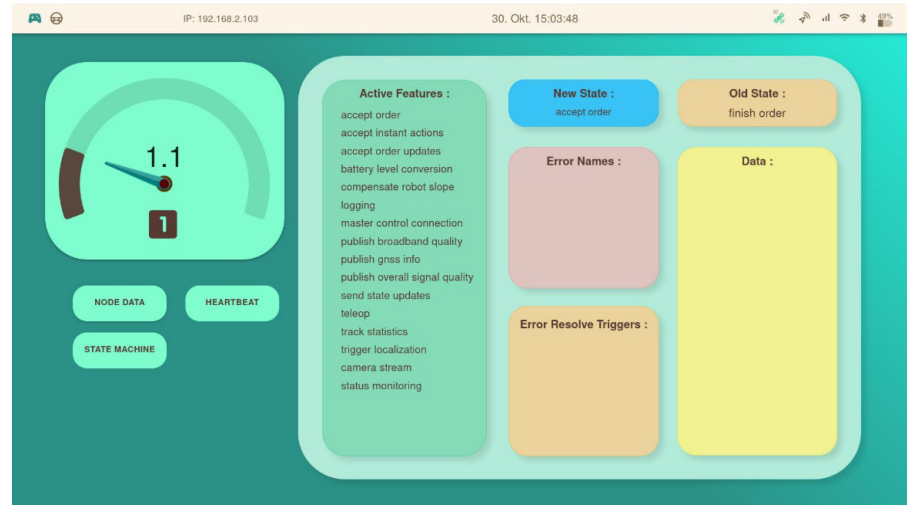
Während des Forschungsvorhabens hat sich herausgestellt, dass neue Entwicklungen von *Open Source Code* aufgrund des nahenden *End of Life* (EOL) von ROS Noetic nur noch für ROS 2 verfügbar werden. Aus diesem Grund erfolgte ein weiteres Upgrade auf Ubuntu 22.04 als Betriebssystem und ROS 2 Humble als Robotik-Framework. Im Zuge dessen wurden sowohl der ITL-Robotik-Softwarestack als auch die weiteren vorhabensspezifischen Funktionen für die Nutzung mit ROS 2 Humble migriert.

Abbildung 2.20: Übersicht über die durchlaufenen ROS-Distributionen (ROS Wiki 2024)



Die Migration auf ROS 2 sowie allgemeine Anforderungen in Kombination mit der Leitstelle erforderten zudem eine Neuentwicklung der Roboter-GUI (*Graphical User Interface*). Eine Übersicht über die GUI ist in Abbildung 2.21 dargestellt. Aktuell zeigt diese Informationen wie aktivierte Funktionen, den Status des Roboters, Fehler, Geschwindigkeit, Gang, IP-Adresse, Mobilfunkempfang, Akkustand sowie gewählte Fahrmodi an und kann bei Bedarf um weitere Felder ergänzt werden.

Abbildung 2.21: Neue Version der grafischen Nutzungsoberfläche des Roboters



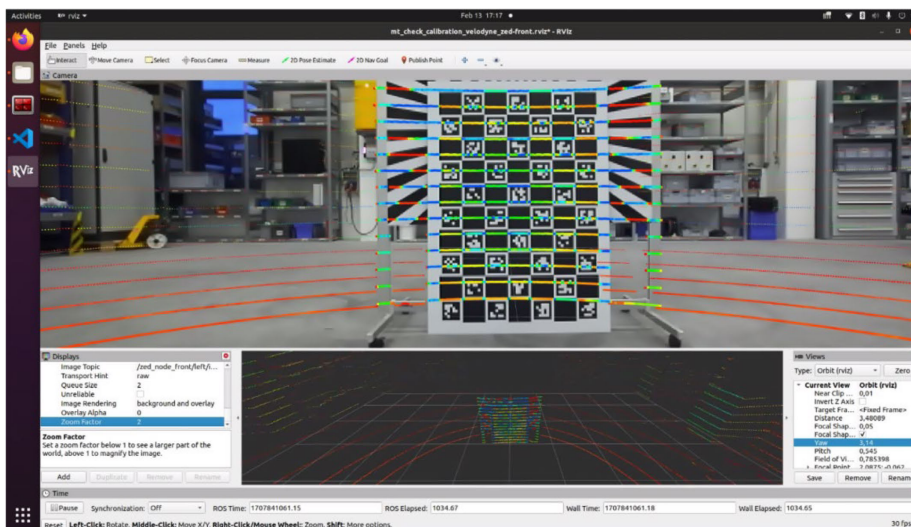
Bei der softwareseitigen Roboterentwicklung war der zentrale Punkt die Einbindung der Roboter in die Leitstelle. Zu diesem Zweck wurden roboterseitig die Voraussetzungen für eine stabile Mobilfunkverbindung geschaffen, damit Parameter wie Akkustand, Position, Verbindungsstatus, Verfügbarkeit, Geschwindigkeit sowie Fehler- und Auftragsstatus dargestellt werden können. Ein weiterer Aspekt ist die Übertragung der Kameradaten in die Leitstelle. Außerdem wurde ein Mechanismus für die Synchronisation mehrerer Fahrzeuge (bspw. für eine Einfahrt des Roboters in den Bus) geschaffen. Dabei wartet der Roboter auf Trigger aus der Leitstelle, um seine nächste *Action* durchzuführen. Entscheidend für die Zulassung des Roboters ist dabei, dass die manuelle Übernahme der Kontrolle des Roboters durch die Begleitperson jederzeit erhalten bleibt.

### 2.3.1.2 Sensorkalibrierung und Roboter-Simulation

Im Rahmen der Vorbereitung auf die geplante Aufnahme eines Roboter-Datensatzes sowie zur weiteren Optimierung der automatisierten Fahrfunktionen wurden die relevanten Sensoren der Roboter sorgfältig kalibriert. Zunächst wurden verschiedene Kalibrierungsalgorithmen identifiziert und getestet. Für die Auswahl eines geeigneten Kalibrierungspakets war es entscheidend, dass sowohl die extrinsische und intrinsische Kalibrierung als auch die Kalibrierung zwischen Kamera und LiDAR unterstützt werden. Im anschließenden Vergleich eines markerlosen und eines targetbasierten Ansatzes erzielte das targetbasierte *ATOM Calibration Network* (LardeMUA 2024) die besten Ergebnisse.

Die eigentliche Kalibrierung wurde anschließend mithilfe spezieller Kalibrierungstargets (siehe Abbildung 2.22) durchgeführt. So wurde die Ausrichtung von LiDAR und den in Fahrtrichtung orientierten Stereokameras zueinander bestimmt.

Abbildung 2.22: Darstellung der kalibrierten LiDAR- und Kamera-Daten

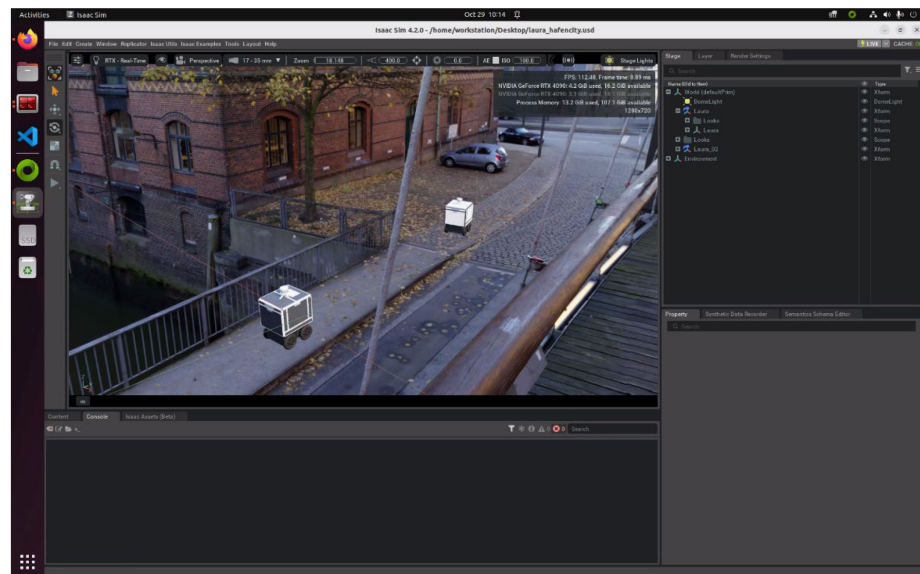


In diesem Forschungsvorhaben wurden zur Weiterentwicklung der Roboter u. a. auch Simulationstools genutzt. Die NVIDIA Isaac Sim wurde auf der beschafften Workstation eingerichtet und für verschiedene Simulationen verwendet. Die Isaac Sim erlaubt eine hochrealistische physikalische Simulation, fotorealistisches Rendering, unterstützt die ROS-Integration, ermöglicht KI-Training in virtuellen Umgebungen und simuliert verschiedene Sensorsysteme. Für die Nutzung wurden die Transportroboter und ihr Sensorsetup integriert, um die Weiterentwicklung der Algorithmik insbesondere im Bereich Navigation, Lokalisierung und Hinderniserkennung effizienter zu gestalten. Gerade im Bereich der Hinderniserkennung wurden viele Hindernisszenarien mit menschlichen Hindernissen, anderen Robotern sowie Fahrrädern getestet. Dies half bei der letztendlichen Entscheidung für den neuen „*nav2\_mppi\_controller*“ (ROS Index 2024) als *Local Planner*.

Abbildung 2.23 zeigt die beiden Transportroboter in der Simulationsumgebung.

Des Weiteren wurden auf der Workstation Algorithmen für SLAM getestet und parametriert. Dabei wurden Aufnahmen der Robotersensordaten im Feldbetrieb im ROS 2 eigenen „ros2 bag“-Format angefertigt und eine Parameterstudie mit dem Ziel der Erzeugung einer höheren Kartenqualität durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass das GMapping Package (ROS Wiki 2024b) sich für die Erstellung weiterer Karten für unsere Anwendungszwecke am besten eignet. Überdies wurde auch ein Umstieg auf 3D-Karten und Lokalisierung geprüft, allerdings wegen der erhöhten Rechenleistung nicht weiterverfolgt.

Abbildung 2.23: Transportroboter in der Simulationsumgebung NVIDIA Isaac Sim



### 2.3.1.3 Automatisierte Bus-Ein- und -Ausfahrt der Transportroboter

Eine der Grundideen der TaBuLa-LOG Vorhaben ist der kombinierte Verkehr von Roboter und ÖPNV. Zur Auslieferung von Transportgütern über weitere Strecken sollen die Roboter die Möglichkeit haben, in Bussen mitzufahren. Um dabei einen möglichst hohen Grad an Automatisierung zu gewährleisten, ist eine entsprechende Entwicklung des Ein- und Ausstiegsprozesses notwendig. Die zuvor beschriebene Leitstelle ermöglicht es, die Roboter und den manuellen Bus miteinander zu synchronisieren (siehe Abschnitt 2.2.1.2). Zu diesem Zwecke kann über die Leitstelle ein Auftrag an den Roboter gesendet werden, sich zu einer nahegelegenen Haltstelle des öffentlichen Linienverkehrs zu begeben. Dort wartet der Roboter auf die Ankunft des Busses. Nach erfolgter Ankunft klappt das Fahrpersonal die Rollstuhlrampe für den Roboter aus und bestätigt dies mithilfe der vom VPL entwickelten Tablet-App (siehe Abschnitt 2.3.2). Sind alle entsprechenden Bestätigungen durch das Fahrpersonal über das Tablet kommuniziert worden und im

Backend-Server angekommen, wird ein Auslöser zum Beginn des Einfahrprozesses an den Roboter gesendet.

Mithilfe der verbauten ZED2-Stereokamera bestimmt Laura die Position des Busses relativ zur eigenen Position. Eine von Laura zuvor mit dem SLAM-Package GMapping aufgezeichnete und zur Lokalisierung genutzte 2D-Karte des Busmodells wird geladen. Anschließend erfolgt das Abfahren zuvor festgelegter Punkte einer Einfahrtstrajektorie. Nach Erreichen der finalen Position benachrichtigt der Roboter die Leitstelle. Anschließend wird die Rampe des Busses vom Fahrpersonal wieder eingeklappt und die Türen geschlossen. Die Leitstelle wird vom Fahrpersonal mithilfe der App über die Beendigung des Einsteigeprozesses und die Bereitschaft zur Weiterfahrt des Busses benachrichtigt.

Der Ausfahrtprozess läuft ähnlich ab. Nach Erreichen der in der Order hinterlegten Haltestelle findet erneut ein Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen und der Leitstelle über die Bereitschaft zum Ausfahrtprozess statt. Hat der Bus nach dem Ausklappen der Rampe eine Benachrichtigung an die Leitstelle gesendet, schickt diese den Auslöser zum Beginn des Ausfahrtprozesses an den Roboter. Erneut nutzt der Roboter die Karte des Busses, um festgelegten Punkten einer Ausfahrtstrajektorie – im Idealfall die Trajektorie des Einfahrens in umgekehrter Reihenfolge – zu folgen. Hat Laura die finale Position erreicht, kann eine Neulokalisierung in der Umgebungskarte stattfinden. Ist diese erfolgt, kann die autonome Fahrt fortgesetzt werden. Die Bus-App bekommt das Signal, dass der Ausstiegsprozess abgeschlossen ist, sodass die Rampe vom Fahrpersonal wieder eingeklappt werden kann. Dann kann der Bus die Haltestelle verlassen und die Fahrt fortsetzen. Abbildung 2.24 zeigt einen der Transportroboter beim automatisierten Verlassen des Busses.

Abbildung 2.24: Automatisierte Ausfahrt des Transportroboters aus dem Bus



### **Buserkennung bei der Einfahrt**

Da bei der Einfahrt die Position des Busses relativ zum Roboter bestimmt werden muss, wird ein Koordinatensystem benötigt, das den Bus in Relation zum Roboter bzw. dessen Karte repräsentiert. Somit können Punkte, die im Bus-Koordinatensystem definiert wurden, in das globale Roboter-Koordinatensystem übertragen werden (z. B. die Trajektorien zur Ein- und Ausfahrt). Für solche Anwendungsfälle eignen sich sogenannte *Apriltags*. Diese QR-Code-artigen Muster dienen der räumlichen Identifikation der Position und Orientierung von Ebenen. Wird ein *Apriltag* an der Außenseite des Busses befestigt, kann es so als Referenzkoordinatensystem von der Kamera des Roboters erkannt werden und eine Transformation zwischen Roboter-, Bus- und Umgebungskoordinatensystem bestimmt werden. In der vorangegangenen Abbildung 2.24 ist der *Apriltag* links neben der Tür des Busses erkennbar.

### **Dynamische Parameteranpassung und Kartierung**

Für die Buseinfahrt wird neben der Lokalisierung des Busses das Justieren mehrerer Software-Parameter für die Hinderniserkennung zur Laufzeit benötigt. Einerseits stellt der Linienbus eine Erweiterung bzw. Veränderung der Umgebung mit neuen Hindernissen dar. Andererseits bildet der schmale Businnenraum eine neuartige Umgebung, durch die der Roboter navigieren soll. Um zunächst den Bus nach dessen Ankunft an der Haltestelle dynamisch in die Roboterkarte einfügen zu können, wurde eine Funktion erstellt, die es erlaubt, die Karte des Busses zur Laufzeit des Roboters mit der Umgebungskarte zusammenzufügen. Nach Erkennung des *Apriltag* mithilfe der Kamera kann die Karte an entsprechender Position eingefügt und mit der Umgebungskarte vereint werden. Bereits bekannte Abgrenzungen, wie Wände, Sitze oder die Rampe, werden dann vom Roboter als Kartengrenzen bzw. Hindernisse interpretiert. Die Karte kann dann zur Lokalisierung und Navigation verwendet werden. Ferner ermöglicht das Verschmelzen der Karten die Integration von Hindernis-Informationen mithilfe sogenannter *Cost Maps*. Weitere Funktionen wurden implementiert, um Parameter der Hinderniserkennung sowie Geschwindigkeiten je nach Buskarte oder Trajektorie dynamisch anzupassen. Um im engen Businnenraum eine erfolgreiche Pfadplanung des Roboters zu ermöglichen, musste bspw. der Sicherheitsabstand um Hindernisse reduziert werden. Beim Befahren der Rampe wurde die Geschwindigkeit des Roboters reduziert, um zu vermeiden, dass der Roboter durch das entstehende Momentum ins Ungleichgewicht gerät. Durch die Fähigkeit, diese Parameter zur Laufzeit dynamisch zu justieren, konnten nach erfolgter Ausfahrt des Roboters wiederum an die Fahrt auf dem Fußweg angepasste Parameter verwendet werden.

### **Modellierung des Ein- und Ausstiegsprozesses in der *State Machine***

Für die automatisierte, teils autonome Steuerung der Roboter wurde eine Architektur in Form einer *State Machine* entworfen. Diese enthält einen Leitfaden für die Architektur neuer Softwarekomponenten und legt besonderen Fokus auf Sicherheitsfunktionen. Ein- und Ausfahrt wurden als einzelne Zustände integriert, in denen benötigte Funktionen und Komponenten des Systems für die Einfahrt zur Verfügung gestellt werden, wie z. B. das Aktivieren der Apriltag-Detektion. Eine für die Roboter entworfene *State Machine* wird auf beiden Robotern gestartet. Teil dieser Basis *State Machine* ist die Umwandlung aus der Leitstelle empfangener Aufträge in eine Kombination von Zuständen in State-Machine-Form, die der Roboter nacheinander durchlaufen kann, bis ein Auftrag abgeschlossen ist.

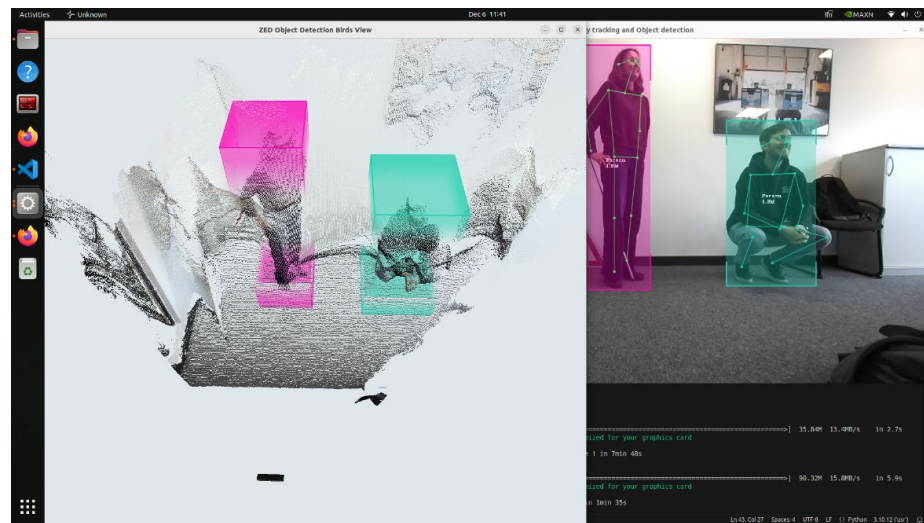
Für die automatisierte Fahrt auf Lauenburgs Gehwegen wurde auf das „NAV 2“-Package in ROS 2 (Nav2 Documentation 2024) zurückgegriffen. Dieses wurde iterativ parametrisiert, um eine möglichst fehlerfreie und gefahrlose Fortbewegung der Roboter zu garantieren. Für das neue Betriebsgebiet rund um die ehemalige Shuttle-Haltestelle „Am Fürstengarten“ wurde eine neue Karte mit dem SLAM-Algorithmus „Gmapping“ (ROS Wiki 2024b) aufgezeichnet, manuell von Rauschen bereinigt und anschließend um sogenannte *Keep-out Zones* erweitert, die ein Fahren auf der Straße vermeiden und somit sicherstellen, dass die Roboter auf dem Fußweg bleiben. Für die Lokalisierung gegenüber dieser Karte wird außerdem ein Layer aus der vom LiDAR erzeugten 3D-Punktwolke verwendet, sodass der Roboter weiterhin mit dem AMCL-Algorithmus (ROS Wiki 2024c) lokalisiert werden kann. Für ein sicheres Fahrverhalten in dynamischen Umgebungen wurde der „nav2\_mppi\_controller“ als *Local Planner* ausgewählt (ROS Index 2024). Insgesamt gelang es durch die Anpassungen, ein solides automatisiertes Fahrverhalten zu erreichen, das nicht geplante Eingriffe in die Steuerung durch die Begleitpersonen auf ein Minimum reduziert hat.

#### 2.3.1.4 Roboterseitige Echtzeit-Objekterkennung und -Tracking

Die in Abschnitt 2.3.1.1 erwähnte Beschaffung der NVIDIA-AGX-Orin-Grafikrechner ermöglicht den Einsatz rechenintensiver KI-Anwendungen in Echtzeit. So können in Kombination mit den im Roboter verbauten Stereokameras die Erkennung von Personen sowie die Verfolgung erkannter Personen in 2D- und 3D-Sensordaten in Echtzeit mit einer Frequenz von über 30 Hz realisiert werden. Über die Erkennung von Personen hinaus können Körperteile des menschlichen Skeletts identifiziert und ebenfalls nachverfolgt werden, wodurch eine Analyse der Bewegung von Personen möglich wäre. Abbildung 2.25 zeigt einen Ausschnitt aus dem Echtzeit-Videostream der Kameras des Roboters, wobei auf der linken Seite die 3D-Sensordaten und auf der rechten Seite die 2D-Kamerabilder dargestellt sind. Die erkannten Personen werden durch eine sogenannte *Bounding Box* symbolisiert, wobei jede erkannte Person durch eine eigene Farbe hervorgehoben wird. Im dreidimensionalen Raum geschieht dies durch einen

Würfel um die als Mensch identifizierten Punkte der Punktwolke. Das erfolgreiche Tracking einzelner Menschen im Kamerabild lässt sich anhand von Bildern schwierig nachweisen. Jedoch konnte in der Sequenz, aus der das Bild in Abbildung 2.25 entnommen wurde, validiert werden, dass einer Person dieselbe Farbe zugewiesen bleibt, auch wenn sich die Bewegungen mehrerer Personen im Kamerabild überschneiden.

Abbildung 2.25: 3D- und 2D-Erkennung und Tracking von Personen inklusive Skelett-Tracking



### 2.3.1.5 KI-basierte Umfelderkennung

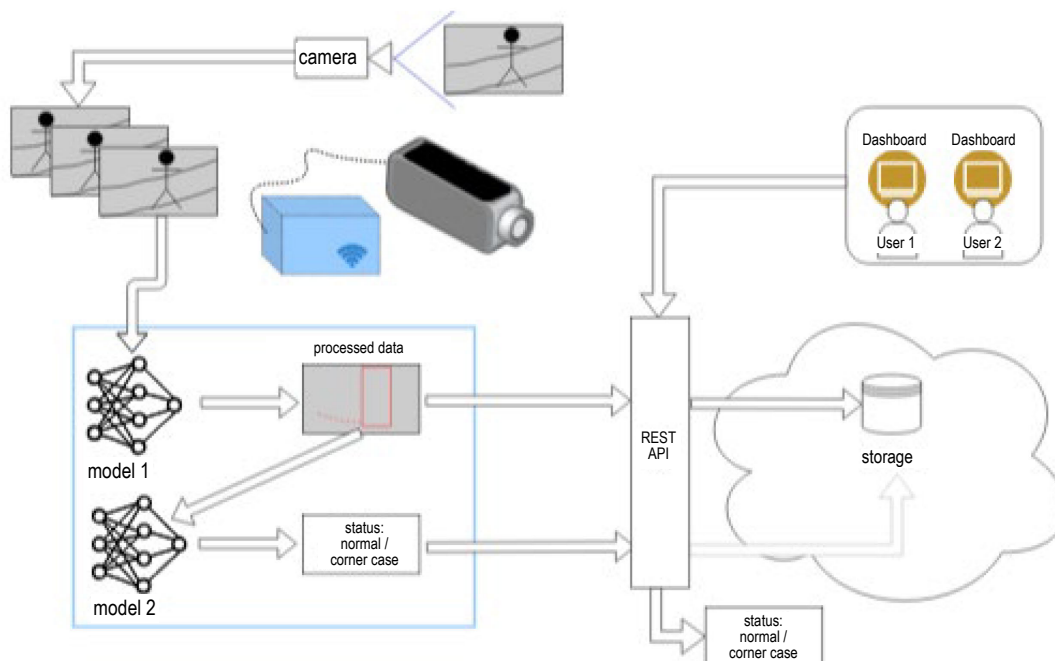
Im Folgenden werden die konzeptionelle Ausarbeitung und die Implementierung der KI-basierten Umfeld- und Situationserkennung beschrieben, die zur Verbesserung der Autonomie des Transportroboters Laura beitragen.

Die Situationserkennung kann auf unterschiedlichen Sensoren und Modellen basieren. Viele aktuelle Ansätze stützen sich auf einen Ansatz des maschinellen Sehens (*Computer Vision*), der Gegenstand aktueller Forschung und verhältnismäßig intuitiv zu verstehen ist. Dieser Ansatz wurde auch in diesem Vorhaben gewählt.

Bei der konzeptionellen Ausarbeitung der Umfelderkennung war es wichtig, dass diese sowohl für einen einzelnen Roboter als auch für eine Roboterflotte anwendbar ist, um die Skalierung auf ein integrales System einer Shuttle- und Roboterflotte zu berücksichtigen. Die Hauptherausforderungen für *Situational Awareness* (SA) mit Mensch-Roboter-Interaktion wurden von Anderson and Shumailov 2021 zusammengefasst. Im aktuellen Forschungsvorhaben bestanden für die SA-Entwicklung insbesondere folgende Herausforderungen:

- Der Roboter bewegt sich in einer dynamischen Umgebung im öffentlichen Raum, d. h., eine Interaktion mit Menschen ist möglich und stellt somit hohe Anforderungen an die Sicherheit des Systems.
- Der Roboter bewegt sich in einer potenziell unbekanntem/neuen Umgebung, die SA sollte daher über verschiedene Orte generalisieren können.
- Der Erfahrungsschatz der KI ist begrenzt, die SA sollte daher aus Erfahrungen lernen können und somit eine Erweiterung des Wissens fördern.

Abbildung 2.26: Konzept und Module für die Roboter-Umfeldererkennung



Die Entwicklung der SA beinhaltet ein System mit mobilem Endgerät mit einer Kamera und einer Verarbeitungseinheit (*Edge Device*) (Abbildung 2.26). Diese Art von Gerät bietet ein hohes Maß an Flexibilität und kann leicht an jeder Maschine (z. B. an einem Roboter) angebracht werden. Auf der Verarbeitungseinheit, dem Edge-Gerät, können Videodaten in Echtzeit über KI-Modelle ausgewertet werden. Die so verarbeiteten Daten enthalten keine personenbezogenen Informationen und werden über eine Standard-Schnittstelle (z. B. REST-API; API = *Application Programming Interface*) an einen Cloud-Server weitergeleitet und dort gespeichert.

Eine REST-API ist eine weitverbreitete Architektur für einen standardisierten und sicheren Datenaustausch.

Über ein Dashboard können die Nutzenden auf den Cloud-Server zugreifen, um Daten auszuwerten und für das weitere Modelltraining zu verwenden.

Die Modelle, die auf dem Edge-Gerät laufen, erkennen bekannte und unbekannte Situationen und entscheiden, ob die erkannte Situation sicher ist oder einen sogenannten *Corner Case* darstellt, der eine unbekannte Situation umfasst. Im Falle eines *Corner Case* wird eine Warnung erzeugt, auf die die Leitstelle und die Robotersteuerung reagieren können.

Im zweiten Schritt werden diese Bewegungsdaten auf dem *Edge Device* durch ein KI-Modell bewertet, das zwischen nicht gefährlichen Situationen und gefährlichen, unbekanntem *Corner Cases* differenziert. Die *Corner-Case*-Detektion ist stark verwandt mit der Anomaliedetektion, die ein großes Forschungsfeld im maschinellen Lernen darstellt. Die resultierende Statusmeldung steht sowohl der Leitstelle als auch der Robotersteuerung zur Verfügung, wodurch der Roboter z. B. in einen Sicherheitsmodus schalten und die Technische Aufsicht in die Robotersteuerung eingreifen kann. Durch das Abspeichern der MOT-Daten (MOT = *Multi Object Tracking*) und *Corner Cases* sowie der Reaktion der Leitstelle bzw. der Technischen Aufsicht wird der Wissenstand der KI sukzessive erweitert, sodass die Technische Aufsicht mit der Zeit immer effizienter durch die KI unterstützt und somit eine Erhöhung der Autonomie erreicht wird.

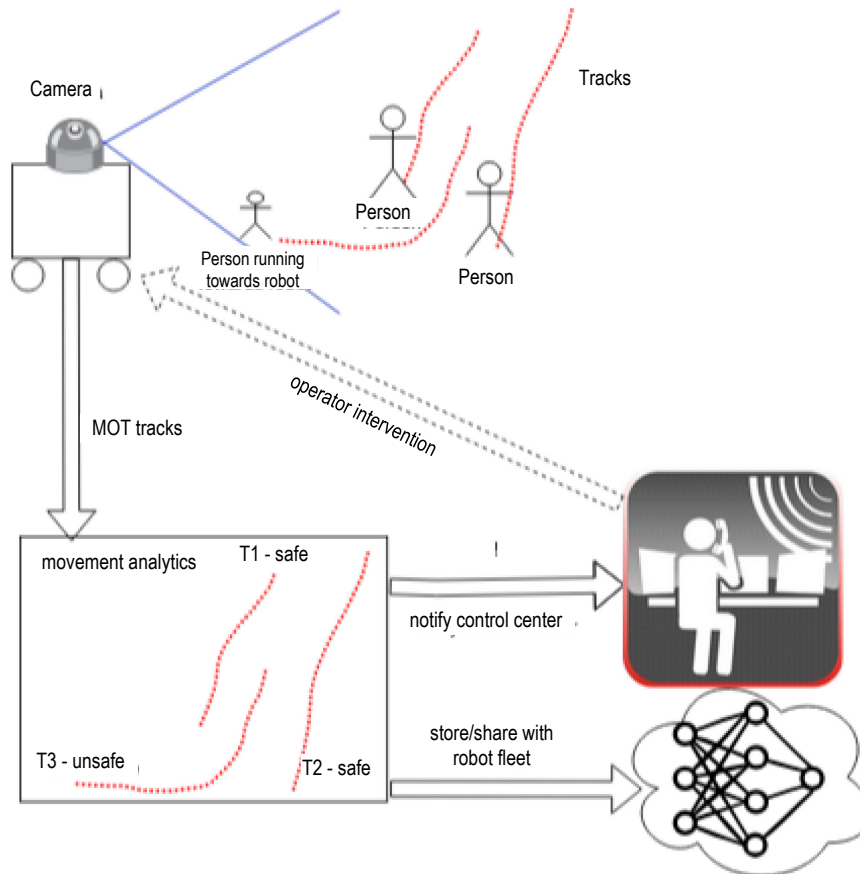
### **Anomaliedetektion**

Die Anomaliedetektion basiert auf den durch das MOT-Modul erzeugten Objekt-Tracks. Anhand der Track-Daten wird analysiert, ob das Bewegungsverhalten der Objekte vom erwarteten Verhalten abweicht. Abweichungen werden als Anomalien klassifiziert.

Für den Roboter könnten diese Szenarien in eine Szene übersetzt werden, in der sich mehrere Personen bewegen und die Nähe des Roboters meiden (keine Gefahr) und eine Person/ein Kind direkt auf den Roboter zuläuft (potenziell unsichere Situation; siehe Abbildung 2.27). Im letzteren Fall erzeugt das System ein Signal, das dazu verwendet werden kann, den Roboter anzuhalten, in den Sicherheitsmodus zu wechseln oder die Technische Aufsicht einzuschalten.

Da in diesem Forschungsvorhaben keine Taxonomie zu normalem und anomalem Verhalten vorlag, musste ohne Taxonomie gearbeitet werden, was dieses AP aufwendiger als geplant gestaltete. Die Echtzeiterzeugung eines Signals konnte daher im Demonstrator nicht mehr mit den verfügbaren Mitteln gezeigt werden und wurde auf konzeptioneller Ebene bearbeitet.

Abbildung 2.27: Schematische Darstellung Anomaliedetektion



### Methodenauswahl

Zwecks Methodenauswahl wurden diverse Ansätze, wie Objektdetektion, *Deep Learning* und Anomaliedetektion, evaluiert. Ausgehend von Vorversuchen mit ausgewählten Methoden, insbesondere MOT und zeitreihenbasierte Anomaliedetektion (z. B. Real-MOT), fiel die Wahl auf die Kombination dieser beiden Ansätze. Neben dem gewählten MOT-Modell (StrongSort) wurden alternative Modelle wie Real-MOT evaluiert. Der Schwerpunkt der Implementierung lag auf der Auswahl und Anpassung eines spezifischen MOT-Modells für unseren Anwendungsfall. Hier fiel die Wahl auf das StrongSort-Modell, das sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Hohe Konfigurierbarkeit: Das Modell kann an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden.
- Edge-Device-Kompatibilität: StrongSort kann direkt auf Edge-Geräten ausgeführt werden, was die Latenzzeiten minimiert.
- Echtzeitfähigkeit: Das Modell ermöglicht Objekterkennung und Datenverarbeitung in Echtzeit

Neben dem gewählten MOT-Modell wurden alternative Modelle wie Real-MOT und DeepSort evaluiert.

Über die Implementierung des MOT-Modells hinaus umfasste die Arbeit die Einrichtung einer hochkonfigurierbaren Streaming-Analyse auf dem *Edge Device*. Diese ermöglicht die Echtzeit-Datenanalyse, die wiederum Voraussetzung für die zeitreihenbasierte Anomaliedetektion ist.

Diese Kombination aus MOT-Tracking, Echtzeit-Datenanalyse und zeitreihenbasierter Anomaliedetektion ermöglicht eine robuste Objekterkennung und die Erkennung anomaler Verhaltensmuster in urbanen Umgebungen.

### 2.3.2 Einbindung von Bussen in die Leitstelle

#### 2.3.2.1 Problem- und Zielstellung

Automatisierte Koordination und Synchronisation von Bus und Roboter erfordern eine Einbindung des Busses in die Leitstelle, um Aufträge an den Bus übermitteln zu können und den Bus sowie den Auftragsstatus anhand von Statusmeldungen zu überwachen. Ausgangssituation des ursprünglichen Forschungsvorhabens war die Einbindung eines NAVYA-Shuttles, das über eine integrierte Entwicklungsschnittstelle verfügt, mittels derer per Mobilfunk Position, Status und weitere Informationen des Fahrzeugs abgefragt und Fahrzielvorgaben an das Fahrzeug übermittelt werden können. Mit dem Wegfall des NAVYA-Shuttles ergab sich die Herausforderung der Einbindung eines alternativen Busses oder Shuttles in die Leitstelle. Die vhh.mobility stellten einen konventionellen Bus bereit, der im normalen Betrieb auf der Linie 338 in Lauenburg zwischen zentralem Omnibusbahnhof (ZOB) und Bahnhof eingesetzt wird. Besonderheit des „MAN Lion's City M“-Busses ist, dass dieser aufgrund der besonders kurzen Bauweise die steilen Passagen in der Lauenburger Altstadt bewältigen und somit auf der Shuttle-Testroute eingesetzt werden kann. Wie die meisten herkömmlichen Busse verfügt der MAN Lion's City M nicht über die Möglichkeit, per *Application Programming Interface* (API) oder durch eine andere Schnittstelle direkt in die Leitstelle eingebunden zu werden. Daher musste eine Aufrüstung der Busse erfolgen, um bidirektional Informationen zwischen dem manuellen Bus und der Leitstelle auszutauschen. Als Lösung wurde eine Tablet-Anwendung entwickelt. Das Tablet inklusive Anwendung, im Folgenden als App bezeichnet, soll in der Fahrerkabine des Busses verbaut werden können und der\*dem Busfahrer\*in Aufträge aus der Leitstelle anzeigen und Interaktionen anleiten. Gleichzeitig soll die App die aktuelle Position des Busses sowie Informationen über den aktuell bearbeiteten Auftrag und dessen Aktionen (bspw. Ein- und Ausstiegsprozess des Roboters) an die Leitstelle senden.

### 2.3.2.2 Hardware und Software

Zu Testzwecken wurde ein Microsoft Surface Pro eingerichtet und mit einem GPS-Gerät ausgestattet. Dazu wurden sowohl eine *On-Board Unit* (OBU) des Unternehmens Yunex GmbH als auch ein Receiver vom Typ Emlid Reach M2 RTK GNSS verwendet. Der Funktionsumfang der OBU ist wesentlich größer als die Positionsübergabe und die Integration per Bluetooth entsprechend komplexer. Der Emlid Reach M2 in Verbindung mit einer Navilock-GNSS-Antenne konnte mit vergleichsweise geringem Aufwand per USB-Verbindung in die Anwendung integriert werden. Beide Geräte dienen dazu, die aktuelle GPS-Position in Längen- und Breitengrad möglichst genau anzuzeigen und den Bus zu lokalisieren.

Die App wurde in Python 3.9 geschrieben (python.org 2020). Die ältere Python-Version wurde verwendet, da das *Python Package* PyBluez zur Bluetooth-Verbindung für Windows-Geräte genutzt wurde (Haung et al. 2019). Zur Kommunikation mit der Leitstelle wurden asynchrone Services aus dem gRPC-Framework (gRPC 2024) verwendet und angelehnt an den Standard der VDA 5050 (siehe Abschnitt 2.2.1.1) umgesetzt. Das GUI der App wurde mit der PyQt5 Library entwickelt (pypi.org 2024a). Ein Teil des Funktionsumfangs der App ist, dass Aufträge in Echtzeit übergeben, pausiert oder abgebrochen werden können, während das GUI bedienbar bleibt. Aufgrund des *Global Interpreter Locks* wurde *Multiprocessing* verwendet, um die einzelnen Prozesse auf verschiedenen Prozessoren parallel ausführen zu können. Das Design der Anwendung soll intuitiv und einfach sein, um die Aufmerksamkeit des\*der Busfahrer\*in möglichst wenig zu beanspruchen.

### 2.3.2.3 Software-Konzept

Der Start-Prozess initiiert vier Sub-Prozesse, die jeweils durch separate Interpreter auf unterschiedlichen Prozessoren ausgeführt werden. Neben dem GPS-, Auftrags- und GUI-Prozess wird ein Manager-Prozess gestartet. Die in Abbildung 2.28 visualisierten Informationsflüsse dienen der Verdeutlichung der logischen Beziehungen. Der Manager-Prozess ist notwendig, um die Datenübertragung zwischen den einzelnen Prozessen zu handhaben. Alle prozessübergreifenden Variablen werden, anders als auf Basis der Darstellung zu vermuten, zuerst an den Manager-Prozess übergeben und anschließend vom Manager-Prozess an die anderen Prozesse verteilt.



### 2.3.2.4 Scope und Programmablaufplan

Die Anwendung kann eingehende Aufträge aus der Leitstelle empfangen, der\*dem Busfahrer\*in visualisieren, abarbeiten und dem Fahrpersonal die Bearbeitung einbinden und sekundlich Status-Updates an die Leitstelle zurückgeben. Aufträge enthalten gemäß der VDA 5050 Knoten und Kanten (siehe Abschnitt 2.2.1.1). Die Knoten sind an Haltestellen der Linie 338 gelegt und enthalten sequenzielle *Actions*. Ist eine Order eingegangen, vergleicht die Anwendung im Hintergrund laufend den Standort des nächsten Knotens mit der eigenen Position. Unterschreitet der Abstand zwischen Knoten und aktueller Position einen definierten Schwellenwert (z. B. zehn Meter), wird der Knoten als erreicht markiert und die anliegenden Actions zur Bearbeitung visualisiert. Der Umfang der Actions, die mit der Anwendung an einem Knoten bearbeitet werden können, ist in Tabelle 2.5 zusammengefasst:

Tabelle 2.5: Übersicht der an einem Knoten verfügbaren Actions der App

Action	Beschreibung	Abschlusskriterium
openDoors	Öffnen der hinteren Bustüren	Bestätigung durch Busfahrer*in auf Tablet
extractRamp	Herausklappen der Einstiegsrampe	Bestätigung durch Busfahrer*in auf Tablet
waitForPassenger	Warten, bis Fahrgäste aus- und eingestiegen sind	Bestätigung durch Busfahrer*in auf Tablet
joinSynclist	Eintragung in der dem Knoten zugehörigen Synchronisations-Liste. Der Listeneintrag zeigt der Leitstelle an, dass der Bus zum Einstieg/Ausstieg des Roboters bereit ist.	Übermitteltes Status-Update
waitForTrigger	Warteprozess auf eine von der Leitstelle gesendete Trigger-ID. Die Trigger-ID wird von der Leitstelle gesendet, sobald der Roboter den Einstiegs-/Ausstiegsprozess abgeschlossen und sich aus dessen Synchronisations-Liste ausgetragen hat.	Empfangene Trigger-ID
leaveSynclist	Austragung aus der dem Knoten zugehörigen Synchronisations-Liste	Übermitteltes Status-Update
retractRamp	Einklappen der Einstiegsrampe	Bestätigung durch Busfahrer*in auf Tablet
closeDoors	Schließen der hinteren Türen	Bestätigung durch Busfahrer*in auf Tablet

Darüber hinaus kann die Leitstelle *InstantActions* an den Bus senden, die sofort bearbeitet und beantwortet werden. Die integrierten *InstantActions* sind in Tabelle 2.6 dargestellt.

Tabelle 2.6: Übersicht der *InstantActions* der Busanwendung

<b>InstantAction</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Abschlusskriterium</b>
factsheetRequest	Anfrage eines Factsheets über den Bus, inklusive LoadSpecifications und ausführbaren Actions	Übermittlung des Bus-Factsheets
cancel	Verwerfen des aktuellen Auftrags	Übermitteltes Status-Update
suspend	Unterbrechung des aktuellen Auftrags	Eingegangene cancel oder resume <i>InstantAction</i>
resume	Wiederaufnahme des aktuellen Auftrags	Übermitteltes Status-Update

Eine detaillierte Darstellung der logischen Abfolgen der Bearbeitung eingehender Aufträge und *InstantActions* findet sich in Anlage 5 in Form eines Programmablaufplans in Anlehnung an die Norm DIN 66001. Der Plan stellt die Hauptprozesse zum Erhalt der GPS-Position, Bearbeitung von Aufträgen und *Actions* sowie der gRPC-basierten Kommunikation mit der Leitstelle dar (DIN e. V. 1983). Das GUI wurde der Übersichtlichkeit halber nicht abgebildet. Überdies sind die einzelnen Schritte zur Ausführung einer *InstantAction* aufgeführt. Zu sehen ist ebenfalls der initiale *Handshake* zwischen Anwendung und Leitstelle, bei dem die gRPC-Services geöffnet bzw. angesprochen werden und ein leeres Factsheet-, LogMessage- und StateMessage-Objekt gesendet werden.

#### 2.3.2.5 *User Interface* und Bedienung

Das GUI besteht aus fünf XML-Dateien, die in Qt Designer entworfen wurden. Die Fenster dienen jeweils unterschiedlichen Funktionalitäten der Anwendung. Im Folgenden ist eine zusammenfassende Übersicht der Ansichten aufgelistet.

1. Standard-Ansicht
2. Kartenansicht
3. Action-Bestätigung durch Busfahrer\*in
4. Aktuelle Auftragsübersicht
5. Fehlermeldung

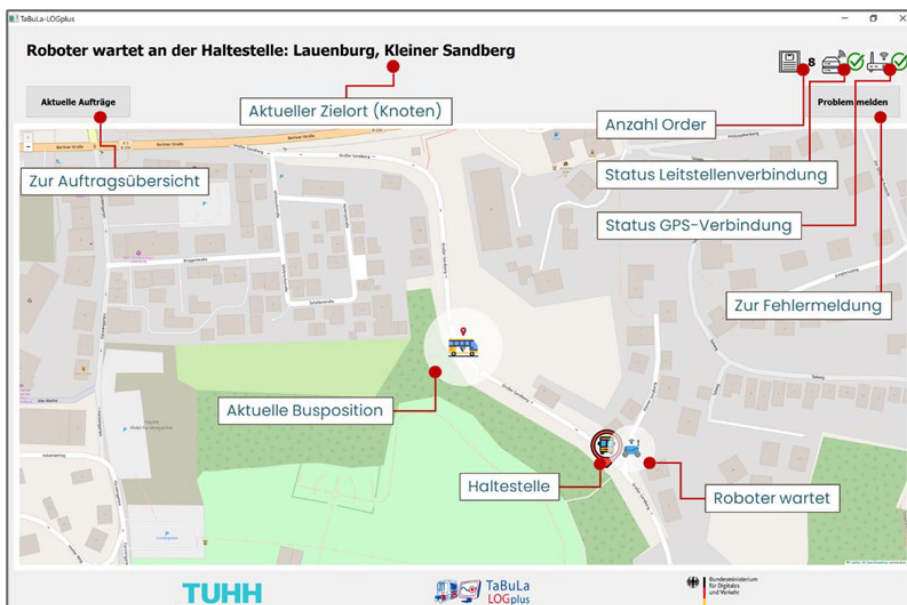
Das folgende Foto zeigt eine Möglichkeit zur Anbringung des Tablets in der Fahrer\*innenkabine.

Abbildung 2.29: Tablet und GPS-Gerät sind in der Fahrer\*innenkabine beispielhaft während des Testbetriebs angebracht (Hr. Scheske, vhh.mobility)



Die Standard-Ansicht kann flexibel per Skript verändert werden, z. B. für die Start-Ansicht. Die Kartenansicht ist die häufigste angezeigte Ansicht, in der eine OpenStreetMap-basierte Karte zentriert um die aktuelle Bus-Position mit Bus-Haltestellen und wartenden Robotern angezeigt wird (siehe Abbildung 2.30).

Abbildung 2.30: Kartenansicht Busanwendung inklusive Beschreibung auf einem Microsoft Surface Pro mit 13-Zoll-Bildschirm



Ist ein Knoten erreicht, werden dem Fahrpersonal über Ansicht 3 die auszuführenden *Actions* mitgeteilt (siehe Auflistung auf Seite 78). Diese können anschließend per Tippen auf das Tablet bestätigt werden. Über die Auftragsübersicht kann der aktuelle Auftragsstatus eingesehen werden. Im Fall eines Fehlverhaltens kann die Ansicht zur Fehlermeldung bedient werden.

Mittels der durch die Anwendung übergebenen Informationen kann dem Roboter von der Leitstelle übermittelt werden, wann der Bus einfahrbereit an der Haltestelle steht (*Actions*: `openDoors`, `extractRamp`, `waitForPassengers`). Anschließend lokalisiert sich der Roboter zum Bus und fährt in den hinteren Eingangsbereich ein. Sobald der Roboter seine Position eingenommen hat, bestätigt dieser die abgeschlossene Einfahrt der Leitstelle. Die Leitstelle leitet diese Information per Trigger mit entsprechender ID an die Busanwendung weiter, woraufhin das GUI der\*dem Busfahrer\*in die Einfahrt bestätigt (*Actions*: `waitForTrigger`, `leaveSyncList`). Anschließend zeigt die App dem Fahrpersonal die vor der Weiterfahrt benötigten *Actions* an (*Actions*: `retractRamp`, `closeDoors`). Die Herausfahrt des Roboters aus dem Bus erfolgt analog.

#### 2.3.2.6 Open-Source-Veröffentlichung

Die entwickelte App steht öffentlich zugänglich unter Verwendung einer CC-BY-Lizenz zur Verfügung und kann über folgenden Link abgerufen werden: [https://collaborating.tuhh.de/w-8/w-8-published-datasets/02\\_tabula-logplus-bus-app](https://collaborating.tuhh.de/w-8/w-8-published-datasets/02_tabula-logplus-bus-app).

