

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG



Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz, Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreuzfeldt, Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig,  
Dr. Johannes Hinckeldeyn, Jacqueline Maaß, Matthias Grote, Sandra Tjaden, Marko Thiel,  
Manuel Schrick, Julia Stargardt, Holger Michelmann, Julia Wolf, Liss Böckler,  
Dr.-Ing. Kerstin Rosenberger, Noel Blunder, Justin Ziegenbein, Jana Purgander,  
Julius Lohse, Lukas Weber



## Bibliografische Information

ISBN 978-3-00-072733-7

TUHH Universitätsbibliothek.  
DOI 10.15480/882.4536

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 42878-3519  
Fax +49 40 42731 41 98



### Satz & Layout

Nadia Nabaoui-Engelhard, W8

### Titelbild

Dominik Pietzko

### Fotos und Grafiken

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

Hamburg, 1. November 2022

# Endbericht des Projektes TaBuLa-LOG

Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreuzfeldt<sup>2</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig<sup>1</sup>, Dr. Johannes Hinckeldeyn<sup>2</sup>,  
Jacqueline Maaß<sup>1</sup>, Matthias Grote<sup>1</sup>, Sandra Tjaden<sup>1</sup>, Marko Thiel<sup>2</sup>,  
Manuel Schrick<sup>2</sup>, Julia Stargardt<sup>3</sup>, Holger Michelmann<sup>4</sup>, Julia