### 2.3.3 Erprobung Roboter und KI-basierte Umfelderkennung

#### **Demonstrator**

Für die Erprobung und Demonstration der entwickelten KI-Methoden zur Objekterkennung und Anomaliedetektion in urbanen Umgebungen wurde ein eigener Demonstrator entwickelt. Der Einsatz eines eigenen Versuchsträgers ermöglichte die Untersuchung sehr spezifischer Fragestellungen, die mit kommerziell verfügbaren Geräten nur schwierig zu adressieren gewesen wären. Abbildung 2.31 zeigt ein detailliertes Foto des Gesamtaufbaus des Demonstrators.

Abbildung 2.31: Demonstrator Hardware-Aufbau

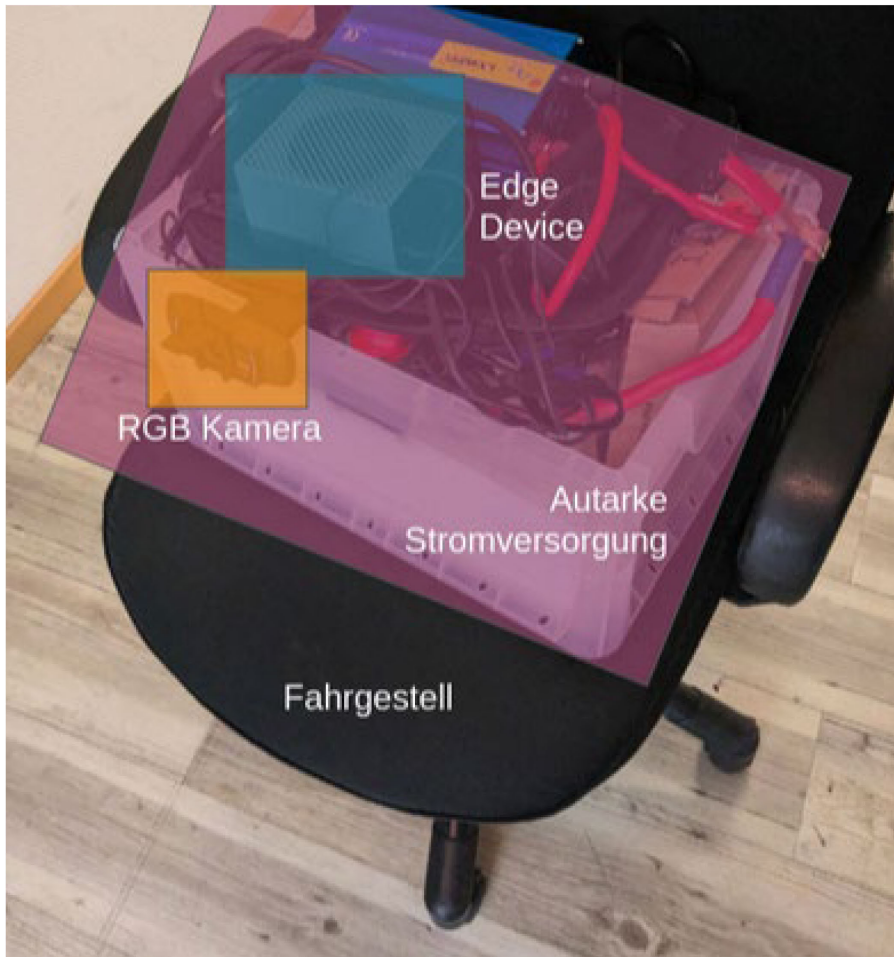
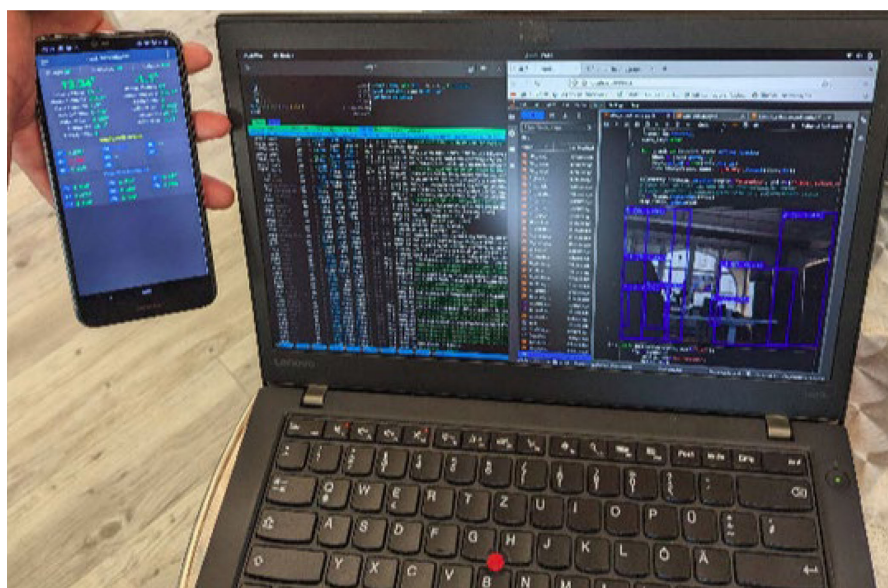


Abbildung 2.32: Echtzeit-Versuchsmonitoring



### *Live-Vorschau von MOT:*

Ein wichtiger Bestandteil der Diagnose ist die Live-Vorschau der MOT-Ergebnisse. Diese Vorschau ermöglicht es den Benutzenden, die erkannten Objekte in Echtzeit zu verfolgen und sich einen Überblick über die aktuelle Situation zu verschaffen. Die Live-Vorschau sollte idealerweise direkt auf dem *Edge Device* oder auf einem separaten Bildschirm dargestellt werden.

### *Dokumentation der Diagnose:*

Zur detaillierten Dokumentation der Diagnose wird ein Drehbuch mit Bildern verwendet.

Abbildung 2.33: Sicht auf Paula



Dieses Bild zeigt die Umgebung aus der Perspektive von Paula (Palaimon + Laura = Paula), dem Versuchsroboter Palaimons. Es soll die Kameraanordnung und die Anbringung des Jetson-Moduls (Edge-Computing-Einheit) auf Paula sichtbar machen.

Abbildung 2.34: MOT auf Kamerabild



Dieses Bild zeigt die Ausgabe des MOT-Algorithmus auf dem Kamerabild. Hier sind die erkannten Objekte (z. B. Menschen, Fahrzeuge) durch Markierungsrahmen (*Bounding Boxes*) visualisiert. Im Idealfall wird ein Bild der Kameraaufnahme mit den eingezeichneten Markierungen dargestellt. Alternativ kann bei Offline-Analyse der Kameraaufnahmen ein Screenshot der MOT-Ergebnisse verwendet werden.

Abbildung 2.35: Bildschirm mit Live-Vorschau



Abbildung 2.36 zeigt eine Person, die vor einem Bildschirm sitzt, auf dem die Live-Vorschau der MOT-Ergebnisse dargestellt wird. Dies veranschaulicht die Benutzerinteraktion mit dem System.

Angezeigte Informationen können beispielweise sein:

- statistische Daten zu den erkannten Objekten, wie die Anzahl der Objekte pro Zeitintervall,
- zeitabhängige Darstellung der Anzahl der Objekte im Bildausschnitt (z. B. Diagramm)

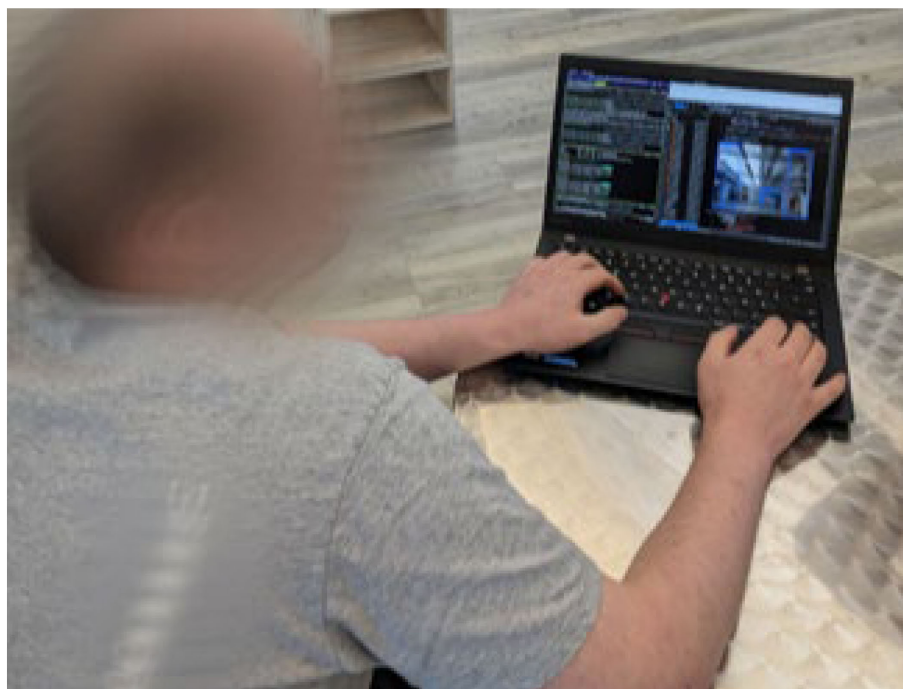
*Anzeige von Analyseparametern:*

Neben der Darstellung der Objekt-Tracks ist es sinnvoll, den Benutzenden auch Einblick in die ausgewerteten Parameter zu gewähren. Dies können beispielsweise die Konfidenzwerte der Objekterkennung oder die Parameter des Kalman-Filters sein. Diese Informationen ermöglichen es den Benutzenden, die Qualität der erfassten Daten und die Funktionsweise des Systems besser zu verstehen.

*Erweiterte Datenanalyse:*

Die Diagnose beschränkt sich nicht nur auf die Visualisierung der MOT-Ergebnisse. Im Sinn einer erweiterten Datenanalyse sollten den Benutzenden auch Möglichkeiten zur Verfügung gestellt werden, die exportierten Daten (z. B. *Tracks* im CSV-Format) weiterzuverarbeiten und mit externen Tools zu analysieren. Dies ermöglicht eine tiefere Untersuchung der erfassten Daten und die Gewinnung neuer Erkenntnisse.

Abbildung 2.36: Person verfolgt Live-Vorschau der MOT-Ergebnisse



### ITL-Video-basierte Offline-Tests

#### *Zielsetzung:*

Die Funktionsweise des KI-Systems für die Objekterkennung und Anomalie-detektion sollte unter realitätsnahen Bedingungen evaluiert werden. Hierfür wurden Offline-Tests auf Basis von ITL-Videos durchgeführt. Diese Videos simulieren die Aufnahmebedingungen des realen Systems in urbanen Umgebungen.

#### *Testumfang:*

Um die Leistungsfähigkeit des Systems unter verschiedenen Umweltbedingungen zu testen, wurden ITL-Videos mit unterschiedlichen Charakteristika herangezogen:

- Dynamik: bewegte Objekte (z. B. Fußgänger, Fahrzeuge) vs. statische Szenen,
- Umgebung: Innenräume vs. Außenbereiche,
- Personenbewegung: einfache Bewegungsmuster vs. sich kreuzende Personenströme,
- Okklusion: Sichtbehinderung von Objekten durch andere Objekte.

#### *Evaluierung der Tracking-Performance:*

Für jedes Testvideo wurde analysiert, inwieweit das KI-System die Objekte erfolgreich verfolgen kann. Dabei wurde insbesondere auf die Qualität der Objekt-Tracks geachtet. Die Ergebnisse der Analyse umfassen:

- Innen- vs. Außenbereich: Vergleich der Tracking-Performance in Innenräumen und in Außenbereichen,
- Tracks: erkannten Tracks wurden visualisiert, um etwaige Brüche darin erkennen zu können, was auf Fehler im Tracking-Algorithmus hinweist.

Abbildung 2.37: Objekt-Tracking einer laufenden Person draußen



Quelle: ITL-Video, Annotation: Palaimon GmbH

Abbildung 2.38: Objekt-Tracking einer laufenden Person im Innenraum (mit zeitweiser Verdeckung der Person)



Quelle: ITL-Video, Annotation: Palaimon GmbH

Die Zahlen in der Grafik geben die Konfidenz des Algorithmus an. In diesem Beispiel sagt die Zahl aus, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % eine Person erkannt wurde.

### **Evaluierung der KI-Methoden und Ergebnisse**

Die Echtzeit-Tests haben folgende Ergebnisse erbracht:

- **Monitoring:** Das System ermöglicht ein effektives Monitoring der Umgebung und der erkannten Objekte.
- **Batteriebetrieb:** Das System kann im Batteriebetrieb genutzt werden. Der Energieverbrauch ist gering genug, um einen langfristigen Einsatz zu ermöglichen.
- **Echtzeitfähigkeit:** Die Objekterkennung erfolgt in Echtzeit.
- **Personentracking und Objektklassen:** Das System kann sowohl Personen als auch verschiedene Objektklassen in unterschiedlichen Umgebungen zuverlässig tracken. Diese Fähigkeit bildet die Grundlage für eine unabhängige Anomaliedetektion, die nicht vom Hintergrund abhängt.

Die durchgeführten Experimente lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Leistung der KI und ermöglichten die Auswahl der optimalen Konfiguration für den Einsatz in urbanen Umgebungen.

Insgesamt ist das Thema „Autonomes Fahren“ als ein sehr komplexes KI-Forschungsproblem einzustufen.

### **Erprobung der Laura-Roboter**

Die iterative Erprobung des Robotersystems und der Leitstelle erfolgte während der gesamten Entwicklungsphase, um den bevorstehenden Testbetrieb optimal vorzubereiten. Tests wurden sowohl in Simulationen, innerhalb der Testhalle des ITL, als auch vor Ort im Betriebsgebiet Lauenburg durchgeführt.

### **Simulationen**

Für die Simulationen kam primär die NVIDIA Isaac Sim auf der instituts-eigenen Workstation zum Einsatz. Parallel dazu wurden einzelne Algorithmen anhand zuvor aufgezeichneter Sensordaten getestet und weiterentwickelt. Die Schwerpunkte lagen hier bei Algorithmen für SLAM, Lokalisierung und Objekterkennung.

### **Versuchslabor im ITL**

Auf der institutseigenen Testfläche wurde das im Vorgängervorhaben TaBuLa-LOG entwickelte *Mock-up* genutzt. Dieses Modell bildet den Innenraum und die Auffahrtsrampe der in Lauenburg bis 2021 eingesetzten automatisierten NAVYA-Shuttles detailgetreu nach und dient zur Erprobung des Ein- und Ausstiegsprozesses. Neben den iterativen Entwicklungstestfahrten fanden monatlich umfangreiche *Testing Sessions* statt. Hierbei wurden Roboter und Leitstelle gesamtheitlich getestet, um potenzielle Fehlerquellen zu identifizieren und Anpassungen durch neue Funktionen transparent zu berücksichtigen. Diese regelmäßigen Tests trugen maßgeblich zur verbesserten Ausfallsicherheit der Roboter bei.

### **Vor-Ort-Tests in Lauenburg**

Zur Vorbereitung auf den Testbetrieb wurden diverse Testtage direkt in Lauenburg durchgeführt. Im Sommer 2023 fanden erste Datenerhebungen mittels stationären Laserscannern und mit beiden Robotern im neuen Betriebsgebiet am Fürstengarten statt. Im März 2024 folgten mehrere Testtage, die sich auf den Einsteigeprozess mit Bussen konzentrierten. Ziel war die Validierung der auf den *Mock-ups* erzielten Ergebnisse mit den realen Bussen in Lauenburg.

Von Mai bis Juli 2024 wurden weitere Testtage durchgeführt, bei denen die autonome Fahrfunktion auf Fußwegen im Fokus stand. Dabei wurde die Betriebssicherheit auf abgesperrten Fußwegabschnitten intensiv überprüft. Im Juli wurden ergänzend mehrere Vormittage der Arbeit am Einsteigeprozess mit Bussen gewidmet. Tests fanden dabei auch auf dem Betriebshof der vhh.mobility Bergedorf statt. Die in Lauenburg auf der Linie 338 eingesetzten Göppel-Busse, die einen verkürzten Radstand für die Fahrt durch die Lauenburger Altstadt haben, standen nur begrenzt zur Verfügung. Daher wurden Tests auch mit anderen, größeren Linienbusmodellen durchgeführt. Zu diesem Zweck mussten die Innenräume der Busse erneut kartiert werden,

was letztlich zu einer breiteren Anwendbarkeit der Ergebnisse führt, da Laura in der Lage ist, in verschiedene Busmodelle einzufahren.

Die umfassenden und iterativen Erprobungen, sowohl in Simulationen als auch in realen Testumgebungen, ermöglichten eine fundierte Vorbereitung auf den finalen Testbetrieb in Lauenburg. Aufgrund der stetigen Verbesserung und Anpassung von Algorithmen und Prozessen wurden eine erhöhte Ausfallsicherheit sowie eine breite Anwendbarkeit der entwickelten Technologien erreicht.

## 2.4 Sicherheitsnachweise und Ausnahmegenehmigungen

**Forschungsfrage:** Welche technischen und verwaltungsrechtlichen Voraussetzungen sind für einen im öffentlichen Raum zugelassenen Betrieb hin zu SAE-Level 4 entwickelter Vehikel umzusetzen?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurde sich auf die bei der Entwicklung und Genehmigung zwei prototypischer Roboterplattformen gewonnenen Erkenntnisse und praktischen Erfahrungswerte gestützt. In den folgenden Abschnitten werden die zentralen Schritte der durchlaufenen Entwicklungs- und Genehmigungsprozesse erläutert und exemplarisch die jeweiligen Kernergebnisse aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass sich die dokumentierten Arbeiten zwar an den Vorgaben der einschlägigen Standards für Straßenfahrzeuge orientieren, diese jedoch nur in Anlehnung umsetzen, um den Anforderungen eines Forschungsvorhabens gerecht zu werden.

### 2.4.1 Ausgangssituation und rechtlicher Kontext

Die Arbeiten des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus bauen inhaltlich auf den Ergebnissen des Vorgängervorhabens TaBuLa-LOG auf (siehe Kapitel 1.2.1). Dazu zählen insbesondere die beiden vorhandenen Transportroboter-Prototypen Laura sowie die während ihrer Entwicklung entstandenen Arbeitsprodukte im Kontext der (funktionalen) Sicherheit. Außerdem liegen Ausnahmegenehmigungen für den automatisierten Betrieb auf Gehwegen in Lauenburg/Elbe vor (weitere Informationen hierzu finden sich in Thiel et al. 2023b).

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die bestehenden Roboter sowohl in Bezug auf die automatisierten Fahrfunktionen als auch hinsichtlich ihrer Integration in die Leitstelle und ihrer Hardwareausstattung erheblich erweitert (siehe Kapitel 2.3.1.1). Daher war erneut ein auf Sicherheit ausgerichteter Entwicklungs- und Modifikationsprozess notwendig, der die relevanten rechtliche Vorgaben und Standards berücksichtigt. Darüber hinaus wurden neue Ausnahmegenehmigungen erforderlich, die die modifizierten Roboter abdecken.

Die rechtliche Grundlage der zu berücksichtigenden Anforderungen besteht in der Einstufung der Roboter als Kraftfahrzeug. Autonome Kraftfahrzeuge werden mittlerweile explizit durch einen angepassten Rechtsrahmen erfasst, jedoch befindet sich die Anwendung der zugehörigen Regelungen noch in einer frühen Phase. Mobile Roboter werden darin noch nicht explizit adressiert. Die entsprechende Verordnung (AFGBV) spezifiziert allerdings Standards und Richtlinien, die berücksichtigt werden müssen, namentlich ISO 26262 (Functional Safety – Funktionale Sicherheit), ISO/PAS 21448 (Safety of the Intended Functionality – SOTIF – Sicherheit der Sollfunktion) und UNECE R 155. Diese Anforderungen wurden angepasst an den Vorhaben- und Roboterkontext berücksichtigt. Zudem wurde für den Bereich Cybersecurity ein Vorgehen angelehnt an den Standard ISO/SAE 21434 gewählt. Das an die Standards angelehnte Vorgehen wurde in Abstimmung mit dem TÜV Nord festgelegt und umfasst die in den jeweiligen Standards beschriebenen Hauptschritte des Entwicklungsprozesses, auf die in den folgenden Unterkapiteln einzeln eingegangen wird: Dokumentation des Systems in einer Item-Definition bzw. Funktions- und Systembeschreibung, Durchführung von Gefahren- und Risikoanalysen für den manuellen und automatisierten Betrieb, Durchführung von Sicherheitsanalysen, Weiterentwicklung des Sicherheitskonzepts sowie Verifikation und Validierung.

Die Roboter werden weiterhin offiziell als automatisierte Fahrzeuge nach SAE-Level 2 eingestuft und betrieben. Diese Einstufung schränkt die autonomen Fahrfunktionen im Vorhabenkontext nicht ein, setzt aber eine ständige Überwachung durch eine Begleitperson voraus. Eine durchgehende Überwachung leitet sich ebenfalls aus unseren Sicherheitsbetrachtungen ab (siehe Kapitel 2.4.4).

#### 2.4.2 Erweiterung der Funktions- und Systembeschreibung

Bereits im Vorgängervorhaben wurden die Item-Definition nach ISO 26262 und die Funktions- und Systembeschreibung nach ISO/PAS 21448 als gemeinsames Dokument erstellt, um Dopplungen in der Dokumentation zu vermeiden. Diese bestehende Dokumentation wurde um die nachfolgend beschriebenen Aspekte erweitert.

Die Systemgrenzen wurden durch die Integration der Leitstelle neu definiert, wodurch die Schnittstellen zwischen Roboter und Leitstelle als Basis für die weiteren Betrachtungen, insbesondere im Bereich Cybersecurity, identifiziert wurden.

Auf Hardware-Ebene wurden die Modifikationen am Roboter (siehe Kapitel 2.3.1.1) in die Dokumentation integriert. Eine erneute Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) wurde in Rücksprache mit einem EMV-Messlabor des TÜV Nord unter Berücksichtigung der durchgeführten Anpassungen und des Vorhabenkontexts für nicht notwendig befunden.

Auf Software-Ebene wurden die erweiterten automatisierten Fahrfunktionen und die Leitstellenanbindung in die Funktions- und Systembeschreibung integriert. Zudem führten Updates grundlegender Betriebssystem- und Framework-Bestandteile der Roboter-Software (siehe Kapitel 2.3.1.1) zu notwendigen Anpassungen.

### 2.4.3 *Operation Scenarios* und *Operational Design Domain*

Die Definitionen von *Operational Scenarios* (Betriebsszenarien) und einer *Operational Design Domain* (ODD, Einsatzumgebung) werden genutzt, um den Rahmen und die Grenzen zu beschreiben, unter denen die Roboter sicher und zuverlässig betrieben werden sollen. Sie ermöglichen eine präzise Analyse der Einsatzsituationen der Roboter und dienen als Grundlage zur Identifikation potenzieller Risiken und zur Entwicklung geeigneter Sicherheitsmaßnahmen.

Die im Forschungsvorhaben betrachteten automatisierten Transporte unter Nutzung eines Busses zur Überwindung weiterer Streckenabschnitte lassen sich in die folgenden übergeordneten *Operational Scenarios* zusammenfassen:

- Einfahrt in den Bus,
- Ausfahrt aus dem Bus,
- Einparken im Bus,
- Überquerung von Plätzen, Parkplätzen oder größeren Freiflächen,
- Fahrt entlang von Wegen oder Straßen,
- Fahrt in der Nähe einer Gebäudetür,
- Stillstand an der Übergabeposition,
- Stillstand im Bus.

Die definierten Umweltbedingungen erlauben den Betrieb nur bei Tageslicht unter günstigen Sicht- und Wetterbedingungen mit ausreichendem GNSS- und Mobilfunkempfang. Diese Wahl gewährleistet, dass die korrekte Funktion kritischer Fahr- und Sicherheitsfunktionen jederzeit sichergestellt ist.

### 2.4.4 Gefährdungs- und Risikoanalysen

Um die Sicherheit des Roboters zu bewerten, wurden zwei Gefährdungs- und Risikoanalysen (*Hazard Analysis and Risk Assessments* – HARAs) durchgeführt.

Die HARA für die funktionale Sicherheit hat das Ziel, potenzielle Risiken durch technische Fehlfunktionen des Systems zu identifizieren und zu bewerten. Sie soll sicherstellen, dass die Funktionen der Roboter keine Gefährdung für Menschen oder die Umwelt darstellen. Hierfür werden mögliche

Gefährdungsszenarien analysiert und hinsichtlich ihrer sicherheitsrelevanten Auswirkungen bewertet (z. B. Versagen der Bremsfunktion bei Annäherung an ein Hindernis). Auf Basis dieser Bewertung werden in einem weiteren Schritt geeignete Maßnahmen zur Risikominderung abgeleitet.

Zusätzlich zur funktionalen Sicherheit betrachtet eine HARA zur Sicherheit der Sollfunktion solche Gefährdungen, die nicht auf technische Fehler, sondern auf unbeabsichtigte Effekte der bestimmungsgemäßen Funktionalität oder potenziellen Fehlgebrauch zurückzuführen sind. Ziel ist es, Risiken zu identifizieren, die durch unvorhergesehene Umstände wie ungünstige Umgebungsbedingungen oder unvollständige Systemkenntnisse entstehen können. Diese Analyse dient der Verbesserung der Robustheit des Systems und reduziert die Wahrscheinlichkeit von Fehlverhalten unter realen Bedingungen. So wurden Einschränkungen der Sensorik unter verschiedenen Witterungsbedingungen betrachtet und als Folge der Einsatz der Roboter bei kritische Witterungsbedingungen (z. B. bei starkem Regen oder dichtem Nebel) eingeschränkt.

#### 2.4.5 Cybersicherheit

Um die Cybersicherheit der Roboter zu gewährleisten, wurde eine TARA (*Threat Analysis and Risk Assessment*) in Anlehnung an ISO/SAE 21434 durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden zunächst die zu schützenden Güter identifiziert, wie z. B. die Datenkommunikation der verbauten Sensorik oder die für die Fahrfunktion notwendigen Kartendaten. Anschließend wurden für jedes Gut mögliche Schadensszenarien ermittelt, unter denen ein Schutzziel (Informationsvertraulichkeit, Datenintegrität, Systemverfügbarkeit) verletzt würde. Diese Szenarien wurden daraufhin bewertet (*Impact Rating*) und mögliche Angriffspfade dokumentiert (*Attack Feasibility Rating*). Das resultierende Gesamtrisiko basiert auf einer kombinierten Auswertung des *Impact Rating* und des *Attack Feasibility Rating*. Zur Reduzierung des (Rest-)Risikos wurden geeignete Schutzmaßnahmen identifiziert und in das Sicherheitskonzept aufgenommen.

Als Ergebnis der TARA konnte festgestellt werden, dass viele der notwendigen Schutzmaßnahmen bereits durch die Anwesenheit einer Begleitperson realisiert werden konnten, die bei unerwartetem Verhalten der Roboter infolge eines Angriffs die Kontrolle übernimmt oder eine (Not-)Bremsung einleitet. Darüber hinaus zeigte sich die Notwendigkeit, den Zugriff auf die USB-Ports und die Benutzungsschnittstelle des Roboters insofern zu erschweren, als die Roboter nicht unbeaufsichtigt in der Öffentlichkeit abgestellt werden dürfen. Für die erprobte Anwendung war es im Kontext der Cybersicherheit ausreichend, die Systemgrenze an der Kommunikationsschnittstelle zwischen Roboter und Leitstand zu definieren. Die von der Leitstelle vorgegebenen Aktionen werden von den Robotern unabhängig umgesetzt und unterliegen den entsprechenden Sicherheitsfunktionen der Robotersysteme. Bei

höheren Automatisierungsgraden und der Weiterentwicklung des Leitstands zu einer Technischen Aufsicht im Sinn der AFGBV, die auch Fahrmanöver vorgeben kann, ist diese Trennung nicht mehr möglich. In diesem Fall ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Leitstelle erforderlich.

#### 2.4.6 Sicherheitsanalysen

Sicherheitsanalysen im Kontext der ISO 26262 werden durchgeführt, um Fehlerursachen zu ermitteln, die Auswirkungen von Fehlern zu bestimmen, aber auch um die Eignung eines Systemdesigns nachzuweisen (siehe ISO 26262-4-6). Für die Untersuchung der Roboter-Systemarchitektur wurde das Instrument der Fehlerbaumanalyse (*Fault Tree Analysis, FTA*) als deduktive bzw. Top-down-Methode gewählt. Fehlerbäume erlauben es, (Teil-)Systeme entlang ihrer Module und Wirkungsketten zu betrachten und auch komplexe Abhängigkeiten zu modellieren. In einem ersten Schritt wurden die in den zuvor durchgeführten HARAs identifizierten Gefährdungen konsolidiert und gemeinsame unerwünschte Top-Ereignisse identifiziert (z. B. Ausfall der Bremsfunktion). Für jedes dieser Top-Ereignisse wurden in einem zweiten Schritt die entsprechenden Fehlerbäume erstellt. Die Fehlerbäume sind qualitativer Natur und erlauben keine Aussage über Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Subsysteme. Einerseits ist dies bei der Entwicklung auf Systemebene nicht zwingend erforderlich, andererseits ist dies mangels Ausfallraten der eingesetzten Komponenten auch nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich.

Es zeigt sich aber auch, dass zukünftige Fahrzeuge ohne überwachende\*n Begleiter\*in vor großen systemseitigen Herausforderungen für einen sicheren Betrieb stehen, wenn alle Ausfälle, Fehlfunktionen oder unerwartete Betriebszustände ausschließlich systemseitig adressiert werden müssen und kein unmittelbarer manueller Eingriff vorgesehen ist.

#### 2.4.7 Weiterentwicklung des Sicherheitskonzepts

Ein Sicherheitskonzept für den Betrieb der Roboter liegt bereits aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben vor. Dieses wurde im Rahmen der oben beschriebenen Aktivitäten weiterentwickelt bzw. um die entwickelten Sicherheitsmaßnahmen ergänzt. Zusammenfassend sind die wichtigsten Elemente des Sicherheitskonzepts folgende: Die Begleitpersonen werden umfassend geschult, um in kritischen Situationen effektiv handeln zu können. Das redundante Bremssystem, bestehend aus Controller, Funk-Not-Aus und fest installiertem Not-Aus-Schalter, ermöglicht es den Begleitpersonen, jederzeit einzugreifen. Eine manuelle Bremsung oder die Übernahme der Steuerung ist unmittelbar möglich. Zum Schutz vor Cyberangriffen und ungewollten Zugriffen sind umfangreiche Aufsichtsmaßnahmen durch die Begleitperson vorgesehen.

#### 2.4.8 Verifikation und Validierung

Im Rahmen der Verifikation wurden umfangreiche Hardware- und Softwaretests durchgeführt, um die Funktionalität und Zuverlässigkeit der entwickelten Prototypen sicherzustellen. Auf Software-Ebene erfolgten neben Unit- und Integrationstests regelmäßige *Walk-throughs* und *Code Reviews*. Hinsichtlich der hardwareseitigen Tests lag ein besonderer Schwerpunkt auf der Verifikation der Not-Aus-Systeme einschließlich der Funktion des redundanten Bremssystems.

Die Validierung erfolgte durch umfangreiche und strukturierte Tests auf System- und Gesamtfahrzeugebene. Ziel der Tests war es, das Verhalten des Roboters in realen und realitätsnahen Anwendungsszenarien nachzuweisen und sicherzustellen, dass die funktionalen und sicherheitstechnischen Anforderungen in ihrer Gesamtheit erfüllt werden.

Es konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass alle Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept berücksichtigt und alle definierten Gegenmaßnahmen zur Risikominimierung korrekt umgesetzt wurden.

#### 2.4.9 Begutachtung und Ausnahmegenehmigungen

Wie bereits im Vorgängervorhaben waren für den Betrieb der Roboter jeweils zwei Ausnahmegenehmigungen erforderlich.

- 1) Eine Ausnahmegenehmigung nach § 70 StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung) für Abweichungen von den Bau- und Betriebsvorschriften der § 30 ff. StVZO.
- 2) Eine Ausnahmegenehmigung nach § 46 StVO für das Befahren der Gehwege mit einem Kraftfahrzeug.

Aufgrund der hardwaretechnischen Modifikationen und der funktionalen Erweiterungen der Roboter, einschließlich der Interaktion mit der Leitstelle, wurden neue Ausnahmegenehmigungen für Abweichungen von der StVZO benötigt. Als Grundlage des Antrags diente ein Nachtragsgutachten des TÜV Nord, welches das vorhandene Gutachten um eine Bewertung der technischen und funktionalen Neuerungen erweitert. Die Begutachtung umfasste zwei wesentliche Elemente:

- 1) Demonstration und Prüfung der Roboter im Realbetrieb vor Ort in Lauenburg/Elbe: Die Roboter wurden hinsichtlich ihres sicheren Fahr- und Ausweichverhaltens auf dem Gehweg sowie ihrer Ein- und Ausfahrt in bzw. aus dem Bus getestet, jeweils im Zusammenspiel mit der Leitstelle.

- 2) Begleitung der auf die Sicherheit ausgerichteten Entwicklungsschritte: Diese erfolgten wie zuvor beschrieben angelehnt an Standards für Straßenfahrzeuge, mit begleitender und abschließender Prüfung der bei diesem Prozess erstellten Arbeitsprodukte (z. B. Funktions- und Systembeschreibung, HARAs etc.).

Die Ausnahmegenehmigungen nach § 46 StVO für das Befahren der Gehwege wurden erneut beantragt, da die vorhandenen örtlich und zeitlich beschränkten Genehmigungen zu Beginn des Testzeitraums ausgelaufen waren. Dem Antrag wurden sowohl die zuvor ausgestellten Genehmigungen als auch die neu ausgestellte Ausnahmegenehmigung nach § 70 StVZO sowie das zugrunde liegende TÜV-Gutachten beigefügt.

## 2.5 Testfeldbetrieb

Der Testfeldbetrieb in Lauenburg/Elbe wurde in drei Phasen mit unterschiedlichen Funktionsumfängen und spezifischen Schwerpunkten durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Testphasen zusammengefasst.

### 2.5.1 Testbetrieb 1 (22.07.24–24.07.24)

Ziel des ersten Testbetriebs war die Überprüfung der automatisierten Fahrfunktionen der Roboter in Lauenburg in Zusammenarbeit mit der Leitstelle. Hierzu wurden wie in Abbildung 2.39 dargestellt zwei Testbereiche am Fürstengarten definiert:

- ein schmaler Fußweg mit Bushaltestelle unmittelbar an einer Straße,
- ein breiter, von Bäumen gesäumter Fußweg in einer Parkanlage.

In den nachfolgenden Tabellen werden verschiedene Szenarien vorgestellt, um unterschiedliche Auftragsprofile aus der Leitstelle mit dem Roboter zu testen. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Fahraufgaben, Fahrbereiche und Hindernisse.

Zur Prüfung der Hindernisbewältigung wurden dynamische Situationen simuliert, in denen Testteilnehmende dem Roboter als potenzielle Hindernisse entgegenkamen. Um die Robustheit zu erhöhen, wurden gezielt Fehlerfälle provoziert. Ein Beispiel ist das versuchte Abdrängen der Roboter vom Fußweg. Abbildung 2.40 zeigt die beiden Roboter während der Testbetriebe in Lauenburg.

Abbildung 2.39: Darstellung der beiden betrachteten Testbereiche in Lauenburg/Elbe

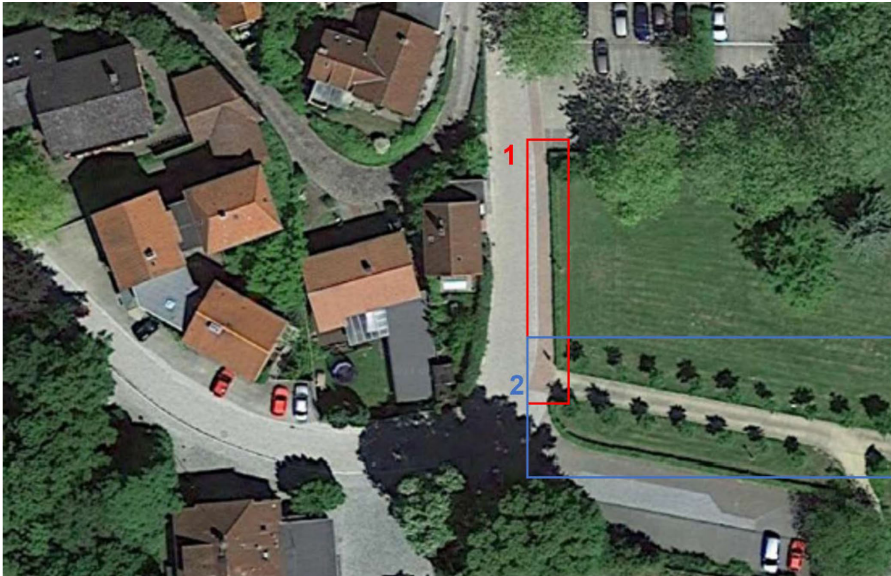
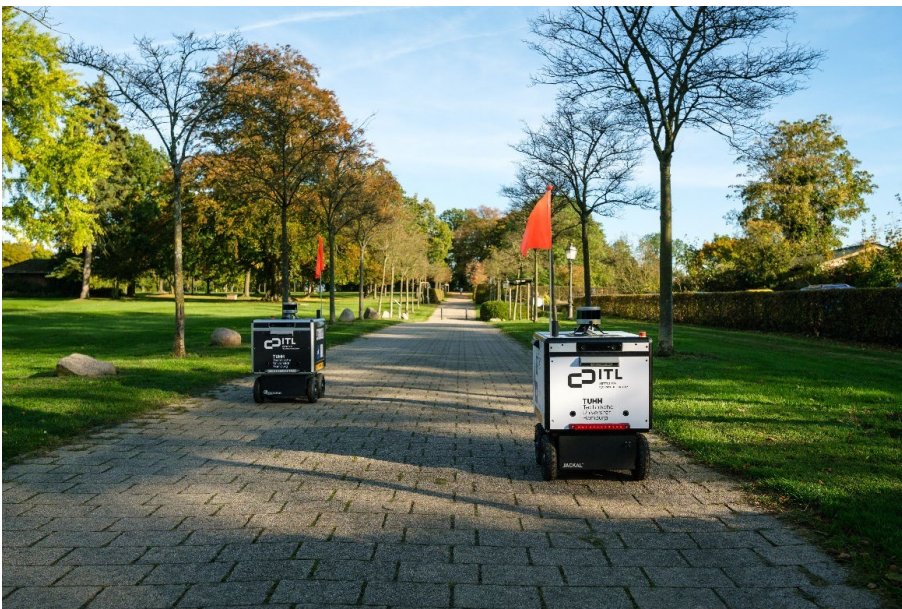


Abbildung 2.40: Schwarzer und weißer Transportroboter während des Testbetriebs in Lauenburg/Elbe



In den drei Testtagen des ersten Testbetriebs legten die Roboter eine Distanz von insgesamt 6.439 Metern zurück. Nach anfänglichen Problemen mit der Lokalisierung wurden zentrale Funktionen und Reaktionszeiten der Roboter-navigation, wie Rückwärtsfahren und bessere Hinderniswahrnehmung, erfolgreich optimiert. Eine Übersicht der behandelten Szenarien findet sich in Tabelle 2.7.

Tabelle 2.7: Übersicht über die Szenarien des ersten Testbetriebs

Szenario	Beschreibung
1.1	3 Knoten ohne Rotation, kurze Abstände zwischen Knoten ( $\approx 3$ m)
1.2	5 Knoten und wieder zurück zum Ursprung, kurze Abstände zwischen Knoten ( $\approx 3$ m)
1.3	1 Knoten, weiter Abstand ( $\approx 20$ m)
1.4	2 Knoten, wieder zum Ursprung zurück, weiter Abstand zwischen Knoten ( $\approx 20$ m)
1.5	7 Knoten, stumpfe Wendung, kurze Abstände zwischen Knoten ( $\approx 3$ m)
2.1	Dynamisches Hindernis parallel von vorne (Fußgänger*in)
2.2	Dynamisches Hindernis parallel von hinten (Fußgänger*in)
2.3	Dyn. Hindernis orthogonal von links
2.4	Dyn. Hindernis orthogonal von rechts
3.1	Pausieren einer Order
3.2	Abbrechen einer Order
3.3	Abfahren 3 Order hintereinander
3.4	Übernahme und erneute Abgabe der Roboterkontrolle bei laufender Order
3.5	Abbrechen einer Order, während Roboter manuell gefahren wird
3.6.	Überwachung der Roboter über den Videostream
3.7	Übernahme der Robotersteuerung aus der Leitstelle
4.1	Roboter Master Control, Knoten stoppen
4.2	Backend beenden
4.3	Mobilfunkverbindung deaktivieren

Der schwarze Roboter befand sich zu diesem Zeitpunkt auf dem ROS-1-Stand, der weiße Roboter war bereits auf dem finalen ROS-2-Stand. Nach der Behebung eines anfänglichen Problems auf dem weißen Roboter mit der Lokalisierung, das durch ein kurz vor Testbetrieb durchgeführtes Update ausgelöst wurde, war das Zusammenspiel aus Roboter und Leitstelle fehlerfrei möglich.

Es ergaben sich folgende Herausforderungen aus Testzeitraum 1:

- Die Roboter hatten Schwierigkeiten beim Erreichen von Knoten, die aus der Leitstelle vorgegeben worden waren, und sind teilweise über das Ziel hinausgefahren.
- Die Reaktionen der Roboter auf vorbeilaufende Passant\*innen erfolgten verzögert und relativ plötzlich, wodurch es zu Irritationen kommen konnte.

Bei der Überprüfung der Schwierigkeiten beim Erreichen der Knoten ergab sich als Lösung die Erlaubnis der Rückwärtsfahrt für die Roboternavigation. Zuvor hatte sich der Roboter aufgrund der Parametrierung nicht mehr weiterbewegt, weil er sich, um vorwärts an das Ziel zu kommen, zunächst vom Ziel wieder hätte entfernen müssen. Durch die Parametrierung der langsamen Rückwärtsfahrt konnte das Ziel dann entsprechend erreicht werden. Alternativ wäre es möglich gewesen, die Distanz zu einem Ziel, ab dem der Roboter dieses als erreicht markiert, hochzusetzen, allerdings auf Kosten der Präzision der Navigation.

Für die verzögerte Reaktion auf nah vorbeilaufende Passant\*innen wurden die Parameter der lokalen *Cost Map* angepasst, sodass der Roboter Hindernisse, die nicht im direkten Weg zum Ziel stehen, nicht als Grund zum Anhalten wahrnimmt. So konnte ein flüssigeres und für Passant\*innen vorhersehbareres Verhalten der Roboter erzielt werden.

### 2.5.2 Testbetrieb 2 (23.09.24–25.09.24)

Der zweite Testbetrieb fokussierte sich auf die gleichzeitige Steuerung von zwei Robotern aus der Leitstelle sowie den Ein- und Ausstiegsprozess der Roboter. Als neuer Aspekt wurde das Verhalten der Roboter im Begegnungsverkehr untereinander untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Hindernisszenarien 2.1–2.4 aus Testzeitraum 1 durch die in Tabelle 2.8 aufgeführten Szenarien ersetzt. Der weiße Roboter legte während des zweiten Testbetriebs 3.263 Meter zurück, der schwarze 1.477 Meter. Einige Szenarien zeigten, dass das Ausweichen im Begegnungsverkehr verbessert werden kann. Die Roboter neigen durch den bisher relativ groß gewählten Sicherheitsabstand zu Hindernissen dazu, vorsichtiger auf Hindernisse zu reagieren als unbedingt notwendig wäre. Dies führt zu längeren Standzeiten der Roboter sowie zu einer Routenplanung, die Verbesserungspotenziale aufweist. Ein Schritt in diese Richtung wären Anpassungen der lokalen *Cost Maps* und die Einführung eines Rechtsfahrgebots.

Tabelle 2.8: Übersicht über die Szenarien des zweiten Testbetriebs

Szenario	Beschreibung
2.1	Dynamisches Hindernis parallel von vorne (Roboter)
2.2	Dynamisches Hindernis parallel von hinten (Roboter)
2.3	Dynamisches Hindernis Roboter parallel von vorn, Fußgänger überholt einen Roboter auf der „Spur“ des anderen Roboters
2.4	Zwei Roboter fahren kurz hintereinander los und werden dann von einem Fußgänger abgedrängt

Bei leitstellenspezifischen Szenarien, dem Importieren und Exportieren vordefinierter Aufträge, traten einige softwarebedingte Fehler auf, die in Vorbereitung auf den dritten Testzeitraum identifiziert und behoben werden konnten.

### 2.5.3 Testbetrieb 3 (14.10.24–17.10.24)

Ziel des abschließenden Testbetriebs war das Testen des erfolgreichen Zusammenspiels zwischen Roboter, Bus(-Anwendung) und Leitstelle. Der weiße Roboter legte während des dritten Testbetriebs 5.633 Meter zurück, der schwarze 3.451 Meter. Die Szenarien zur Synchronisation von Roboter und Bus sowie der Ein- und Ausstiegsprozess verliefen ordnungsgemäß und der *Proof of Concept* des Gesamtsystems konnte erfolgreich sichergestellt werden. Ein Usability-Test der Leitstellenoberfläche durch Interlink ergänzte den Testbetrieb (Ergebnisse siehe Abschnitt 2.5.2). Die ergänzenden Szenarien sind in Tabelle 2.9 dargestellt.

Tabelle 2.9: Übersicht über die Szenarien des dritten Testbetriebs

Szenario	Beschreibung
5.1	Einstieg Roboter ohne Sync-Prozess über Leitstelle
5.2	Ausstieg Roboter ohne Sync-Prozess über Leitstelle
5.3	Bus bedient leere Haltestelle
5.4	Bus bedient Haltestelle, Roboter führt synchronisierten Einstieg durch
5.5	Bus bedient Haltestelle, Roboter führt synchronisierten Ein- und Ausstieg durch
5.6	Unterschiedliche Haltestelle für Ein- und Ausstieg

Insgesamt legten die Roboter an zehn Testtagen 20.623 Meter zurück. Im gesamten Testzeitraum wurde lediglich im ersten Testbetrieb ein manuelles Eingreifen in einer kritischen Situation erforderlich. Durch die Tests gelang es dem Konsortium des Forschungsvorhabens, die in der Konzeptphase entwickelten Funktionen zu validieren und die automatisierte Fahrfunktion in Richtung SAE-Level 4 weiterzuentwickeln, wodurch die Eingriffe des Begleitpersonals signifikant reduziert wurden.

Diese Testphasen bestätigen die Leistungsfähigkeit und die Weiterentwicklungspotenziale der automatisierten Systeme und liefern wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Anwendungen und Optimierungen und werden in Kapitel 8 aufgegriffen.

#### 2.5.4 Test der Leitstellenoberfläche aus Sicht der Betreibenden

Während des dritten Testfeldbetriebs erfolgte der Test der Leitstellenoberfläche aus Sicht der Betreibenden. Die Methodik des Tests sowie eine Übersicht über die Testenden ist Kapitel 2.2.1.5 zu entnehmen. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse beschrieben.

##### **Effizienz**

Unter dem Punkt Effizienz wird beschrieben, wie schnell die Testenden die Aufgaben in der Benutzer\*innenoberfläche ausführen konnten. Dieser Punkt wurde aus der Beobachtung während der Aufgabenerfüllung abgeleitet. Insgesamt zeigen T 3 bis 5 eine gute Effizienz, da sie die Aufgaben in der erwarteten Zeit oder schneller abschlossen. Im Gegensatz dazu hatten T 1 und 2 Schwierigkeiten beim Erstellen oder Ändern von Aufträgen, konnten die Aufgaben jedoch letztlich abschließen. Die Schwierigkeiten beruhten auf Herausforderungen bei der Navigation in den Menüs und Funktionen. Testende, die auf Fehler stießen, benötigten zudem länger für eine Lösungsfindung.

Schlussfolgerungen:

- Die Testenden, die zuvor einen Einblick in die Leitstellenoberfläche hatten, konnten besser mit dieser umgehen als diejenigen ohne vorherige Berührungspunkte. Diese wünschten sich aussagekräftigere Benennungen von Funktionen sowie eine intuitivere Anordnung.
- Die beiden Testenden, denen eine Fehlermeldung angezeigt wurde, benötigten Unterstützung beim Umgang mit dieser. Insofern wären integrierte Lösungsvorschläge zu Fehlern hilfreich.

##### **Effektivität**

Die Genauigkeit sowie der Erfolg bei der Ausführung der Aufgaben werden unter der Überschrift Effektivität beschrieben. Die Effektivität wurde aus den Beobachtungen während der Aufgabenerfüllung abgeleitet. T 3 bis 5 schlossen die Aufgaben durchweg korrekt und in einer kurzen Zeit ab. Dies deutet darauf hin, dass Personen mit Vorkenntnissen das System effektiv bedienen können. T 1 zeigte ebenfalls eine hohe Effektivität und beging nur geringe Fehler, benötigte dafür jedoch mehr Zeit als T 3 bis 5. T 2 hatte am meisten Schwierigkeiten und führte eine Aufgabe nicht korrekt durch, was T 2 erst später erkannte. Alle fünf Personen mussten am Ende daran erinnert werden, die Löschung des Transportauftrags zu speichern.

Schlussfolgerungen:

- Auch bei der Effektivität sind deutliche Unterschiede zwischen Personen mit und ohne Vorkenntnisse zu erkennen. Die Testenden ohne Vorerfahrung benötigten etwa 22 Minuten zur Erfüllung der Aufgaben, während die mit Vorerfahrung diese in durchschnittlich acht Minuten abschlossen. Eine Einweisung im Vorfeld ist zu empfehlen.

- Das Stoppen des Roboters stellte für T 2 eine Herausforderung dar. Hier könnten visuelle Hinweise unterstützend eingesetzt werden.

### **Zufriedenheit**

Die Zufriedenheit der Testenden wurde durch eine Befragung nach den Tests ermittelt. Dabei wurden Fragen hinsichtlich der Nutzungsoberfläche, der Nutzungsfreundlichkeit und des Komforts gestellt. Insgesamt waren T 3 und 4 sehr zufrieden mit dem System und lobten den reibungslosen Aufgabenwechsel sowie die klaren Rückmeldungen. T 5 war größtenteils zufrieden, äußerte jedoch den Wunsch nach klareren Hinweisen bei Fehlermeldungen. T 2 äußerte eine moderate Zufriedenheit und beschrieb die Oberfläche als funktional, jedoch an manchen Stellen verwirrend. T 1 gab an, dass die Oberfläche für Erstnutzende zuerst nicht intuitiv zu bedienen, dies jedoch während des Tests schnell einfacher geworden sei.

Schlussfolgerungen:

- Die Testenden mit Vorerfahrung bewerteten die Oberfläche von Anfang an besser als die Testenden ohne Vorerfahrung. Diese gaben jedoch an, sich leicht eingefunden zu haben, sobald sie sich mit den Funktionen vertraut gemacht hatten.
- Die beiden Testenden, denen Fehlermeldungen angezeigt wurden, schätzten die Echtzeit-Rückmeldungen, wünschten sich jedoch zu dem Zeitpunkt mehr visuelle Hilfen, sodass die Fehlerbehebung einfacher vorstatten gehen kann.

### **Anpassungsvorschläge**

Die fünf Testenden äußerten Wünsche hinsichtlich der Anpassung der Software. Diese werden nachfolgend zusammengefasst:

- Die Schaltflächen „Edit changes“, „Accept changes“ und „Discard changes“ sollten näher an der Fläche für die Bestellungen angeordnet sein, da sich somit die wichtigen Funktionen an einer Stelle befinden. Die Benennung der Schaltfläche „Edit changes“ führte zu Verwirrungen, da bei der Neuanlage eines Auftrags keine Änderung vorgenommen wird. Der Einsatz von Icons statt Wörtern würde die Bedienung vereinfachen.
- Weiterführende Informationen zu einem aktiven Roboter, wie die voraussichtliche Ankunftszeit oder der nächste angefahrene Knoten, wären nützlich, wenn der Mauszeiger über das Icon des Roboters bewegt wird.
- Zur Verbesserung der Fehlerbehebung sollten Fehlermeldungen vereinfacht und den Nutzenden ausreichend Zeit zum Durchlesen gegeben werden. Integrierte Hilfestellungen bei Fehlern helfen Nutzenden bei einem schnellen Umgang mit diesen.
- Eine Legende und ein Kompass in der Karte wären für die Nutzenden zur besseren Orientierung hilfreich.

- Bei der Veränderung von Knoten sollten die unveränderlichen Knoten gesperrt werden. Der Versuch diese zu verschieben, führte bei drei von fünf Nutzenden zu Fehlermeldungen.
- Die Platzierung der Start-/Pause-Schaltfläche war für manche Testende nicht intuitiv. Sie wünschten sich diese Schaltfläche in der Kartendarstellung.
- Allen fünf Nutzenden erschloss sich nicht intuitiv, dass nach dem Löschen eines Auftrags diese Änderung durch „Accept changes“ bestätigt werden muss. Hier könnte mit einem Pop-up gearbeitet werden.

Für die drei Testenden, die eine Einweisung erhalten hatten, war die Bedienung der Oberfläche messbar einfacher als für die beiden ohne Einweisung. Im Durchschnitt würden die Testenden der prototypischen Leitstelle eine Bewertung von 3,8/5 Punkten geben (1 = schlecht, 5 = sehr gut).

Die obenstehenden Anpassungsvorschläge wurden bereits für zukünftige Entwicklungsarbeiten an der Leitstelle aufgenommen und werden entsprechend ihrer Priorität abgearbeitet und umgesetzt.

## 2.6 Simulation

Verkehrssimulationen spielen als wesentliches Bewertungsinstrument in der Verkehrsplanung eine zentrale Rolle. Sie bieten einen kosteneffizienten, sicheren und robusten Ansatz zur Analyse möglicher zukünftiger Verkehrsszenarien. Durch die Bereitstellung wertvoller Einblicke in verschiedene Planungsstrategien ermöglichen Verkehrssimulationen die Bewertung voraussichtlicher Ergebnisse und liefern so Informationen für strategische Entscheidungen, wie z. B. die Integration autonomer Lieferroboter (*Autonomous Driving Robot*, ADR) in öffentliche Verkehrssysteme. Die durch Simulationen generierten Vorhersageergebnisse können durch Vergleiche mit empirischen Experimenten oder kontrollierten Laborstudien weiter validiert werden.

Insbesondere mikroskopische Verkehrssimulationen sind ein wesentlicher Bestandteil dieser Analyse, da sie sich auf die granulare Dynamik der Verkehrsbedingungen, der Straßeninfrastruktur und des Verhaltens der einzelnen Verkehrsteilnehmer\*innen konzentrieren. Diese detaillierten Simulationen sind für eine umfassende Bewertung von Verkehrssystemen unerlässlich. In dieser Studie wird Aimsun, eine weitverbreitete mikroskopische Verkehrssimulationssoftware, aufgrund ihrer fortschrittlichen Fähigkeiten in der detaillierten Simulationsanalyse und ihrer hochentwickelten Visualisierungswerkzeuge verwendet.

Die Bewertung der simulierten Szenarien stützt sich auf verschiedene Leistungskennzahlen, darunter Verkehrsaufkommen, Fahrzeuggeschwindigkeit

ten, Häufigkeit von Stopps, Fahrdauer, kumulative Stoppzeiten, zurückgelegte Gesamtstrecke und Auftreten potenzieller Kollisionen. Diese Indikatoren geben wichtige Einblicke in die Auswirkungen der Integration von ADR in das öffentliche Verkehrsgeschehen und bieten eine Grundlage für das Verständnis zukünftiger Verkehrsbedingungen und damit verbundener Sicherheitsüberlegungen.

### 2.6.1 Methodik

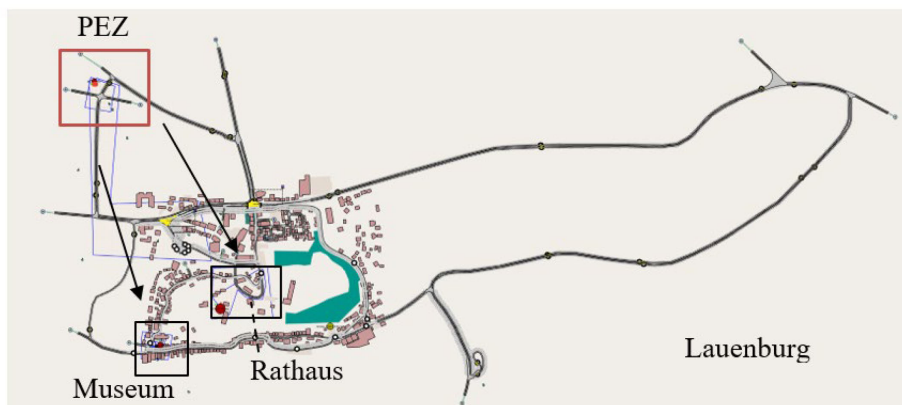
Die mikroskopische Modellierung von ADR ist noch keine weitverbreitete Bewertungsmethode. In diesem Bereich spielen mehrere Aspekte eine Rolle. Erstens erschwert es die Vielseitigkeit der ADR-Technologie, das Standardverhalten und die Auswirkungen von ADR auf das Verkehrssystem vorherzusagen. Zweitens ist ADR-basierte Logistik noch in der Entwicklung, sodass die Details der Umsetzung bislang nicht sicher abschätzbar sind (Dinar et al. 2024). Drittens ist der intermodale Verkehr des ADR im Gegensatz zum Buspendelverkehr nicht Teil der Standardfunktionen von Verkehrssimulations-Software (Dinar et al. 2024). Schließlich gibt es keine standardisierte *Operational Design Domain* (ODD) für das ADR, um das Modell zu universalisieren. ODD ist der Begriff der Simulations- und Bewertungsstudie, die den Simulationsinput standardisiert und die Untersuchungen vor der Umsetzung vergleichbar macht. Die Entwicklung eines Standard-ODD für ADR ist Gegenstand der Forschung, um Ergebnisse realer Experimente mit Simulationsergebnissen vergleichbar zu machen.

#### 2.6.1.1 Einführung in das Basismodell, Übersicht der verwendeten Daten

Das Modell besteht aus einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets in Lauenburg/Elbe, der das Bediengebiet der Buslinie 338 des Hamburger Verkehrsverbunds und die in den früheren TaBuLa-Projekten betriebene Pendelbuslinie umfasst. So kann die Anschlussfähigkeit an die beiden Vorgängerprojekte und deren Erkenntnisse sichergestellt werden. Im Vorgängerprojekt war ein *Use Case* ermittelt worden, der praktikabel und unter Einbezug aller Parameter einen vorteilhaften Anwendungsfall für ADR und Busse als Reichweitenverlängerung darstellte. Entsprechend wurden Postlieferungen zwischen den einzelnen Verwaltungsstandorten in Lauenburg durch ADR ersetzt. Es ist in diesem Projekt geplant, dass der ADR seine Lieferungen vom Posteinlagerungszentrum (PEZ) aus beginnt und anschließend einen von mehreren zuvor definierten Lieferorten zur Abgabe der Pakete erreicht (Dinar et al. 2024). Die Lieferorte sind das Elbschiffahrtsmuseum und das Rathaus. Abbildung 2.41 gewährt einen Überblick über das Untersuchungsgebiet. Um diese Strecke zurückzulegen, nutzt der ADR insgesamt drei Bustypen und ist auf zwei Arten von Routen unterwegs. Konventionelle, von Menschen gesteuerte Busse (mit konventionellem oder elektrischem Antrieb) sowie ein automatisierter NAVYA-Shuttle-Bus aus den beiden Vorgängerprojekten sind die in dieser Studie verwendeten ÖPNV-

Fahrzeuge. Die Daten der NAVYA-Busse stammen aus den vorherigen Projekten, die Daten der konventionellen Busse wurden z. T. in diesem Projekt neu erhoben. Die zurückgelegte Strecke wird von weiteren Buslinien des ÖPNV (238 und 438) genutzt, sie weist größere Kreuzungen und unterschiedliche Straßenbreiten mit variablen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf.

Abbildung 2.41: Untersuchungsgebiet: Lauenburg/Elbe, Deutschland, erstellt in Aimsun



Die Eingangsdaten der Studie haben verschiedenen Primär- und Sekundärquellen. Verkehrs- und Infrastrukturdaten wurden mithilfe von Straßenkameras, der BAST, der Stadtverwaltung Lauenburg und einem GPS-Datenerfassungsgerät gewonnen. Die Verkehrsdaten umfassen das Verkehrsaufkommen, Busfahrpläne, Belegungszahlen und Sicherheitsmessungen, während die Infrastrukturdaten die Straßengeometrie, Lichtsignalanlagen und mehr umfassen. Die GPS-Datenerfassung wurde mit einem Datenlogger vom Typ Columbus V 990 durchgeführt. Zusätzlich wurde im Oktober 2023 eine Felduntersuchung durchgeführt, um die Mobilitäts- und Erreichbarkeitsmuster des ADR zu analysieren. Tabelle 2.10 listet die mithilfe eines GPS-Geräts gesammelten Daten und veranschaulicht die im Oktober 2023 beobachteten Mobilitätsmuster. Nähere Informationen zur Datenerhebung können im Kapitel 6 eingesehen werden.

Tabelle 2.10: Mobilitätsmuster auf der Busroute 338 aus der Feldstudie mit dem GPS-Datenlogger

Route 338	Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h)	Reisezeit (min)	Standzeit (s)	Anzahl der Stopps
Busfahrt 1	12	7	129	7
Busfahrt 2	13	9	72	12

Mit der Untersuchung sollte auch festgestellt werden, ob eine LSA-Bevorrechtigung der Busse im Sinne einer grünen Welle vorliegt. Es wurde festgestellt, dass diese in Lauenburg nicht besteht. Die technischen Daten

des Busses, des Shuttles und des ADR wurden über einen Datenlogger von der Hamburger Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) erhoben. Die Straßenkamera wurde genutzt, um Daten über den Spitzenstundenverkehr zu sammeln, der für die statische Eingangsanalyse unerlässlich ist. Tabelle 2.11 zeigt die für die ADR-Modellierung verwendeten Eingangsdaten. Die folgenden Werte stammen aus den vom ITL entworfenen Spezifikationen des ADR.

Tabelle 2.11: Annahmen für den autonomen Lieferroboter und Setup der Simulation

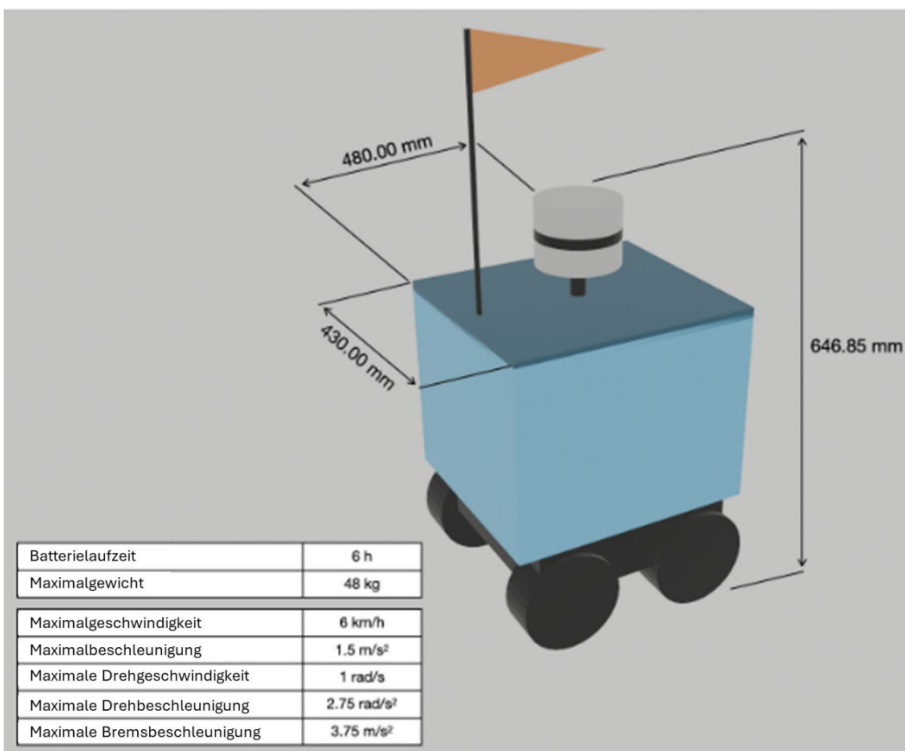
Parameter	Wert	Einheit
Länge	480	mm
Breite	430	mm
Höhe	646,85	mm
Maximale Masse (einschließlich Waren)	48	kg
Maximale lineare Geschwindigkeit	6	km/h
Maximale lineare Beschleunigung	1,5	m/s <sup>2</sup>
Maximale seitliche Geschwindigkeit	3	km/h
Maximale Winkelgeschwindigkeit	1	rad/s
Maximale Winkelbeschleunigung	2,75	rad/s <sup>2</sup>
Maximale Notbremsbeschleunigung	3,75	m/s <sup>2</sup>
Maximale Verzögerung	1	m/s <sup>2</sup>
Ladeleistung	variabel	mA
Energieverbrauch (im Stehen)	variabel	mA
Energieverbrauch (während der Fahrt)	variabel	mA
Dauer der Laufzeit	6	h
Spielraum (vorne)	500	mm
Freiraum (seitlich)	500	mm
Maximale Abgabezeit	30	s
Akzeptanz von Geschwindigkeitsbegrenzungen	1	
Reaktionszeit	10	s
Sicherheitsmarge Faktor	1	
Aggressivität der Vorwärtsbewegung	1	
PCU	0,5	
Akzeptanz der Lücke	1	
Sicherheitsabstand (Stand/Dynamik)	400	mm
Abholung der Lieferung	60	s
Lieferung absetzen	60	s

Parameter	Wert	Einheit
Bus in der Zeit (leerer/voller Bus)	30	s
Busausgangszeit (leerer/voller Bus)	30	s
Zeit vom Warten bis zum Einsteigen	10	s
Parkzeit	10	s
Pannenzzeit	30	s

### 2.6.1.2 Modellierungsansatz – autonomer Lieferroboter

Für die Modellierung wurden Kennwerte eines autonomen Systems der SAE-Stufe 4 (SAE Levels, 2024) auf der Grundlage des vom ITL entwickelten ADR-Prototyps Laura angenommen. Abbildung 2.42 illustriert die für diese Studie verwendeten Kennwerte des ADR. Für die weitere Analyse wurden einige Verhaltensweisen angenommen: kein Umkippen am Fahrbahnrand, konstanter Zeitbedarf für den Buseinstieg sowie das Verlassen des Busses. Das Verhalten des ADR wurde mithilfe eines Social-Force-Modells modelliert nach Helbing und Molnár (1995), ähnlich wie bei Fußgänger\*innen.

Abbildung 2.42: Laura, autonomer Lieferroboter



### 2.6.1.3 Intermodaler Transport – autonomer Lieferroboter zum Bus

Die Aimsun-Software bietet, wie jeder andere aktuelle Simulator, kein fertiges Modell zur Simulation von ADRs und deren intermodalen Transport in der Kombination mit öffentlichen Verkehrsmitteln als ADR-„Träger“. Aimsun bietet gleichwohl einige Methoden für den intermodalen Transport: *External Agent Interface (EAI)*, *On-demand call by Aimsun Ride* und *Dynamic Transport-Assignment-Methode*. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die verschiedenen Methoden und ihre Anforderungen.

1. Externe Agentenschnittstelle (EAI) (Aimsun 2024)
  1. Fehlender Fahrzeugsimulator
  2. Keine eingehende Fahrzeugtrajektorie
2. On demand mit Aimsun Ride (Aimsun 2024)
  1. Kein Simulator erforderlich
  2. Kein fester Fahrplan
  3. Travel-activity-basierte Bewertung
3. Dynamic Transport Assignment (Aimsun 2024)
  1. Abruf nicht erforderlich
  2. Für den Anwendungsbereich am wichtigsten
  3. Bedarfs- und wirkungsorientierte Bewertung
  4. Annahme: Social-Force-Modell. Die dynamische Transportzuweisung deckte den intermodalen Transport für die verfügbaren Eingabedaten richtig ab. Wenn das ADR aus verschiedenen Gründen nicht direkt von einem Ort zu einem anderen Ort gelangen kann, wird bei dieser Methode der öffentliche Verkehr genutzt, um diese unzugängliche Strecke zurückzulegen. Tabelle 2.12 zeigt die wichtigsten Merkmale des Social-Force-Modells nach Helbing und Molnár. Das konzeptionelle Modell wurde in den mikroskopischen Simulatoren Aimsun Next und Aimsun Ride implementiert. Nach der Umsetzung wurde das ADR-Verhalten interpretiert.

Tabelle 2.12: Komponenten des Social-Force-Modells

Verhalten	Beschreibung	Aimsun-Schnittstelle
Agenten wollen ihr Ziel bequem erreichen.	Agenten nehmen keine Umwege, wählen den kürzesten Weg und unternehmen keine absichtliche Verzögerung.	Driving Force Relaxation: Modelliert die Beschleunigung und Aggressivität. Je kürzer die Entspannungszeit ist, desto aufdringlicher verhalten sich die Fußgänger*innen. Aufdringlich bedeutet ein aggressiveres Manöver des*der Verkehrsteilnehmer*in.  Wechselwirkungsstärke: Modelliert, wie schnell die ausgeübte Kraft mit dem Abstand abnimmt.  Interaktionsbereich: Modelliert den Einfluss der Entfernung auf die Abstoßungskraft.
Die Bewegung eines Agenten wird von anderen Agenten beeinflusst.	Agent wird je nach Geschwindigkeit und Dichte von anderen Agenten beeinflusst.	Anisotropie der Interaktion: Stellt das effektive Sichtfeld dar, das die Form einer gewölbten Pascalschen Schnecke hat.
Agenten werden manchmal von anderen Agenten abgelenkt.	Die Agenten verringern den Abstand zu anderen Agenten.	Implementiert in Form von bestehendem Verhalten
Agenten werden manchmal durch andere Agenten oder Objekte abgelenkt.	Agenten vermeiden die Nähe zu anderen Agenten.	Implementiert in Form von bestehendem Verhalten

Quelle: Helbing &amp; Molnár (1995)

### 2.6.2 Aufbau der Simulation

Die *Operational Design Domain* (ODD) legt die Simulationsszenarien fest und bietet einen standardisierten Rahmen für die Auswertung der Simulationsergebnisse. Außerdem definiert sie die erforschbare Umgebung innerhalb der Simulationsschnittstelle. Tabelle 2.13 zeigt den in dieser Studie verwendeten ODD-Rahmen.

Tabelle 2.13: Aimsun-Eingaben, die in der ODD-Framework-Checkliste verwendet werden

Variable	Parameter
Baulich getrennte Fahrbahn	Nein
Städtisch	Ja
Parken	Nein
Auf- und Abfahrtsrampe	Nein
Notfall-Evakuierungsrouten	Nein
Kreuzung	Ja
Asphalt	Ja
Beton	Nein
<b>Fahrbahnränder und Markierungen</b>	
Fahrbahnmarkierungen	Nein
Temporäre Fahrbahnmarkierungen	Nein
Schulter	Nein
Fahrspur-Barrieren	Nein
Schiene	Nein
Mindestgeschwindigkeit	0 km/h
Höchstgeschwindigkeit	≤ 6 km/h
<b>Verkehrsbedingungen</b>	
Verkehrsdichte	Normales Verkehrsaufkommen

### 2.6.3 Szenarien

Um die Auswirkungen der Integration autonomer Lieferroboter (ADR) in das bestehende Verkehrssystem zu bewerten, wurden fünf Szenarien eingehend analysiert. Sie decken ab, dass Lieferungen ausschließlich von ADR auf sich allein gestellt oder von intermodalen Lieferrobotern durchgeführt werden. Im letzteren Fall nutzt der ADR zum Überwinden längerer Strecken andere Fahrzeuge, hier: die ohnehin verkehrenden ÖPNV-Linienbusse. Tabelle 2.14 zeigt alle für die Studie verwendeten Szenarien. Die Shuttle-Buslinie und die Buslinie 338 dienten in dieser Studie als öffentliche Verkehrsmittel. Für die intermodale Zustellung wurden die Fahrtabläufe in vier Segmente aufgeteilt. Im monomodalen ADR-Szenario (ohne Busnutzung) wurden diese vier Segmente zu einer einzigen Fahrt zusammengefasst. Das in dieser Studie verwendete ADR-Modell arbeitet auf der Autonomiestufe 5, sodass es mit Hindernissen wie der Routenwahl und unerwarteten Pannen umgehen kann. Für diese Analyse wurden Ausfälle oder Ausweichsituationen nicht berücksichtigt. Für eine angemessene Bewertung wurde die gesamte Fahrt des ADR in einige Teilstrecken unterteilt. Abbildung 2.43 bis Abbildung 2.45 zeigen die Details der Fahrten in Szenarien. Einige Werte wurden als konstant angenommen: Anzahl der ADRs, Simulationszeit: 07:00–10:00 Uhr, maximale Nutzlast der ADRs: 2 kg. In dieser Studie werden die Szenarien 1a, 1b und 2 als Basisszenario behandelt. Szenario 0 hingegen dient als Benchmark, um die Auswirkungen der Möglichkeit der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel zu bewerten und die daraus resultierende Veränderung der Kennwerte des Systems zu bestimmen. Szenario 3 schließlich stellt ein optimistisches Szenario für die Skalierung der Flotte dar, das für eine zukünftige kommerzielle Anwendung konzipiert wurde. Es umfasst insgesamt neun Fahrtabschnitte, sodass die Bewertung des Szenarios in kleinere Segmente unterteilt werden kann. Dieser Ansatz erleichtert ein besseres Verständnis der Ergebnisse des Szenarios.

Tabelle 2.14: Liste der für diese Studie verwendeten Szenarien

Szenario	ADR-Strecken	Berücksichtigte ÖPNV-Angebote	Trägertyp	Antriebsart des Busses
0	PEZ zum Rathaus, PEZ zum Museum	–	–	–
1a	PEZ zum ZOB, Rathaus eigenständig erreichbar	Shuttle-Bus	MAN Lion's City M	Verbrenner
1b	PEZ zum ZOB, Rathaus eigenständig erreichbar	Shuttle-Bus	Tremonia-City	Elektrisch
2	PEZ zum ZOB, Rathaus eigenständig erreichbar	Shuttle-Bus	NAVYA-Zubringer	Elektrisch
3	PEZ zum ZOB, Rathaus eigenständig erreichbar, einige andere kurze Wege	338	Tremonia-City	Elektrisch

Abbildung 2.43: Szenario 0, Lieferung ausschließlich mit ADR

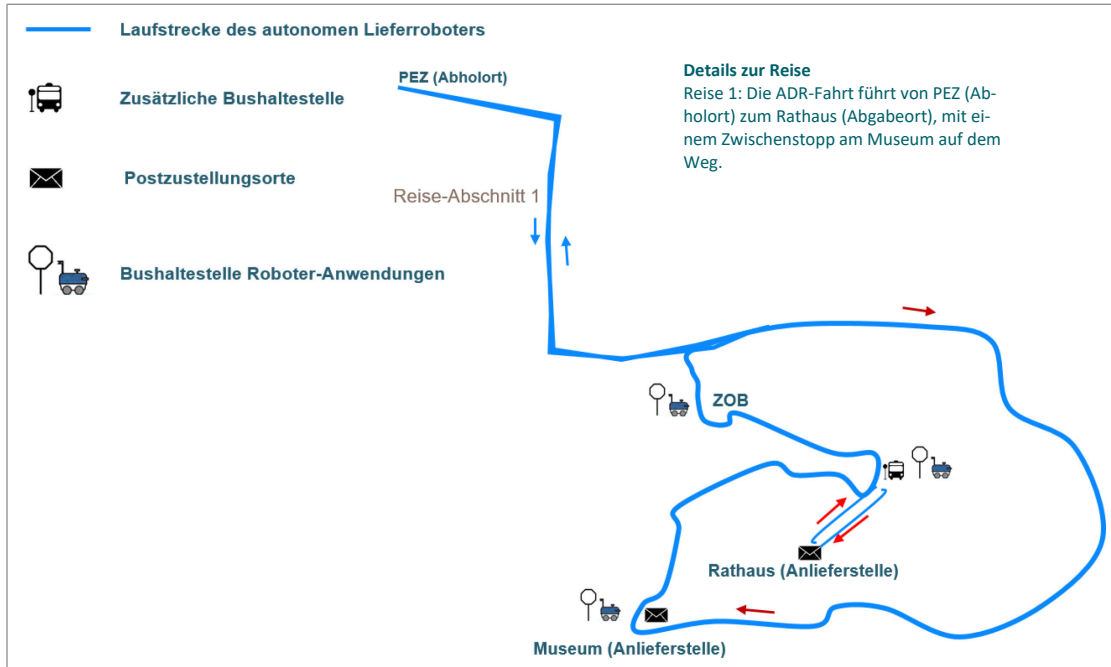
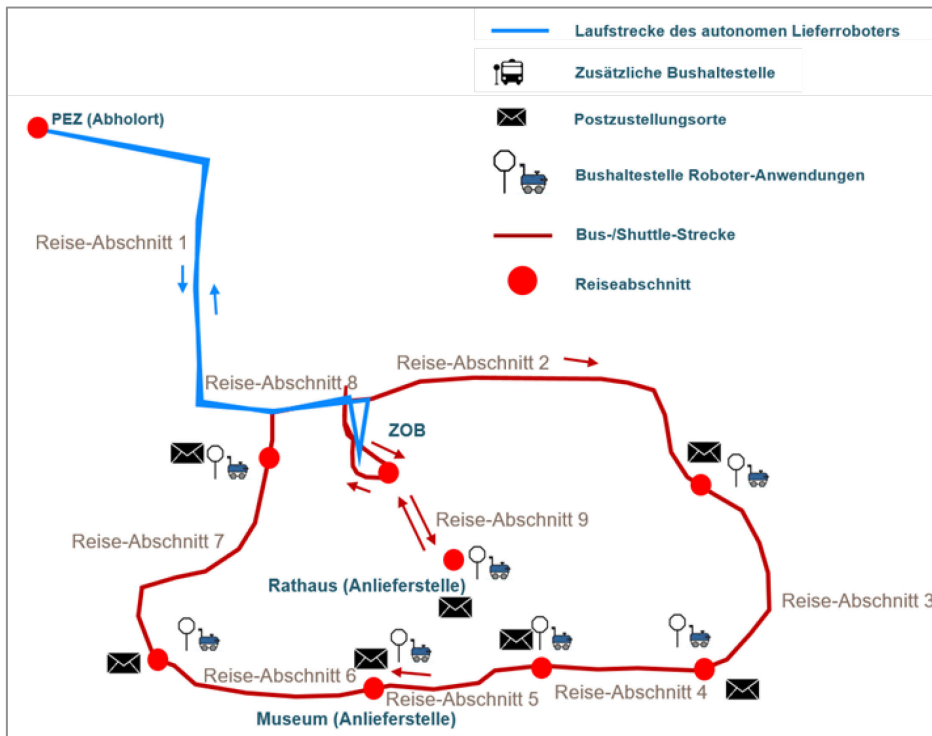


Abbildung 2.44: Szenarien 1a, 1b und 2, Zustellung durch intermodale verbesserte Zustellroboter unter Zuhilfenahme des ÖPNV



Abbildung 2.45: Szenario 3, Zustellung durch intermodale, verbesserte Zustellroboter; mehr Zustellorte mit mehr Fahrtabschnitten



### Szenario für Verspätung bei Abfahrt

Es wurde angenommen, dass öffentliche Verkehrsbetriebe wie die vhh.mobility eine um bis zu eine Minute frühere Abfahrt oder eine Verspätung von bis zu zwei Minuten gegenüber der planmäßigen Zeit als pünktliche Abfahrt betrachten. Jede Verspätung von mehr als zwei Minuten an der Bushaltestelle gilt als verspätete Fahrt. Wenn ADRs an mehreren Stellen ein- und aussteigen dürfen, können die kumulierten Verspätungen im Busverkehr zu Verspätungen beim Umlauf führen. Die Verspätungen, die sich aus verzögerten Abfahrten ergeben, wurden in Szenario 1a in zwei verschiedenen Situationen analysiert, die ähnliche Ergebnisse wie in den Szenarien 1b und 2 zeigen. Beide Situationen sind in Tabelle 2.15 dargestellt.

Tabelle 2.15: Komponenten der Einsteigezeit für die beiden unterschiedlichen Situationen in den Szenarien 1a, 1b und 2

Bestandteil der Boardingzeit	Situation I (in Sek.)	Situation II (in Sek.)
Beschleunigung aus dem Stillstand auf eine Höchstgeschwindigkeit von 6 km/h	1,11	1,11
Beschleunigung aus dem Stillstand auf eine Geschwindigkeit von 4 km/h	0,74	0,74
Erfassungsbereich des ersten Meters bei einer Geschwindigkeit von 4 km/h	1,9	1,9
Abdeckung der verbleibenden 14 Meter bei einer Geschwindigkeit von 4 km/h	12,6	15,3
Abdeckung einer Gesamtstrecke von 18 Metern bei einer Geschwindigkeit von 4 km/h	15	17
Warten auf aussteigende*n Passagier*in und zwei ADRs	15	20
Warten auf einsteigende Fahrgäst*innen und Positionierung von ADR	15	25
Kumulative Betriebszeit für den Einsteigeprozess	45	62

#### 2.6.4 Ergebnisse

Um reale Bedingungen zu simulieren, wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit des ADR und des Shuttle-Busses auf 5 km/h bzw. 18 km/h festgelegt, wobei die tatsächlichen Geschwindigkeiten aufgrund von Faktoren wie engen Straßen, unebenen Oberflächen und Fußgänger\*innenverkehr variierten. Die Geschwindigkeitswerte entsprechen eigenen Messungen des Roboters bzw. des Shuttles aus den Vorgängerprojekten. Die Auswirkungen der Integration von ADRs in das Transportsystem wurden in zwei Kategorien analysiert. In der ersten Kategorie erfolgt die Auslieferung ausschließlich durch den Transportroboter, in der zweiten mit intermodalen Robotern, die Fahrwege mit Bus oder Shuttle zurücklegen. Um dies zu analysieren, wurden fünf Szenarien mit und ohne öffentliche Verkehrsmittel untersucht. Die Integration von öffentlichem Verkehr und ADR in jedem Streckenabschnitt liefert einen Gesamteindruck der Reisezeit für jedes Szenario. Die Reisezeiten wurden für jede Reise über alle Szenarien hinweg berechnet, wie in Tabelle 2.16 dargestellt. Verlängert sich die Strecke für das ADR, nimmt die Reisezeit zu. Bleibt die Route des öffentlichen Verkehrs unverändert (Bus und Shuttle-Bus benutzen die gleiche Strecke), so bleibt die Reisezeit unverändert. Die Reisezeit wurde dadurch nicht beeinflusst, da die Zeit, die das ADR im Bus verbringt, die Auswirkungen der Interaktion mit den Verkehrsteilnehmer\*innen effektiv eliminiert. Der ADR-Betrieb nutzt den Vorteil der schnelleren Fortbewegung, den der öffentliche Verkehr bietet. Szenarien mit einer längeren Verweildauer des ADR im Bus zeigen deutlich

positive Ergebnisse. Die Einbeziehung zusätzlicher Abgabestellen in Szenario 3 in Verbindung mit Änderungen der Route führt hingegen zu einer Verlängerung der Fahrzeit. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der errechneten Reisezeiten je Szenario und Reiseabschnitt (RA). Alle Berechnungen wurden mittels Randomisierungstests durchgeführt, um auf statistische Mittelwerte und Abweichungen zu schließen.

Tabelle 2.16: Reisezeit für die in den Szenarien kategorisierten Reiseabschnitte (in Sekunden)

Szenario	RA 1	RA 2	RA 3	RA 4	RA 5	RA 6	RA 7	RA 8	RA 9	Gesamt-reisezeit (Sek.)	Gesamt-reisezeit (Min.)
0	3.350									3.350	55,83
1a	562	432	132	180						1.306	21,77
1b	562	432	132	180						1.306	21,77
2	562	398	100	180						1.240	20,67
3	562	120	50	48	37	41	110	85	328	1.381	23,02

Die Anzahl der Stopps ist ein wichtiger Indikator für die Analyse der Interaktion zwischen ADRs und Fußgänger\*innen. Ein Stopp wird aufgezeichnet, wenn ein ADR für mindestens fünf Sekunden anhält, was typischerweise ausgelöst wird, wenn sich ein\*e Fußgänger\*in, Radfahrer\*in oder ein anderer ADR nähert. Tabelle 2.17 gibt einen Überblick über die Anzahl der in jedem Szenario beobachteten Stopps nach Fahrten geordnet. Diese Ergebnisse lassen auf ein Muster schließen. Die höchste Anzahl von Stopps wird beobachtet, wenn das ADR ohne Mitfahrt im ÖPNV agiert, wie in Szenario 0. In Szenarien, die öffentliche Verkehrsmittel einbeziehen, sinkt die Anzahl der Stopps, was die geringeren Interaktionen mit Fußgänger\*innen widerspiegelt. In Szenario 3, in dem die Flotte skaliert wird und zusätzliche Abgabestellen eingeführt werden, steigt die Zahl der Stopps hingegen an. Dieser Anstieg ist auf die erhöhte Nutzung von Bushaltestellen und Wegen zurückzuführen, die die Wahrscheinlichkeit von Begegnungen mit Fußgänger\*innen erhöht. Wenn sich das ADR an Bord eines öffentlichen Verkehrsmittels befindet, wird es effektiv aus dem aktiven Netz entfernt und hat somit keinen Einfluss auf die Simulation während der Fahrt. Die Wiederaufnahme des ADR in das Netz an den Zustellungspunkten erhöht jedoch das Potenzial für Fußgänger\*innenkonflikte, was zu einem weiteren Anstieg der Anzahl der Stopps führt.

Tabelle 2.17: Anzahl der Stopps für ADR, kategorisiert in Szenarien

Szenario	RA 1	RA 2	RA 3	RA 4	RA 5	RA 6	RA 7	RA 8	RA 9	Gesamtzahl der Stopps
0	12									12
1a	3	1	0	2						6
1b	3	1	0	2						6
2	3	1	0	2						6
3	3	0	1	2	0	1	1	0	5	13

Darüber hinaus sind potenzielle Konflikte ein weiterer wichtiger Maßstab für die Bewertung der Interaktionen zwischen ADRs und Fußgänger\*innen. Ein Konflikt tritt auf, wenn das ADR auf ein stationäres oder bewegliches Hindernis innerhalb eines Radius von 400 mm trifft, das ein Kollisionsrisiko darstellt, wenn das ADR nicht anhält. Diese Kennzahl zeigt vergleichbare Trends wie die Anzahl der Stopps. Mögliche Konflikte werden mit der Methode des *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM) berechnet. SSAM verwendet die Trajektorie des Agenten, in diesem Fall des ADR, zur Berechnung des Konflikts (Souleyrette & Hochstein 2012). Das Konfliktpotenzial ist größer, wenn sich der ADR unabhängig bewegt. Die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel verringert diese Wahrscheinlichkeit. In Szenario 3, mit einem erweiterten Fußgänger\*innenbereich und zusätzlichen Abfahrtspunkten, steigt jedoch die Konfliktwahrscheinlichkeit. Die vom ADR und den Bussen zurückgelegte Gesamtstrecke ist in Tabelle 2.18 und Tabelle 2.19 dargestellt. Nach der Integration des öffentlichen Verkehrs in das ADR-Angebot und den Betrieb des ADR verringert sich die zurückzulegende Fahrstrecke für das ADR.

Tabelle 2.18: Vom ADR zurückgelegte Strecken nach Szenarien

Szenario	RA 1	RA 2	RA 3	RA 4	RA 5	RA 6	RA 7	RA 8	RA 9	Gesamte zurückgelegte Meter	Gesamte zurückgelegte Kilometer
0	3.143									3.143	3,14
1a	758,5	1	0	203						962,5	0,96
1b	758,5	1	0	203						962,5	0,96
2	758,5	1	0	203						962,5	0,96
3	758,5	1	3	10	2	1	6	0	285,8	1.067,3	1,07

Tabelle 2.19: Mittels ÖPNV zurückgelegte Strecken nach Szenarien

Szenario	RA 1	RA 2	RA 3	RA 4	RA 5	RA 6	RA 7	RA 8	RA 9	Gesamtstrecke (Meter)	Gesamtstrecke (Kilometer)
0	0									0	0
1a	0	1.582	486	0						2.068	2,07
1b	0	1.582	486	0						2.068	2,07
2	0	1.582	486	0						2.068	2,07
3	0	732	289	279	241	316	319	551	0	2.727	2,73

Die Verzögerung der Abfahrt wurde in zwei Situationen untersucht. In jeder Situation wurden Einsteigekomponenten verwendet, um einzelne Fälle zu analysieren, wie in Tabelle 2.20 dargestellt ist. Fahrten, die in grüner Schrift dargestellt werden, liegen innerhalb des zulässigen Zeitbereichs des Fahrplans, während Fahrten in roter Schrift die zulässige Grenze überschreiten.

Die Szenarien 1a und 1b zeigen eine Zunahme der Wartezeiten an den Bushaltestellen, die auf die Prozesse des Aussteigens, der Bewegung und der Positionierung von Fahrgäst\*innen und Robotern zurückzuführen sind. Innerhalb der von der vhh.mobility festgelegten Pünktlichkeitsschwelle blieb der Busbetrieb jedoch in den meisten Fällen „pünktlich“. Dies deutet darauf hin, dass, wenn der Pünktlichkeitsschwellenwert unverändert blieb, eine Änderung dieses Schwellenwerts jedoch die wahrgenommene Pünktlichkeit sowohl für die Betreibenden als auch für die Fahrgäst\*innen erheblich beeinflussen könnte. Andererseits wurde in Szenario 3 die Einführung eines zweiten ADR untersucht. Eine Fallstudie zeigte die Anfälligkeit der bestehenden Pünktlichkeitsschwelle, da die Hinzunahme von mehr Robotern in drei von vier Fällen zu Verspätungen führte. Darüber hinaus wurde eine deutliche Abhängigkeit zwischen den Ausgangsbedingungen des Busbetriebs und der Zuverlässigkeit der Pünktlichkeit festgestellt, was das Fehlen einer definierten Methode zur Verringerung der Gesamtverspätungen deutlich macht. Daher wird ein dynamischerer und flexiblerer Planungsansatz empfohlen, der unterschiedliche Verkehrsbedingungen, wie etwa Staus auf Hauptverkehrsstraßen, berücksichtigen könnte. Tabelle 2.20 und Tabelle 2.21 geben eine Übersicht zu den analysierten Situationen und den Auswirkungen auf den Fahrplan.

Tabelle 2.20: Analyse der Verspätungsabweichung für Situation I

Busbahnhof	Fahrplan	Fall 1 Abfahrt wie geplant	Fall 2 Abfahrt mit einer Minute Verspätung	Fall 3 Abfahrt mit 2:59 Minuten Verspätung	Fall 4 Vorzeitige Abfahrt, -59 Sekunden
<b>ZOB</b>	<b>10:35:00</b>	<b>10:35:00</b>	<b>10:36:00</b>	<b>10:37:59</b>	<b>10:34:01</b>
Kleiner Sandberg	10:37:00	10:37:00	10:38:00	10:39:59	10:36:01
Großer Sandberg	10:40:00	10:38:45	10:39:45	10:41:44	10:37:46
<b>Bahnhof Lauenburg</b>	<b>10:40:00</b>	<b>10:40:45</b>	<b>10:41:45</b>	<b>10:43:44</b>	<b>10:39:46</b>
<b>Bahnhof Lauenburg</b>	<b>10:47:00</b>	<b>10:47:00</b>	<b>10:48:00</b>	<b>10:49:59</b>	<b>10:46:01</b>
Großer Sandberg	10:49:00	10:49:45	10:50:45	10:52:44	10:48:46
Lösch- und Ladeplatz	10:50:00	10:50:45	10:51:45	10:53:44	10:49:46
Fährtreppe	10:51:00	10:51:45	10:52:45	10:54:44	10:50:46
Elbschiffahrtsmuseum	10:53:00	10:54:30	10:55:30	10:57:29	10:53:31
Neustadt	10:55:00	10:56:30	10:57:30	10:59:29	10:55:31
Grünstraße	10:57:00	10:59:15	11:00:15	11:02:14	10:58:16
<b>ZOB</b>	<b>11:01:00</b>	<b>11:03:15</b>	<b>11:04:15</b>	<b>11:06:14</b>	<b>11:02:16</b>

Tabelle 2.21: Analyse der Verspätungsabweichung für Situation II

Busbahnhof	Fahrplan	Fall 1 Abfahrt wie geplant	Fall 2 Abfahrt mit einer Minute Verspätung	Fall 3 Abfahrt mit 2:59 Minuten Verspätung	Fall 4 Vorzeitige Abfahrt, -59 Sekunden
<b>ZOB</b>	<b>10:35:00</b>	<b>10:35:00</b>	<b>10:36:00</b>	<b>10:37:59</b>	<b>10:34:01</b>
Kleiner Sandberg	10:37:00	10:37:00	10:38:00	10:39:59	10:36:01
Großer Sandberg	10:40:00	10:39:02	10:40:02	10:42:01	10:38:03
<b>Bahnhof Lauenburg</b>	<b>10:40:00</b>	<b>10:41:02</b>	<b>10:42:02</b>	<b>10:44:01</b>	<b>10:40:03</b>
<b>Bahnhof Lauenburg</b>	<b>10:47:00</b>	<b>10:47:00</b>	<b>10:48:00</b>	<b>10:49:59</b>	<b>10:46:01</b>
Großer Sandberg	10:49:00	10:50:02	10:51:02	10:53:01	10:49:03
Lösch- und Ladeplatz	10:50:00	10:51:02	10:52:02	10:54:01	10:50:03
Fährtreppe	10:51:00	10:52:02	10:53:02	10:55:01	10:51:03
Elbschiffahrtsmuseum	10:53:00	10:55:04	10:56:04	10:58:03	10:54:05
Neustadt	10:55:00	10:57:04	10:58:04	11:00:03	10:56:05
Grünstraße	10:57:00	11:00:06	11:01:06	11:03:05	10:59:07
<b>ZOB</b>	<b>11:01:00</b>	<b>11:04:06</b>	<b>11:05:06</b>	<b>11:07:05</b>	<b>11:03:07</b>

Ursprünglich waren die Auswirkungen der grünen Welle für diesen Ort nicht verfügbar, sodass die Koordinierung der grünen Welle nicht zu bewerten war. Die Schaltung der Lichtsignalanlagen ist nicht mit dem Fahrplan der im ÖPNV betriebenen Busse verknüpft. Gegenwärtig erhält der Hauptverkehrsstrom eine längere Grünlichtdauer, die für die Bewältigung des hohen Verkehrsaufkommens ausreichend ist.

### 2.6.5 Schlussfolgerung

Schlussendlich lässt sich sagen, dass es logistische Vorteile bietet, den ADR innerhalb des öffentlichen Verkehrssystems einzusetzen. Wichtige Kennzahlen wie Fahrzeit, Anzahl der Stopps, zurückgelegte Gesamtstrecke und Anzahl der Konflikte liefern den Entscheidungsträger\*innen Erkenntnisse, die den Einsatz von ADRs mittels Bussen unterstützen. Bei der Umsetzung müssen jedoch mehrere Faktoren berücksichtigt werden, z. B. sichergestellt werden, dass die eigenständig zurückgelegte Fahrstrecke für den ADR minimal bleibt, und berücksichtigt werden, dass aufeinanderfolgende ADR-Zustellpunkte zu Verspätungen bei Busfahrten führen können.

## 2.7 Wirkungsabschätzungen

Im Rahmen von TaBuLa-LOGplus wurden die verkehrlichen, ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Wirkungen einer smarten Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Personenshuttles bzw. Busse abgeschätzt. Kapitel 2.7.1 stellt das Konzept zur Wirkungsabschätzung vor, während sich die nachfolgenden Kapitel mit den Abschätzungen der verkehrlichen, ökologischen und gesellschaftlichen sowie der ökonomischen Wirkung befassen.

### 2.7.1 Konzept zur Wirkungsabschätzung

Zur Erstellung eines Gesamtkonzepts zur Wirkungsabschätzung (AP 1.2) wurde ein Mixed-Methods-Ansatz genutzt, um die unterschiedlichen Perspektiven der Wirkungen zu vereinen und ein möglichst ganzheitliches Bild abzuleiten. Mithilfe eines Ideenfindungsprozesses des internen Teams aus Wirtschaft und Wissenschaft mit den Schwerpunkten Logistik, Verkehrsplanung und Ingenieurwissenschaften konnte ein Konzept erstellt werden, das die Methoden der Wirkungsabschätzung umfasst.

Den methodischen Überbau lieferte das Instrumentarium der Planungsanalyse (Flämig 2004), die den originären Teil der Politikanalyse nach von Prittwitz (1994) mit Methoden der Arbeitsorganisation, der empirischen Sozialforschung sowie mit politikanalytischen Verfahren verknüpft. Mithilfe der Planungsanalyse ist es möglich, ein Projekt von der Ideenfindung über

die Planung bis zur Durchführung zu evaluieren, um den Implementationsprozess zu optimieren.

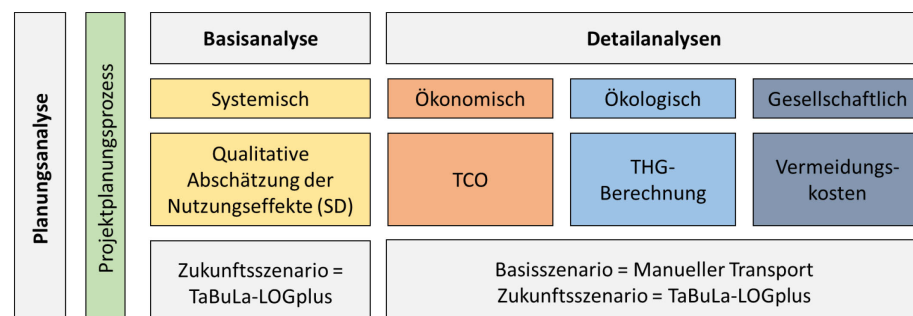
Zur Abschätzung der substanziellen Wirkungen einer smarten Leitstelle auf Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft wurde zunächst eine auf Vester (1990) beruhende systemische Analyse des Verkehrssystems durchgeführt, um die direkten und indirekten Wirkungszusammenhänge zu erfassen. Darauf aufbauend konnte mithilfe eines System-Dynamics-Modells (SD-Modells) eine qualitative Abschätzung der Nutzungseffekte einer smarten Leitstelle mit automatisierten Transportmitteln ermittelt werden sowie deren Interdependenzen, um mögliche Reboundeffekte zu identifizieren.

Die qualitative Basisanalyse wurde begleitet von drei Detailanalysen zur Abschätzung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Wirkungen (siehe auch Abbildung 2.46):

- Aus ökologischer Perspektive wurden die Treibhausgasemissionen (THG) der Fahrzeuge, der Leitstelle und der Roboter im Betrieb ermittelt. Klassischerweise basiert diese Berechnung auf der THG-Bilanzierung nach DIN EN ISO 14083.
- Zur Ermittlung der ökonomischen Wirkungen wurde die Berechnung der *Total Cost of Ownership* (TCO), der Lebenszykluskosten, durchgeführt. Neben den Anschaffungskosten fließen auch die Betriebs- und Entsorgungskosten in diese Analyse ein. Dadurch ist es möglich, die Kosten über den kompletten Lebenszyklus eines Produkts zu ermitteln.
- Basierend auf der THG- und TCO-Berechnung wurden die Wirkungen auf die Gesellschaft mithilfe eines Vermeidungskostenansatzes ermittelt. Berechnet wurde, wie hoch die Investitionen zur Einsparung einer festgelegten Menge an Emissionen wären. Dies hilft den gesetzgebenden Organen, den Aufwand zur Steigerung der Lebensqualität einzuschätzen.

Durch die Nutzung des beschriebenen Mixed-Method-Ansatzes wurde es möglich, die Dimensionen der Nachhaltigkeit auf das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus zu übertragen und eine ganzheitliche Analyse der Wirkungen sowohl qualitativ als auch quantitativ durchzuführen.

Abbildung 2.46: Visualisierung des Konzepts zur Wirkungsabschätzung



## 2.7.2 Wirkungen im Verkehrssystem

Die Vorgängervorhaben TaBuLa und TaBuLa-LOG haben bereits verdeutlicht, dass es mit der Einführung automatisierter Fahrzeuge sowohl im Personals als auch im Güterverkehr zu Veränderungen kommen wird. Bisher fehlen Untersuchungen darüber, welche konkreten Wirkungen sich durch die Implementierung einer smarten Leitstelle auf das Verkehrssystem ergeben. In einem ersten Analyseschritt wurden mögliche Wirkungen im Verkehrssystem ermittelt, um erste Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche Einführung automatisierter Transportmittel mit einer smarten Leitstelle abzuleiten.

### 2.7.2.1 Methodik

Die Analyse der Wirkungen basiert auf dem Sensitivitätsmodell nach Vester (1991). Hierbei handelt es sich um ein Planungsinstrument, bei dem ein Planungsgegenstand „systemisch-evolutionär“ analysiert wird. Komplexe Systeme können damit erfasst und bewertet werden. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Verfahren wird das System nicht isoliert untersucht. In die Analyse werden auch die Wechselwirkungen und vernetzten Lebensbereiche integriert. Dieser Ansatz ermöglicht es, ein Planungsobjekt mit all seinen Elementen und Wirkungsbeziehungen zu verstehen, um Empfehlungen für eine Gestaltung dieses Planungsgegenstands zielgerichtet abzuleiten. Das Sensitivitätsmodell besteht aus mehreren aufeinander aufbauenden Schritten, die in einem iterativen Prozess kontinuierlich angepasst und verbessert werden.

Zur Ermittlung der Wirkung durch die Einführung der smarten Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Bus im Verkehrssystem wurde ein Expert\*innenworkshop durchgeführt. Insgesamt fünf Fachkundige aus Forschung und Wirtschaft mit den Schwerpunkten Ingenieurwissenschaften, Logistik und Verkehrsplanung nahmen an dem Workshop teil. Zusätzlich diente eine Literaturrecherche als Grundlage für das allgemeine Verständnis und die Aufstellung des Variablensatzes.

### 2.7.2.2 Aufstellung Variablensatz und Durchführung des Papiercomputers

Das betrachtete System umfasst alle verkehrlichen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Elemente, die das Verkehrssystem durch die Einführung einer kombinierten Leitstelle für Bus und Transportroboter in Deutschland beeinflussen. Diese Definition dient als Grundlage die Aufstellung des Variablensatzes.

Der Variablensatz wurde mithilfe eines Brainstormings der Fachkundigen identifiziert und diskutiert. Insgesamt wurden 26 Variablen ermittelt. Diese verteilen sich auf vier Subsysteme: Kombiniertes Personen- und Güterverkehr, Bus, Transportroboter und Umfeld. Jede Variable wurde definiert und mit einem Indikator versehen, damit eindeutig ist, wie die

Variable zu verstehen ist und wie diese quantifiziert werden kann. Darüber hinaus wurden externe Einflüsse definiert, die unabhängig von den berücksichtigten Variablen auf die jeweilige Variable von außen einwirken können. Anlage 3 zeigt den finalen Variablensatz, der zur weiteren Bearbeitung genutzt wurde. Die Variablen wurden anschließend mit einer Kriterienmatrix auf Vollständigkeit überprüft.

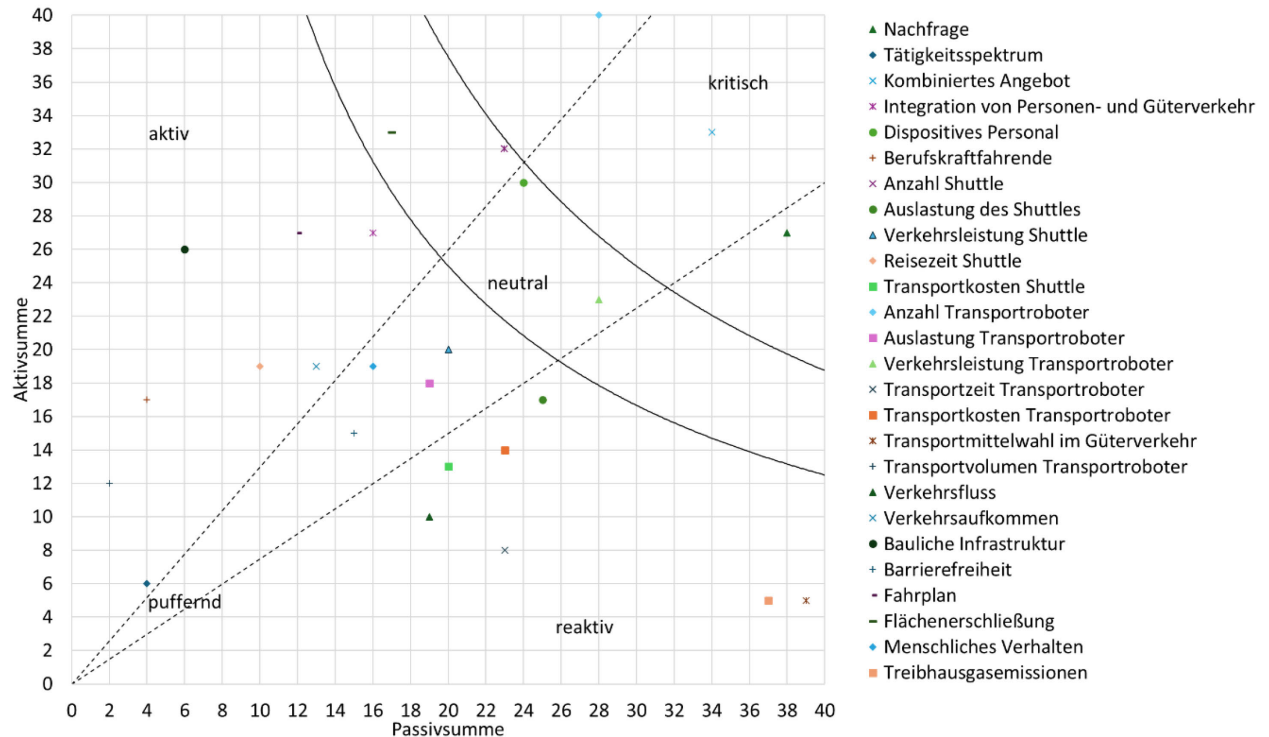
Nach der Aufstellung des Variablensatzes wurden im Rahmen eines Workshops die Einflüsse einer Variable auf eine andere Variable mithilfe des Papiercomputers identifiziert und gegebenenfalls anhand von Literatur verifiziert. Mittels Gewichtung und Richtung der Einflüsse im System konnte festgehalten werden, welche Wirkungsbeziehungen zwischen Variablen bestehen und wie das Wirkungsgefüge sowohl innerhalb der Subsysteme als auch für das gesamte Untersuchungssystem aussieht. Expert\*innen bewerteten die Variablen auf einer siebenstufigen Skala (Anlage 4). Ausgangspunkt war jeweils die Annahme eines zunehmenden Einflusses der Variablen. Die Zuordnung wurde für alle Variablen in einem iterativen Prozess vorgenommen. Darüber bietet die Gewichtung die Möglichkeit, die Aktiv- und Passivsumme der Variablen zu bilden. Hierbei handelt es sich um die absoluten Werte, mithilfe derer der sogenannte Q-Wert und der P-Wert ermittelt werden können – das Produkt und der Quotient aus Aktiv- und Passivsumme. Diese Werte geben Aufschluss über die Rollen der Variablen im System.

### 2.7.2.3 Wirkungsgefüge und Rollen der Variablen im System

Die Wirkungsgefüge wurden jeweils für die vier Subsysteme mithilfe von Kausaldiagrammen visualisiert. Dadurch konnten nicht nur eindimensionale Wirkungen, sondern auch positive und negative Rückkopplungsschleifen ermittelt werden. Bei positiven Rückkopplungsschleifen wirken zwei oder mehr Wirkungen in eine Richtung. Obwohl dieser Effekt zunächst wünschenswert klingt, können positive Rückkopplungsschleifen insofern auch den entgegengesetzten Effekt haben, als sie eine Zunahme herbeiführen. Dabei schaukeln sich die Wirkungen bis zu einem Grenzwert auf und können zur Destabilisierung des Systems führen. Im Gegensatz dazu sind negative Rückkopplungsschleifen durch entgegengesetzte Wirkungsrichtungen gekennzeichnet, d. h., die Erhöhung einer Variable führt zur Verringerung einer anderen und umgekehrt. Diese Wirkungsbeziehungen führen im Gegensatz zu positiven Rückkopplungsschleifen zu einer Stabilisierung des Systems, da sie sich gegenseitig ausgleichen. Das Ziel der Analyse ist, die negativen und positiven Folgen der Einführung des Transportrobotersystems abschätzen zu können. Nach Identifizierung der negativen Folgen können entgegenwirkende Handlungsempfehlungen definiert werden.

Neben der Ermittlung der Rückkopplungsschleifen konnten ebenfalls die Rollen der Variablen (Vester 1991) identifiziert werden (Abbildung 2.47).

Abbildung 2.47: Einflussdiagramm des Untersuchungssystems



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Vester (1991)

#### 2.7.2.4 Handlungsempfehlungen

Die Analyse der Wirkungen einer smarten Leitstelle für automatisierte Transportmittel im Verkehrssystem zeigt, dass durch bewusste Beeinflussung bestimmter Variablen das Systemverhalten verändert werden kann. Gesteuert werden kann das System beispielsweise über folgende identifizierte hochaktive und aktive Variablen:

- Mit Anpassung der baulichen Infrastruktur (z. B. Haltestellen, Lichtsignalanlagen) wird es möglich, dass Transportroboter und Bus die öffentliche Infrastruktur problemlos nutzen können. Damit steigt das Angebot, die Flächenerschließung, die Barrierefreiheit und die Integration von Personen- und Güterverkehr. Außerdem wird der Verkehrsfluss verbessert.
- Die Erhöhung des Transportvolumens des Transportroboters kann die Auslastung der Transportroboter verbessern und die Verkehrsleistung steigern.

- Die Transportkosten steigen mit zunehmender Anzahl der Berufskraftfahrenden sowohl für Transporte im Bussystem als auch für Transportroboter. Die Zunahme der Automatisierungsstufe zum fahrerlosen Fahren, kann dieser Wirkung entgegenwirken.
- Ein höherer Integrationsgrad von Personen- und Güterverkehr in einer Instanz kann zu einer besseren Auslastung beitragen sowie die Barrierefreiheit steigern.
- Die Veränderung der Reisezeit der Busse kann zu einer Veränderung der Verkehrsleistung der Busse führen. Auch die Transportzeiten der Transportroboter, die Transportmittelwahl im Güterverkehr sowie das menschliche Verhalten werden durch die Reisezeit der Busse beeinflusst. Eine Optimierung durch die Reduzierung der Reisezeit sollte angestrebt werden, damit die Nutzung eines kombinierten Personen- und Güterverkehrs an Attraktivität gewinnt.
- Eine Abstimmung des Fahrplans hinsichtlich der Nutzung der Busse sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr führt zu einem zunehmenden Angebot kombinierter Transportmöglichkeiten. Mit Optimierung des Fahrplans ist es zudem möglich, die Auslastung des Busses zu steigern, Transportzeiten der Roboter zu verringern, die Transportmittelwahl im Güterverkehr zu beeinflussen und eine zunehmende Flächenerschließung zu bewirken.
- Ähnlich wie die Anpassung der baulichen Infrastruktur kann die zunehmende Flächenerschließung automatisierter Fahrzeuge dazu beitragen, das Angebot kombinierter Transportlösungen zu erhöhen, und zudem der Erweiterung des Fahrplans dienen.

Die Analyse der Wirkungen im Verkehrssystem verdeutlichte aber auch, dass es bestimmte Wirkungsbeziehungen im System zu beachten gilt. Hierzu zählen insbesondere die positiven Rückkopplungsschleifen. Einige prägnante Wirkungsbeziehungen sind hervorzuheben:

- Mit Veränderung des Angebots kann das System verändert und sogar destabilisiert werden. Es gilt daher, genau darauf zu achten, an welchen Stellen die Änderung des Angebots sinnvoll ist.
- Die Nachfrage eines kombinierten, automatisierten Personen- und Güterverkehrs kann sich sowohl positiv als auch negativ auf das menschliche Verhalten auswirken. Es gilt daher, gezielt Öffentlichkeitsarbeit einzusetzen, um die Nachfrage zu steigern.
- Mit zunehmender Anzahl automatisierter Busse verändert sich das System. Dies kann die Verkehrsleistung und/oder das Angebot verbessern, gleichzeitig muss aber ausreichend dispositives Personal zur Verfügung stehen, um Busse nutzen zu können. Es muss daher rechtzeitig ein Ausbildungs- bzw. Weiterbildungsprogramm für dispositives Personal für Busse und Transportroboter entwickelt werden.

- Auch mit zunehmender Nutzung von Transportrobotern ist diese Wirkung zu berücksichtigen. Ein Mangel an dispositivem Personal kann auch hier zu einer Reduktion von Transportrobotern führen. Dadurch werden auch die Transportmittelwahl im Güterverkehr und das Angebot kombinierter Transportlösungen beeinflusst.
- Um ökologische Wirkungen zu reduzieren, ist die Nachfrage automatisierter Transportlösungen essenziell. Sollten die THG-Emissionen jedoch steigen, kann sich dies negativ auf die Nachfrage auswirken. Die Fahrzeuge sollten daher in der Regel mit einem batterieelektrischen Antrieb ausgestattet sein und zu einer Vereinheitlichung des Verkehrsflusses führen, um eine Reduktion von THG-Emissionen zu erzielen.

Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsbeziehungen kann die Einführung und Nutzung eines kombinierten Systems aus Bus und Transportroboter mit einer smarten Leitstelle fördern. Systeminterventionen sollten gezielt unter Berücksichtigung der intendierten, aber auch nicht intendierten Wirkungen vorgenommen werden.

### 2.7.3 Ökologische und gesellschaftliche Wirkungen

Im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus wurde das Zusammenspiel verschiedener automatisierter Fahrzeuge betrachtet, die über eine gemeinsame Leitstelle gesteuert werden. Für einen definierten Anwendungsfall wird im Folgenden die Frage erörtert, inwieweit die Zustellung mithilfe automatisierter Transportroboter ökologisch sinnvoll ist, wenn ein Teil der Strecke als Huckepackverkehr in einem Bus des ÖPNV stattfindet. Anhand der DIN EN ISO 14083:2022 wird die Paketbelieferung im Innenstadtbereich von Lauenburg verglichen, die ausgestoßenen Treibhausgase pro Paket bestimmt und deren Menge als funktionelle Einheit zur Vergleichbarkeit der Lieferprozesse verwendet (DIN 2022).

#### 2.7.3.1 Szenarien

Als Ausgangspunkt für den Vergleich verschiedener Lieferszenarien dient das Posteinlagerungszentrum (PEZ), das bereits im Vorgängervorhaben TaBuLa-LOG der Startpunkt war. Zu Beginn wird Laura am PEZ mit vier Paketen in den DHL-Größen S und M beladen, die der Roboter problemlos transportieren kann. Daraufhin fährt der Transportroboter selbstständig zur nächsten Haltestelle, um von dort einen Teil der Strecke mit dem Bus mitzufahren. Koordination und Zuweisung des Busses, in den eingestiegen werden soll, erfolgen über die Leitstelle. Für die vier auszuliefernden Pakete (exemplarische Mengengröße zur einheitlichen Vergleichbarkeit eines Lieferprozesses) bestimmt die Leitstelle die passenden Haltestellen, an denen der Roboter aus- und wieder einsteigen soll. Mit den zufällig ausgewählten Lieferstandorten beträgt die Fahrstrecke von Laura insgesamt 3,69 Kilometer. Der Auslieferungsprozess ist in Abbildung 2.48 visualisiert.

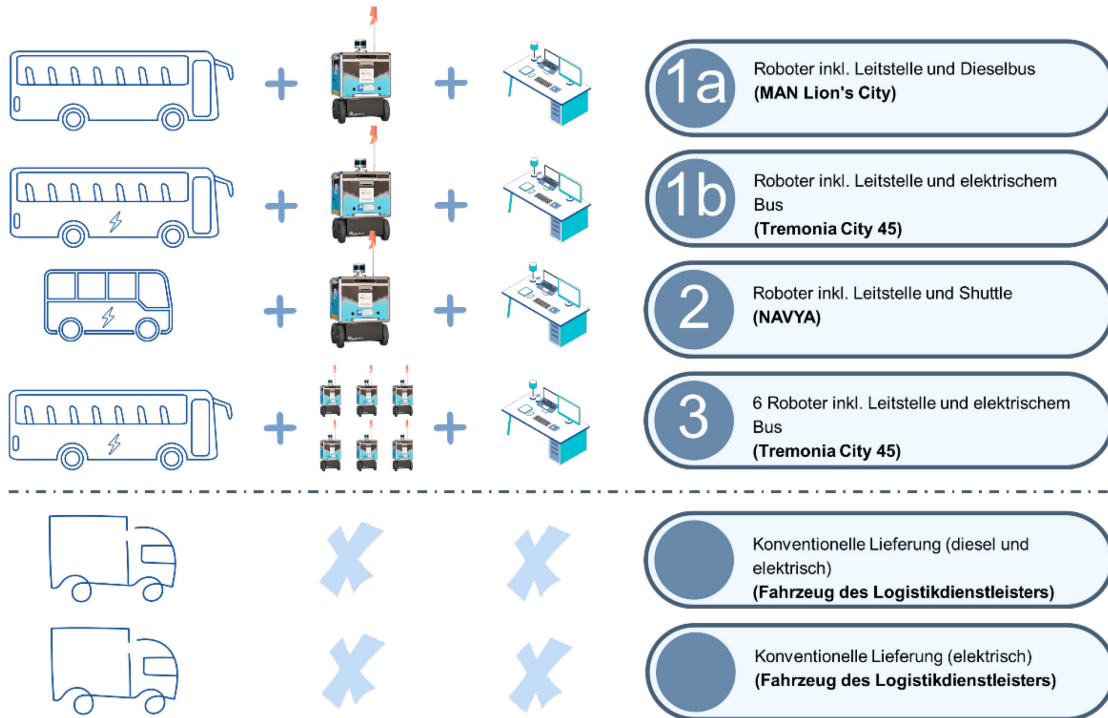
Die gewählte Strecke des Busses (blaue Linie) entspricht dem Linienverlauf der Stadtbuslinie 338 und weist insgesamt neun Haltestellen auf. Die zu befahrende Strecke ist 3,5 Kilometer lang.

Abbildung 2.48: Exemplarische Bus- und Roboteroute für die Zustellung von vier Paketen



Für das beschriebene Lieferszenario wird in der Vergleichsrechnung der gewählte Bus variiert. Dabei werden neben dem NAVYA-Shuttle aus den Vorgängervorhaben auch ein regulär eingesetzter Linienbus der vhh.mobility (MAN Lion's City, auch Göppelbus genannt) und ein potenzielles elektrisches Neufahrzeug (Tremonia City 45) betrachtet. Zum Vergleich wird ebenfalls die konventionelle Belieferung eines Logistikdienstleisters einbezogen. Abbildung 2.49 zeigt die beschriebenen Szenarien.

Abbildung 2.49: Darstellung der Szenarien zur Abschätzung der ökologischen Wirkung



### 2.7.3.2 Methodik

Als Grundlage für den Emissionsvergleich der Transportketten wird die DIN EN ISO 14083:2022 verwendet. Dabei werden die THG-Emissionen betrachtet, die im Betrieb der Fahrzeuge und der Leitstelle sowie durch den Prozess der Bereitstellung der Energieträger ausgestoßen werden. Für die Fahrzeuge wird der Energieverbrauch, entweder als Kraftstoff- oder Stromverbrauch, herangezogen, für die Leitstelle wird der Stromverbrauch anhand der zusätzlich benötigten Geräte betrachtet. Die Quantifizierung erfolgt mithilfe von Emissionsfaktoren in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>-Äq), die alle relevanten Treibhausgase in einem Wert zusammenführen und auch die jeweiligen Vorketten berücksichtigen. Die gewählten Emissionsfaktoren sind in Tabelle 2.22 dargestellt.

Tabelle 2.22: Emissionsfaktoren

Benötigte Emissionsfaktoren	Wert	Einheit	Quelle
Deutscher Strommix 2023	445	g CO <sub>2</sub> -Äq/kWh	UBA 2024a
WTW-Wert Diesel (für Europa)	3.780	g CO <sub>2</sub> -Äq/kg	DIN EN ISO 14083:2022

### 2.7.3.3 Ergebnisse

Zunächst wurde für jedes Fahrzeug die benötigte Energie für einen Kilometer ermittelt (siehe Tabelle 2.23). Die Quellen für die Verbrauchseinheiten der Fahrzeuge und die zur Berechnung verwendeten Emissionsfaktoren sind Anlage 6 zu entnehmen. Für die Leitstelle wird angenommen, dass die benötigten Geräte an einem regulären Arbeitstag von acht Stunden 1,2 kWh verbrauchen, allerdings die Auslieferung mit einem Transportroboter lediglich einen halben Arbeitstag in Anspruch nimmt.

Tabelle 2.23: Energieverbrauch der betrachteten Fahrzeuge

Fahrzeug	Energieträger	Verbrauch	Einheit
Laura	Strom	0,1625	kWh/km
NAVYA-Shuttle	Strom	0,68	kWh/km
MAN Lion's City	Diesel	0,42	l/km
Tremonia City 45	Strom	0,4	kWh/km

Da die drei betrachteten Busse als reguläre Busse für die Personenbeförderung eingesetzt werden, wird der Verbrauch nur anteilig dem Pakettransport zugerechnet. Hierfür wird die Fahrt anhand der durchschnittlichen Auslastung zwischen der Personenbeförderung und dem Gütertransport aufgeteilt. In den Vorgängervorhaben wurde gemessen, dass im Durchschnitt fünf Personen mit den Bussen fahren und Laura den Platz von zwei Personen beansprucht. Da im Realbetrieb die vollständige Auslastung nicht erreicht wird, wird auch für die Kalkulation davon ausgegangen, dass Laura keine zuvor anders genutzten Plätze beansprucht. In Tabelle 2.24 sind die ausgehend von den gewählten Annahmen resultierenden Ergebnisse der ökologischen Vergleichsrechnung dargestellt. Als Vergleichswert wird die konventionelle Belieferung danebengestellt, bei der ein Paket auf der letzten Meile mit einem Transporter zum Endkunden gefahren wird. DHL gibt für seine eigene Paketlauslieferung innerhalb Deutschlands einen Wert von 450 Gramm CO<sub>2</sub>-Äq an (Tagesschau 2023). Circa 60 Prozent dieser Summe fallen dabei auf der letzten Meile an, da die Bündelungseffekte hier geringer sind (UBA 2024b).

Tabelle 2.24: THG-Emissionen der betrachteten Szenarien

Szenario	Beschreibung	THG-Emissionen pro Paket [g CO <sub>2</sub> -Äq/Paket]
1a	MAN Lion's City + Laura + Leitstelle	464
1b	Tremonia City 45 + Laura + Leitstelle	178
2	NAVYA + Laura + Leitstelle	209
3	Tremonia City 45 + Laura (6 Stk.) + Leitstelle	142
	Konventionelle Belieferung (Diesel und batterieelektrisch)	270
	BEV-Zustellfahrzeug	165

Zusätzlich zur konventionellen Belieferung mit einer gemischten Zustellflotte aus Diesel- und Elektro-Transportern wurde der Vergleich mit einem batterieelektrischen Fahrzeug (*Batterie-Electric Vehicle*; BEV) durchgeführt. Die DHL-Zustellflotte bestand 2023 nach eigenen Angaben zu 37,6 Prozent aus BEV für die Abholung und Zustellung (DHL 2024a). Da keine offiziellen Angaben vom Unternehmen zur Emissionsreduktion durch elektrische Zustellfahrzeuge verfügbar waren, wurden mehrere Vergleichsstudien zwischen Diesel- und BEV-Zustellfahrzeugen herangezogen. Die CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale liegen anhand der Studien durchschnittlich bei 50,2 Prozent (Woody et al. 2022; Middela et al. 2022; Lee et al. 2013). Eine Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen lässt sich über folgende Gleichung ermitteln.

$$270 \text{ g} = 62,4 \% * e_{\text{Diesel}} + 37,6 \% * (e_{\text{Diesel}} - (50,2 \% * e_{\text{Diesel}}))$$

Es ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionen für das Diesel-Fahrzeug ( $e_{\text{Diesel}}$ ) von ungefähr 332 g CO<sub>2</sub>-Äq und dementsprechend Emissionen von 165 g CO<sub>2</sub>-Äq für das BEV-Zustellfahrzeug. Somit ist die Roboter-Auslieferung im Vergleich zur batterieelektrischen Auslieferung in Bezug auf die Treibhausgaswirkungen leicht vorteilhaft.

Es zeigt sich, dass die Paketzustellung auf der letzten Meile mit einem Transportroboter ökologische Vorteile bieten kann. Die Kombination sowohl mit dem NAVYA-Shuttle als auch mit einem elektrisch betriebenen Bus stößt eine geringere Menge an Treibhausgasen aus als die Belieferung mit Dieselfahrzeugen. Der Transportroboter in Kombination mit einem konventionellen Diesel-Bus stellt sich hingegen als nicht ökologisch vorteilhaft dar.

Für eine Betrachtung von Skalierungseffekten wird das gewählte Szenario dahingehend erweitert, dass insgesamt sechs Transportroboter und ein elektrischer Bus (Tremonia City 45) über einen Arbeitstag von acht Stunden unterwegs sind. In diesem Szenario sinken die THG-Emissionen auf 142 Gramm pro Paket, was im Vergleich zu Szenario 2 mit nur einem Roboter einer Reduktion um knapp ein Drittel und nahezu einer Halbierung des THG-Ausstoßes der Zustellung mit einem dieselbetriebenen Zustellfahrzeug entspricht (siehe Tabelle 2.24).

#### 2.7.4 Ökonomische Wirkungen und Vermeidungskosten

Anknüpfend an die Analyse der ökologischen Wirkung einer smarten Leitstelle für automatisierte Transportmittel wird im Folgenden ebenfalls die ökonomische Wirkung dieser Fahrzeuge betrachtet. Mithilfe einer Prozessanalyse und einer TCO-Berechnung wird der ökonomische Nutzen des Huckepackverkehrs analysiert. Für die Analyse der Prozesse wurde eine verkürzte logistische Prozesskostenrechnung durchgeführt, die ebenfalls die Szenarien aus der ökologischen Wirkungsanalyse betrachtet und die relevanten Teilprozesse des Dieselmotors, des elektrischen Busses und des Shuttles in Kombination mit dem Roboter und der Leitstelle berücksichtigt.

##### 2.7.4.1 Methodisches Vorgehen und Annahmen

Für den ökonomischen Vergleich der Fahrzeuge wurden im Rahmen der Gesamtkostenrechnung alle anfallenden Kosten über die gesamte Nutzungsdauer berücksichtigt. Die Analyse der Kostenarten wurde in Anlehnung an die DIN 60300-3-3:2005 (Analyse der Lebenszykluskosten) durchgeführt (DIN 2005). Die Kosten lassen sich unter den Gesamtanschaffungskosten und den direkten sowie indirekten Betriebskosten zusammenfassen.

Für die Gesamtanschaffungskosten wurden neben dem Anschaffungspreis der Busse bzw. der Hardware für Roboter und Leitstelle u. a. die Kosten für TÜV (Normenarbeit und Zulassung) herangezogen. In die direkten Betriebskosten wurden neben den Personalkosten die Kraftstoffkosten bzw. der Energieverbrauch und Mobilfunkverträge inkludiert. Die indirekten Betriebskosten umfassen Kosten für Verwaltung und Schulungen sowie Wartungs- und Reparaturkosten, Versicherungskosten, Steuerkosten und Kapitalbindungskosten.

Die Berechnungen wurden unter Berücksichtigung der in folgender Tabelle dargestellten Annahmen (Quellen siehe Anlage 6) durchgeführt:

Tabelle 2.25: Annahmen für die Berechnung der Gesamtkosten

Allgemeine Angaben	Transportmittel				Leitstelle
	Bus (manuell)	Bus (elektrisch)	Shuttle (autonom)	Roboter	
Antrieb	Diesel	elektrisch	elektrisch	elektrisch	
autonom fahrend	nein	nein	ja	ja	
Nutzungsdauer (Jahre)	10	10	8,14	3	3
Betriebsstunden pro Woche	106	106	106	40	40
Fahrleistung über Nutzungsdauer (km)	400.000	400.000	400.000	1.200	
Zinssatz	4,00 %	4,00 %	4,00 %	4,00 %	4,00 %
Kraftstoff-/ Stromverbrauch (pro km)	0,42 l	0,40 kWh	0,68 kWh	0,04 kWh	

Außerdem wurde angenommen, dass die Roboter-Leitstelle in eine bereits bestehende Leitstelle des ÖPNV integriert wird, sodass lediglich die Kosten für einen zu ergänzenden Arbeitsplatz, bestehend aus Hardwareanschaffungen, berücksichtigt wurden. Die Jahre der Nutzungsdauer für die einzelnen Bus-Modelle orientieren sich an den Abschreibungs-Tabellen (AfA) des Bundesfinanzministeriums (Bundesfinanzministerium 2024). Die Nutzungsdauer des Roboters wurde in Absprache mit Experten auf drei Jahre festgelegt. Da die Kostenpunkte der Leitstelle insbesondere aus Hardwarekomponenten (z. B. Notebooks) bestehen, wurde die Nutzungsdauer ebenfalls anhand der AfA-Tabelle auf drei Jahre festgelegt. Für die Umrechnung des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs auf die tatsächlichen Kosten wurden anhand historischer Diesel- und Strompreisentwicklungen Prognosen errechnet und diese mit der Fahrleistung über die Nutzungsdauer multipliziert. Außerdem wurde für die Ermittlung der Zinskosten mit einer Kapitalbindung über die Laufzeit der durchschnittliche Marktzinssatz der vergangenen Jahre von vier Prozent angenommen.

## 2.7.4.2 Ergebnisse

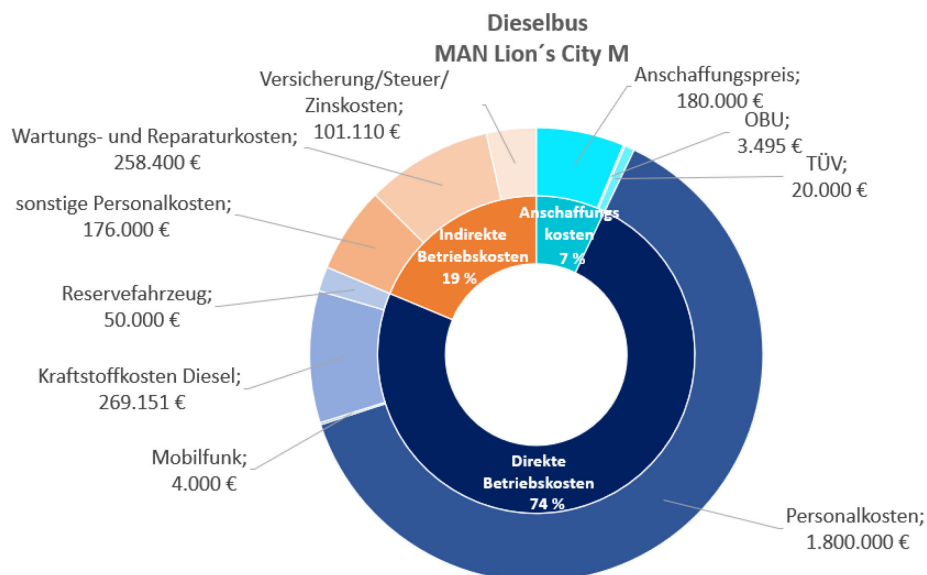
Zunächst wurden für jedes Bus-Modell die Gesamtanschaffungskosten und die direkten sowie indirekten Betriebskosten ermittelt. Im weiteren Verlauf wurden die Kosten für den Roboter und die Leitstelle addiert. Die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer pro Bus-Modell sind der folgenden Tabelle zu entnehmen (Quellen siehe Anlage 8).

Tabelle 2.26: Berechnung der Gesamtkosten pro Bus-Modell

Kategorie	Parameter	Kostenschätzung		
		Szenario 1a mit Busmodell MAN Lion's City M	Szenario 1b mit Busmodell VDL MidCity	Szenario 2 mit Busmodell NAVYA-Shuttle
Gesamt- anschaffungs- kosten	Anschaffungspreis Bus	180.000 €	220.000 €	248.333 €
	Onboard-Unit-Anschaffung	3.475 €	3.475 €	–
	Onboard-Unit-Support (Installation)	20 €	20 €	–
	TÜV (Normenarbeit, Zulassung)	20.000 €	20.000 €	20.000 €
Direkte Betriebskosten	Personalkosten	1.800.000 €	1.800.000 €	1.465.200 €
	Mobilfunk	4.000 €	4.000 €	4.000 €
	Software-Updates/Lizenzen	–	–	104.000 €
	Kraftstoffkosten Diesel	269.151 €	–	–
	Energiekosten Strom	–	53.965 €	102.011 €
	Reservefahrzeug	50.000 €	–	–
	Indirekte Betriebskosten	Personalkosten (Verwaltung)	160.000 €	160.000 €
Personalkosten (Schulung)		16.000 €	16.000 €	16.000 €
Wartungs-& Reparaturkosten		258.400 €	258.400 €	257.500 €
Versicherungskosten		58.333 €	47.483 €	47.483 €
Kfz-Steuer		4.090 €	–	–
Kapitalbindung/Zinskosten		38.687 €	47.284 €	44.667 €
<b>Gesamtkosten über Nutzungsdauer</b>		<b>2.862.156 €</b>	<b>2.630.627 €</b>	<b>2.469.195 €</b>
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	<b>286.216 €</b>	<b>263.063 €</b>	<b>303.341 €</b>	

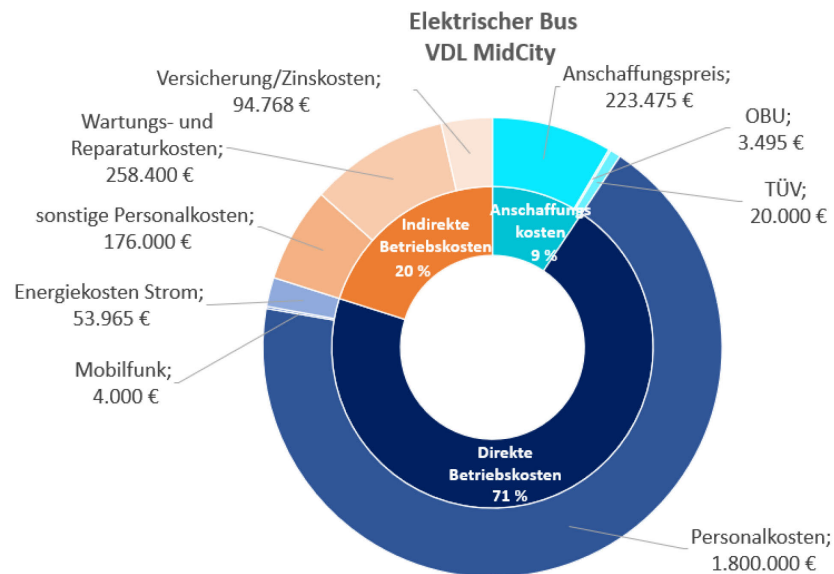
Die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer der drei unterschiedlichen Bus-Modelle variieren zwischen 2,4 Mio. Euro und 2,8 Mio. Euro, wobei der Shuttle die günstigste Alternative darstellt. Die Kosten des Dieselmotors sind im Vergleich am höchsten, was insbesondere auf die hohen Kraftstoffkosten für Diesel zurückzuführen ist. Die Kosten des elektrischen Busses liegen zwischen den anderen beiden Alternativen, wobei der Energieverbrauch im Vergleich zum elektrischen Shuttle deutlich geringer ist. Die relative Verteilung der Kostenarten ist jeweils ähnlich, die direkten Betriebskosten machen mit 68 bis 74 Prozent den größten Anteil an den Gesamtkosten aus. Den Abbildungen 50 bis 52 sind einzelnen Kostenparameter aufgeteilt nach Kategorie zu entnehmen.

Abbildung 2.50: Gesamtkosten des Dieselmotors aufgeschlüsselt nach Kategorien



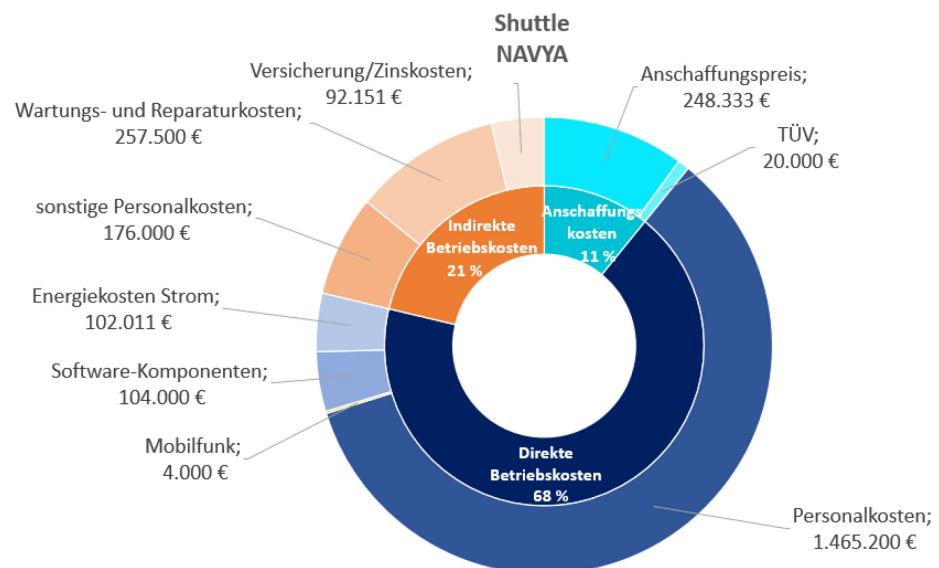
Der Vergleich der Bus-Modelle aufgeschlüsselt nach Kategorien zeigt auf, dass die Anschaffungskosten für den Dieselmotors am niedrigsten sind. Die höheren Gesamtkosten im Vergleich zu den anderen beiden Fahrzeugen liegen insbesondere in den Kraftstoffkosten für Diesel und den hier anfallenden Kfz-Steuer-Kosten begründet.

Abbildung 2.51: Gesamtkosten des elektrischen Busses aufgeschlüsselt nach Kategorien



Die Anschaffungskosten des elektrischen Busses sind im Vergleich zu den Kosten des Diesebusses höher. Die Energiekosten für Strom des VDL MidCity-Busses sind dahingehend 80 Prozent geringer als beim Diesebus. Somit sind die Gesamtkosten des elektrischen Busses im Vergleich niedriger als die Gesamtkosten des Diesebusses.

Abbildung 2.52: Gesamtkosten des Shuttles aufgeschlüsselt nach Kategorien



Die Anschaffungskosten des NAVYA-Shuttles sind etwas höher als die des elektrischen Busses. Außerdem weist dieses Modell doppelt so hohe Energiekosten für Strom aus. Da für dieses autonom fahrende Bus-Modell deutlich geringere Personalkosten angenommen wurden, sind die Gesamtkosten des Shuttles insgesamt am niedrigsten.

Eine andere Verteilung zeigt sich beim Vergleich von Roboter und Leitstelle. Während der Roboter hohe Anschaffungskosten (für Hard- und Softwarekomponenten) aufweist, sind die Betriebskosten vergleichsweise gering. Bei der Leitstelle zeigt sich Gegenteiliges. Während die Anschaffungskosten (für Monitore, Notebooks etc.) gering sind, werden hier höhere Personalkosten angenommen. Die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer betragen für den Roboter 14.877 Euro, die Kosten für die Leitstelle 165.863 Euro. Die Quellen zur Berechnung der Gesamtkosten für Roboter und Leitstelle sind der Anlage 8 zu entnehmen.

Tabelle 2.27: Berechnung der Gesamtkosten für Roboter und Leitstelle

Kategorie	Parameter	Roboter	Leitstelle
Gesamt-anschaffungskosten	Anschaffungspreis Hardware	10.558 €	6.344 €
	Installation	–	20 €
	TÜV	140 €	–
Direkte Betriebskosten	Personalkosten	–	158.100 €
	Mobilfunk	540 €	900 €
	Energieverbrauch	72 €	100 €
Indirekte Betriebskosten	Sonstige Personalkosten	1.080 €	–
	Inspektion	243 €	–
	Versicherungskosten	450 €	–
	Kapitalbindung/Zinskosten	1.794 €	399 €
<b>Gesamtkosten über Nutzungsdauer</b>		<b>14.877 €</b>	<b>165.863 €</b>
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>		<b>4.959 €</b>	<b>55.288 €</b>

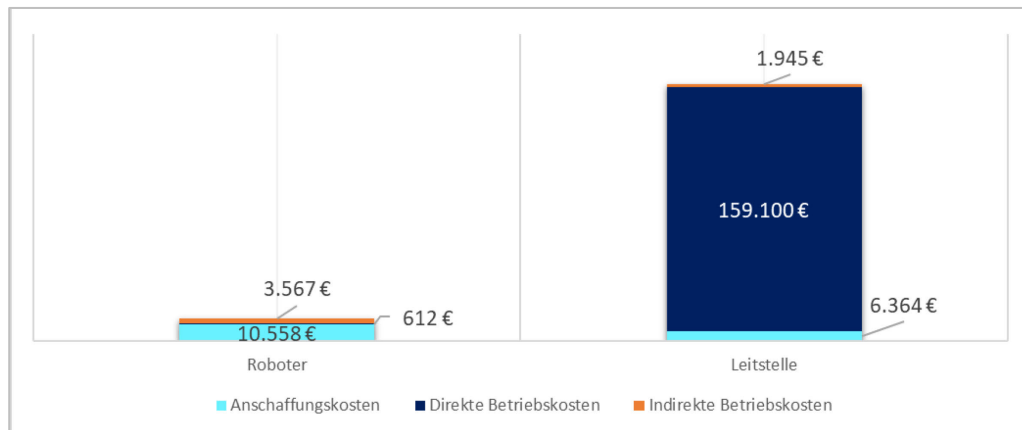
Die Kosten des Roboters wurden im Gespräch mit wissenschaftlichen Mitarbeitenden vom ITL für eine zukünftig optimierte Herstellung von 50 Robotern aufgestellt. In den Kostenkomponenten der Anschaffungskosten für den Roboter sind bspw. der Pokini-Rechner in Eigenbau, der NVIDIA-Jetson-Rechner sowie der Velodyne-Lidar-VLP-16-Sensor inkludiert. Außerdem wurden Kostenpunkte für weitere Sensoren, die Roboterbasis, Akkus, LTE-Module und das Funk-Not-Aus berücksichtigt.

Neben dem großen Kostenblock „Personalkosten“ wurden für die Leitstelle die Anschaffungskosten der Hardwarekomponenten wie Notebooks,

Monitore und Hotspot berechnet. Darüber hinaus wurden die Energiekosten für Strom dieser Geräte ermittelt und den Stromkosten zugerechnet.

Abbildung 2.53 zeigt die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer für Roboter und Leitstelle aufgeteilt in die definierten Kostenkategorien.

Abbildung 2.53: Gesamtkosten für Roboter und Leitstelle



Da die Kosten für Roboter und Leitstelle bei allen drei Szenarien gleich angenommen werden, ergibt sich der Unterschied in der Gesamtkostenrechnung aus der Kalkulation der unterschiedlichen Bus-Modelle. Die Gesamtkosten im Vergleich für die einzelnen Szenarien sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 2.28: Gesamtkostenüberblick für die einzelnen Szenarien

Kategorie	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 2
Anschaffungskosten	220.556 €	260.556 €	285.395 €
Direkte Betriebskosten	2.282.863 €	2.017.677 €	1.834.924 €
Indirekte Betriebskosten	541.023 €	534.680 €	531.163 €
<b>Gesamtkosten über Nutzungsdauer</b>	<b>3.044.442 €</b>	<b>2.812.913 €</b>	<b>2.651.481 €</b>
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	<b>346.978 €</b>	<b>323.825 €</b>	<b>364.103 €</b>

Es zeigt sich, dass die Verwendung elektrischer Fahrzeuge auf der letzten Meile auch ökonomisch Vorteile bieten kann. Sowohl die Kombination mit dem NAVYA-Shuttle als auch mit einem elektrisch betriebenen Bus sind im Vergleich zum Dieselbus kostengünstiger. Der Einsatz eines kombinierten (fahrerlosen) Personen- und Gütertransports kann also zu einer Einsparung von Kosten führen. Dies gilt insbesondere für die Busbetriebe, die mit automatisierten Fahrzeugen ihr Angebot verbessern und mit dem Güter-

transport die Auslastung erhöhen könnten. Da kommerzielle Transportroboter zu niedrigeren Preisen am Markt erhältlich sein müssten, wäre eine andere Option die Steigerung der Auslastung (z. B. durch Beschaffung und Nutzung mehrerer Roboter), um die Kosten zu senken.

In dieser Kostenabschätzung wurden einige Annahmen und grobe Abschätzungen vorgenommen, dennoch zeigt sie auf, welche ökonomischen Veränderungen für die Implementierung eines kombinierten (fahrerlosen) Personen- und Gütertransports erforderlich sind. Neben den Veränderungen, die sich in den logistischen Prozessketten ergeben, sind vermehrte Anstrengungen zur Standardisierung zu unternehmen, um die erforderlichen Mengendegressionseffekte realisieren zu können. Der kombinierte Personen- und Gütertransport bietet Potenzial, nicht nur Kosten einzusparen, sondern auch Verkehr und dessen negative Folgen zu reduzieren (Tjaden et al. 2022).

#### 2.7.4.3 Vermeidungskosten

Die Berechnung der Vermeidungskosten ist eine Kombination der ökologischen Betrachtung und der ökonomischen Analyse aus volkswirtschaftlicher Perspektive. Vermeidungskosten zeigen die Kosten für Investitionen auf, um eine gewählte Einheit CO<sub>2</sub>-Äq, meist in Tonnen angegeben, mit einer neuen Technologie oder einem neuen System einzusparen.

In Kapitel 2.7.3 wurde der ökologische Vergleich zwischen der konventionellen Auslieferung mittels eines DHL-Lieferfahrzeugs auf der letzten Meile mit dem neuen System aus Robotern und Leitstelle verglichen. Die zentralen Kennzahlen sind dabei die Emissionsbelastungen von 270 g CO<sub>2</sub>-Äq für die konventionelle Zustellung auf der letzten Meile und 142 g CO<sub>2</sub>-Äq für die Roboter-Auslieferung im Szenario der Flottenskalierung. Die mögliche Reduktion beträgt somit 128 g CO<sub>2</sub>-Äq pro Lieferung. Zur Berechnung der Mehrkosten wird ein Referenzwert der konventionellen DHL-Lieferung benötigt. DHL bietet den Versand von kleineren Paketen in mehreren Formaten an. Für den Vergleich mit der Roboterauslieferung wurden aufgrund des begrenzten Stauraums kleine DHL-Paketkategorien gewählt. Kleine Pakete der Kategorie S in den Maßen 35 × 25 × 10 cm bis 2 kg kosten den Endkunden 3,99 Euro und Pakete der Kategorie M in den Maßen 60 × 30 × 15 cm bis 2 kg werden für 4,79 Euro angeboten (DHL o. J.). Im Mittel der beiden Kategorien ergeben sich Kosten für den Endkunden von 4,39 Euro. Zur Berechnung der internen Kosten für DHL werden weitere Kennzahlen benötigt. Eine Abschätzung der internen Kosten wurde durchgeführt, indem Geschäftsberichte der DHL nach Margen je Geschäftseinheit betrachtet wurden. Für die Geschäftsbereiche „eCommerce“ und „Post und Paket Deutschland“ verzeichnete die DHL im Geschäftsjahr 2023 eine Marge vor Zinsen und Steuern (EBIT) von 4,6 Prozent bzw. 5,2 Prozent

(DHL 2024b). Für die der RoboterAuslieferung verwandten Geschäftsbereiche der DHL ergibt sich somit eine durchschnittliche Marge von 4,9 Prozent. Die entspricht internen Kosten bei der Paketzustellung in der Kategorie S/M von 4,17 Euro. DHL zitiert auf seiner Website überdies eine Quelle der Unternehmensberatung Capgemini bezüglich der Kostenverteilung auf der letzten Meile (DHL 2023; Capgemini 2018). Diese entsprächen 41 Prozent der Gesamtlieferkosten. Die internen Kosten auf der letzten Meile für die Paketkategorien S und M betragen somit im Durchschnitt 1,71 Euro.

Für das Szenario der Flottenskalierung werden sechs Roboter gesteuert über eine Leitstelle angenommen. Die Kosten für den Bus bzw. das Shuttle werden nicht berücksichtigt, da diese auch ohne Betrieb der RoboterAuslieferung anfallen. Bei jährlichen Kosten von 4.959 Euro pro Roboter und Leitstellenkosten von 55.288 Euro ergeben sich Gesamtkosten von 85.042 Euro pro Jahr. Es wird angenommen, dass ein Roboter täglich 20 Pakete ausliefert. Dies entspräche fünf Lieferfahrten, bei denen jeweils vier Pakete geladen und innerhalb einer achtstündigen Betriebszeit pro Tag geliefert werden. Hochgerechnet auf sechs Roboter entspräche dies einer Auslieferung von 120 Paketen am Tag und 31.200 Paketen pro Jahr. Anzumerken ist, dass eine entsprechende Nachfrage im Liefergebiet vorhanden sein muss. Bei durchschnittlichen Paketzahlen je Einwohnenden pro Jahr in dicht besiedelten urbanen Räumen wie München (73 Pakete pro Einwohner\*in), Stuttgart (72) oder Düsseldorf (70) müssten somit circa 446 Menschen im Liefergebiet wohnen (eigene Berechnungen nach BPEX 2021). Entsprechend den 31.200 jährlichen Paketen lassen sich die Kosten der RoboterAuslieferung auf 2,73 Euro pro Paket bestimmen. Im Vergleich zur konventionellen Lieferung ergeben sich Mehrkosten von 1,02 Euro bei eingesparten 128 g CO<sub>2</sub>-Äq pro Paketlieferung auf der letzten Meile.

In der Kombination der Mehrkosten pro eingesparter Einheit CO<sub>2</sub>-Äq betragen die Vermeidungskosten 7.968,75 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq.

## 2.8 Begleitforschung zum Forschungsvorhaben

Der Erfolg von Forschungsvorhaben und Projekten hängt maßgeblich mit deren Organisation und Planung zusammen. Konflikte und Hemmnisse können im Verlauf zu Verzögerungen oder im schlimmsten Fall zum Abbruch führen. Um diesen Hemmnissen entgegenzuwirken und die Erfolgsfaktoren, die sich aus der Projekt-/Vorhabenarbeit ergeben, zu fördern, wurde im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus eine Begleitforschung durchgeführt, die die Arbeit auswertet.

Die Grundlage der Begleitforschung ist die Planungsanalyse nach Flämig (2004), eine Methode zur Unterstützung von Projekten/Forschungsvorhaben zur (nachhaltigen) Gestaltung von Wirtschaftsverkehrssystemen. Im Kontext

dieses Forschungsvorhabens wurde die Planungsanalyse zur Identifikation von Hemmnissen und Erfolgsfaktoren sowie zur Verbesserung von Kommunikation und Organisation innerhalb des Forschungsvorhabens genutzt.

Zur Datenerhebung wurden mehrere das Vorhaben begleitende Befragungen durchgeführt. Diese dienten dazu, informelle Prozesse und Rahmenbedingungen transparenter zu machen, die Kommunikation zu verbessern sowie die Effektivität und Effizienz von Projekten/Vorhaben zu erhöhen. Die Befragung erfolgte im Verlauf des Forschungsvorhabens zu drei Zeitpunkten (ex-ante, begleitend, ex-post). Mithilfe der Befragung können Gestaltungsoptionen und Handlungsempfehlungen für den Planungs- und Umsetzungsprozess abgeleitet werden. Dabei wurde kontinuierlich der Frage nachgegangen: „Was können wir besser machen?“.

### 2.8.1 Ex-ante-Begleitforschung

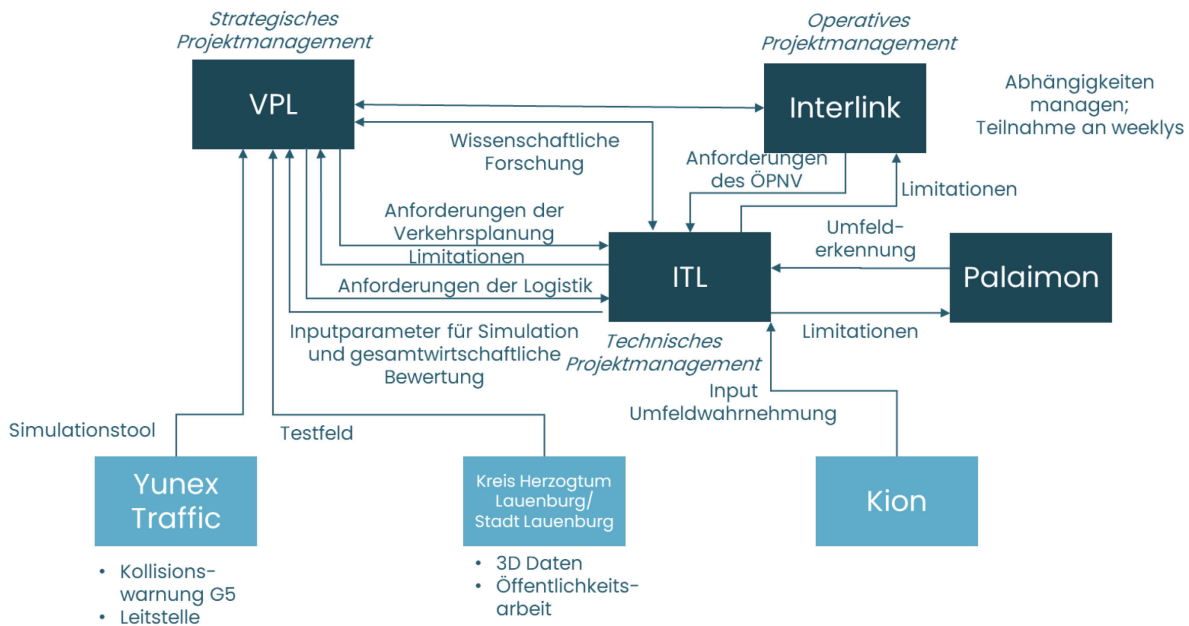
Für die Ex-ante-Befragung wurden von April bis Mai 2022 Interviews mit neun am Forschungsvorhaben Beteiligten durchgeführt und ausgewertet. Die Interviewfragen finden sich in der Anlage 9. Die Antworten der Interviews wurden schriftlich festgehalten und konsolidiert. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des ersten Vorhabentreffens den beteiligten Partner\*innen des Forschungsvorhabens sowie den assoziierten Partner\*innen präsentiert und im Rahmen eines internen Workshops diskutiert.

Im Rahmen der Befragung wurden fünf Themenschwerpunkte behandelt: Rückblick auf die Initiierungsphase, Stakeholder\*innen-Konstellation, Projektpartnerschaft, Projektmanagement und Ausblick auf die ersten Projektschritte. Dadurch wurden zum einen die Erfolgsfaktoren und Hemmnisse aus der Initiierungsphase erfragt, zum anderen konnten Informationen über die Erwartungen und das gegenseitige Rollenverständnis zwischen den einzelnen Beteiligten sowie an das Projektmanagement gewonnen werden.

Im Rahmen der Interviews wurden die unterschiedlichen Rollen der Partner\*innen des Forschungsvorhabens und ihre gegenseitigen Erwartungen erfragt. Außerdem wurden die erwarteten Tätigkeiten, individuelle Ziele und Qualifikationen ermittelt. Daraus ergaben sich Zuständigkeiten der Partner\*innen für den Erfolg des Forschungsvorhabens. Die Ermittlung des zuvor beschriebenen Rollenverständnisses im Rahmen der Interviews trägt dazu bei, dass die Partner\*innen ein gegenseitiges Verständnis für die Tätigkeiten und Qualifikationen der anderen Partner\*innen erhalten.

Mithilfe der Interviews konnte auch ein Wirkungsgefüge der Beteiligten ermittelt werden (siehe Abbildung 2.54). Es zeigt, welche Tätigkeiten die Beteiligten im Forschungsvorhaben übernehmen und wie die Interaktionen und Abhängigkeiten zwischen ihnen bestehen.

Abbildung 2.54: Gegenseitiges Rollenverständnis



Die Ergebnisse der Interviews zeigen, dass die Partner\*innen vielfältige Erwartungen an die anderen Partner\*innen sowie an das Projektmanagement haben. Es wird zudem deutlich, dass zwischen den Partner\*innen eine Vielzahl von Abhängigkeiten besteht, die es im Verlauf des Forschungsvorhabens zu berücksichtigen gilt.

Die Ex-ante-Befragung legt einen Ausgangspunkt für die Wirkungsabschätzung in der begleitenden Befragung und der Ex-post-Befragung, sodass zum einen die Diskrepanz zwischen dem Geplanten bzw. Erwarteten und der Realität abgeschätzt sowie zum anderen eine Überprüfung von Effizienz und Effektivität der Maßnahmen im Projektmanagement durchgeführt werden kann.

### 2.8.2 Begleitende Begleitforschung

Für die begleitende Befragung wurde den am Forschungsvorhaben Beteiligten in der Zeit von Mitte Dezember 2023 bis Mitte Januar 2024 ein Fragebogen online zur Verfügung gestellt. Die Interviewfragen finden sich in der Anlage 10. Die Antworten von insgesamt zehn Beteiligten wurden tabellarisch konsolidiert und ausgewertet. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der wöchentlichen Besprechungsrunde den beteiligten Partner\*innen präsentiert.

Im Rahmen der Befragung wurden fünf Themenschwerpunkte behandelt. Zum einen wurden die Erfolgsfaktoren und Hemmnisse aus der Änderungsphase erfragt, zum anderen konnten Informationen über die Erwartungen für die weitere Arbeit sowie an das Projektmanagement gewonnen werden.

Ein besonderes Augenmerk wurde in der begleitenden Befragung auf die Treiber und Hemmnisse in der Phase des Änderungsantrags gelegt. Durch das Wegfallen eines autonomen Shuttles musste in der Formulierung der geänderten Inhalte des Forschungsvorhabens an einer neuen gemeinsamen Vision gearbeitet werden. Zielsetzung war es, eine gemeinsame Zielorientierung zu erreichen und ein Interesse an der Fortführung des Forschungsvorhabens zu erhalten.

Durch die fehlende Finanzierung des Betriebs der autonomen Fahrzeuge (siehe dazu auch Kapitel 1.2.3 auf S. 22) standen die Shuttles aus den Vorgängervorhaben TaBuLa und TaBuLa-LOG nicht mehr zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde dieser Forschungsaspekt im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens gestrichen. Dies bedeutete die Notwendigkeit, fahrzeugseitig einen aktuell im Betrieb des vhh.mobility befindlichen Bus inklusive Fahrpersonals einzusetzen. Die technische Aufrüstung dieses Busses, um diesen in die Leitstelle integrieren zu können, bedingte eine Änderung technischer Parameter. Diese Änderungen bedeuteten zwar, dass die zuvor geplanten Szenarien nicht getestet werden konnten, allerdings wurde in der Befragung herausgestellt, dass das Alternativszenario kurz- bzw. mittelfristig sogar ein realistischeres Szenario für die Praxis abbildet. Der Änderungsantrag führte zu einer hohen Abhängigkeit der Partner\*innen vom ITL, da die Entwicklung der Leitstelle und die Integration des Roboters einen elementaren Teil des realen Testfelds einnahmen. In diesem Zusammenhang wurde in der Befragung auf die veränderte Schnittstelle zwischen dem ITL und dem VPL verwiesen, da die Programmierung der Leitstellenintegration der eingesetzten Busse über die OBU durch das VPL erfolgen sollte.

In der begleitenden Befragung wurde außerdem die Akzeptanz der internen Zusammenarbeit untersucht. Dabei zeigte sich eine hohe Zufriedenheit mit der Form der Kommunikation und dem Informationsaustausch. Das wöchentliche Format zum gegenseitigem Statusupdate wurden vielfach

positiv hervorgehoben und als positives Element für eine zeitnahe interne Rückmeldung gesehen. Allerdings wurde ein aktiveres Eingreifen des Projektmanagements zur Verbesserung kritischer Prozesse gewünscht, sodass eine deutlichere Lenkung zur Ausgestaltung offener Arbeitspakete erreicht wird. Entsprechende Verbesserungspotenziale wurden intern diskutiert und die Struktur und Durchführung von Regelterminen angepasst. Mit dieser Anpassung der regelmäßigen Termine konnte eine bessere Absprache zwischen den Partner\*innen sowie eine Verbesserung der Zusammenarbeit erwirkt werden.

Darüber hinaus wurde der Wunsch geäußert, eine transparente und verständliche Darstellung der Ergebnisse im Videoformat zu erreichen. Aus diesem Grund erfolgte die Beauftragung der Firma DREHGUT GmbH mit der Erstellung eines Imagefilms im Sommer 2024. Für die Außendarstellung soll eine verständliche Darstellung des Geschehens im Forschungsvorhaben und der erzielten Ergebnisse erreicht werden.

### 2.8.3 Ex-post-Begleitforschung

Im Rahmen der Ex-post-Begleitforschung wurde den Beteiligten im November 2024 ein digitaler Fragebogen zur Verfügung gestellt. Die Interviewfragen finden sich in der Anlage 11. Die Antworten von insgesamt zehn Beteiligten wurden tabellarisch zusammengefasst und ausgewertet. Die Ergebnisse wurden den beteiligten Partner\*innen im Rahmen der wöchentlichen Besprechungsrunde präsentiert.

Die Befragung thematisierte drei Themenschwerpunkte. Zum einen wurde ein Rückblick auf das Forschungsvorhaben und die Zusammenarbeit innerhalb des Teams erfragt und zum anderen Informationen über den Ausblick auf ein Folgevorhaben gesammelt. Ein besonderes Augenmerk wurde in der Ex-post-Befragung auf die abschließende Betrachtung von Hemmnissen und Erfolgsfaktoren sowie die möglichen Verbesserungen von Kommunikation und Organisation im Forschungsvorhaben gelegt. Im Ergebnis sollten Gestaltungsoptionen und Handlungsempfehlungen zukünftiger Projekte/Vorhaben abgeleitet werden.

Im Folgenden wird – ausgehend von der Frage, in welcher Funktion die Beteiligten im Forschungsvorhaben mitgewirkt haben – eine umfassende Auswertung der Untersuchungsergebnisse präsentiert. Verschiedene Akteur\*innen waren an der Entwicklung von Soft- und Hardware für automatisierte Roboter beteiligt, ebenso wie am Projektmanagement und an der Konzeption einer Leitstelle. Die zentralen Ergebnisse umfassten die Entwicklung einer Leitstelle, die sowohl Personen- als auch Warentransporte kombiniert, sowie die Verbesserung der autonomen Funktionen der eingesetzten Roboter. Diese Fortschritte wurden durch eine Neuausrichtung der Inhalte und die Einbindung der Perspektive der Betreibenden ermöglicht.

Darüber hinaus führten internationale Kooperationen zu neuen Erkenntnissen.

Zu den inhaltlichen Herausforderungen zählten die technische Komplexität der Robotersysteme, die Beschaffung zuverlässiger Datenquellen und die Einhaltung von Datenschutzrichtlinien. Diese Herausforderungen wurden durch den Einsatz von Bibliotheken, Foren und externer Expertise sowie durch regelmäßige Abstimmungen und iteratives Testen bewältigt.

Kommunikationsschwierigkeiten mit bestimmten Partner\*innen stellten insofern eine Hürde dar, als diese teilweise unzureichend reagierten und zurückhaltend in der Zusammenarbeit waren. Diese Schwierigkeiten wurden durch intensivere Kommunikation, den Fokus auf Kernziele und die Etablierung notwendiger Kooperationsstrukturen adressiert.

Für künftige Forschungsvorhaben wurde ermittelt, dass eine klare Definition der Rollen innerhalb des Teams, abgestimmte Projektpläne und eine initial festgelegte Kommunikationsstruktur wichtig sind, um die Zusammenarbeit effizient zu gestalten. Zudem wurde die Bedeutung einer präzisen Definition der Entwicklungsziele, einer umfassenden Dokumentation und ausreichender Ressourcen für das Projektmanagement hervorgehoben.

Zukünftige Perspektiven und potenzielle Folgevorhaben sehen die Skalierung der entwickelten Lösungen, die Ausweitung auf weitere Verkehrsmittel und die Erprobung neuer Nutzungsmöglichkeiten für mobile Roboter im öffentlichen Raum vor. Dies könnte die Integration von Echtzeit-Verkehrsdaten in die Planung autonomer Transportmittel oder das Monitoring öffentlicher Räume durch Roboter neben Transportanwendungen umfassen. Insgesamt führte das Forschungsvorhaben zu wichtigen technischen Fortschritten und lieferte wertvolle organisatorische und methodische Erkenntnisse für zukünftige Forschungsvorhaben.

### 3 Tabellarische Zusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgt eine tabellarische Zusammenfassung der geleisteten Arbeiten bezogen auf die Arbeitspakete und größten Kostenpositionen. Ergänzend werden die Abweichungen in der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung inklusive der Ursachen und Folgen aufgezeigt.

#### 3.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen sowie Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die nachfolgende Tabelle geht mit Bezug auf die im Antrag geplanten Ergebnisse auf das erzielte inhaltliche Ergebnis zum Ende des Forschungsvorhabens je Arbeitspaket ein.

Tabelle 3.1: Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens A (TUHH)

AP	Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
1	Begleitforschung ist ausgewertet.	Ex-ante-, begleitende und Ex-post-Begleitforschung wurden durchgeführt und ausgewertet.
1	Ein Evaluationskonzept der Wirkungseffekte liegt vor; die Umsetzung des Forschungsvorhabens ist mithilfe dieses Evaluationskonzepts zu drei Zeitpunkten hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkungen evaluiert.	Die verkehrlichen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen wurden analysiert und evaluiert. Zur Vergleichbarkeit wurden vier verschiedene Szenarien aufgestellt und in der ökologischen und ökonomischen Betrachtung sowie in der Simulation verwendet.
1	Vermeidungskosten und TCO sind ermittelt.	Die Vermeidungskosten wurden mittels Kombination der ökologischen und ökonomischen Analyse im Vergleich zu einer konventionellen Auslieferung auf der letzten Meile berechnet.
1	Das ITL wurde zum Ende des Forschungsvorhabens bei der Datenbereitstellung, Datenaufbereitung und Veröffentlichung mit 50 Stunden unterstützt.	Das ITL wurde bei Datenbereitstellung, Datenaufbereitung und Veröffentlichung im notwendigen Umfang unterstützt.

AP	Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
1	Alle generierten forschungsrelevanten Daten mit Bezug zu den Transportrobotern, Bus und Infrastruktur werden spätestens mit Ablauf des Forschungsvorhabens Open Access auf der bereits vorhandenen Plattform TORE der TUHH zur Verfügung gestellt.	Alle generierten forschungsrelevanten Daten mit Bezug zu den Transportrobotern, Bus und Infrastruktur wurden Open Access auf der Plattform TORE der TUHH zur Verfügung gestellt.
2	Anforderungen der Praxis an die technische Aufsicht sind durch die Vorgängervorhaben und im weiteren potenziellen Austausch mit der Praxis identifiziert und der Anforderungskatalog ist für potenzielle Betreiber*innen einsehbar.	Die Anforderungen an die technische Aufsicht und zum Betrieb der Leitstelle wurden im Betriebskonzept festgehalten.
2	Konzept für die Leitstelle ist auf Grundlage des (auch zeitlichen) Anforderungskatalogs ausgearbeitet und wird nach Umsetzung und Testlauf der Leitstelle iterativ optimiert. Das Konzept wird in der Umsetzungsphase verwendet.	Das Leitstellen- und das Betriebskonzept wurden ausgearbeitet und im Testbetrieb kritisch hinterfragt und angepasst.
2	Dem Partner wurde mit 0,5 PM zum Datenschutzkonzept basierend auf der DSGVO zugearbeitet.	Die Partner*innen wurden, je nach individuellen Bedarfen, entsprechend unterstützt.
2	Mit Abschluss des HAP 2 ist ein Konzept mit den Anforderungen an die Leitstelle und Schnittstellenentwicklung entwickelt worden, auf dem die Entwicklung der Leitstelle aufbaut.	Ein Konzept mit den Anforderungen an die Leitstelle und Schnittstellenentwicklung wurde erstellt.
3	Die Busse sind bis Ende Q3 2023 mit der entsprechenden Hard- und Software ausgestattet, um die Integration mit der Leitstelle sicherzustellen und so langfristig ökonomische Vorteile zu generieren.	Das Ziel wurde in Q2 2024 erreicht, nachdem die Lieferung der Onboard-Units deutlich länger gedauert hat als initial angenommen. Die Busse waren mittels nachträglicher Aufrüstung im Testbetrieb einsatzbereit.
3	Der Testfeldbetrieb findet die letzten 6 Monate des Forschungsvorhabens ohne interne Ausfälle statt.	Der Testfeldbetrieb wurde in drei verschiedenen Zeiträumen in Q3 und Q4 2024 durchgeführt.

AP	Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
3	Es wird eine Roboterplattform mit Abschluss des Projektmonats 24 in Richtung SAE-Level 4 entwickelt worden sein, sodass die Anzahl manueller Eingriffe der begleitenden Buddies reduziert werden konnte.	Die aus dem Vorgängervorhaben bekannte Roboterplattform wurde weiterentwickelt und erneut vom TÜV Nord abgenommen. Die Anzahl manueller Eingriffe der Begleitpersonen konnte wesentlich reduziert werden.
4	Bis Projektmonat 30 liegen Simulationen/ Visualisierungen von Testdaten als Verkehrsmodell vor. Mithilfe der digitalen Daten sollen Simulationen zu Verkehren und durch KI-optimierte Abläufe erfolgen.	Die Simulationen und Visualisierungen wurden mittels der Software Aimsun umgesetzt. Das Lauenburger Verkehrssystem wurde repliziert und entstehende Effekte der RoboterAuslieferung evaluiert. Eine Simulation inklusive KI-optimierter Abläufe hat nicht stattgefunden, da die entsprechende Zulieferung des verantwortlichen Partners ausgeblieben ist.
4	Die Leitstelle mit den Schnittstellen zum Bus und der Roboterplattform weist nach Ende des Projektmonats 29 in diversen Softwaretests keine betriebseinschränkende Fehler mehr auf und ist somit einsatzbereit.	Gemäß dem geplanten Ergebnis ist die Leitstelle betriebsbereit und weist auch nach diversen Softwaretests keine betriebseinschränkende Fehler mehr auf.
5	Stakeholder*innen-Management-Cycle vor Umsetzungsstart durchgeführt und Stakeholder*innenansprache bis zur erfolgreichen Realisierung des Forschungsvorhabens iterativ weiterentwickelt. Beispielung der Social-Media-Kanäle und Websites nach Arbeitsständen orientiert an den Meilensteinen.	Der Stakeholder*innen-Management-Cycle wurde durchgeführt und diente als Grundlage für Teile der Begleitforschung. Die Ergebnisse der Begleitforschung wurden genutzt, um die interne und externe Projektkommunikation zu verbessern. Die Website des Forschungsvorhabens und Social-Media-Kanäle wurden mit aktuellen Ereignissen bespielt.
6	Das VPL arbeitet die entsprechenden Berichtsteile für die Zwischen- und den Endbericht aus. Gegenüber dem Mittelgeber werden Vernetzungstreffen oder ähnliche Formate bedient. Für die Treffen und Abstimmungen von Berichten und Medien wird eng mit Interlink zusammengearbeitet.	Die geforderten Berichte wurden zeitgemäß eingereicht. Es fanden regelmäßige interne Austausch- und Entscheidungstermine zwischen den Beteiligten statt.

Tabelle 3.2: Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens B (Interlink GmbH)

AP	Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
1	Ein Evaluationskonzept der Wirkungseffekte liegt vor.	Evaluationskonzept lag mit Abschluss des zweiten Projektmonats vor.
1	Vermeidungskosten und TCO sind ermittelt.	Dem VPL wurden Eingangsparameter für die Ermittlung zur Verfügung gestellt.
2	Die Praxisanforderungen an eine Leitstelle sind vorbereitend für die Konzeption in einem Anforderungskatalog/Lastenheft festgehalten.	Anforderungen aus der Praxis wurden identifiziert und festgehalten.
2	Die Leitstelle/Technische Aufsicht ist aus Sicht der Praxis vor der Entwicklung des Betreiber*innenkonzepts in einem Entwurf konzipiert. Das Konzept der Leitstelle/Technischen Aufsicht wird iterativ bis zum Start des Testbetriebs erweitert.	Leitstelle/Technische Aufsicht wurde konzipiert und iterativ erweitert. Die Veröffentlichung des Leitstellenkonzepts erfolgte im Mai 2024.
2	Ein Konzept zu Datenschutz und -sicherheit liegt bis zum Betriebsstart des Testbetriebs vor.	Das ITL hat ein Konzept zum Datenschutz und zur Datensicherheit aufbauend auf dem Vorgängervorhaben bis zum Testbeginn erarbeitet.
2	Ein umsetzbares und erprobtes Betreiber*innenkonzept liegt vor der Implementierung und Erprobung der Leitstelle vor.	Es wurde zeitgerecht ein Betriebskonzept mit drei Modellen ausgearbeitet.
3	Die Transportroboter sind inklusive ihrer neuen Funktionen zugelassen und haben alle relevanten Genehmigungen vor dem Start des Testfeldbetriebs erlangt.	Automatisierte Fahrfunktion beider Transportroboter wurde vor Beginn des Testfeldbetriebs genehmigt.
3	Der Testfeldbetrieb findet die letzten sechs Monate des Forschungsvorhabens ohne interne Ausfälle statt.	Testfeldbetrieb fand von Juli 2024 bis Oktober 2024 ohne Ausfälle statt.
4	Eine erste Indikation für ein Durchführungskonzept für die Leitstelle/Technische Aufsicht liegt vor deren Betriebsstart vor.	Ein Durchführungskonzept lag vor dem Testfeldbetrieb vor. Es wurden anschließend iterative Anpassungen

AP	Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
4	Das Durchführungskonzept für die Leitstelle/Technische Aufsicht wird während des Betriebsstarts umgesetzt, erprobt und iterativ angepasst.	am Durchführungskonzept vorgenommen.
4	Ein umsetzbares und erprobtes Durchführungskonzept für die Leitstelle/Technische Aufsicht liegt am Ende des Forschungsvorhabens zur Übertragung vor.	
5	Die Öffentlichkeit wird zu jedem relevanten Meilenstein informiert. Darstellung und Veröffentlichung der durchgeführten Maßnahmen gegenüber der Öffentlichkeit, vor allem potenziellen Nutzer*innen und Kommunen, die die Maßnahmen übertragen könnten.	Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen wurden wie geplant durchgeführt.
5	Die interne Kommunikation ist zu jedem Zeitpunkt auf die Zielerreichung des Forschungsvorhabens, das Management der Risiken und die fachliche Zusammenarbeit ausgerichtet.	Die Zielerreichung, das Risikomanagement sowie die fachliche Zusammenarbeit waren stets im Fokus der internen Kommunikation.
5	Es finden quartalsweise Treffen mit einem Lenkungsausschuss und nach Bedarf (zwei-, vier-, sechswöchig) Treffen zu inhaltlichen Themen statt.	Regelmäßige Treffen des Lenkungsausschusses wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens durchgeführt. ITL, VPL und Interlink trafen sich wöchentlich zur Besprechung der inhaltlichen Themen.
6	Erfolgreiche Erreichung der Ziele aus dem Antrag unter Einhaltung des vereinbarten Zeit- und Budgetrahmens. Abwendung von Risiken und Erreichung bzw. Koordination der SMARTEN Ziele.	Die gesetzten Ziele wurden im angegebenen Rahmen unter Budgeteinhaltung fristgerecht erreicht.
6	Einreichung von Zwischenberichten und einem Schlussbericht	Die Einreichung der Berichte erfolgte fristgerecht.

Tabelle 3.3: Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens C (Palaimon GmbH)

AP	Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
2	Konzeption der Lösung unter Datenschutz- und Sicherheitsaspekten (Datenanonymisierung, Secure-by-Design-Ansatz)	Ein Datenschutzkonzept wurde erstellt.
3	Anforderungen an die Roboterspezifische Umfelderkennung sind aufgenommen.	Die Anforderungen wurden aufgenommen.
3	Die benötigten Input-Daten sind gesichtet und aufbereitet und stehen zum Trainieren der KI zur Verfügung.	Die Daten stehen zur Verfügung.
3	Evaluation und Implementierung der passenden KI-Methoden für die Problemstellung wurde abgeschlossen. Die KI wurde mithilfe der Daten trainiert.	Die Evaluation der KI-Methoden wurde abgeschlossen. Die KI wurde trainiert. Durch die abgelehnte Mittelaufstockung mussten bei der abschließenden Anomaliedetektion Abstriche gemacht werden.
3	Testeinsatz der KI unter realitätsnahen Bedingungen wurde abgeschlossen.	Der Testeinsatz wurde erfolgreich abgeschlossen.
4	Methodenauswahl und KI-Entwicklung für die Generierung unsicherheitsbehafteter Vorhersagen für den Bedarf an Personen- und Warentransport, basierend auf Input-Daten wie historischen und Simulationsdaten	KI-Methoden wurden evaluiert und implementiert.
4	Ableitung unsicherheitsbehafteter Warentransportkapazitäten und Ermittlung des im Erwartungswert optimalen Transportangebots mit KI-Methoden	Auf Basis eigens erstellter Simulationsdaten wurden Transportkapazitäten vorhergesagt.
4	KI-basierte Empfehlung zur optimalen Flottenauslastung zur Vermeidung von Leerläufen und Warenstau	Auf Basis eigens erstellter Simulationsdaten und Annahmen wurden Flottenauslastungen vorhergesagt.

### 3.2 Abweichungen in der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung, Ursachen und Folgen für das Forschungsvorhaben

Tabelle 3.4: Abweichungen in der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Abweichung	Ursache	Folgen
Entsprechend dem Änderungsantrag konnten, entgegen der initialen Ausgangslage, keine autonomen Shuttles im Forschungsvorhaben verwendet werden.	Fehlende Finanzierung des Shuttlebetriebs durch Wegfall der Förderung in einem weiteren Projekt im Kreis Herzogtum Lauenburg.	Als Alternative wurden manuelle Busse des Typs MAN Lion's City M per Tablet-App in die Leitstelle eingebunden. Diese Busse wurden zur Zeit des Vorhabens im Gebiet des Vorhabens auf der Ringlinie 338 in Lauenburg eingesetzt.
Verspätete Einbindung der OBUs	Verzögerte Lieferung der OBUs sowie fehlende Emulationssoftware	Achtmonatige Verzögerung der OBU-Einbindung sowie daran angepasste Zeitplanung
Die Entwicklung der Anomaliedetektion konnte nicht abgeschlossen werden.	Arbeiten in AP4.2 und 3 waren umfangreicher als geplant.	Eine Mittelaufstockung wurde abgelehnt, da die Partner*innen die Arbeiten als nicht projektkritisch einstufen.
KI wurde nicht in die Simulation eingebunden.	Zulieferung eines entsprechenden Algorithmus durch den verantwortlichen Partner nicht erfolgt	Einbindung der KI-gestützten Auslastungsprognose in die Verkehrssimulation konnte nicht geleistet werden.
Migration zum ROS-2-Framework	Kompatibilität mit neuestem Stand der Forschung und Sicherung der zukünftigen Kompatibilität mit ITL-Leitstelle	Verzögerte Entwicklung der Ein- und Ausfahrt
Personallücke von drei Monaten ITL	Kündigung durch Mitarbeiter, geeignetes Personal zu finden, dauerte mehrere Monate	Verzögerte Entwicklung der Ein- und Ausfahrt

### 3.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die nachfolgende Tabelle listet alle wesentlichen externen monetären Positionen auf und beschreibt deren inhaltliche Verwendung. Personal- und Reisekosten werden nicht aufgeführt.

Tabelle 3.5: Zahlenmäßiger Nachweis

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
TUHH 0835	Lfd. Nr. 1 Aimsun-Simulationssoftware	Beschaffung der Aimsun-Software-Lizenzen zur Erstellung der Verkehrssimulationen mit automatisierten Agenten
TUHH 0835	Lfd. Nr. 1 Beschaffung OBU's	Beschaffung von zwei OBU's und vorhabensspezifischer Support
TUHH 0835	Lfd. Nr. 3 Busse und Personalkosten Fahrpersonal	Bereitstellung der Busse und Personalkosten des Fahrpersonals in den Testzeiträumen durch die vhh.mobility GmbH
TUHH 0850	Lfd. Nr. 1 Pokini I v3	Beschaffung neuer, leistungsstärkerer Recheneinheiten für Transportroboter
TUHH 0850	Lfd. Nr. 2 NVIDIA Jetson Xavier	Beschaffung neuer Generation Grafik-PCs für Transportroboter
TUHH 0850	Lfd. Nr. 3 Velodyne VLP-16 LiDAR	Robosense Helios LiDAR als günstigere Alternative beschafft
TUHH 0850	Lfd. Nr. 5 Failsafe-Motoren	Neue Failsafe-Motoren für die Transportroboter
TUHH 0850	Lfd. Nr. 6 3D-Drucker	3D-Drucker für den Druck von Bauteilen für die Transportroboter
TUHH 0850	Lfd. Nr. 7 Workstation	Eine Workstation wurde beschafft für Simulation und Parametrierung von Roboter-Algorithmen.
TUHH 0850	Lfd. Nr. 8 Mobilfunkausrüstung	Mobilfunkequipment für die Verbindung von Roboter und Leitstelle wurde beschafft.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 8.10 TÜV Nord Mobilität GmbH	Beratung bei der Normenarbeit und Gutachtenerstellung für Transportroboter und Leitstelle durch den TÜV Nord Mobilität GmbH
TUHH 0850	Lfd. Nr. 9 Arbeitsplatz Leitstelle	Ein Arbeitsplatz für die Leitstelle mit Frontend und Backend PC wurde beschafft.

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
TUHH 0850	Lfd Nr. 10-17 Mobilfunkequipment	Mobilfunkequipment inklusive Datenvolumen, SIM-Karten, WLAN-Repeater, Mobile Hotspots, LTE-Module, Antennen, Kabel für die Roboter und Adapter wurden beschafft, um die Verbindung zwischen Leitstelle und Robotern zu ermöglichen.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 16 Erklärfilm	Erstellung des zum Forschungsvorhaben gehörigen Erklärfilms inklusive Drehtage, Interviews und Postproduktion
TUHH 0850	Lfd Nr. 18 Velodyne VLP-16 LiDAR	Ein weiterer LiDAR für die Transportroboter wurde beschafft.
TUHH 0850	Lfd Nr. 19 NVIDIA Jetson Orin	Beschaffung neuer Generation Grafik-PCs für Transportroboter und unabhängiges Testing
TUHH 0835	Datenschutz Nord	Datenschutzbeauftragter zur Unterstützung bei der Erweiterung des Datenschutzkonzepts der TUHH um die Inhalte des Forschungsvorhabens
Interlink GmbH 0850	Lfd. Nr. 1 Rechnerkapazitäten	Für das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus wurde eine prototypische Leitstelle implementiert und die erforderliche Hardware beschafft.
Palaimon GmbH 0850	GPU-Kosten	Zur Berechnung der KI-Modelle fielen GPU-Kosten an. Ein Grafikprozessor (GPU, <i>Graphics Processing Unit</i> ) ist ein Computerchip, der Grafiken und Bilder durch schnelle mathematische Berechnungen rendert.

## 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Motivation der drei Partner\*innen bestand darin, im Forschungsbereich (automatisierte Transportroboter, kombinierte Verkehre, automatisierter ÖPNV, Leitstelle für automatisierte Fahrzeuge) Erkenntnisse zu generieren und diese mit Fachpersonal zu teilen. Dazu erfolgte die Durchführung des Forschungsvorhabens stets in Übereinstimmung mit den im Antrag festgelegten Zielen und orientierte sich weitestgehend am Projektplan. Im Verlauf des Forschungsvorhabens notwendige Anpassungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektträger vorgenommen.

### 4.1 Konzeptionierung, Aufbau und Erprobung einer Leitstelle

Die zunehmende Urbanisierung und das wachsende Verkehrsaufkommen in städtischen Gebieten stellen erhebliche Herausforderungen für die effiziente und nachhaltige Mobilität dar. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist es unerlässlich, innovative Lösungen zu entwickeln, die sowohl den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) als auch den Einsatz autonomer Systeme integrieren. Eine zentrale Leitstelle für Busse und mobile Roboter stellt daher eine vielversprechende Lösung zur Koordination und Steuerung dieser Systeme dar.

Einen Teil des Forschungsvorhabens bildeten die Konzeptionierung, der Aufbau und die Erprobung einer Leitstelle. Ziele des Forschungsvorhabens waren die prototypische Umsetzung eines erarbeiteten Leitstellenkonzepts und die Erprobung sowohl aus Sicht der Betreibenden (Interlink) als auch Sicht der Entwickelnden (TUHH).

Neben der Umsetzung der Ziele des Forschungsvorhabens ist eine zentrale Leitstelle erforderlich zur Effizienzsteigerung im ÖPNV. Durch ihre Integration können Kapazitäten in Bussen erkannt und durch Transportroboter effizient genutzt werden. Zudem lassen sich durch eine Leitstelle autonome Systeme integrieren. Mit der wachsenden Verbreitung mobiler Roboter im öffentlichen Raum ist die Notwendigkeit einer koordinierten Steuerung unerlässlich, um die Sicherheit und Effizienz dieser Systeme zu gewährleisten. Zusätzlich ist auch die potenzielle Einsparung von Begleitpersonal im öffentlichen Raum ein Grund für die Notwendigkeit einer Leitstelle. Der reduzierte Personalaufwand kombiniert mit der Optimierung

der Verkehrsströme und reduzierten Leerfahrten sind weitere Aspekte, die den Bedarf einer Leitstelle rechtfertigen.

Die Angemessenheit des Vorgehens lässt sich wie folgt darlegen. Das Konzept zur Leitstelle vereint Fachwissen aus den Bereichen Verkehrstechnik, Informatik, Robotik und Verkehrsbetriebe, um ein möglichst ganzheitliches System zu entwickeln. Die Leitstelle soll den Anforderungen moderner städtischer Mobilität gerecht werden.

Der Aufbau bzw. die technische Umsetzung ist angemessen aufgrund der Neuheit der Technologie. Bisher ist keine kombinierte Leitstelle bekannt. Daher wurde diese auf Basis moderner Kommunikationstechnologien aufgebaut, um eine reibungslose Kommunikation und Synchronisation zwischen Roboter und Bus zu gewährleisten.

Die praxisnahe Erprobung wurde in einem realitätsnahen städtischen Szenario umgesetzt, das die typischen Herausforderungen des Verkehrs in Kleinstädten simulierte und wertvolle Erkenntnisse für die weitere Optimierung und Anpassung des Systems liefert. Zusätzlich wurde durch die Kooperation mit den örtlichen Verkehrsbetrieben wie der vhh.mobility, relevanten Behörden sowie Prüforganisationen sichergestellt, dass die entwickelte Lösung nicht nur technisch machbar, sondern auch praktisch umsetzbar ist, und wertvolles Feedback gesammelt.

Die Erprobung der Leitstelle aus Sicht des Betreibenden ist notwendig, um die Nutzbarkeit für Personen ohne tiefere Programm-Kenntnisse sicherzustellen und zu evaluieren, welche Herausforderungen sich in der Bedienung durch unterschiedliche Personen mit voneinander abweichenden Vorkenntnissen ergeben.

Zusammenfassend war das Forschungsvorhaben angesichts der aktuellen Anforderungen und Herausforderungen im Bereich städtischer Mobilität sowohl notwendig als auch angemessen. Die angestoßenen Entwicklungen und erarbeiteten Erkenntnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung intelligenter Verkehrssysteme und bieten eine solide Grundlage für zukünftige Forschungen und Anwendungen.

## 4.2 Weiterentwicklung des automatisierten Transportroboters und Genehmigung

Um einen sinnvollen Betrieb in Kombination mit einer Leitstelle zu gewährleisten, ist eines der Ziele des Forschungsvorhabens die Weiterentwicklung der automatisierten Transportroboter in Richtung SAE-Level 4. Ein Transportroboter kann nur dann effizient arbeiten, wenn er nicht eins zu eins von einer Begleitperson betreut werden muss. Die Transportroboterplattform aus TaBuLa-LOG hatte in der damaligen Form hinsichtlich Rechenkapazitäten, Softwarearchitektur und Sicherheitsaspekten ihre Leistungsgrenze erreicht. Entsprechend wurde ein Konzept zur Weiterentwicklung notwendig. Dieses wurde in Abstimmung mit dem zuvor erwähnten Leitstellenkonzept erstellt, um auf die daraus resultierenden Anforderungen zu reagieren. Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurde das Konzept umgesetzt und ergänzt. Aufgrund der Vielzahl an Änderungen und der neuen Funktionen, wie der Verbindung mit der Leitstelle, wurden neue Genehmigungen notwendig.

Bei der Ausführung der Entwicklung wurde darauf geachtet, möglichst viel der bereits vorhandenen Hardware weiterzuverwenden, um den Aufwand für Neubeschaffungen und Neuentwicklungen sowie den Genehmigungsaufwand gering zu halten. Die zuvor beschriebenen Entwicklungs- und Genehmigungsarbeiten sind entsprechend am Mindestmaß der zur Zielerreichung notwendigen Änderungen orientiert.

## 4.3 Einbindung von KI

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, Deutschland in Sachen Digitalisierung und künstliche Intelligenz deutlich voranzubringen und zu fördern. Insbesondere sind Video-Daten für den Verkehrsbereich sehr wertvoll, da sie kostengünstig erhoben werden können.

Ohne die Unterstützung durch das BMDV wäre die Durchführung des Forschungsvorhabens nicht möglich gewesen. Die Arbeiten im Bereich KI sind sehr forschungsnah und bergen daher Forschungs- und Entwicklungsrisiken, die allein nicht getragen werden können. Alle beschriebenen Arbeitspakete waren erforderlich, um das Ziel des Forschungsvorhabens zu erreichen. Auf dieser Grundlage kann die Digitalisierung im Verkehrsbereich maßgeblich vorangetrieben werden.

#### 4.4 Simulationen und Wirkungsabschätzung

Vor der Einführung eines neuen Systems ist die Wirkungsabschätzung hinsichtlich des direkten Umfelds, der Nachhaltigkeit und der finanziellen Belastung ein zentraler Bestandteil, insbesondere wenn das neue System komplementär in ein bestehendes System integriert werden soll, wie es in diesem Forschungsvorhaben mit dem ÖPNV der Fall ist. Der Rahmen der Wirkungsabschätzung sollte in einem Innovationsprojekt im Verkehrs- und Logistiksektor neben den ökologischen und ökonomischen Auswirkungen auch die verkehrlichen und gesellschaftlichen Wirkungen evaluieren. Die gewählten Analysemethoden sollten nicht isolierte Teilaspekte, sondern ein möglichst holistisches Gesamtbild betrachten. Daher wurden wissenschaftlich fundierte Methoden gewählt, um die drei Untersuchungsebenen angemessen abzubilden.

Alle Untersuchungsebenen wurden mit dem Ziel der Vergleichbarkeit hinsichtlich derselben Szenarien analysiert. In vier Szenarien wurden verschiedene Antriebstechnologien des ÖPNV-Busses bzw. Shuttles sowie manuell und autonom fahrende Busse betrachtet. Neben dieselbetriebenen Fahrzeugen wurden elektrische Busse untersucht. Des Weiteren wurde ein ergänzendes Szenario im Sinne der Flottenskalierung festgelegt, indem die Anzahl der Roboter erhöht wurde, um einer zukünftigen kommerziellen Nutzung der Roboterauslieferung gerecht zu werden und diese zu evaluieren.

Die verkehrlichen Wirkungen wurden zum einen qualitativ im Austausch mit Expert\*innen mittels des Vester-Modells systematisch untersucht. Zum anderen wurde mittels einer Verkehrssimulation das vorherrschende Verkehrssystem möglichst exakt erfasst und entstehende Auswirkungen der Roboterauslieferung statistisch, quantitativ untersucht. Mit diesem zweifachen Ansatz konnte sowohl das Wissen beteiligter Stakeholder\*innen als auch statistische Methoden anhand des aktuellen Verkehrssystems genutzt werden. Darüber hinaus konnte durch die erstmalige umfängliche Abbildung autonomer Agenten und deren Interaktion in einer Verkehrssimulation eine Erweiterung etablierter Verkehrsforschungsmethoden erreicht werden.

Für die Evaluierung der ökologischen Auswirkungen wurde sich am aktuellen internationalen Standard der Transportemissionsbilanzierung DIN ISO 14083 orientiert. Die Analyse mittels dieses Standards ermöglicht die Quantifizierung jedes beteiligten Transportelements. Zusätzlich schreibt die Norm vor, dass neben den unmittelbaren direkten Emissionen während des Betriebs der Fahrzeuge auch die indirekten Emissionen zur Herstellung und Bereitstellung der Energieträger eingerechnet werden müssen. Als Zielgröße wurde eine mit dem Kyoto-Protokoll gängige Einheit der CO<sub>2</sub>-Äquivalente verwendet. Diese Einheit umfasst neben den Kohlendioxid-Emissionen weitere klimawirksame Gase wie Methan und Distickstoffoxid. Mittels

international gängiger Standards in Kombination mit der Emissionsquantifizierung entlang der kompletten Wertschöpfungskette der Energieträger wurde somit eine umfassende und leicht mit anderen Technologien vergleichbare Evaluierung geschaffen.

Die Berechnung der entstehenden Kosten wurde ebenfalls mittels eines ganzheitlichen Ansatzes durchgeführt, wobei die TCO analysiert wurden. Die TCO beinhalten alle relevanten Kostenpunkte der Anschaffungs- sowie direkten und indirekten Betriebskosten. Diese wurden in Anlehnung an die DIN 60300-3-3 errechnet. Dazu wurden Erfahrungswerte aus den Vorgängervorhaben gesammelt und einbezogen.

Die Recherche von Informationen und die Auswahl von Methoden zur Analyse der Wirkungsabschätzung erfolgte stets vor dem Hintergrund wissenschaftlich fundierter Praxis. Wann es im Rahmen des Forschungsvorhabens möglich war, wurden Primärdaten verwendet bzw. erhoben. So wurden z. B. ergänzende Verkehrszählungen in Lauenburg durchgeführt. Auf Sekundärdaten bzw. Richtwerte aus Literaturquellen wurde nur dann zurückgegriffen, wenn Primärdaten nicht verfügbar waren oder der Aufwand der Beschaffung nicht angemessen war. Sekundärdaten wurden gegenüber den Richtwerten priorisiert. Die Ergebnisse aus den vorangegangenen TaBuLa-Vorhaben sind als bevorzugte Quelle in die Wirkungsabschätzung eingeflossen. Fragestellungen bezüglich der ÖPNV-Fahrzeuge wurden nach Möglichkeit direkt mit der vhh.mobility geklärt. Die Recherche hinsichtlich der Transportroboter erfolgte in enger Abstimmung mit dem ITL. Die Informationen zur Leitstelle wurden in Kooperation mit der Interlink GmbH erarbeitet.

## 5 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

Tabelle 5.1: Wirtschaftliche Verwertung Teilvorhaben A–C

Ergebnis des Vorhabens/Inhalt	Nutzen/Verwertung
Konzeptionierung Leitstelle und Technische Aufsicht	Schärfung der Geschäftsfeldentwicklung der Interlink GmbH
KI-Modellentwicklung	Erweiterung der Geschäftsfeldentwicklung der Palaimon GmbH

Tabelle 5.2: Wissenschaftlich/technische Verwertung Teilvorhaben A–C

Ergebnis des Vorhabens/Inhalt	Nutzen/Verwertung
Studentische Arbeiten	Insgesamt konnten <ul style="list-style-type: none"> <li>– vier Qualifikationsarbeiten in der Verkehrsplanung und Logistik sowie</li> <li>– acht Qualifikationsarbeiten in der Technischen Logistik</li> </ul> im Rahmen des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus abgeschlossen werden. Die Studierenden in diesen Gebieten waren in der Lage, neue Qualifikationen zu erlangen.
Lehrveranstaltungen	Kenntnisse zur Automatisierung sind in den Veranstaltungen Technische Logistik sowie Logistik und Automatisierung am Institut für Technische Logistik eingesetzt worden. Überdies wurden Inhalte zur mikroskopischen Simulation im Rahmen der Veranstaltung Verkehrsmodellierung sowie der Vorlesung Systemtheorie und Planungsanalyse am Institut für Verkehrsplanung und Logistik vermittelt.
Erfahrungsaustausch	Es fand ein umfangreicher Wissenstransfer/-austausch mit anderen Projekten statt, beispielsweise mit AHOI, myLOG MOL, AMEISE, MoVMi, neomind, R4R, efeuCampus Bruchsal, Schaufenster: KI für die Mobilität der Zukunft auf Basis von Plattformökonomie.
Fachveröffentlichungen	Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden bis zum Ende der Laufzeit diverse Artikel in Fachzeitschriften veröffentlicht (siehe dazu Kapitel 7.1). Es sind weitere in Planung.
Fachkonferenzen	In Kapitel 7.2 ist eine Liste der Veranstaltungen zu finden, an denen teilgenommen wurde.

## 6 Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplans

### Integration von bereits vorhandenen Daten in das Vorhaben

Zur Replikation des Lauenburger Verkehrssystems entlang der Linie 338 innerhalb der Simulationssoftware Aimsun wurde auf Daten aus Verkehrszählungen zurückgegriffen. Die Datensätze wurden von der Yunex GmbH sowie vom Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr in Schleswig-Holstein bereitgestellt. Dazu wurden Daten zum Verkehrsaufkommen über die Website der Bundesanstalt für Straßenwesen abgerufen (BASt 2024). Im Umfang enthalten sind mehrere Verkehrszählstellen, die entlang der Bundesstraße 209 und des Büchener Wegs errichtet sind.

### Durchgeführte Datenerhebungen im Rahmen des Vorhabens

Zur Ergänzung der Verkehrsdaten für die Simulation wurden an weiteren Standorten innerhalb der Stadt Lauenburg/Elbe Verkehrszählungen durchgeführt. Abbildung 6.1 zeigt die Punkte A bis J, an denen zusätzlich Verkehrszählungen vorgenommen wurden. Diese Daten wurden ebenfalls genutzt, um die Qualität der bereits vorhandenen Verkehrsdaten zu verbessern. Bei der Erhebung wurden Verkehrskameras des Typs Miovision Scout verwendet. Die Bilddaten wurden anschließend in 15-minütigen Intervallen hinsichtlich der Anzahl an Fahrzeugen und Fußgänger\*innen ausgewertet.

Abbildung 6.1: Standorte ergänzender Verkehrszählungen (Karte abgerufen über Google Maps)



Quelle: Bilder © 2025 Airbus, GeoContent, Maxar Technologies, Kartendaten © 2025 GeoBais-DE/BKG (©2009), Google

Die folgende Tabelle zeigt exemplarisch die Ergebnisse für den Standort D während des Zeitintervalls 06:30 Uhr bis 09:30 Uhr.

Tabelle 6.1: Exemplarische Übersicht zu den Resultaten der Verkehrszählungen

Zeitabschnitt	Pkw	Lkw	Bus	Motorrad	Fahrrad	Fußgänger*innen
06:30–06:45	10	0	1	0	1	1
06:46–07:00	7	0	0	0	0	1
07:01–07:15	7	1	0	0	0	6
07:16–07:30	8	0	0	0	0	2
07:31–07:45	9	0	0	1	2	2
07:46–08:00	9	0	0	0	1	4
08:01–08:15	14	0	0	0	3	1
08:16–08:30	4	1	0	0	0	2
08:31–08:45	11	2	0	0	1	3
08:46–09:00	3	3	1	1	0	8
09:01–09:15	4	1	0	0	2	16
09:16–09:30	5	2	0	0	2	7
<b>Summe</b>	<b>91</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>53</b>
<b>Gesamtsumme</b>	<b>105</b>					<b>65</b>

Die Messungen wurden im Zeitraum vom 11.09.2023 bis 15.09.2023 durchgeführt. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Tage und Zeiträume der durchgeführten Erhebungen.

Tabelle 6.2: Übersicht der Zeiträume für die Verkehrszählungen

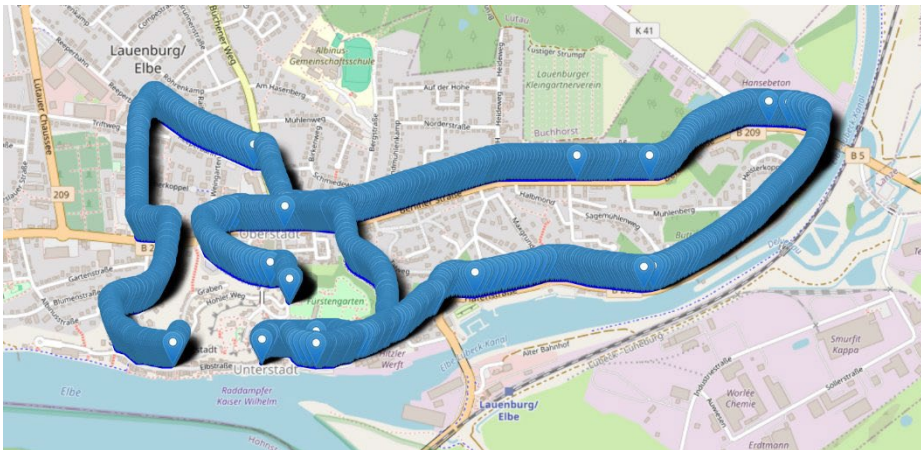
Standort	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<b>Datum</b>	11.09.	12.09.	13.09.	14.09.	15.09.	11.09.	12.09.	13.09.	14.09.	15.09.
<b>Zeitraum</b>	17:00-20:00	06:30-20:00	06:30-20:00	06:30-20:00	06:30-13:30	17:00-20:00	06:30-20:00	06:30-20:00	06:30-20:00	06:30-13:30

Die Verkehrszahlen wurden in die Verkehrssimulation integriert, um ein möglichst genaues Abbild des vorherrschenden Verkehrssystems zu gewährleisten.

Zum Entwickeln der Bus-Anwendung außerhalb der Stadt Lauenburg/Elbe wurden GPS-Daten einer Rundfahrt aufgenommen. Mittels der GPS-Daten konnte eine Busfahrt simuliert werden, indem die aufgenommenen Koordinaten von der Bus-Anwendung als aktuelle Bus-Position verarbeitet wurden.

Die Route führt entlang einiger Haltestellen der Linie 338, die zu Testzwecken von Ein- und Ausstiegsprozessen aufgezeichnet wurden. Die folgende Abbildung 6.2 veranschaulicht die aufgenommene Strecke. Jede blaue Standortmarkierung entspricht einem Messpunkt.

Abbildung 6.2: Aufgenommene GPS-Koordinaten zur Simulation der Bus-Anwendung (Karte abgerufen über OpenStreetMap)



Quelle: Hintergrundkarte von [openstreetmap.org](https://openstreetmap.org/)/copyright

Chronologisch beginnt die Datenaufzeichnung am Fürstengarten und endet am Kirchplatz. Die Daten sind im Format Längen- und Breitengrad aufgezeichnet.

Des Weiteren wurde, wie untenstehend beschrieben, eine Punktwolke des TU-Campus mit dem ROS-2-Standard durch die Transportroboter aufgenommen.

### **Veröffentlichung und Verarbeitung neu erhobener Datensätze**

Die erhobenen Verkehrszahlen werden der Yunex GmbH und dem Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr in Schleswig-Holstein zur Verwendung und möglichen Veröffentlichung übergeben.

Darüber hinaus kann die zum Testen der Bus-Anwendung aufgenommene Route zum Test der Anwendung verwendet werden. Dazu sind die GPS-Koordinaten im in Kapitel 2.3.2 verlinkten *GitLab Repository* verlinkt.

### **Forschungsdatenmanagement und *Open Data***

Hinsichtlich Forschungsdatenmanagement und *Open Data* hat sich das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus zum Ziel gesetzt, alle generierten forschungsrelevanten Daten, die sich auf die Transportroboter, den Bus und die Infrastruktur beziehen, spätestens mit Ablauf des Forschungsvorhabens *Open Access* auf der bereits bestehenden Plattform TORE der TUHH bereitzustellen.

Im Hinblick auf Forschungsdaten mit Bezug zum Transportroboter konnte die gleichzeitige Lokalisierung und Kartierung, bekannt als *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), als eine der zentralen Herausforderungen für autonom fahrende mobile Roboter identifiziert werden. SLAM ermöglicht es Robotern, Karten ihrer Umgebung zu erstellen und gleichzeitig ihre Position innerhalb dieser Karten zu bestimmen. Daraus resultieren dementsprechend Karten und Robotertrajektorien. Verschiedene Ansätze adressieren diese Herausforderung, wobei insbesondere LiDAR-basierte und kamerabasierte SLAM-Anwendungen im Fokus moderner Roboternavigation stehen.

Für die Entwicklung und Verfeinerung von SLAM-Algorithmen sind umfassende Datensätze erforderlich, die unterschiedliche Umgebungen abbilden und eine zuverlässige Referenzgröße (*Ground Truth*) für die aus den Algorithmen resultierenden Karten und Trajektorien bereitstellen, um die zu bewertenden Algorithmen adäquat bewerten zu können. Viele der bereits existierenden Datensätze fokussieren sich entweder auf Objekterkennung oder Anwendungsfälle im Rahmen des autonomen Fahrens. Daher fehlt es an Datensätzen, die speziell die Herausforderungen autonomer Lieferroboter auf Gehwegen (*Sidewalk Autonomous Delivery Robots*, SADR) im öffentlichen Raum adressieren.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein neuartiger Sensordatensatz aufgezeichnet und für die Veröffentlichung aufbereitet, der speziell für das Training und die Evaluierung verschiedenartiger SLAM-Algorithmen in öffentlichen Fußgängerbereichen ausgelegt ist. Als Aufnahmegebiet dient der Universitätscampus der TUHH, da dieser über diverse öffentliche Fußgängerbereiche mit unterschiedlichen Beschaffenheiten verfügt (z. B. wechselnde Vegetation und Bebauung, Steigungen, Bodenunebenheiten).

Der Datensatz enthält einerseits eine kontinuierliche Referenztrajektorie und andererseits eine hochgenaue 3D-Punktwolke, die eine präzise Evaluation von Algorithmen ermöglichen. Die 3D-Punktwolke, die mithilfe terrestrischer Laserscanner (Modelle Faro Focus S70 und Faro Focus Premium) aufgenommen wurde, wird mit einer Auflösung von einem Zentimeter bereitgestellt. Der erfasste Campusbereich umfasst eine Fläche von 559 Metern Länge und 247 Metern Breite (siehe Abbildung 6.3). Hierfür wurden insgesamt 125 einzelne Laserscans erstellt, die mithilfe künstlicher Marker in Form von Kugeln in einer Nachbearbeitungsphase zu einer zusammenhängenden Punktwolke verbunden wurden (siehe Abbildung 6.3). Die erfassten Daten wurden datenschutzkonform anonymisiert und darüber hinaus bereinigt, indem beispielsweise Reflexionen sowie dynamische oder temporäre Hindernisse entfernt wurden. Anschließend wurden sie auf der Plattform TORE veröffentlicht (Thiel et al. 2023a). Die aufgezeichnete Punktwolke (siehe Abbildung 6.4) wurde in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Labor der HafenCity Universität Hamburg durch Tachymeter-Referenzmessungen validiert. Hieraus resultierte eine maximale Abweichung zwischen Referenzpunkten in der Punktwolke und der tachymetrischen

Messung von fünf Zentimetern, was hinsichtlich der Gesamtkartenlänge von 559 Metern einer maximalen globalen Abweichung von weniger als 0,01 Prozent entspricht.

Abbildung 6.3: Terrestrischer Laserscanner, Kugel-Targets und die Scanpositionen des gesamten Scans

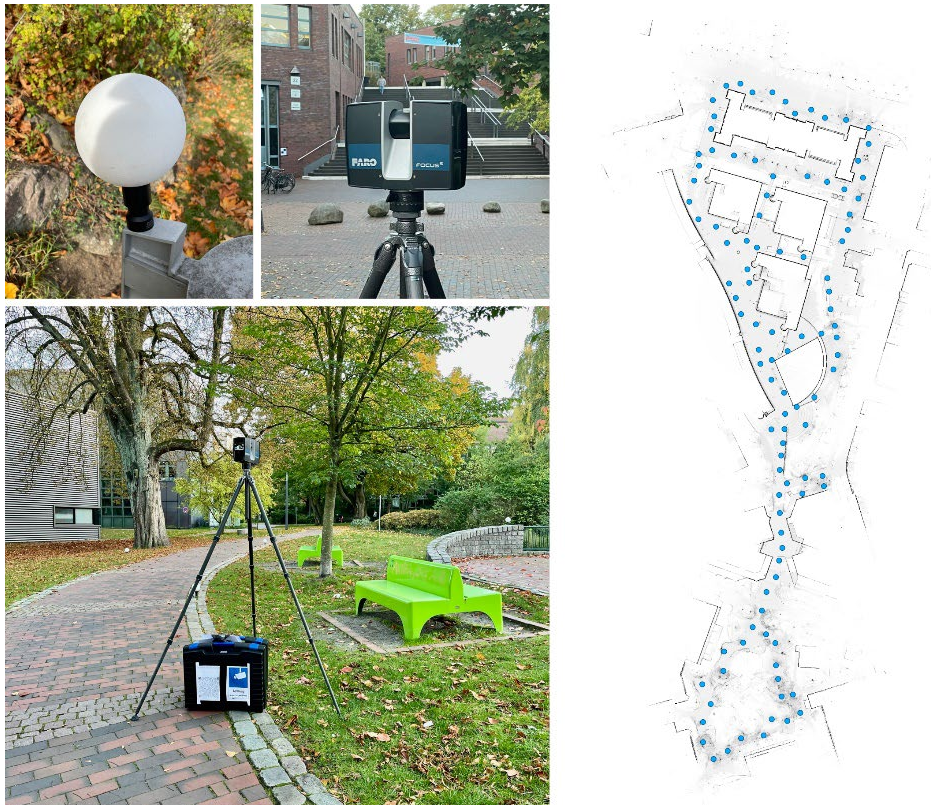


Abbildung 6.4: Ansicht des nördlichen Teils der gesamten Punktwolke in der Software Faro Scene



Für die bereitgestellte Referenztrajektorie wird die 3D-Punktwolke direkt mit den aufgenommenen Roboterdaten verrechnet, indem ein kontinuierliches Optimierungsverfahren angewendet wird (Nguyen et al. 2024). Dabei wird die Verzerrung der entstehenden Roboterkarte, die durch Bewegungen während der Aufnahme entsteht, explizit berücksichtigt.

Die aufgenommenen Roboterdaten bestehen aus verschiedenen Sequenzen, die in drei unterschiedlichen Bereichen des Campus mit einem der Transportroboter aufgenommen wurden. Die Sensordaten umfassen ein 3D-LiDAR, eine passive Stereokamera, eine auf den Boden gerichtete aktive Stereokamera, eine *Inertial Measurement Unit* (IMU), Radsensoren sowie ein RTK-GNSS-System. Alle Daten wurden im ROS-2-Bag-Format aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Segmente umfassen einen bewachsenen Park mit Teich, einen modernen Campusbereich und Bereiche mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen.

Der Datensatz wird gemeinsam mit einem zugehörigen Paper als Open Source zur Verfügung gestellt (Ziegenbein et al. 2025). Alle weiteren aufgenommenen Roboterdaten werden datenschutzkonform vernichtet, sobald sie nicht mehr benötigt werden. Für die Open-Source-Datensätze ist eine dauerhafte Verfügbarkeit über die TORE Plattform sichergestellt. Die Sensordaten und auch die 3D-Punktwolke dienen dazu, ein digitales Abbild eines mobilen Roboters in einem realen Testbereich zu erschaffen. Damit können Algorithmen zur Lokalisierung und das Mapping getestet werden, ohne dass die Beschaffung einer eigenen Roboterplattform nötig ist. Außerdem können die Daten der verbauten Sensoren genutzt werden, um deren Eignung für angestrebte Projekte beurteilen zu können.

Im Rahmen einer Kooperation mit der Königlichen Technischen Hochschule (KTH) in Stockholm wurde eine geringer aufgelöste Version der erstellten 3D-Punktwolke in einem Multicampus-Datensatz bereits zur Verfügung gestellt. Dieser Datensatz dient ebenfalls als wertvolles Werkzeug für den Vergleich von SLAM-Algorithmen, wurde jedoch im Vergleich mit dem hier angestrebten Datensatz nicht mit einem Roboter aufgezeichnet, sondern mit einem in der Hand gehaltenen Sensoraufbau. Zusätzlich wurden auf Teilen des KTH-Campus in Stockholm Punktwolken und Roboter-Sensordaten aufgenommen. Der daraus entstandene Multicampus-Datensatz wurde bei der IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2024 (CVPR) eingereicht und 2024 veröffentlicht (Nguyen et al. 2024). Die Punktwolke des Datensatzes ist als Open Source zugänglich (Thiel et al. 2023a).

Die in Kapitel 2.3.2 beschriebene Busanwendung wurde auf Grundlage von Open-Source-Services und -Frameworks entwickelt. Alle zugehörigen Dokumente werden in Form eines *GitLab Repository* der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die enthaltenen Programmcodes können nach CC-BY-Lizenz weiterverwendet werden. Die Anwendung wurde, wie auch die Leitstelle, aufbauend auf dem VDA-5050-Standard geschrieben. Die zugehörige Datei „Requirements.txt“ gibt die zur Ausführung der Anwendung notwendigen Schritte wieder. Das *Repository* enthält ebenfalls ein einfaches *gRPC Server Mock-up*, mit dem die Anwendung auch ohne Leitstelle getestet werden kann.

## 7 Durchgeführte öffentlichkeitswirksame Maßnahmen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten und noch geplanten öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen sowie ihr vorhabenbezogener Mehrwert dargestellt.

### 7.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Tabelle 7.1: Veröffentlichungen im unmittelbaren Rahmen des Forschungsvorhabens

Titel	Datum	Ort
Mobile Roboter auf dem Gehweg – Rechtlicher Kontext und resultierende Anforderungen für die Automatisierung der letzten Meile	03/2023	30. Deutscher Materialflusskongress Kongressband 2023
Mobile Robots on Sidewalks: Legal Context and Resulting Requirements for Autonomous Last-Mile Delivery in Germany	05/2023	ICRA Workshop MACTAS
3D Point Cloud of the Main Campus of Hamburg University of Technology (5 cm subsampled)	05/2023	TUHH Open Research (TORE)
Bridging the Normative Gap: Standardization for Sidewalk Robots in a World of Self-Driving Cars, Personal Robots and Automated Industrial Vehicles	06/2023	ICRA Workshop Lab-to-Real Gap
From Concept to Reality: Developing Sidewalk Robots for Real-World Research and Operation in Public Space	09/2023	Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2023
Rapid Prototyping and Deployment of Real-Time Multi-Object Tracking Solutions on Edge Devices	09/2023	Abstract angenommen
Konzeption einer Leitstelle für einen kombinierten Personen- und Gütertransport im ÖPNV mit autonomen Shuttles und Transportrobotern	05/2024	Journal für Mobilität und Verkehr
Localizing semi-static objects in AMR applications: A comparison of sensors and algorithms	10/2024	Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2024
MRCDD - Mobile Robot Campus Dataset for Evaluating SLAM Algorithms on Wheeled Robots	XX/2025	Eingereicht bei: IEEE Robotics and Automation Practice (RA-P)

Tabelle 7.2: Veröffentlichungen im Umfeld des Forschungsvorhabens

Titel	Datum	Ort
Applying 3D Object Detection from Self-Driving Cars to Mobile Robots: A Survey and Experiments	05/2023	2023 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)
Toward a Robust Sensor Fusion Step for 3D Object Detection on Corrupted Data	09/2023	IEEE Robotics and Automation Letters (Volume: 8, Issue: 11, November 2023)
MCD: Diverse Large-Scale Multi-Campus Dataset for Robot Perception	03/2024	The IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2024

## 7.2 Veranstaltungen und Vorträge

Tabelle 7.3: Vorträge

Titel	Datum	Ort
Vortrag auf der EuroSciPy in Basel (Palaimon GmbH)	31.08.2022	Basel (Schweiz)
Regionalkonferenz der Metropolregion Hamburg	19.01.2023	Hamburg
Vortrag bei der Uni Kassel zum Thema „Autonomes Fahren im ÖPNV – wo geht die Reise hin und wo sind wir gerade?“ im öffentlichen Seminar Verkehrswesen in der Veranstaltungsreihe „Vernetztes und automatisiertes Fahren – und schon bald autonom?“	04.05.2023	Kassel
„What may automation cost? Activity-based costing for autonomous transport in urban logistics“	19.06.2023	
Vortrag bei der Hans-Böckler-Stiftung: „Autonomes Fahren, die Zukunft des ÖPNV – Gestaltung der zukünftigen Infrastruktur für autonome Verkehrsnetze	04.03.2023	Hamburg
Vortrag bei der CMUS: Spaces for urban logistics	24.08.2024	Aalborg
Vortrag bei der Climate Week: Smart and innovative last-mile deliveries – An emission comparison for autonomous post-delivery robots that take the bus	22.10.2024	Barcelona
Vortrag bei der European Transport Conference: Life Cycle Assessment Twin Comparison: Evaluating the CO2e Impact of Battery-Electric and Diesel Heavy-Duty Trucks through real-world Freight Company Driving and Energy Data	20.09.2024	Antwerpen

Tabelle 7.4: Teilnahme an Veranstaltungen

<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>
Mobilität in Hamburgs Süden	26.01.2023	Harburg
7. Zukunftskongress Autonomes Fahren im öffentlichen Verkehr, veranstaltet von der VDV-Akademie	27.03.2023–28.03.2023	Berlin
KoTAM-Auftaktveranstaltung	14.06.2023	Ludwigshafen
Abschlussveranstaltung aBUS Iserlohn – New Mobility Lab	16.06.2023	Iserlohn
TACHELES-Konferenz 2023	05.07.2023	Karlsruhe
HOLON-Veranstaltung	06.07.2023	Berlin
Women in Mobility bei Civity	11.07.2023	Hamburg
FLASH-Veranstaltung	12.09.2023	Schkeuditz
5G-Kongress	21.09.2023	Braunschweig
Bus World Europe	9.10.2023–10.10.2023	Brüssel
Thementag „Autonomes Fahren als innovative Lösung für den ÖPNV im ländlichen Raum – das GINEVRA Projekt“	15.11.2023	Bad Schönborn
Hamburg Mobility Forum	29.11.2023	Hamburg
Netzwerkveranstaltung Intelligent Move	17.06.2024	Karlsruhe
TACHELES-Konferenz 2024	18.06.2024	Karlsruhe
Abschlussveranstaltung GAIA-X	14.11.2024	Hamburg

### 7.3 Pressemitteilungen

Tabelle 7.5: Pressemitteilungen

Titel	Datum	Ort
Startschuss für TaBuLa-LOGplus	16.05.2022	Interlink-Verkehr.de
Startschuss für TaBuLa-LOGplus: Auftakt für die smarte Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse in der Stadt Lauenburg/Elbe	03.06.2022	Hamburg.de
Startschuss für TaBuLa-LOGplus	22.06.2022	Kreis Herzogtum Lauenburg
Auftakt für die smarte Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse in der Stadt Lauenburg	22.06.2022	Herzogtum direkt
Transportroboter Laura soll in Lauenburg „sehen“ lernen	02.07.2022	Lauenburgische Landeszeitung
Mit Laura ist bewiesen: Die kombinierte Personen- und Güterbeförderung im automatisiert fahrenden ÖPNV kann funktionieren	05.07.2022	Kreis Herzogtum Lauenburg
Automatisierter ÖPNV: Waren und Fahrgäste zugleich transportieren	08.07.2022	Logistik Heute
„Kombinierter Verkehr“: Wenn der Transportroboter den Bus nimmt	08.07.2022	Logistra
Transportroboter: Laura fährt mit dem Bus	08.07.2022	Transport
Startschuss für TaBuLa-LOGplus: Auftakt für die smarte Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse in der Stadt Lauenburg/Elbe	08.07.2022	TUHH
Autonomes Fahren: 13 Pilotprojekte haben Potenzial für den echten Straßenverkehr	01.08.2022	heise online
Transportroboter Laura rollt weiter – jetzt mit KI-Unterstützung	04.08.2022	Hamburger News
Aufbau einer smarten Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse	19.08.2022	Camo.nrw
Nächster Halt: Fahrerlos	07.10.2022	TUHH Spektrum
Was Transportroboter „Laura“ in Lauenburg alles gelernt hat	18.01.2023	Lauenburgische Landeszeitung
Pressemitteilung: Startschuss für TaBuLa-LOGplus	22.06.2023	Website Kreis Herzogtum Lauenburg
Kurios: Wartet ein Roboter auf den Linienbus ...	18.06.2024	Lauenburgische Landeszeitung
KI in Lauenburg Roboter „Laura“ lernt sehen und nimmt nun den Bus	23.10.2024	Hamburger Abendblatt

#### 7.4 Weitere öffentlichkeitswirksame Maßnahmen

Der Podcast mit dem Titel „Niemand am Steuer – Der Podcast über Autonomes Fahren in der Stadtplanung“ wurde im April 2023 veröffentlicht. Sandra Tjaden und Marko Thiel vom Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus sprechen in einer der zehn Folgen über die Integration autonomer Transportroboter in den ÖPNV sowie das Forschungsvorhaben. Der Podcast ist auf allen gängigen Podcast-Websites zu finden.

Im August 2023 stellte Radio Hamburg das Thema „Roboter im Alltag“ vor. Als Gast informierte Justin Ziegenbein über Lieferroboter und das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus.

Die Website der Vorgängervorhaben (<https://www3.tuhh.de/vpl/tabula/>) wurde durch Informationen zu TaBuLa-LOGplus ergänzt und laufend in Bezug auf den aktuellen Stand aktualisiert.

Im Oktober 2024 wurde während des dritten Testfeldbetriebs ein Imagevideo gedreht. Im Film wird die Entwicklung von TaBuLa über TaBuLa-LOG bis zum jetzigen Vorhaben TaBuLa-LOGplus plus beschrieben. Das Video wird auf dem YouTube-Kanal des ITL sowie auf der Website des Vorhabens und über Social-Media-Kanäle veröffentlicht.

## 8 Fazit und Ausblick

Im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus wurden in den unterschiedlichen Themenfeldern rund um die Leitstelle für einen kombinierten Verkehr für autonome Transportroboter und Shuttles verschiedene Erkenntnisse gewonnen, welche in den folgenden Unterkapiteln aufgezeigt werden.

### 8.1 Ergebnisse und Zielerreichungsgrad

#### **Leitstellenkonzeption**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde erfolgreich ein umfassendes Konzept für eine Leitstelle entwickelt, welche die hier im Vorhaben identifizierten praxisrelevanten Anforderungen aller einbezogenen Stakeholder\*innen erfüllt. Die Anforderungen wurden in einem initialen Workshop basierend auf Erfahrungen aus vorherigen Vorhaben und der Zusammenarbeit mit externen Partner\*innen identifiziert. Die Leitstelle soll die Kontrolle durch technologische Aufsichtsfunktionen übernehmen und einen sicheren, datenschutzkonformen Betrieb gewährleisten. Das entwickelte Schnittstellenmanagement zwischen den Systemkomponenten Leitstelle, Roboter und Bus bildet die Basis für die effiziente Integration und Synchronisation aller Agenten, einschließlich Transportrobotern und eines ÖPNV-Busses in die Leitstelle. Weitere Schwerpunkte des Umsetzungs-konzepts für die prototypische Leitstelle sind die Mobilfunkanbindung sowie nutzungsfreundliche Oberflächen. Diese Aspekte tragen maßgeblich zur Erreichung der Ziele im Rahmen von TaBuLa-LOGplus bei.

#### **Roboterentwicklung, Genehmigung und Zulassung sowie Testfeldbetrieb**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten signifikante Fortschritte bei der Entwicklung und Implementierung von zwei Transportrobotern des Typs Laura erzielt werden. Das Ziel, diese in Richtung SAE-Level 4 weiterzuentwickeln, konnte über die Minimierung der notwendigen Eingriffe des Begleitpersonals realisiert werden. Laut den erneuerten Gutachten benötigen die Roboter bei automatisierter Fahrt nun lediglich eine Begleitperson, zuvor waren dies zwei. Außerdem traten während der Testbetriebe keine Situationen auf, die ein Eingreifen der Begleitperson erforderten. Die Roboter basieren nun auf dem neuesten Softwarestand (Ubuntu 22.04 und ROS 2) und sind somit längerfristig für weiter Testbetriebe nutzbar. Aufgrund dieses Schritts und der Parametrierung zahlreicher Algorithmen rund um die globale und lokale Navigation der Roboter weisen die Roboter ein sicheres

Fahrverhalten auf, das durch ein hohes Zuverlässigkeitslevel im automatisierten Betrieb charakterisiert ist. Diese Eigenschaften konnten in Begutachtungen und Genehmigungen zuständiger Prüforganisationen und Behörden nachweisbar dokumentiert werden. Die Reduktion der Eingriffe des Begleitpersonals haben die Effizienz und Autonomie der Roboter signifikant verbessert.

Ein weiterer Meilenstein war die Integration der Kommunikationsschnittstelle mit einer Leitstelle, von der die Roboter Aufträge annehmen konnten, um sie automatisiert auszuführen, aus der Ferne überwacht sowie automatisiert in Busse ein- und aussteigen konnten. Diese Funktion stellt einen entscheidenden Schritt in Richtung einer flexiblen und nahtlosen Integration mobiler Transportroboter in bestehende Verkehrssysteme dar.

Die Roboter wurden umfassend vom TÜV Nord geprüft. Im Zuge dieser Überprüfung wurde eine Nachtragsbewertung vorgenommen, die zur Erlangung einer Ausnahmegenehmigung nach § 70 StVZO führte. Diese Genehmigung erlaubt Abweichungen von den Bau- und Betriebsvorschriften gemäß § 30 ff. StVZO. Zudem erhielten die Roboter eine Ausnahmegenehmigung nach § 46 StVO (Straßenverkehrsordnung), die ihnen als Kraftfahrzeug das Befahren von Gehwegen gestattet.

Diese Genehmigungen waren das Resultat intensiver Demonstrationen und Prüfungen im Realbetrieb in Lauenburg. Ergänzend wurden die auf Sicherheit ausgerichteten Entwicklungsschritte erweitert, um den hohen Sicherheitsstandards gerecht zu werden. Insgesamt zeigen die erzielten Ergebnisse nicht nur die technische und regulatorische Machbarkeit der Transportroboter auf, sondern auch deren Potenzial, als integrale Bestandteile moderner urbaner Transportsysteme zu agieren.

### **Implementierung und Erprobung Leitstelle**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das entwickelte Konzept zur Leitstelle umgesetzt. Hierzu erfolgt die Entwicklung eines Leitstellenprototyps in Anlehnung an den VDA-5050-Kommunikationsstandard. Dieser Standard ermöglicht einen effizienten Austausch von Auftrags- und Statusdaten zwischen der Leitstelle und fahrerlosen Transportfahrzeugen, was Flexibilität und Interoperabilität innerhalb der Fahrzeugflotten unterstützt. Die Leitstellenfunktionalität wurde durch integrative Tests mit den Transportrobotern und der Busanwendung nachgewiesen. Dabei wurde auch die Fähigkeit zur Synchronisation und Koordination der Fahrzeuge gezeigt. Die erfolgreiche Implementierung und die Tests der Leitstelle und das Sicherstellen einer zuverlässigen, strukturierten Kommunikation zwischen den Systemen verdeutlichen einen hohen Zielerreichungsgrad. Dies bildet die Grundlage für den automatisierten Betrieb der Fahrzeuge.

### **Testfeldbetrieb**

Im Testfeldbetrieb wurden mit den Transportrobotern im Betriebsgebiet 20 623 m zurückgelegt. Durch die Tests ist es dem Konsortium des Forschungsvorhabens gelungen, die entwickelten Funktionen der Leitstelle sowie der eingebundenen Agenten zu validieren. Im Endeffekt konnten die notwendigen Eingriffe des Begleitpersonals signifikant reduziert und somit die Leistungsfähigkeit des Systems unter Beweis gestellt werden.

### **KI-basierte Umfelderkennung und KI-basierte Optimierung**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Konzepte für die KI-basierte Umfelderkennung und Optimierung entwickelt und umgesetzt. Zentral war die Entwicklung einer hochkonfigurierbaren Streaming-Analyse, die auf einem *Edge Device* ausgeführt wird. Die Kombination aus MOT-Tracking, Echtzeit-Datenanalyse und zeitreihenbasierter Anomaliedetektion ermöglicht eine robuste Objekterkennung und die Erkennung anomaler Verhaltensmuster in urbanen Umgebungen.

### **Betriebskonzept**

Das erarbeitete Betriebskonzept zeigt Ansätze für Verkehrs- und Logistikunternehmen auf und liefert Einblicke, wie ein Huckepackverkehr (bestehend aus Bus und Transportroboter) umgesetzt werden kann. Es wurden drei Modelle erarbeitet, die darlegen, wie der Betrieb einer Leitstelle für die Kombination von ÖPNV-Fahrzeugen und autonomen Transportrobotern erfolgen kann. Die Automatisierung der Linienbusse ist in den drei Modellen keine Voraussetzung für die Umsetzung.

### **Wirkungsabschätzung**

Die Wirkungsabschätzungen wurden mittels wissenschaftlich anerkannter Methoden in den Bereichen gesellschaftliche, verkehrliche, ökonomische und ökologische Folgen durchgeführt. Dazu wurden aktuelle Informationen gesammelt und nach bestem Wissen und Gewissen notwendige Annahmen getroffen. Innerhalb der verschiedenen Untersuchungsebenen wurden ganzheitliche Analysemethoden angewendet, um jeweils holistische und umfassende Ergebnisse zu erzielen. Die Wirkungsabschätzungen wurden abgeschlossen und die Resultate visualisiert und dokumentiert.

### **Simulation**

Das Lauenburger Verkehrssystem wurde detailliert mittels der Simulationssoftware Aimsun nachgebildet. Es wurde auf aktuelle Verkehrszählungen zurückgegriffen und, wenn notwendig, ergänzende Verkehrszählungen durch das Team des Forschungsvorhabens durchgeführt. Die Transportroboter wurden in enger Abstimmung mit dem ITL hinsichtlich des Fahrverhaltens in Aimsun nachgebildet. Verschiedene Szenarien wurden definiert, hinsichtlich

derer die Auswirkungen eines kombinierten Personen- und Gütertransports auf der Buslinie 338 untersucht wurden. Randomisierungstests wurden verwendet, um statistisch belastbare Effekte in den Bereichen Sicherheit und Folgen auf das vorherrschende Verkehrssystem, insbesondere die Buslinie 338, zu erhalten. Die Ergebnisse wurden abschließend visualisiert und dokumentiert.

### **Aufrüstung der Busse**

Die im Testbetrieb verwendeten manuellen Busse wurden mit einem Tablet inklusive einem GPS-Gerät ausgestattet. Für das Tablet wurde eine Desktop-Anwendung geschrieben, die dem Fahrpersonal ein GUI zur Interaktion mit der Leitstelle bereitstellt. Die entwickelte Anwendung befindet sich mit dem Ende im Status eines Prototyps, der speziell für den Testbetrieb entwickelt wurde. Die Ziele des Forschungsvorhabens – eine bidirektionale Einbindung des Busses in die Leitstelle sowie die automatisierte Abstimmung mit dem Transportroboter – wurden während des Testbetriebs reibungslos erreicht. Der entstandene Programmcode wurde bereinigt und kommentiert, um eine Weiterverwendung zu erleichtern.

## **8.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie Limitationen des Forschungsvorhabens**

### **Leitstellenkonzeption**

Das erstellte Leitstellenkonzept ist als Grundlage für andere Anwendungsfälle nutzbar, in denen eine Flotte heterogener Fahrzeuge genutzt wird (z. B. Lieferroboter, konventionelle und autonome Busse, unterschiedliche Schienenfahrzeuge etc.). Insbesondere wurden grundlegende Anforderungen an das Konzept aus den Perspektiven verschiedener Beteiligter, wie Anwendende, ÖPNV-Betriebe sowie Logistikunternehmen, gesammelt (z. B. personalisiertes Dashboard, Statusverfolgung etc.).

Die prototypische Umsetzung der Leitstelle weist Limitationen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf, da diese explizit für den Anwendungsfall des Forschungsvorhabens in Lauenburg entwickelt wurde. Es können zwar sehr heterogene Fahrzeuge eingebunden werden, die Machbarkeit eines Einsatzes im Betrieb mit großen Flotten aus Robotern und Bussen müsste jedoch näher betrachtet und geprüft werden. Das Umsetzungskonzept müsste hinsichtlich der dadurch identifizierten Anforderungen erweitert werden, um notwendige Anpassungen zu dokumentieren

### **Roboterentwicklung, Genehmigung und Zulassung sowie Testfeldbetrieb**

Die entwickelten Transportroboter vom Typ Laura bringen in vielerlei Hinsicht Übertragbarkeit für andere Anwendungsfälle mit sich. Es wurde gezeigt, dass die Roboter in der Lage sind, basierend auf Open-Source-Algorithmen automatisiert auf Fußwegen zu verkehren. Entsprechend sind die dabei erzielten Ergebnisse bezüglich Robotersteuerung vollständig auch auf andere Szenarien und Kontexte (z. B. Intralogistik) übertragbar. Zudem ist es möglich, die bei der Entwicklung und Ausstattung der Roboter mit Sensorik und Rechnern gesammelten Erfahrungen bei einer Neuentwicklung zu nutzen. Das Erreichen eines höheren Automatisierungsgrads auf Gehwegen im öffentlichen Raum ist auf dem aktuellen Entwicklungsstand nicht möglich, da gemäß den aktuell erlangten Genehmigungen bisher weiterhin eine Begleitperson vor Ort für die Überwachung der Roboter notwendig ist.

Der Genehmigungsprozess aus TaBuLa-LOGplus stellt beispielhaft dar, wie Roboter für den Forschungseinsatz eine Ausnahmegenehmigung für die autonome Fahrt im öffentlichen Raum erhalten können und wie sich weiterentwickelnde Fahrzeuge bewerten lassen. Es lassen sich Anforderungen an den Roboter und den Entwicklungsprozess ableiten, die für eine Genehmigung notwendig sind. Der Fokus lag hierbei stets klar im Rahmen eines Forschungsvorhabens auf prototypischen Fahrzeugen und der Erwartungshorizont war entsprechend reduziert verglichen mit einer Genehmigung für serienreife Roboter. Des Weiteren sind die im Prozess entstandenen Risikobetrachtungen stark auf das Einsatzgebiet in Lauenburg/Elbe beschränkt. Zusätzliche Aufwände bei Anwendung der AFGBV wurden nicht betrachtet. Die gesammelten Erkenntnisse lassen sich insofern auf weitere Anwendungsbereiche übertragen, als Sicherheitsaspekte eine essenzielle Rolle in allen Interaktionen zwischen mobilen Robotern und Menschen darstellen. Die spezifischen Anforderungen anderer Anwendungsbereiche (z. B. Intralogistik) mögen sich zwar von denen im öffentlichen Raum unterscheiden, der auf Sicherheit ausgerichtete Grundgedanke sowie die Betrachtung möglicher Gefahren und Risiken dahinter sind aber durchaus übertragbar.

Die Übertragbarkeit der gesammelten Erkenntnisse aus dem Testfeldbetrieb beschränkt sich auf allgemeinere Punkte. Ein Aspekt sind die gesammelten Erfahrungen mit instabiler Verfügbarkeit von LTE- oder 5G-Netzen, die eine dauerhafte und störungsfreie Überwachung der Roboter erschwert. Zusätzlich beschränkt sich das Testumfeld explizit auf ein Testgebiet in Lauenburg/Elbe. Eine Übertragbarkeit der Fahrfunktionen auf andere Bereiche ist möglich, aber nicht sicher.

### **Implementierung und Erprobung Leitstelle**

Die Ergebnisse der Implementierung und Erprobung der Leitstelle aus Sicht des Entwickelnden lassen sich insofern übertragen, als der *Proof of Concept* des Leitstellenkonzepts erbracht wurde. Es ist möglich, mit einer an den VDA-5050-Kommunikationsstandard angelehnten Leitstelle heterogene Fahrzeuge miteinander zu synchronisieren und Interaktionen zwischen den Fahrzeugen zu automatisieren. Da bisher lediglich mit zwei Transportrobotern und einem Bus getestet wurde, sind Aussagen zur Skalierbarkeit der Ergebnisse nur bedingt möglich und sollten zukünftig näher untersucht werden. Trotzdem kann die implementierte Leitstellenarchitektur für zukünftige Arbeiten im Bereich der Leitstellenkonzeptionierung als Basis verwendet werden.

Die Ergebnisse der Erprobung der Leitstellenoberfläche aus Sicht der Betreibenden werden in diesem Dokument beschrieben. Die aufgezeigten Punkte können aufgegriffen und bei der Entwicklung anderer, ähnlicher Programme einbezogen werden. Limitiert wurde die Erprobung durch die Nutzung eines einzelnen Transportroboter-Typs. Werden weitere Transportroboter in die Oberfläche eingebunden, so können weitere Tests zum Überwachungsschlüssel sowie zur Überwachung einer kompletten Flotte an Transportrobotern erfolgen.

### **KI-basierte Umfelderkennung und KI-basierte Optimierung**

Es ist davon auszugehen, dass KI-Methoden zunehmend angewandt werden und der Bedarf an KI-basierten Methoden zur Auswertung von Bewegungs- und Video-Daten im Verkehrsbereich zunimmt. Durch eine Übertragung in andere Bereiche, wie autonom fliegende Drohnen oder autonom fahrenden Fahren, ist eine Anwendung der Methoden in anderen Gebieten möglich.

### **Betriebskonzept**

Das Betriebskonzept liefert einen ersten Ein- und Überblick über den Huckepackverkehr und die Möglichkeiten, mit denen er umgesetzt werden kann. Im Forschungsvorhaben wurde eines der drei ausgearbeiteten Modelle erprobt. Eine Erprobung der anderen beiden Modelle kann in einem Folgevorhaben erfolgen.

### **Wirkungsabschätzung**

Die Wirkungsabschätzungen wurden, angelehnt an die Vorgängervorhaben und den Testbetrieb, für den Anwendungsfall innerhalb Lauenburgs durchgeführt. Für dieses Verkehrssystem, betrachtet in vier unterschiedlichen Szenarien, bilden die Ergebnisse eine sehr detaillierte Analyse der erwartbaren Effekte. Diese Ergebnisse können verwendet werden, um generalisierte Aussagen über die Anwendung des Robotersystems an anderen Standorten zu treffen. Mit den Resultaten in den Bereichen

Gesellschaft, Verkehr, Ökologie und Ökonomie wurden die Ziele des Forschungsvorhabens erreicht. Für die Übertragung auf andere Städte und Verkehrssysteme bedarf es einer Aktualisierung der geschaffenen Grundlagen.

### **Simulation**

Ähnlich wie die Wirkungsabschätzungen wurde die Simulation bezogen auf den vorherrschenden Anwendungsfall des Forschungsvorhabens sowie der Vorgängervorhaben in Lauenburg konzipiert. Dementsprechend gibt die Simulation eine sehr detaillierte Evaluation der zu erwartenden Verkehrseffekte wieder. Somit können grundlegende Aussagen für die Anwendung in anderen urbanen Räumen getätigt werden. Für eine exakte Analyse an anderen Standorten ist jedoch eine Anpassung an das jeweilige alternative Verkehrssystem erforderlich.

### **Aufrüstung der Busse**

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Busanwendung ist ein Prototyp. Eine massentaugliche und kommerzielle Nutzung würde einer Weiterentwicklung bedürfen. Es wurde darauf geachtet, die Programmierung unter Berücksichtigung gängiger Programmierstandards und -konventionen durchzuführen, um eine weitere Nutzung zu vereinfachen. Im verlinkten *GitLab Repository* kann die App heruntergeladen und eine Testversion ausgeführt werden. Zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit wurde der Programmcode kommentiert und erklärende Dateien beigefügt.

## **8.3 Anforderungen und Handlungsempfehlungen**

Die im Verlauf des Forschungsvorhabens erarbeiteten und im Schlussbericht aufgezeigten Ergebnisse münden in Handlungsempfehlungen, die in Folgevorhaben oder Anwendungen umgesetzt werden können. Dadurch ist es möglich, das Themenfeld rund um den Betrieb eines automatisierten und kombinierten Personen- und Güterverkehrs voranzubringen.

Das Management einer größeren, aus mehreren Transportrobotern und Bussen bestehenden Flotte bietet das Potenzial weiterer Untersuchungen: Durch eine größere Flotte ergibt sich die Möglichkeiten zu erproben, welche Anzahl an Transportrobotern und Bussen eine Person überwachen kann und wie diese übersichtlich und ohne Informationsverlust in der Leitstellenoberfläche angezeigt werden können.

Für die weitere Entwicklung eines wie im Forschungsvorhaben angestrebten Systems aus Leitstelle, Transportrobotern und ÖPNV-Bussen sollte die Zusammenarbeit aller beteiligten Parteien gegeben sein. Alle Komponenten des Systems sollten zusammenhängend betrachtet und entwickelt werden. Beteiligte Institutionen sollten in enger Abstimmung einheitliche Leitlinien definieren und sich laufend über den aktuellen Entwicklungsstand aktualisieren. Die im Vorhaben verwendeten Schnittstellenstandards und technischen Konventionen sollten beibehalten werden. Die notwendige Expertise zur Umsetzung des Systems erfordert die Zusammenarbeit von Personen mit verschiedenen Hintergründen, die ihr Wissen in den Bereichen ÖPNV und Robotik einfließen lassen.

Darüber hinaus sollten die verwendeten Hard- und Softwarekomponenten zugänglich evaluiert und wenn möglich erneut verwendet werden. Die Abstimmung von Hard- und Software, insbesondere bei der Entwicklung des Transportroboters, wurde mit großer Sorgfalt durchgeführt und ist das Resultat eines weitreichenden Prozesses der Evaluation und Abstimmung.

Vor der Einführung in einem neuen urbanen Raum sollte eine eingängige Machbarkeitsstudie erfolgen, um die Anforderungen und Effekte abzuschätzen. Dazu können die Ergebnisse des Vorhabens als Grundlagen dienen. Es bedarf insbesondere eines präzisen Studiums der praktischen Umsetzbarkeit sowie des ökonomischen Nutzens und der Sicherheit.

Aus dem Forschungsvorhaben ergeben sich auch Handlungsempfehlungen in Bezug auf die weitere Automatisierung der Transportroboter. Wie schon im Vorgängervorhaben erkannt, gilt es, eine personenlose, autonome Fahrt gemäß SAE-Level 4 der Transportroboter zu erreichen, da andernfalls ein Einsatz nicht wirtschaftlich realisierbar ist. Mit der Einführung der Leitstelle ist ein wichtiger Aspekt für die Reduzierung menschlicher Eingriffe vor Ort hinzugekommen, allerdings sind aus zulassungsrechtlichen Gründen bisher noch Begleitpersonen notwendig. Eine weitere Verbesserung der Selbstdiagnosefähigkeiten und der autonomen Fahrfunktionen ist als empfehlenswert anzusehen. Um auf eine Begleitperson vor Ort vollständig verzichten zu können, muss der Roboter beispielsweise in der Lage sein, eigenes Fehlverhalten oder Gefahrensituationen zu erkennen, und sich eigenständig in einen sicheren Zustand versetzen können, bis eine Begleitperson eintrifft, die aus der Leitstelle benachrichtigt wurde.

Zusätzlich ist die Erweiterung der Betriebsgebiete für automatisierte Fahrzeuge sinnvoll, da erfolgreiche Tests in möglichst unterschiedlichen Umgebungen zu einer höheren Ausfallsicherheit der automatisierten Fahrzeuge führen. Ebenfalls wäre ein Betriebsgebiet mit höherem Verkehrsaufkommen, wie z. B. Hamburg, interessant, um die Auswirkungen einer dynamischeren Umgebung auf die Funktionen der Roboter untersuchen zu können. Um eine Übertragung auf andere Betriebsbereiche zu erleichtern,

sollten Standards entwickelt und verfolgt werden, die feste Rahmenbedingungen für eine Zulassung beziehungsweise Genehmigung mobiler Roboter im öffentlichen Raum beinhalten. Ohne ein solches standardisiertes Vorgehen ist eine skalierte Umsetzung des hier entwickelten Systems nahezu ausgeschlossen.

Für eine sinnvolle Umsetzung von kombiniertem Verkehr ist es notwendig, die Infrastruktur im öffentlichen Raum anzupassen. Gerade für den kombinierten Verkehr mit radbasierten Robotern und ÖPNV muss Barrierefreiheit hergestellt werden. Für die Vernetzung von Fahrzeugen über eine Leitstelle ist zudem ein flächendeckender ausgebautes Mobilfunknetzwerk notwendig. Ein Ausbau neuer Mobilfunktechnologien (5G, 6G) außerhalb von Großstädten ist daher zu empfehlen. Hinzu kommt eine notwendige Vereinheitlichung von Schnittstellen, um möglichst viele heterogene Fahrzeuge in einer Leitstelle nutzen zu können.

Die Forschung im Bereich der situativen Wahrnehmung mittels KI bietet ein enormes Potenzial für die Entwicklung intelligenter Systeme, die in komplexen Umgebungen agieren können. Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen, sind folgende Handlungsempfehlungen zu beachten:

- Die Entwicklung robuster KI-Modelle erfordert umfangreiche und realitätsnahe Daten. Diese sollten vielfältige Szenarien abdecken und möglichst alle relevanten Aspekte der situativen Wahrnehmung berücksichtigen.
- Die Forschung sollte sich an konkreten Anwendungsfällen orientieren, um die praktische Relevanz der entwickelten Technologien zu erhöhen.
- Zudem ist es wichtig, dass KI-Modelle kontinuierlich lernen und sich an veränderliche Umgebungen anpassen können. Mechanismen für lebenslanges Lernen sind daher unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit von KI-Systemen langfristig zu gewährleisten.
- Ein interdisziplinärer Ansatz ist gewinnbringend. Die Kombination von KI-Expertise mit Wissen aus Bereichen wie Psychologie, Soziologie und den jeweiligen Anwendungsdomänen ermöglicht ein tieferes Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Mensch und Maschine sowie der Umgebung.

## 8.4 Ausblick

Das Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus und die darin entwickelten Roboter sowie die Leitstelle haben einige mögliche Anknüpfungspunkte hervorgebracht. Wie bereits im Fazit erwähnt ist bisher lediglich ein System mit zwei Robotern und einem Bus in einer Leitstelle untersucht worden. Für die Untersuchung der Eignung von Robotern im kombinierten Verkehr sowie der Bedienbarkeit der Leitstelle ist es notwendig, die Skalierbarkeit der entwickelten Lösung zu untersuchen. Dabei sollte ein besonderer Fokus auf Flotten- und Auftragsmanagement gelegt werden. Überdies sollten Untersuchungen zur Nutzungsfreundlichkeit vorgenommen sowie die skalierte Überwachung gewährleistet werden. So könnte beispielsweise die maximale Anzahl zu überwachender Roboter pro Leitstellenmitarbeiter\*in untersucht werden. Zur Überprüfung der Skalierbarkeit wäre auch die Erstellung einer Simulationsumgebung des umgesetzten Systems aus Leitstelle, Robotern und Bussen bzw. automatisierten Shuttles eine Option.

Eine weitere Möglichkeit der Anknüpfung ist die Übertragung des bestehenden Systems auf andere Betriebsgebiete, wie beispielsweise im urbaneren Raum der Stadt Hamburg. Hierbei sind zweierlei Aspekte zu untersuchen, zum einen Unterschiede und Übertragbarkeiten im Genehmigungsprozess aufgrund unterschiedlicher zuständiger Behörden. Zum anderen sind dies Herausforderungen bei der Übertragbarkeit der entwickelten Roboter- und Leitstellenfunktionen. So können erweiterte Anforderungen durch neue Betriebsbereiche (z. B. erhöhtes Personen- oder Verkehrsaufkommen) dazu führen, dass eine neue Auslegung der Roboter- oder Leitstellenfunktionen nötig ist. Auch die Kommunikation zwischen Robotern und ihrer Umgebung (z. B. mit Menschen oder Infrastruktur) sollte näher untersucht werden. Wie bereits im Absatz zuvor erwähnt sollte ein standardisierter Prozess zur Zulassung beziehungsweise Genehmigung mobiler Roboter im öffentlichen Raum entwickelt und etabliert werden.

Ein weiterer zu untersuchender Aspekt ist die Einbindung anderer heterogener Agenten in die Leitstelle mit verschiedenen Anwendungsfällen im öffentlichen Raum. Am Anwendungsfall dieses Forschungsvorhabens orientiert wären insbesondere kommerziell erhältliche, automatisiert fahrende ÖPNV-Shuttles oder andere Trägerfahrzeugtypen (z. B. S-Bahnen oder U-Bahnen) interessant. Darüber hinaus wären auch Erweiterungen der Leitstellenfunktionen denkbar, z. B. in Kombination mit modularen Robotern für verschiedene Tätigkeiten im öffentlichen Raum. Orientiert am Anwendungsfall von Transportrobotern wäre ein Szenario denkbar, in dem Roboter Letzte-Meile-Auslieferungen im urbanen Raum mit automatisierten Paket-Hubs als Ausgangspunkte durchführen. Neben Transporttätigkeiten wäre auch ein fahrender Sensoraufbau für die Messung von Luftreinheit bzw. Schadstoffen möglich. Auch Roboter, die automatisiert Computer-Vision-

basierte Analysen öffentlicher Flächen, wie z. B. Grünflächen oder Fußwege, hinsichtlich Verschmutzung, Barrierefreiheit, Gesundheit von Pflanzen oder Erosion von Böden durchführen, könnten zukünftige Erweiterungen darstellen. Ein weiterer Anwendungsfall eines modularen Roboters könnte die Analyse öffentlich zugänglicher Gebäude bezüglich gespeicherter recycelbarer Materialien oder Energieeffizienz basierend auf (Thermal-)Kamerabildern sein.

Auch die Untersuchung alternativer bodengebundener Roboterarten, wie z. B. Laufroboter, als weitere Agenten in der Leitstelle und im kombinierten Verkehr mit Bussen oder anderen ÖPNV-Gefäßen sollte zukünftig in Erwägung gezogen werden. Diese stellen auch im Hinblick auf eine Zulassung im straßennahen Verkehr und auf Gehwegen einen interessanter Anwendungsfall dar und können bei Bedarf auch in nicht barrierefreien Gebieten zum Einsatz kommen.

Die Forschung zur situativen Wahrnehmung mit KI steht an der Schwelle zu bahnbrechenden Entwicklungen. Durch die kontinuierliche Verbesserung von Algorithmen, die Verfügbarkeit immer größerer und vielfältigerer Datensätze sowie die zunehmende Rechenleistung wird es möglich, KI-Systeme zu entwickeln, die immer komplexere Aufgaben bewältigen können. Um diese Potenziale voll auszuschöpfen, ist es jedoch unerlässlich, die ethischen Implikationen der KI-Entwicklung im Blick zu behalten und sicherzustellen, dass KI-Systeme zum Wohl der Menschheit eingesetzt werden.

## Dokumentenbezogenes Literaturverzeichnis

- Aimsun (2024): Aimsun Next Benutzerhandbuch. Aimsun Next Benutzerhandbuch, <https://docs.aimsun.com/next/24.0.1/>.
- BASt (2024): Automatische Zählstellen 2022, <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html?nn=1817946>.
- Blitzrechner (2023): Online-Rechner: Stromverbrauch eines Laptops berechnen, <https://www.blitzrechner.de/laptop-stromverbrauch/>.
- BMDV (2021): Kooperatives Autonomes Fahren mit Sicherheitsgarantien – KoSi, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/kosi.html>.
- BMDV (2022a): Ready for Smart City Robots? Multimodale Karten für autonome Mikromobile – R4R, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/r4r.html>.
- BMDV (2022b): Robots are in town: Erfassung von Akzeptanzkriterien für den Einsatz von autonomen Mikromobilen – RoboTraces, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/robotraces.html>.
- BMDV (2022c): ÖV-Leitmotif-KI – ÖV-Leitmotif-KI, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/oev-leitmotif-ki.html>.
- BMDV (2023a): Integration von drei Autonomen Linien-BUSsen in der Region Hannover – ALBUS, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/albus.html>.
- BMDV (2023b): Automatisierung des Hamburger On-Demand-Angebots mit Integration in den ÖPNV – AHOI, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/ahoi.html>.
- BMDV (2023c): KI-basiertes System für vernetzte Mobilität – KIS'M, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/kis-m.html>.
- BMDV (2023d): Erhöhte Verkehrssicherheit mittels Intelligenter Detektionstechnologien – VIDETEC-2, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/videtec-2.html>.

- BMDV (2023e): Automatisierte Auswertung der Bilddaten von Verkehrskameras auf Autobahnen durch Anwendung aktueller KI-Algorithmen – KI\_CAM, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/ki-cam.html>.
- BMDV (2023f): Künstliche Intelligenz basierte Belegungsoptimierung im ÖPNV – Fahrbar20, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/fahrbar20.html>.
- BMDV (2023g): OpenTrainingData für automatisierte und autonome Mikromobile – OPTmicro, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/optmicro.html>.
- BMDV (2023h): Effizientes Straßenmanagement durch künstliche Intelligenz – DeepStreet-M, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/deepstreet-m.html>.
- Bundesfinanzministerium (2024a): AfA-Tabellen, [https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung-Steuerrecht/Betriebspruefung/AfA\\_Tabellen/afa\\_tabellen.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung-Steuerrecht/Betriebspruefung/AfA_Tabellen/afa_tabellen.html).
- Bundesfinanzministerium (2024b): KFZ-Steuer-Rechner, [https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps\\_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html).
- BPEX (2021): BIEK-Kompandium: Zahlen, Daten und Fakten der KEP-Branche, <https://bpex-ev.de/presse/meldung/die-meisten-pakete-pro-einwohner-gibts-in-m%C3%BCnchen-stuttgart-und-d%C3%BCsseldorf.html>.
- Capgemini Research Institute (2018): The last-mile delivery challenge, <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2019/01/Report-Digital-%E2%80%93-Last-Mile-Delivery-Challenge1.pdf>.
- DHL Group (o. J.): PREISE NATIONAL – Preise und Produkte für Ihren Versand deutschlandweit, <https://www.dhl.de/de/privatkunden/pakete-versenden/deutschlandweit-versenden/preise-national.html>.
- DHL Group (2023): 4 Möglichkeiten, Ihre Lieferleistung auf der letzten Meile zu verbessern, <https://www.dhl.com/discover/de-at/logistics-advice/import-export-advice/last-mile-solutions>.
- DHL Group (2024a): Nachhaltig. Wie DHL Group Treibhausgasemissionen reduziert, <https://group.dhl.com/content/dam/deutschepostdhl/de/media-center/responsibility/dhl-group-nachhaltigkeit-broschuere.pdf>.

- DHL Group (2024b): Konzernergebnisse Q4/GJ 2023 | DHL Group | Bilanzpressekonferenz, <https://group.dhl.com/content/dam/deutschepostdhl/de/media-relations/events/2024/annual-earnings-2023/dhl-group-media-presentation-fy-2023.pdf>.
- Dinar, Yousuf; Maaß, Jacqueline und Gertz, Carsten (2024): Zu einem grundlegenden Verständnis der mikroskopischen Transportsimulation von autonomen Lieferrobotern. *Zeitschrift für Straßen- und Verkehrstechnik*, 70 (2), 11–22, <https://doi.org/10.31075/PIS.70.02.02Aimsun>.
- DIN e. V. (1983): DIN 66001:1983-12 Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN e. V. (2005): DIN EN 60300-3-3:2005-03 Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN e. V. (2022): DIN EN ISO 14083:2022 Treibhausgase – Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen, Beuth-Verlag, Berlin.
- EurA AG (o. J.): FAQ. Projekt: Pläne, Partner, Orte, <https://www.naf-bus.de/faq-1/>.
- Europäische Zentralbank (2024): MFI-Zinsstatistik für den Euroraum: April 2024, <https://www.bundesbank.de/resource/blob/933636/c42e1f7dcfc42d2010f75382b8af22f7/mL/2024-06-05-mfi-zinsstatistik-download.pdf>.
- Fahrplanbuch online (2024): vhh mobility, Linie 338, <https://www.nimmbus.de/fahrplanbuch/plaene/338H-1.htm>.
- Frankfurt University of Applied Sciences (2023): Kombinom 2. Simulation als Entscheidungsunterstützungssystem zur Nutzung autonomer Kleinbusse im ländlichen Raum zum kombinierten Transport von Personen und Gütern, <https://www.frankfurt-university.de/de/hochschule/fachbereich-1/ffin/fachgruppen-des-ffin/relut/forschungsprojekte/kbinom-2/>.
- Flämig, Heike (2004): Güterverkehrssysteme in Verdichtungsräumen: Empirische Analysen, Umsetzungsprozesse, Handlungsempfehlungen.

- Gertz, Carsten; Kreuzfeldt, Jochen; Flämig, Heike; Hinckeldeyn, Johannes; Maaß, Jacqueline; Grote, Matthias; Tjaden, Sandra; Thiel, Marko; Schrick, Manuel; Stargardt, Julia; Michelmann, Holger; Wolf, Julia; Böckler, Liss; Rosenberger, Kerstin; Blunder, Noel; Ziegenbein, Justin; Purgander, Jana; Lohse, Julius und Weber, Lukas (2022): Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG. TUHH-Universitätsbibliothek, <https://doi.org/10.15480/882.4536>.
- Gestalt Robotics (2022): myLOG MOL. Ein 5G-gesteuertes Logistiksystem zur Stabilisierung des Einzelhandels, <https://www.gestalt-robotics.com/foerderprojekte/mylogmol>.
- gRPC (2024): A high-performance, open-source universal RPC framework, <https://grpc.io/>.
- Handelsblatt (2024): Tilgungsrechner – Tilgungsrate & Restschuld, <https://tilgung.rechner.handelsblatt.com/rechner3/handelsblatt2/tilgungsrechner>.
- Haug, Albert et al. (2019): PyBluez Dokumentation, <https://pybluez.readthedocs.io/en/latest/index.html>.
- Helbing, Dirk und Molnár, Péter (1995): Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review. E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 51 (5), 4282–4286, <https://doi.org/10.1103/physreve.51.4282>.
- Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) (2024): Gehweg Navi. Nutzbarmachung des Gehwegs für das autonome Fahren von Mikromobilen durch Erzeugung eines navigierbaren Datensatzes, <https://www.haw-hamburg.de/forschung/forschungsprojekte-detail/project/project/show/gehwegnavi/>.
- LardeMUA (2024): Atom Documentation, [https://lardemua.github.io/atom\\_documentation/](https://lardemua.github.io/atom_documentation/).
- Lee, Dong-Yeon; Thomas, Valerie M. und Brown, Marilyn, A. (2013): Electric urban delivery trucks: energy use, greenhouse gas emissions, and cost-effectiveness. *Environmental Science & Technology*, 47 (14), 8022–8030.
- Leipziger Verkehrsbetriebe (LBV) GmbH (2023): ABSOLUT II im Überblick, <https://absolut-projekt.de/absolut-2>.
- Lilling, Tim (2023): Online-Rechner: Stromverbrauch eines Laptops berechnen, <https://www.blitzrechner.de/laptop-stromverbrauch/>.

Middela, Mounisai Siddartha; Mahesh, Srinath; Kancharla, Surendra Reddy; Ramadurai, Gitakrishnan; Perme, Rokom; Sripada, Subrahmanya Kiran und Devi, Gayathri (2022): Complete LCA of battery electric and conventional fuel vehicles for freight trips. Transportation Research Part D – Transport and Environment, 110, 103398–103398.

MongoDB (2024): The Developer Data Platform,  
<https://www.mongodb.com/>.

Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG) (2024): Projekt MINGA. Automatisierung von Fahrzeugen im öffentlichen Nahverkehr,  
<https://www.mvg.de/ueber/mvg-projekte/bus/minga.html>.

Nav2 Documentation (2024): Navigation2 Documentation,  
<https://docs.nav2.org/>.

Nguyen, Thien-Minh; Yuan, Shenghai; Hoang Nguyen, Thien; Yin, Pengyu; Cao, Haozhi; Xie, Lihua; Wozniak, Maciej; Jensfelt, Patric; Thiel, Marko; Ziegenbein, Justin und Blunder, Noel (2024): MCD: Diverse Large-Scale Multi-Campus Dataset for Robot Perception. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Juni 2024, S. 22304–22313.

Nuts One GmbH (2023): Vorstellung des Projektes,  
<https://www.shuttle-modellregion-oberfranken.de/vorstellung>.

OpenStreetMap (2024): Welcome to OpenStreetMap,  
<https://wiki.openstreetmap.org/>.

Prittitz, Volker (1994): Politikanalyse, Verlag für Sozialwissenschaften, ISBN: 3810010448.

pypi.org (2024): PyQt5 5.15.11 Dokumentation,  
<https://pypi.org/project/PyQt5/>.

python.org (2020): Python 3.9.0 release,  
<https://www.python.org/downloads/release/python-390/>.

python.org (2024a): multiprocessing – Process-based parallelism,  
<https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>.

python.org (2024b): asyncio – Asynchronous I/O,  
<https://docs.python.org/3/library/asyncio.html>.

React (2024): React – A JavaScript library for building user interfaces,  
<https://react.dev/>.

ROS Index (2024): nav2\_mppi\_controller,  
[https://index.ros.org/p/nav2\\_mppi\\_controller/](https://index.ros.org/p/nav2_mppi_controller/).

ROS Wiki (2024): ROS Distributions, <https://wiki.ros.org/Distributions>.

ROS Wiki (2024b): Gmapping, <https://wiki.ros.org/gmapping>.

ROS Wiki (2024c): AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization),  
<https://wiki.ros.org/amcl>.

SAE International (2024): SAE Levels of Driving Automation™ für mehr Klarheit und ein internationales Publikum verfeinert,  
<https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>.

Souleyrette, Reginald und Hochstein, Joshua L. (2012): Development of a Conflict Analysis Methodology Using SSAM,  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-a-Conflict-Analysis-Methodology-SSAM-Souleyrette-Hochstein/f4c6645b1fe1df5392a1e0eaab3e920b84874685>

Spritmonitor (2024): Iveco Daily 35s11,  
<https://www.spritmonitor.de/de/detailansicht/621303.html?cdetail=1>.

Statista (2024): Durchschnittlicher Preis für Dieselmotorkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2024, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotorkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/>.

Stepstone (2024a): IT Support Gehälter in Deutschland,  
<https://www.stepstone.de/gehalt/IT-Support.html>.

Stepstone (2024b): Wissenschaftliche/r Mitarbeiter/in Gehälter in Deutschland, <https://www.stepstone.de/gehalt/Wissenschaftliche-r-Mitarbeiter-in.html>.

Stepstone (2024c): Reinigungskraft Gehälter in Deutschland,  
<https://www.stepstone.de/gehalt/Reinigungskraft.html>.

Tagesschau (2023): Post fordert CO<sub>2</sub>-Label für Pakete,  
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/post-co2label-pakete-101.html>.

Technische Universität Braunschweig (2024): Einladung: Projektabschluss LogiSmile mit Live-Demonstration, <https://www.tu-braunschweig.de/nff/aktuelles/detailansicht-termine/projektabschluss-logismile-mit-live-demonstration>.

Thiel, Marko; Ziegenbein, Justin; Blunder, Noel; Hinckeldeyn, Johannes und Kreuzfeldt, Jochen (2023a): 3D Point Cloud of the Main Campus of Hamburg University of Technology (5 cm subsampled), Version 1.0, veröffentlicht durch TUHH Library, <https://doi.org/10.15480/336.5041>.

- Thiel, Marko; Ziegenbein, Justin; Blunder, Noel; Schrick, Manuel; Kreutzfeldt und Jochen (2023b): From Concept to Reality: Developing Sidewalk Robots for Real-World Research and Operation in Public Space. *Logistics Journal: Proceedings*, 2023 (1).
- Tjaden, Sandra; Flämig, Heike; Grote, Matthias und Thiel, Marko (2022): Ökonomische Analyse eines kombinierten Personen- und Gütertransportes – Verbindung von Transportroboter und Shuttle für eine autonome Transportlösung. *Internationales Verkehrswesen*.
- Tremonia (2024): Sprinter City, <https://web.tremonia.com/sprinter-city/>.
- UBA (2024a): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2023, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23\\_2024\\_cc\\_strommix\\_07\\_2024.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_07_2024.pdf).
- UBA (2024b): Umweltzeichen Blauer Engel für Lieferdienstleistungen der letzten Meile, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23\\_2024\\_cc\\_strommix\\_07\\_2024.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_07_2024.pdf).
- Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) (2024): VDA 5050 – Kommunikationsschnittstelle für Fahrerlose Transportfahrzeuge (Version 2.1.0), <https://www.vda.de/de/aktuelles/publikationen/publication/vda-5050-fts-kommunikationsschnittstelle>.
- Vester, Frederic (1990): *Ausfahrt Zukunft. Strategien für den Verkehr von morgen; eine Systemuntersuchung. 2., korr. Aufl.* München: Heyne.
- Vester, Frederic (1991): *Ausfahrt Zukunft Supplement. Material zur Systemuntersuchung.* München: Studiengruppe für Biologie und Umwelt GmbH.
- Wegner, Andreas (2023): Rollende „Warenkörbe“ bringen’s in Hamburg, <https://mediacenter.rewe.de/pressemitteilungen/rollende-warenkoebe-bringen-es-in-hamburg-rewe-startet-autonom-fahrendes-einkaufskonzept>.
- Wolf, Julia; Schneider, Daniela; Tjaden, Sandra und Ziegenbein, Justin (2024): Konzeption einer Leitstelle für einen kombinierten Personen- und Gütertransport im ÖPNV mit autonomen Shuttles und Transportrobotern. *Journal für Mobilität und Verkehr*, 21, 67–75, <https://doi.org/10.34647/jmv.nr21.id151>.
- Woody, Maxwell; Vaishnav, Parth; Craig, Michael T. und Keoleian, Gregory A. (2022): Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of the USPS Next-Generation Delivery Vehicle Fleet. *Environmental Science & Technology*, 56 (18), 13391–13397.

Ziegenbein, Justin; Blunder, Noel; Maroofi, Sean; Thiel, Marko; Nguyen, Thien-Minh; Rose, Hendrik Wilhelm; Braun, Philipp; Jahn, Carlos (2025): Mobile Robot Campus Dataset (MRCD). TUHH Library, <https://doi.org/10.15480/882.15125>

## Vorhabenbezogenes Literaturverzeichnis

- Adler, Florian (2016): Das Herzstück des Busverkehrs in Münster: Das macht unsere Verkehrsleitstelle, <https://www.stadtwerke-muenster.de/blog/verkehr/das-herzstueck-des-busverkehrs-in-muensters-das-macht-unsere-verkehrsleitstelle/>.
- Ahmed, Hafiz Usman; Huang, Ying und Lu, Pan (2021): A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-Simulation. *Smart Cities*, 4 (1), 314–335, <https://doi.org/10.3390/smartcities4010019>.
- Anderson, Ross und Shumailov, Ilia (2021): Situational Awareness and Adversarial Machine Learning–Robots, Manners, and Stress.
- Bagloee, Saeed Asadi; Tavana, Madjid; Asadi, Mohsen und Oliver, Tracey (2016): Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of Modern Transportation*, 24 (4), 284–303, <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0117-3>.
- Bai, Xuyang; Hu, Zeyu; Zhu, Xinge; Huang, Qingqiu; Chen, Yilun; Fu, Hongbo und Tai, Chiew-Lan (2022): TransFusion: Robust LiDAR-camera fusion for 3D object detection with transformers. *Proceedings IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 1090–1099.
- Barceló, Jaime und Casas, Jordi (2005): Dynamic Network Simulation with AIMSUN. *Simulation Approaches in Transportation Analysis*. With assistance of Ryuichi Kitamura, Maso Kuwahara. 31 volumes. Boston, MA: Springer (Operations Research/Computer Science Interfaces Series), [https://doi.org/10.1007/0-387-24109-4\\_3](https://doi.org/10.1007/0-387-24109-4_3).
- Baum, Leonard; Assmann, Tom und Strubelt, Henning (2019): State of the art – Automated micro-vehicles for urban logistics. *IFAC-PapersOnLine*, 52 (13), 2455–2462, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.575>.
- Bogdanski, Ralf und Cailliau, Cathrin (2022): Kombiniertes KEP-Verkehr mit öffentlichen Nahverkehrsmitteln. Einsatz auf der letzten Meile in Ballungsräumen. Springer Gabler.
- Bogdoll, Daniel; Breitenstein, Jasmin; Heidecker, Florian; Bieshaar, Maarten; Sick, Bernhard; Fingscheidt, Tim und Zöllner, J. Marius (2021): Description of Corner Cases in Automated Driving: Goals and Challenges. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, S. 1023–1028.

- Bolte, Jan-Aike; Bar, Andreas; Lipinski, Daniel und Fingscheidt, Tim (2019): Towards Corner Case Detection for Autonomous Driving. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S. 438–445. IEEE.
- Boysen, Nils; Schwerdfeger, Stefan und Weidinger, Felix (2018): Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots. *European Journal of Operational Research*, 271 (3), S. 1085–1099, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.058>.
- Brandt, Jan Christopher; Böker, Björn; Bullinger, Alexander; Conrads, Martin; Duisberg Alexander und Stahl-Rolf, Silke (2018): Fallstudie: Delivery Robot Hamburg für KEP-Zustellung, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/delivery-robot-hamburg.pdf>.
- Burmann, Michael; Heß, Rainer; Hühnermann, Katrin; Jahnke, J. und Wimber, Kristina (2022): *Straßenverkehrsrecht – Kommentar*, 27. Auflage. München: C. H. Beck.
- Cleophas, Catherine; Cottrill, Caitlin; Ehmke, Jan Fabian und Tierney, Kevin (2019): Collaborative Urban Transportation: Recent Advances in Theory and Practice. *European Journal of Operational Research*, 273 (3), 801–816, [https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/124998/1/prePubVersion\\_1\\_s2.0\\_S0377221718303412\\_main.pdf](https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/124998/1/prePubVersion_1_s2.0_S0377221718303412_main.pdf).
- Cordts, Marius; Omran, Mohamed; Ramos, Sebastian; Rehfeld, Timo; Enzweiler, Markus; Benenson, Rodrigo; Franke, Uwe; Roth, Stefan und Schiele, Bernt (2016): The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- de Jong, Nicole (2023): Überblick: Städte von Wirtschaftsverkehr entlasten, <https://www.dvz.de/rubriken/logistik/industrie-und-handelslogistik/detail/news/staedte-von-wirtschaftsverkehr-entlasten.html>.
- Die Verkehrsunternehmen (2023): *Berufe bei den Verkehrsunternehmen*.
- Diehl, Frederik; Brunner, Thomas; Truong Le, Michael und Knoll, Alois (2019): Graph Neural Networks for Modelling Traffic Participant Interaction. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S. 695–701. IEEE.
- Dorsch, Monique (2019): *Öffentlicher Personennahverkehr. Grundlagen und 25 Fallstudien mit Lösungen*. München: UVK Verlag.

- El Asmar, Boulos; Chelly, Syrine; Azzi, Nour; Nassif, Lynn; El Asmar, Jana und Färber, Michael (2020): AWARE: A Situational Awareness Framework for Facilitating Adaptive Behavior of Autonomous Vehicles in Manufacturing. International Semantic Web Conference, S. 651–666. Springer.
- Engesser, Valeska; Rombaut, Evy; Vanhaverbeke, Lieselot und Lebeau, Philippe (2023): Autonomous Delivery Solutions for Last-Mile Logistics Operations: A Literature Review and Research Agenda, 15 (2774), <https://doi.org/10.3390/su15032774>.
- Esser, Klaus und Kurte, Judith (2023): KEP-Studie 2023 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK). Köln.
- Figliozzi, Miguel und Jennings, Dylan (2020): Autonomous delivery robots and their potential impacts on urban freight energy consumption and emissions. Transportation Research Procedia, 46, 21–28, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.159>.
- Flämig, Heike (2015): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 377–398.
- Gehrke, Steven R.; Phair, Christopher, D.; Russo, Brendan J. und Smaglik, Edward J. (2023): Observed sidewalk autonomous delivery robot interactions with pedestrians and bicyclists. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 18, 100789, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100789>.
- Gertz, Carsten; Kreuzfeldt, Jochen; Flämig, Heike; Hinckeldeyn, Johannes; Maaß, Jacqueline; Grote, Matthias; Tjaden, Sandra; Thiel, Marko; Schrick, Manuel; Stargardt, Julia; Michelmann, Holger; Wolf, Julia; Böckler, Liss; Rosenberger, Kerstin; Blunder, Noel; Ziegenbein, Justin; Purgander, Jana; Lohse, Julius und Weber, Lukas (2022): Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG. Hamburg.
- Gertz, Carsten; Maaß, Jacqueline; Grote, Matthias; Diebold, Tyll; Mantel, Rebekka; Röntgen, Ole; Stargardt, Julia; Werner, Lennard und Wolf, Julia (2021): Endbericht des Projektes TaBuLa. Hamburg.
- Ghilas, Veaceslav; Demir, Emrah und Van Woensel, Tom (2016): The Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines. INFOR: Information Systems and Operational Research, 54 (2), 147–167.

- Grolms, Martin (2019): Autonomous Shuttles and Delivery Robots. *Advanced Science News*, <https://www.advancedsciencenews.com/autonomous-shuttles-and-delivery-robots/>.
- Grote, Matthias und Röntgen, Ole (2021): Kosten autonom fahrender Minibusse: Literaturanalyse ergänzt um Erfahrungen aus dem Betrieb eines Testprojektes und den Ergebnissen einer Expert:innenbefragung. ECTL working paper, Band 54. TUHH Universitätsbibliothek <https://doi.org/10.15480/882.3621>.
- Grush, Bern (2022): Defining PMRs (from ISO DTS 4448-2), <https://www.urbanroboticsfoundation.org/post/defining-pmrs>.
- Helbing, Dirk und Molnár, Péter (1995): Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*, 51 (5), 4282–4286, <https://doi.org/10.1103/physreve.51.4282>.
- Hoffmann, Thomas und Prause, Gunnar (2018): On the Regulatory Framework for Last-Mile Delivery Robots. *Machines*, 6 (3), 33, <https://doi.org/10.3390/machines6030033>.
- Jennings, Dylan und Figliozzi, Miguel A. (2019): Study of Sidewalk Autonomous Delivery Robots and Their Potential Impacts on Freight Efficiency and Travel. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673 (6), <https://doi.org/10.1177/0361198119849398>.
- Jung, Boyoon und Sukhatme, Gaurav S. (2004): Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment. *International conference on intelligent autonomous systems*, Citeseer, S. 980–987.
- Liang Tingting; Xie, Hongwei; Yu, Kaicheng; Xia, Zhongyu; Lin, Zhiwei; Wang, Yongtao; Tang, Tao; Wang, Bing und Tang, Zhi (2022): BEVFusion: A simple and robust LiDAR-camera fusion framework. *Proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, S. 10421–10434.
- Löhdefink, Jonas; Fehrling, Justin; Klingner, Marvin; Hüger, Fabian; Schlicht, Peter; Schmidt, Nico M. und Fingscheidt, Tim (2020): Self-Supervised Domain Mismatch Estimation for Autonomous Perception. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, S. 334–335.
- Monheim, Heiner; Muschwitz, Christian; Reimann, Johannes; Thesen, Volker; Michelmann, Holger; Pitzen, Constantin und Sylvester, Anja (2014): Nächster Halt: Lebensqualität. Kombination auf ganzer Linie. Leitfaden.

- Mourad, Abood; Puchinger, Jakob und Chu, Chengbin (2019): A Survey of Models and Algorithms for Optimizing Shared Mobility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 123, 323–346, [https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02014342/file/TRB\\_2018\\_437%20-%20Mourad%20et%20al.%202019.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02014342/file/TRB_2018_437%20-%20Mourad%20et%20al.%202019.pdf).
- Mourad, Abood; Puchinger, Jakob und Van Woensel, Tom (2021): Integrating Autonomous Delivery Service into a Passenger Transportation System. *International Journal of Production Research*, 59 (7), 2116–2139, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02500684/document>.
- myLOG MOL (2023): myLOG MOL. 5G gesteuertes Logistiksystem zur Stabilisierung des Einzelhandels in Märkisch Oderland. myLOG MOL, <https://www.mylog-mol.de/mylog-mol-5g-transport-rover/>.
- Nobis, Claudia und Kuhnimhof, Tobias (2018): *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht*.
- Poeting, Moritz; Schaudt, Stefan und Clausen, Uwe (2019): A Comprehensive Case Study in Last-Mile Delivery Concepts for Parcel Robots, 2019 Winter Simulation Conference (WSC), S. 1779–1788, <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004811>.
- Salvini, Pericle; Paez-Granados, Diego und Billard, Aude (2021): On the safety of mobile robots serving in public spaces: Identifying gaps in EN ISO 13482:2014 and calling for a new standard. *J. Hum.-Robot Interact.*, 10 (3), <https://doi.org/10.1145/3442678>.
- Salvini, Pericle; Paez-Granados, Diego und Billard, Aude (2022): Safety concerns emerging from robots navigating in crowded pedestrian areas. *International Journal of Social Robotics*, 14 (2), <https://doi.org/10.1007/s12369-021-00796-4>.
- Stocco, Andrea; Weiss, Michael; Calzana, Marco und Tonella, Paolo (2020): Misbehaviour Prediction for Autonomous Driving Systems. *Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering*, S. 359–371.
- Sun, Pei; Wang, Weiyue; Chai, Yuning; Elsayed, Gamaleldin; Bewley, Alex; Zhang, Xiao; Sminchisescu, Cristian und Anguelov, Dragomir (2021): RSN: Range sparse net for efficient, accurate lidar 3d object detection. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 5725–5734.

- Tamm, Deike A. und Wendt, Domenik H. (2022): Rechtliche Herausforderungen nachhaltiger Logistikkonzepte. Am Beispiel der LastMileTram. Wiesbaden: Springer Fachmedien; Springer Gabler, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7087516>.
- Thiel, Marko; Grote, Matthias; Schrick, Manuel und Tjaden, Sandra (2022): Transportroboter in automatisierten Shuttles. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 124 (4), 48–52, <https://doi.org/10.1007/s35148-021-0818-8>.
- Thiel, Marko; Tjaden, Sandra; Schrick, Manuel; Rosenberger, Kerstin und Grote, Matthias (2021): Requirements for robots in combined passenger/freight transport. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics*, S. 195–215, <https://doi.org/10.15480/882.4000>.
- Trotta, Manuel; Archetti, Claudia; Feillet, Dominique und Quilliot, Alain (2022): Pickup and Delivery Problems with Autonomous Vehicles on Rings. *European Journal of Operational Research*, 300 (1), 221–236.
- VDV (2023): Maßnahmen gegen den Personalmangel im Fahrbetrieb. Für einen qualitativ hochwertigen ÖPNV. Positionspapier/Januar 2023. Köln, <https://www.vdv.de/personalstrategisches-papier-langfassung-2023.pdf>.
- Yang, Xun; Shi, Yunyang; Xing, Jiping und Liu, Zhiyuan (2022): Autonomous driving under V2X environment: state-of-the-art survey and challenges. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 1, 1–10, <https://doi.org/10.1093/iti/liac020>.

## Anlagen

Anlage 1:	Umsetzungskonzept Leitstellen-Prototyp.....	195
Anlage 2:	Worksheet Test Leitstelle Sicht der*des Betreibenden.	199
Anlage 3:	Variablensatz des Untersuchungsgegenstands.....	201
Anlage 4:	Einflussmatrix des Untersuchungssystems .....	204
Anlage 5:	PAP Busanwendung .....	205
Anlage 6:	Quellenverzeichnis für THG- und TCO-Annahmen.....	208
Anlage 7:	Quellenverzeichnis für Bus-Modelle .....	209
Anlage 8:	Quellenverzeichnis für Roboter und Leitstelle.....	210
Anlage 9:	Interviewfragen zur Ex-ante-Begleitforschung .....	211
Anlage 10:	Fragebogen zur begleitenden Begleitforschung .....	214
Anlage 11:	Fragebogen zur Ex-post-Begleitforschung .....	217

Anlage 1:           Umsetzungskonzept Leitstellen-Prototyp

## Umsetzungskonzept Leitstelle

Im Rahmen des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus soll eine Leitstelle prototypisch entwickelt und getestet werden, mithilfe derer eine Koordination und Synchronisation multimodaler Agenten im öffentlichen Raum gewährleistet werden soll. Die Agenten sind sowohl Transportroboter als auch ein mit Sensorik aufgerüsteter ÖPNV-Linienbus. Im Rahmen des Gesamtkonzepts der Leitstelle wurde das Szenario 1 zur Umsetzung ausgewählt, das alle Leitstellenelemente (Technische Aufsicht sowie Planung und Disposition aller Fahrzeuge) in einer zentralen Einheit vereint.

Die Leitstelle soll zur Überwachung der integrierten Fahrzeuge anhand von Statusparametern dienen sowie Eingriffe in die Fahrzeugsteuerung in Form von Fahraufträgen vornehmen. Während die Umsetzung dieser Fahrbefehle in konkrete Navigationsaufgaben (z. B. Lokalisierung, globale und lokale Pfadplanung, Hinderniserkennung/-vermeidung) dezentral auf den Fahrzeugen selbst stattfindet, ermöglicht die zentral erfolgende Auftragsverwaltung eine Synchronisation der Fahrzeuge untereinander. So soll eine Koordination zwischen Robotern und ÖPNV-Bussen erfolgen, sodass ein kombinierter Personen- und Güterverkehr mit möglichst hohem Automatisierungsgrad gewährleistet werden kann.

### Intralogistik Leitstand als Basis für Leitstelle

Wie bereits im Gesamtkonzept herausgearbeitet gibt es einige Anforderungen, die bei der Umsetzung einer solchen Leitstelle beachtet werden müssen (Schnittstellen-/Kommunikationsstandard, Bereit- und Darstellung entsprechender Fahrzeugparameter, Auftragsmanagement). Eine am ITL entwickelte Software, die einen Leitstand zur Erstellung, Durchführung, Wiederholung und Aufzeichnung von Robotik-Experimenten im Intralogistik-Kontext mit verschiedenartigen Robotern umfasst, soll dazu dienen, einige der herausgestellten Rahmenbedingungen zu erfüllen. So orientiert sich die Kommunikation der Roboter und des ÖPNV-Busses mit dem Leitstand am Intralogistik-Kommunikationsstandard der VDA 5050, der eine zentrale Einbindung verschiedener Roboter mit unterschiedlichen Funktionen/Fähigkeiten sowie ein Auftragsmanagement ermöglicht.

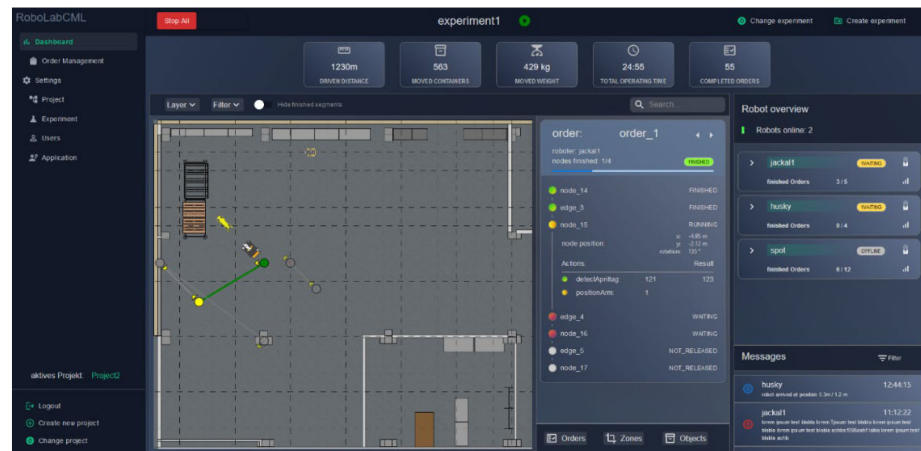


Abbildung A-1: Leitstand-Software zur Erstellung, Durchführung, Wiederholung und Aufzeichnung von Robotik-Experimenten im Intralogistik-Kontext

Um diese Software im Kontext des Forschungsvorhabens TaBuLa-LOGplus nutzen zu können, sind einige Anpassungen notwendig, die in den kommenden Projektmonaten realisiert werden sollen. Als Grundlage dieser Anpassungen dient die Identifikation von Anforderungen hinsichtlich der Ziele des Vorhabens, die aus entwickelten *User Stories* abgeleitet wurden.

### Notwendige Anpassungen zur Nutzung im Forschungsvorhaben TaBuLa-LOGplus

**Mobilfunkanbindung:** Während der ursprüngliche Anwendungsfall eine in sich geschlossene Umgebung mit privatem Netzwerk vorsieht, sollen sowohl die Transportroboter als auch der ÖPNV-Bus im öffentlichen Raum betrieben werden. Dies setzt eine Mobilfunkanbindung der Leitstelle sowie aller zu integrierenden Agenten voraus. In diesem Zuge müssen Mechanismen geschaffen werden, die eine Identifikation der einzelnen Agenten unabhängig von einer statischen IP-Adresse ermöglichen. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Kommunikation über das Mobilfunknetz nicht ohne Weiteres von unbeteiligten Dritten gestört oder modifiziert werden kann. Hierfür muss die gRPC-Verbindung (*Remote Procedure Call*) zwischen Roboter und Backend angepasst sowie der Webserver-Traffic zwischen Roboter und GUI per SSL sicher konfiguriert werden.

**Kartendarstellung:** Die geplante umfassende Nutzung von GPS-Signal zur Lokalisierung sowohl der Transportroboter als auch der ÖPNV-Busse erfordert eine Georeferenzierung der in der Leitstelle dargestellten und zur Vergabe von Aufträgen genutzten Karte. Um Fahrzeuge auf Basis ihrer GPS-Position innerhalb einer Pixelgrafik-Karte darzustellen, muss ein Mechanismus entwickelt werden, der jedem Bildpixel entsprechende Koordinaten(bereiche) zuweist. Nur so kann eine realitätsgetreue

Darstellung der Fahrzeugpositionen gewährleistet werden. Da im ursprünglichen Anwendungsfall GPS aufgrund der Indoor-Untauglichkeit keine Anwendung findet, muss die bestehende Software um einen entsprechenden Mechanismus ergänzt werden. Auch muss sichergestellt werden, dass Auftragsknoten nur in Bereichen angelegt werden können, die vom Roboter befahren werden dürfen. Die freie Wahl von Roboter-Zielorten auf der Karte im ursprünglichen Anwendungsfall wird für den Betrieb im öffentlichen Raum auf einige ausgewählte Zielpositionen (Haltestellen und Start- sowie Endpunkte von Aufträgen) begrenzt werden.

**Integration ÖPNV-Bus:** Um einen konventionellen ÖPNV-Bus gemäß der VDA 5050 in die Leitstelle einbinden zu können, müssen die prozessrelevanten Parameter des Fahrzeugs über eine Webschnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Für die Einbindung von Robotern wird dafür aktuell das gRPC-Framework verwendet. Um das Verhalten eines automatisierten Busses zu imitieren, sollen einerseits kontinuierliche Statusupdates an die Leitstelle übermittelt, andererseits Aufträge an den Bus übermittelt und der jeweilige Bearbeitungsstatus vom Bus zurückgemeldet werden. Diese Demo-Funktionalität könnte beispielsweise über eine mobile Anwendung (z. B. auf Tablet oder Smartphone) gewährleistet werden, in der Busfahrer\*innen oder Begleitpersonen Eingaben tätigen und Änderungen relevanter Parameter auslösen können. Eine konkrete Ausgestaltung dieser Anwendung liegt jedoch beim ebenso im Forschungsvorhaben beteiligten Institut für Verkehrsplanung und Logistik. Vonseiten des ITL ist hierbei die Definition der benötigten Schnittstellen vorgesehen, um eine entsprechende Anwendung in die Funktionalität der Leitstelle integrieren zu können. Relevante Informationen für die Einbindung in die Leitstelle und den Synchronisationsprozess zwischen Robotern und Bus sind:

- Verbindungsstatus (*available/unavailable*),
- GPS-Position des Busses,
- Status der Türen (*geöffnet/geschlossen*),
- Status der Rollstuhlrampe (*aus-/eingefahren*),
- Mitnahme Roboter auslastungsbedingt möglich (*true/false*),
- Auftragsstatus (Ankunft an/Verlassen einer Haltestelle),
- Ein- und Austragen in Synchronisationslisten,
- Freigabe für Weiterfahrt bei Roboterein-/ausfahrt (*true/false*).

Diese Informationen werden entweder explizit per Statusnachricht übermittelt (z. B. GPS-Position) oder können dem Prozesskontext entnommen werden (z. B. Status der Türen als erfolgreiche Ausführung der Aktion „Türen öffnen“).

Für die Definition der Schnittstelle wird gemäß der VDA 5050 vom ITL ein *Factsheet* für den Bus entworfen, in dem alle spezifischen Funktionen und Einschränkungen des Busses festgehalten werden. Auf dieser Basis wird im Sinne des gRPC-Frameworks eine Protobuf-Datei, in der die Nachrichtentypen für die Kommunikation zwischen Bus und Server-Backend definiert sind, um die busspezifischen Actions erweitert. Diese Spezifikationen können vom VPL oder etwaigen Unterauftragnehmer\*innen für die Entwicklung einer kompatiblen Anwendung genutzt werden.

**Bedienbarkeit:** Während im ursprünglichen Anwendungsfall die möglichst umfangreiche Darstellung aller Parameter und Informationen durchzuführender Experimente für Personal mit umfangreichen Kenntnissen im Bereich der Robotik im Vordergrund steht, soll TaBuLa-LOGplus den Leitstellenbetrieb auch durch geschultes, aber fachfremdes Personal ermöglichen. Dementsprechend soll der Fokus bei Layout-Entscheidungen der Nutzungsoberfläche insbesondere auf Übersichtlichkeit und intuitiver Nutzbarkeit liegen. Hierfür soll die Gesamtansicht (Fahrzeuge in Karte) möglichst schlank dargestellt werden und die primären Mitteilungsfenster menschenlesbaren und leicht interpretierbaren Text enthalten.

**Datenaufzeichnung:** Um einerseits im Rahmen des Testbetriebs spezifische Daten aufzeichnen zu können und andererseits die Sicherheit sowie Fehlerbehebung zu verbessern, sollen neben den primären Mitteilungen auch vorhabenspezifische Prozessdaten aufgezeichnet werden. Diese Logging-Mechanismen sollen generell der Aufzeichnung prozessrelevanter Daten dienen. Dabei kann es sich von Fehlerdetails über Sensordaten bis zum User-Tracking bei Entscheidungen handeln.

Anlage 2: Worksheet Test Leitstelle Sicht der\*des Betreibenden

### Testaufbau

Name	Ort
Testende Person	
Beobachtende Person	
Unterstützende Person	
Start des Tests:	Ende des Tests:

### Einführung

Vor Beginn des Tests erfolgte für die fünf testenden Personen eine 30-minütige Einführung in die Aufgaben und die Testenden konnten allgemeine Fragen stellen.

### Aufgaben

1. Bitte erstellen Sie einen neuen Lieferauftrag für den Roboter und benennen Sie diesen nach Ihrem Kürzel. Den Routenverlauf entnehmen Sie bitte der Grafik. Weisen Sie anschließend einem Roboter den Auftrag zu. Nach der Speicherung starten Sie bitte die Zustellung.



2. Überwachen Sie den Fortschritt auf der Route. Stoppen Sie den Roboter nach Knotenpunkt 2.
3. Passen Sie den Lieferauftrag an (siehe Grafik). Fügen Sie noch einen weiteren Knoten ein, den Sie anschließend wieder löschen.



4. Setzen Sie die Fahrt zu den Knoten 3 und 4 fort.
5. Nach erfolgter Zustellung löschen Sie bitte den Lieferauftrag aus dem System.

**Zufriedenheitsumfrage**

1. Hatten Sie bereits Vorerfahrungen mit einer solchen Plattform? Falls ja, welcher Art?
2. Wie intuitiv war der Prozess der Erstellung und Verwaltung von Aufträgen für den Transportroboter?
3. Wie zufrieden sind Sie mit der allgemeinen Nutzungsfreundlichkeit der Nutzungsoberfläche der Leitstelle?
  - a. Beobachtung: Wie haben Sie den Beobachtungsprozess wahrgenommen?
  - b. Effektivität: Hatten Sie Probleme bei der Navigation durch die Menüs? Wenn ja, woran lag es?
  - c. Gesamtzufriedenheit (1 = sehr unzufrieden bis 5 = sehr zufrieden)
4. Würden Sie Verbesserungen im Umgang mit Fehlern oder Unterbrechungen vorschlagen? Wenn ja, welche?

# Anlagen

Anlage 3: Variablensatz des Untersuchungsgegenstands

Subsystem	Variable	Definition	Indikator	Externer Einfluss
Kombinierter Personen- und Güterverkehr	Nachfrage	Zunehmende Nachfrage nach autonomen Fahrzeugen	Anzahl der Nutzenden pro Zeiteinheit (absolut)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haushalts- und Wirtschaftslage, Rohstoffmangel</li> <li>• Umweltereignisse</li> <li>• Skandale der Technologie- und Automotive-Industrie</li> <li>• Medienberichte</li> </ul>
	Tätigkeitsspektrum	Zunehmende veränderte, neue oder wegfallende Tätigkeiten	Anzahl und Art der verlagerten Tätigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personalmangel</li> <li>• Technische Entwicklung</li> <li>• Fehlende Weiterbildung</li> </ul>
	Kombiniertes Angebot	Zunehmende Verfügbarkeit des automatisierten Personen- und Güterverkehrs	Streckenkilometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haushalts- und Wirtschaftslage</li> <li>• Technische Entwicklung</li> </ul>
	Integration von Personen- und Güterverkehr	Zunehmender Integrationsgrad von Personen- und Güterverkehr in einem IT-System	Anteil Gesamtsysteme an Einzelsystemen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haushalts- und Wirtschaftslage</li> <li>• Personalmangel</li> <li>• Rohstoffmangel</li> <li>• Technische Entwicklung</li> <li>• Gesetzeslage (z. B. Verbot von Gefahrguttransport mit Fahrgästen)</li> </ul>
	Dispositives Personal	Zunehmende Anzahl des fahrfremden Personals (Disposition, Technische Aufsicht)	Anzahl pro Zeiteinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haushalts- und Wirtschaftslage</li> <li>• Fachkräftemangel</li> <li>• Rohstoffmangel</li> <li>• Technische Entwicklung (Technische Aufsicht)</li> </ul>
	Berufskraftfahrende	Zunehmende Anzahl des Fahrpersonals (Fahrende, Begleitpersonen)	Anzahl pro Zeiteinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haushalts- und Wirtschaftslage</li> <li>• Personalmangel</li> <li>• Rohstoffmangel</li> <li>• Technische Entwicklung (fahrerloses Fahren)</li> </ul>
	Fahrplan	Zunehmend abgestimmte Fahrpläne auf die kombinierte Nutzung des ÖPNV von Personen und Gütern	Fahrzeit in Zeiteinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> </ul>

Subsystem	Variable	Definition	Indikator	Externer Einfluss
Shuttle	Anzahl Shuttle	Zunehmende Anzahl eingesetzter Shuttle	Anzahl Fahrzeuge (absolut)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrpersonalmangel</li> <li>Umwelt- und Wettereinflüsse</li> <li>Lobbyarbeit der Automobilindustrie</li> <li>Gesetzeslage</li> <li>Strategische Veränderungen in der Automobilindustrie (neue Leitung, neue Produktausrichtung)</li> </ul>
	Auslastung des Shuttles	Zunehmende Auslastung der Shuttle durch Personen und Güter	Anzahl Personen pro Zeiteinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> <li>Wirtschaftslage</li> <li>Bevölkerungsstruktur</li> <li>Raumstruktur</li> </ul>
	Verkehrsleistung Shuttle	Zunehmende Verkehrsleistung des Shuttles	Transportierte Personenkilometer (pkm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände</li> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> <li>Wirtschaftslage</li> </ul>
	Reisezeit Shuttle	Zunehmende Reisezeit zur Beförderung von Personen	Reisezeit pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umwelt- und Wettereinflüsse</li> <li>Gesetzeslage</li> </ul>
	Transportkosten Shuttle	Zunehmende Betriebskosten pro pkm	Kosten in Betriebsstunden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steuerliche Veränderungen und Bepreisung</li> </ul>
Transportroboter	Anzahl Transportroboter	Zunehmende Anzahl eingesetzter Transportroboter	Anzahl Fahrzeuge (absolut)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personal­mangel</li> <li>Umwelt- und Wettereinflüsse</li> <li>Lobbyarbeit der Technologieunternehmen</li> <li>Gesetzeslage</li> </ul>
	Auslastung Transportroboter	Zunehmende Auslastung des Transportgefäßes des Transportroboters	Auslastungsgrad des Transportgefäßes Kilogramm/Volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> <li>Wirtschaftslage</li> </ul>
	Verkehrsleistung Transportroboter	Zunehmende Verkehrsleistung durch Transportroboter	Transportierte Tonnenkilometer (tkm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände</li> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> <li>Wirtschaftslage</li> </ul>
	Transportzeit Transportroboter	Zunehmende Transportzeit der Güter	Gesamttransportzeit vom Versender zum Empfänger pro Tonne (t)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umwelt- und Wettereinflüsse</li> <li>Gesetzeslage</li> </ul>

## Anlagen

Subsystem	Variable	Definition	Indikator	Externer Einfluss
	Transportkosten Transportroboter	Zunehmende Betriebskosten pro tkm	Kosten in Euro pro transportierte Tonne (t)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steuerliche Veränderungen und Bepreisung</li> </ul>
	Transportmittelwahl im Güterverkehr	Zunehmende Verlagerung der Transportmittelwahl manuell gesteuerter Nutzfahrzeuge (N1–N3) zu automatisierten Transportrobotern	Anteil des Transportaufkommen pro Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umwelt- und Wettereinflüsse</li> <li>Lobbyarbeit der Technologieunternehmen</li> <li>Gesetzeslage</li> </ul>
	Transportvolumen Transportroboter	Vergrößerung des Transportgefäßes	In Volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Technologien</li> <li>Gesetzeslage und Regulierung</li> </ul>
Umfeld	Verkehrsfluss	Zunehmende Anzahl Fahrzeuge pro Stunde auf einem festgelegten Abschnitt der Straßeninfrastruktur	Anzahl Fahrzeuge pro Zeiteinheit auf einem definierten Streckenabschnitt	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planungsverfahren</li> <li>Stadtentwicklung</li> <li>Geschwindigkeitsbegrenzung</li> <li>Verkehrsregelung</li> </ul>
	Verkehrsaufkommen	Zunehmendes Verkehrsaufkommen auf der Straßeninfrastruktur durch Shuttle und Transportroboter	Fahrzeugfahrleistung in Kilometer pro Tag von Shuttle und Transportroboter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände</li> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> <li>Wirtschaftslage</li> </ul>
	Bauliche Infrastruktur	Erhöhung der Ausbaustufe der Straßeninfrastruktur, Haltestellen, Stellplätze, LSA, Ladeinfrastruktur für automatisierte Fahrzeuge	Ausbaustufe der Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände</li> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> <li>Wirtschaftslage</li> </ul>
	Barrierefreiheit	Zunehmende Barrierefreiheit der Fahrzeuge für Personen- und Güterverkehr	Ausbaustufe des Fahrzeugs	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände</li> <li>Planungs- und Entscheidungsverfahren</li> </ul>
	Menschliches Verhalten	Zunehmende menschenverursachte Störungen und aktive Beschädigung von Fahrzeugen und Infrastruktur	Anzahl Störungen/Unfälle durch menschliches Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umweltereignisse</li> <li>Skandale der Technologie- und Automotive-Industrie</li> <li>Medienberichte</li> </ul>
	Treibhausgasemissionen	Zunehmender Ausstoß von Treibhausgasemissionen	CO <sub>2</sub> -Äquivalente (CO <sub>2</sub> -Äq) Well-to-Wheel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Entwicklung</li> <li>Umwelt- und Wettereinflüsse</li> <li>Rohstoffmangel</li> </ul>

Anlagen

Anlage 4: Einflussmatrix des Untersuchungssystems

Variable	Nachfrage	Tätigkeitsspektrum	Kombiniertes Angebot	Integration von Personen- und Güterverkehr	Dispositives Personal	Berufskraftfahrende	Anzahl Shuttle	Auslastung des Shuttles	Verkehrsleistung Shuttle	Reisezeit Shuttle	Transportkosten Shuttle	Anzahl Transportroboter	Auslastung Transportroboter	Verkehrsleistung Transportroboter	Transportzeit Transportroboter	Transportkosten Transportroboter	Transportmittelwahl im Güterverkehr	Transportvolumen Transportroboter	Verkehrsfluss	Verkehrsaufkommen	Bauliche Infrastruktur	Barrierefreiheit	Fahrplan	Flächenerschließung	Menschliches Verhalten	Treibhausgasemissionen	Aktivsumme	
<b>Einfluss von ↓ auf →</b>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
+ Nachfrage	0	2	3	0	0	3	2	1	0	0	3	2	1	0	0	3	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-3	-2	27
+ Tätigkeitsspektrum	1	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
+ Kombiniertes Angebot	2	0		2	3	0	3	0	1	-1	0	3	0	1	-1	-1	3	0	1	0	0	3	3	3	0	-2	33	
+ Integration von Personen- und Güterverkehr	2	3		3	0	0	3	1	1	0	0	3	1	1	0	1	0	-1	0	1	3	1	0	0	-2	27		
+ Dispositives Personal	0	1	3	2		0	3	3	0	-3	2	3	3	0	-3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	30	
+ Berufskraftfahrende	0	0	-1	0	-3		-2	0	1	0	3	-2	0	1	0	3	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	
+ Anzahl Shuttle	2	0	3	2	3	0		0	3	0	3	1	0	0	-2	-2	0	2	0	2	0	1	0	0	3	0	32	
+ Auslastung des Shuttles	2	0	0	0	0	0	-1		0	0	-3	1	0	0	-2	-3	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	17	
+ Verkehrsleistung Shuttle	2	0	1	0	1	0	3	3		0	-3	1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	1	-3	20	
+ Reisezeit Shuttle	-2	0	0	0	0	0	0		-3		1	0	0	-2	3	0	-3	0	0	0	0	0	1	0	3	1	19	
+ Transportkosten Shuttle	-2	0	-1	0	0	-2	-1	0	0		0	0	0	0	2	-2	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	0	0	13	
+ Anzahl Transportroboter	2	0	3	2	3	0	0	3	0	0		0	0	2	-2	3	3	0	2	3	1	2	1	3	2	-3	40	
+ Auslastung Transportroboter	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0		0	3	1	-3	1	0	-1	-1	0	0	0	0	1	-3	18	
+ Verkehrsleistung Transportroboter	2	0	1	0	1	0	1	2	1	0	0	3	3		0	-1	0	1	1	2	0	0	0	1	3	23		
+ Transportzeit Transportroboter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3		1	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	
+ Transportkosten Transportroboter	-2	0	-2	0	0	0	0	-1	0	0	0	-2	-3	0	0		-3	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	14	
+ Transportmittelwahl im Güterverkehr	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
+ Transportvolumen Transportroboter	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	-1	0		0	0	2	0	0	0	0	-2	12	
+ Verkehrsfluss	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	3	10	
+ Verkehrsaufkommen	2	0	2	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	3		0	0	1	0	0	3	19	
+ Bauliche Infrastruktur	0	0	3	3	0	0	2	0	1	-1	0	2	0	1	-1	0	1	0	3	0		3	0	3	2	0	26	
+ Barrierefreiheit	2	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	-1	0	2	0	0	0	1		1	1	1	0	15	
+ Fahrplan	2	0	3	0	0	0	0	3	2	-2	-1	0	1	0	-3	-2	3	0	1	0	0	0		3	0	-1	27	
+ Flächenerschließung	2	0	3	1	1	0	1	2	2	1	1	1	0	2	1	1	2	0	1	2	2	2	3		1	1	33	
+ Menschliches Verhalten	-3	0	-2	0	0	0	-2	0	0	0	3	-2	0	0	0	3	-3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	19	
+ Treibhausgasemissionen	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1		5	
+ <b>Passivsumme</b>	38	4	34	16	24	4	23	25	20	10	20	28	19	28	23	23	39	2	19	13	6	15	12	17	16	37		
+ <b>AS/PS</b>	0,71	1,50	0,97	1,69	1,25	4,25	1,39	0,68	1,00	1,90	0,65	1,43	0,95	0,82	0,35	0,61	0,13	6,00	0,53	1,46	4,33	1,00	2,25	1,94	1,19	0,14	<b>Q</b>	
+ <b>AS x PS</b>	1026	24	1122	432	720	68	736	425	400	190	260	1120	342	644	184	322	195	24	190	247	156	225	324	561	304	185	<b>P</b>	

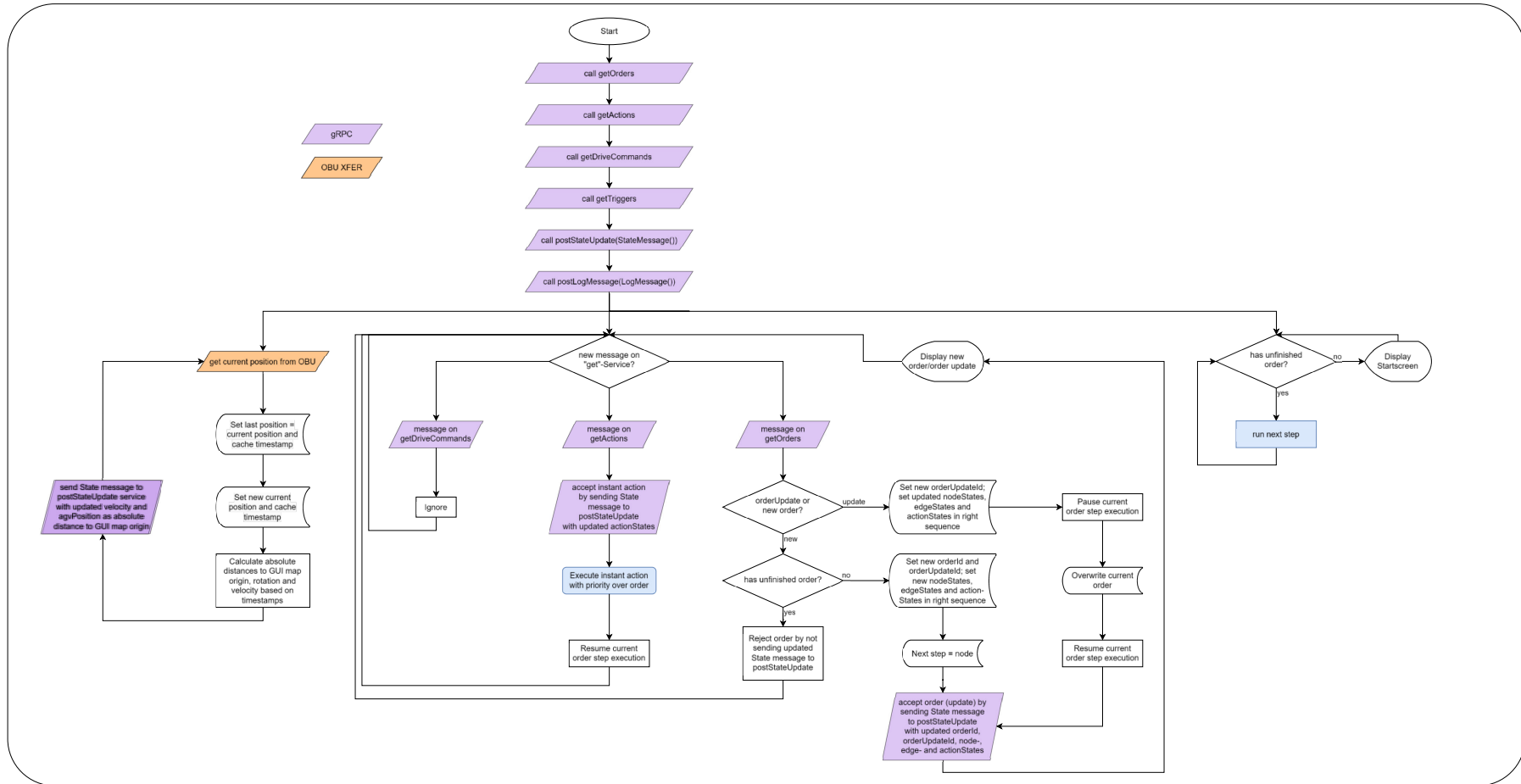
**Stärke des Einflusses**

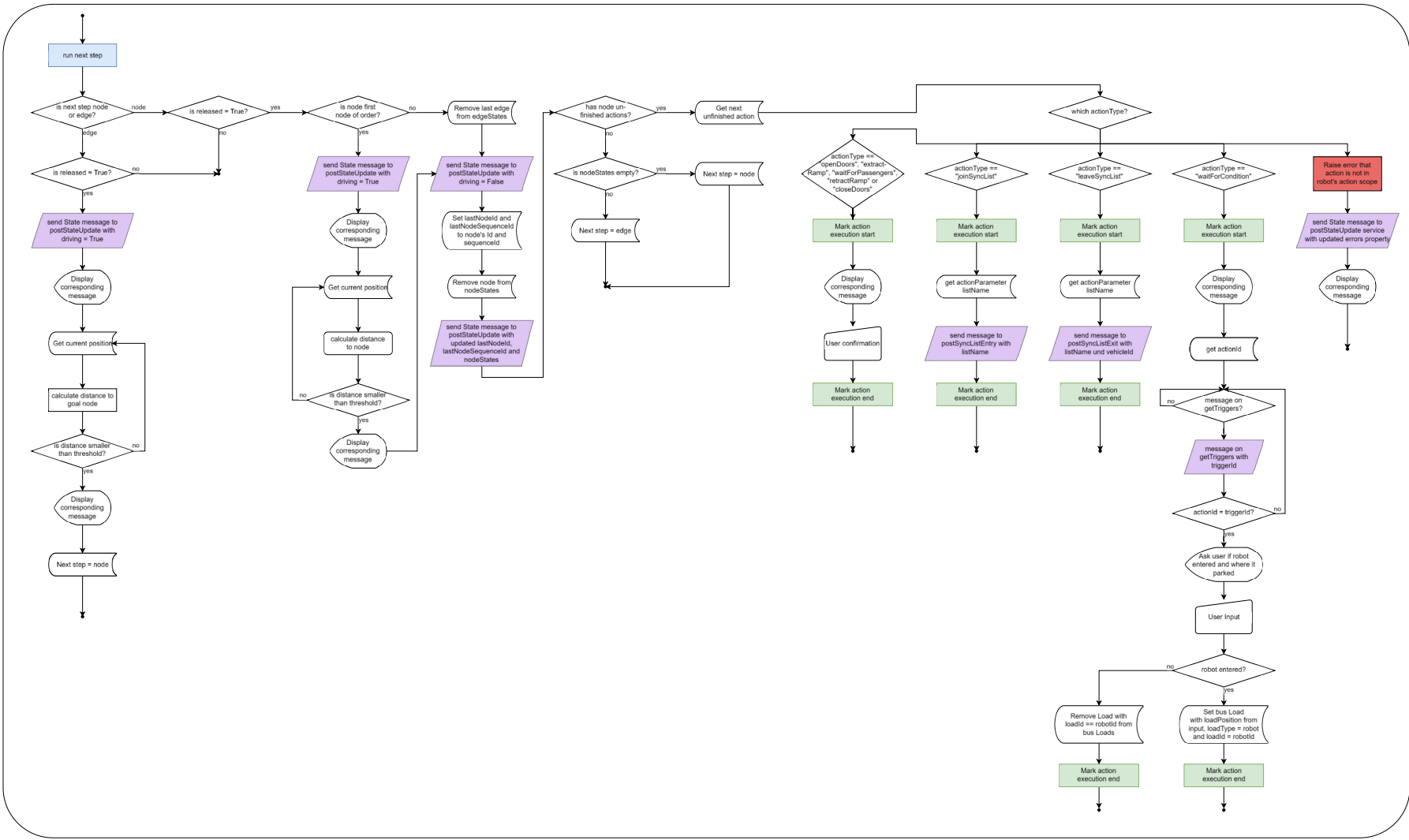
- + gleichgerichtete Wirkung
- 3 sehr starker Einfluss
- 2 starker Einfluss
- 1 geringer Einfluss
- 0 kein/sehr geringer Einfluss
- 1 geringer Einfluss
- 2 starker Einfluss
- 3 sehr starker Einfluss
- entgegengerichtete Wirkung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Vester (1991: 90)

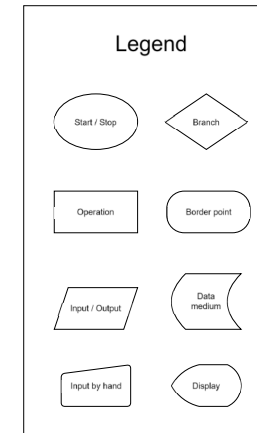
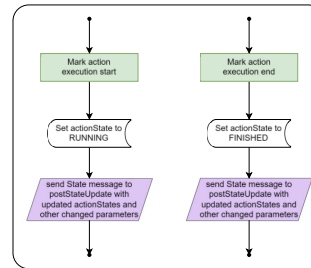
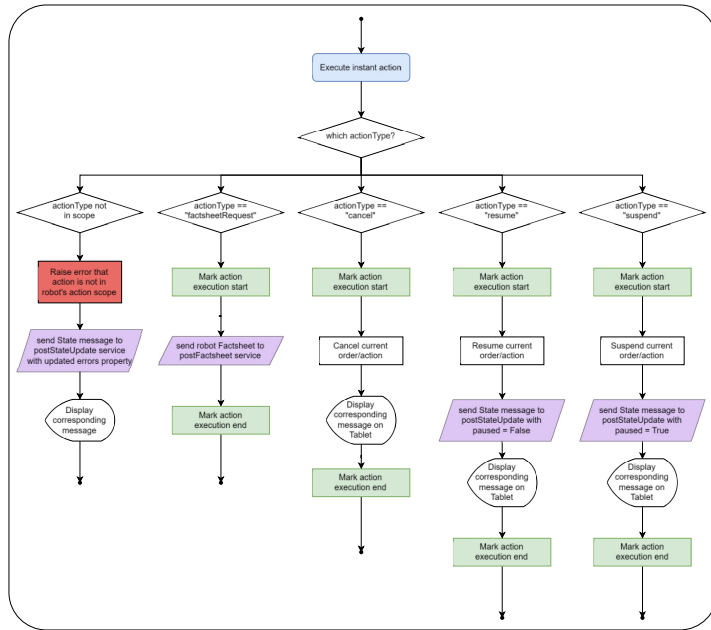
# Anlagen

## Anlage 5: PAP Busanwendung





# Anlagen



Anlage 6: Quellenverzeichnis für THG- und TCO-Annahmen

TCO-Annahmen	Transportmittel				Leitstelle
	Bus (manuell)	Bus (elektrisch)	Shuttle (autonom)	Roboter	
Antrieb					
Autonom fahrend					
Nutzungsdauer (Jahre)	Bundesfinanz- ministerium (2024a)	Bundesfinanz- ministerium (2024a)	Bundesfinanz- ministerium (2024a)	ITL	ITL
Betriebsstunden pro Woche	Fahrplanbuch online (2024)	Fahrplanbuch online (2024)	Fahrplanbuch online (2024)	ITL	ITL
Fahrleistung über Nutzungsdauer (km)	aus Durchlauf- zeiten- Szenarien	aus Durchlauf- zeiten- Szenarien	aus Durchlauf- zeiten- Szenarien	aus Durchlauf- zeiten- Szenarien	
Zinssatz	Europäische Zentralbank (2024)	Europäische Zentralbank (2024)	Europäische Zentralbank (2024)	Europäische Zentralbank (2024)	Europäische Zentralbank (2024)
Kraftstoff-/ Stromverbrauch (pro km)	interne Anfrage an BVG (2018)	Tremonia (2024)	Gertz et al. (2022)	ITL	
Emissionsfaktoren	DIN EN ISO 14083, S. 121	UBA 2024	UBA 2024	UBA 2024	

## Anlage 7: Quellenverzeichnis für Bus-Modelle

Kategorie	Parameter	Kostenschätzung		
		Szenario 1a mit Busmodell MAN Lion's City M	Szenario 1b mit Busmodell VDL MidCity	Szenario 2 mit Busmodell NAVYA-Shuttle
Gesamtanschaffungskosten	Anschaffungspreis Bus	interne Anfrage	Tremonia (2024)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)
	Onboard-Unit-Anschaffung	Yunex GmbH	Yunex GmbH	–
	Onboard-Unit-Support (Installation)	Yunex GmbH	Yunex GmbH	–
	TÜV (Normenarbeit, Zul.)	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)
Direkte Betriebskosten	Personalkosten	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)
	Mobilfunk	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)
	Software-Updates/Lizenzen	–	–	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)
	Kraftstoffkosten Diesel	eigene Hochrechnung, Statista (2024)	–	–
	Energiekosten Strom	–	Tremonia (2024)	TaBuLa (2021)
	Reservefahrzeug	Grote, Röntgen (2021)	–	–
Indirekte Betriebskosten	Personalkosten (Verwaltung)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)
	Personalkosten (Schulung)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)	Tjaden, Flämig, Grote, Thiel (2022)
	Wartungs- und Reparaturkosten	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)
	Versicherungskosten	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)	Grote, Röntgen (2021)
	Kfz-Steuer	Bundesfinanzministerium (2024)	–	–
	Kapitalbindung/Zinskosten	Handelsblatt (2024)	Handelsblatt (2024)	Handelsblatt (2024)

Anlage 8: Quellenverzeichnis für Roboter und Leitstelle

Kategorie	Parameter	Roboter	Leitstelle
Gesamt- anschaffungskosten	Anschaffungspreis (Hardware)	ITL	IL
	Installation	–	IL
	TÜV	ITL	–
Direkte Betriebskosten	Personalkosten	–	Stepstone (2024b)
	Mobilfunk	ITL	ITL
	Energieverbrauch	Lilling (2023)	Blitzrechner (2023)
Indirekte Betriebskosten	Sonstige Personalkosten	Stepstone (2024c)	–
	Inspektion	Stepstone (2024b)	–
	Versicherungskosten	TaBuLa-LOG	–
	Kapitalbindung/Zinskosten	Handelsblatt (2024)	Handelsblatt (2024)

## Anlage 9: Interviewfragen zur Ex-ante-Begleitforschung

- Die Forschungsbegleitung wird an die Planungsanalyse nach Flämig (2004) angelehnt. Hierbei handelt es sich um eine Methode zur Unterstützung von Projekten zur (nachhaltigen) Gestaltung von Wirtschaftsverkehrssystemen.
- Durch eine projektbegleitende Befragung können informelle Prozesse und Rahmenbedingungen transparenter gemacht, die Kommunikation verbessert sowie die Effektivität und Effizienz von Projekten erhöht werden.
- Das Ziel besteht in der Identifikation von Hemmnissen und Erfolgsfaktoren sowie in der Verbesserung von Kommunikation und Organisation im Projekt.
- Die Befragung wird zu drei Zeitpunkten im Projektverlauf durchgeführt (ex ante, begleitend, ex post).
- Die Erkenntnisse der Ex-ante-Befragung werden im Kick-off-Termin präsentiert und diskutiert.
- Im Ergebnis werden Gestaltungsoptionen und Handlungsempfehlungen für den Planungs- und Umsetzungsprozess abgeleitet werden: „Was können wir besser/smarter machen?“.

Kategorie	Fragen
1) Stakeholder*innen-Konstellation	Welcher Impuls oder Anlass hat Ihre Projektteilnahme ausgelöst?
	Welche individuellen Ziele möchten Sie im Projektrahmen erreichen?
	Welche Ihrer heutigen <i>Qualifikationen</i> (Fähigkeiten und Wissen) werden Sie zur Erreichung der Projektziele einbringen?
	Wie wünschen Sie sich, dass mit diesem Input von Ihren Projektpartner*innen umgegangen wird?
	Welche Qualifikationen planen Sie, sich im Laufe des Projekts anzueignen?
	Welche Projektpartner*innen kannten Sie bereits vor der Initiierung des Projekts?
2) Projektpartnerschaft (Zusammenarbeit und Kommunikation)	Wie schätzen Sie die Bedeutung Ihrer Projektpartner*innen für die Erreichung der Projektziele ein?
	Welche Erwartungen haben Sie an Ihre Projektpartner*innen?
	Welche Herausforderungen sehen Sie in Bezug auf die Zusammenarbeit und Kommunikation mit den Projektpartner*innen?
	Welche Rolle möchten Sie in der Zusammenarbeit mit Ihren Projektpartner*innen einnehmen?

Kategorie	Fragen
3) Projektmanagement	In welcher Form sollte die Kommunikation und der Informationsaustausch im Projektteam erfolgen? (z. B. zeitliche Abstände und Präsenz/Online)
	In welchem zeitlichen Turnus ist ein gegenseitiges Update der Projektpartner*innen über den aktuellen Stand der Arbeiten notwendig? (z. B. Statusbericht in Projektsitzungen oder Echtzeitkommunikation)
	Welche Plattformen bevorzugen Sie zum Informations- und Datenaustausch?
	Welche ergänzenden Erwartungen haben Sie an das Projektmanagement?
	Wie viel Agilität wünschen Sie sich vom Projektmanagement? (z. B. Sprints)
	Welche formalen Ansprüche haben Sie an das Projektmanagement? (z. B. Protokolle)
	Welche Risiken sehen Sie, die die Erreichung der Projektziele gefährden können?
	Welchen assoziierten und externen Stakeholder*innen messen Sie eine besondere Bedeutung für den Projekterfolg bei?
	Welche Ansprüche haben Sie an die Außendarstellung und die externe Ergebniskommunikation? (z. B. Publikationen)
4) Rückblick auf Initiierungsphase (Skizze, Antrag, Kooperationsvertrag)	Wie waren Sie an der Formulierung des Projektantrags beteiligt?
	Welche Inhalte sind für Sie von Bedeutung und welche fehlen Ihnen im Projektantrag?
	Welche Begleitumstände haben die Initiierungsphase beeinflusst?
	Was ist gut gelaufen und welche Chancen konnten ergriffen werden?
	Welche Herausforderungen gab es während der Initiierungsphase (in Bezug auf die Zusammenarbeit mit Ihren Projektpartner*innen)?
	Wie konnten diese Herausforderungen überwunden werden und was hätte besser gemacht werden können?

Kategorie	Fragen
5) Ausblick auf die ersten Schritte (nicht in Dokumentation für Projektträger integrieren)	Welche ersten inhaltlichen Schritte haben Sie selbst bereits gemacht bzw. planen Sie?
	Welche ersten inhaltlichen oder organisatorischen Schritte sollten kollektiv mit allen Projektpartner*innen gemacht bzw. abgesprochen werden?

## Anlage 10: Fragebogen zur begleitenden Begleitforschung

- Durch eine projektbegleitende Befragung können informelle Prozesse und Rahmenbedingungen transparenter gemacht, die Kommunikation verbessert sowie die Effektivität und Effizienz von Projekten erhöht werden.
- Die Befragung wird als Online-Fragebogen geplant, um den Bearbeitungsaufwand geringer zu halten. Teilnehmen sollen aber möglichst alle Projektpartner\*innen und alle Mitarbeitenden (Zeitaufwand ca. 20 min).
- Das Ziel besteht in der Identifikation von Hemmnissen und Erfolgsfaktoren sowie in der Verbesserung von Kommunikation und Organisation im Projekt.
- Die Erkenntnisse der begleitenden Befragung werden im Anfang des nächsten Jahres (2024) im Lenkungskreis präsentiert und diskutiert.
- Im Ergebnis werden Gestaltungsoptionen und Handlungsempfehlungen für den Planungs- und Umsetzungsprozess abgeleitet werden: „Was können wir besser/smarter machen?“.

Kategorie	Fragen	Antwortform
1) Rückblick auf Änderungsphase (Skizze, Antrag, Kooperations- vertrag)	In welcher/n Funktion/en waren Sie im Projekt beteiligt?	Freitext
	Waren Sie an der Formulierung des Änderungsantrags beteiligt?	Freitext
	Welche Begleitumstände haben die Änderungsphase aus Ihrer Sicht beeinflusst?	Freitext
	Was ist gut gelaufen und welche Chancen konnten ergriffen werden?	Freitext
	Welche Herausforderungen gab es während der Änderungsphase (auch in Bezug auf die Zusammenarbeit mit Ihren Projektpartner*innen)?	Freitext
	Wie konnten diese Herausforderungen überwunden werden und was hätte besser gemacht werden können?	Freitext
	Wie hat sich ihr inhaltlicher Fokus mit dem Änderungsantrag verändert?	Freitext
	Gibt es initiale Forschungsaspekte, die Ihnen nach dem erfolgten Änderungsantrag fehlen?	Freitext
	Wo sehen Sie Gründe für die Änderungen, die sich ergeben haben?	Freitext
	Haben sich die Verschneidungen/ Abhängigkeiten mit anderen Projektpartner*innen verändert?	Freitext

Kategorie	Fragen	Antwortform
2) Projekt- partnerschaft (Zusammen- arbeit und Kommunikation)	Wie schätzen Sie die Bedeutung Ihrer Projektpartner*innen für die Erreichung der Projektziele ein?	Freitext
	Welche Erwartungen haben Sie an Ihre Projektpartner*innen?	Freitext
	Welche Herausforderungen sehen Sie in Bezug auf die Zusammenarbeit und Kommunikation mit den Projektpartner*innen?	Freitext
	Welche Rolle möchten Sie in der Zusammenarbeit mit Ihren Projektpartner*innen einnehmen?	Freitext
	Welche Herausforderungen sehen Sie in Bezug auf die inhaltliche Zusammenarbeit mit den Projektpartner*innen?	Freitext
3) Stakeholder- *innen- Konstellation	Welche individuellen Ziele möchten Sie im Projektrahmen (noch) erreichen? Welche wurden bereits erreicht? Wurden Ziele aus der Anfangsphase des Projekts verworfen?	Freitext
	Welche Qualifikationen haben Sie sich bisher im Lauf des Projekts angeeignet? Welche planen Sie, sich noch anzueignen?	Freitext
4) Projekt- management	Sind Sie zufrieden mit der Form der Kommunikation und des Informationsaustauschs im Projektteam? (z. B. zeitliche Abstände, Wechsel Präsenz/Online und Ablauf Termine) Falls nein: Was kann verändert bzw. verbessert werden?	ja/teilweise/ nein – Frage mit Freitext bei Bedarf
	Sind Sie zufrieden, in welchem zeitlichen Turnus ein gegenseitiges Update der Projektpartner*innen über den aktuellen Stand der Arbeiten erfolgt? (z. B. Statusbericht in Projektsitzungen oder Echtzeitkommunikation) Falls nicht: Was kann verändert bzw. verbessert werden?	ja/teilweise/ nein – Frage mit Freitext bei Bedarf
	Sind Sie zufrieden mit den Plattformen zum Informations- und Datenaustausch? Falls nicht: Was kann verändert bzw. verbessert werden?	ja/teilweise/ nein – Frage mit Freitext bei Bedarf
	Werden Ihre Erwartungen an das Projektmanagement erfüllt? Falls nicht: Was kann verändert bzw. verbessert werden?	ja/teilweise/ nein – Frage mit Freitext bei Bedarf

Kategorie	Fragen	Antwortform
	Sind Sie zufrieden mit dem Grad an Agilität im Projekt? (z. B. Sprints)	ja/teilweise/ nein – Frage mit Freitext bei Bedarf
	Sind ihre formalen Ansprüche an das Projektmanagement zufriedengestellt? (z. B. Protokolle) Falls nicht: Was kann verändert und verbessert werden?	ja/teilweise/ nein – Frage mit Freitext bei Bedarf
	Welche Risiken sehen Sie, die die Erreichung der Projektziele gefährden können?	Freitext
	Welchen assoziierten und externen Stakeholder*innen messen Sie eine besondere Bedeutung für den Projekterfolg bei?	Freitext
	Welche Ansprüche haben Sie an die Außendarstellung und die externe Ergebniskommunikation? (z. B. Publikationen)	Freitext
5) Ausblick auf die ersten Schritte (nicht in Dokumentation für Projektträger integrieren)	Wie schätzen Sie den Fortschritt ihrer Arbeitspakete im Vergleich zum zeitlichen Stand des Projekts ein?	Freitext
	Welche nächsten inhaltlichen oder organisatorischen Schritte sollten im nächsten Schritt kollektiv mit allen Projektpartner*innen gemacht bzw. abgesprochen werden?	Freitext

## Anlage 11: Fragebogen zur Ex-post-Begleitforschung

- Durch projektbegleitende Befragungen können informelle Prozesse und Rahmenbedingungen transparenter gemacht, die Kommunikation verbessert sowie die Effektivität und Effizienz von Projekten erhöht werden.
- Die Befragung wird als Online-Fragebogen geplant, um den Bearbeitungsaufwand geringer zu halten. Teilnehmen sollen aber möglichst alle Projektpartner\*innen und alle Mitarbeitenden (Zeitaufwand ca. 15 min).
- Das Ziel besteht in der Identifikation von Hemmnissen und Erfolgsfaktoren sowie in der Verbesserung von Kommunikation und Organisation im Projekt.
- Die Erkenntnisse der begleitenden Befragung fließen in die Erstellung des Endberichts und in die Bearbeitung des Folgeprojekts ein.
- Im Ergebnis werden Gestaltungsoptionen und Handlungsempfehlungen für den Planungs- und Umsetzungsprozess abgeleitet werden: „Was können wir besser/smarter machen?“.

Kategorie	Fragen	Antwortform
1) Rückblick auf das Projekt	In welcher/n Funktion/en waren Sie im Projekt beteiligt?	Freitext
	Was sind die zentralen Ergebnisse, die Sie für Ihre Institution (z. B. Institut oder Unternehmen) erzielen konnten, und welche Chancen konnten ergriffen werden?	Freitext
	Welche zentralen inhaltlichen Herausforderungen gab es in Ihren Arbeitspaketen?	Freitext
	Wie konnten diese Herausforderungen überwunden werden, welche Methoden wurden genutzt?	Freitext
	Welche zentralen Herausforderungen gab es im Projekt in Bezug auf die Zusammenarbeit mit Ihren Projektpartner*innen?	Freitext
	Wie konnten diese Herausforderungen überwunden werden, welche Methoden wurden genutzt?	Freitext
	Welche initialen Abstimmungen (z. B. Projektskizze, Projektplan, Rollenkonstellation) hätten Sie rückwirkend gerne anders oder konkreter definiert?	Freitext
	Was sind Ihre <i>Key Learnings</i> aus dem Projekt, die Sie auf folgende Forschungsprojekte anwenden können?	Freitext

Kategorie	Fragen	Antwortform
2) Stakeholder- *innen- Konstellation	Haben sich Ihre Erwartungen an das Projekt, die den Impuls oder den Anlass für Ihre Projektteilnahme gegeben haben, erfüllt?	Freitext
	Welche individuellen Ziele wurden im Projektrahmen erreicht? Wurden Ziele aus der Anfangsphase des Projekts verworfen?	Freitext
	Welche Qualifikationen haben Sie sich im Lauf des Projekts angeeignet?	Freitext
3) Ausblick auf ein Folgeprojekt	Welche nächsten Schritte sehen Sie, um den Realisierungsprozess einer smarten Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse erfolgreich fortzuführen?	Freitext
	Inwieweit hat der neue Gesetzesrahmen zum autonomen Fahren (Verabschiedung der AFGBV und Änderung der StVO) die Anforderungen an das Projekt(management) geändert?	Freitext
	Wo sehen Sie Anknüpfungspunkte für ein mögliches Folgeprojekt?	Freitext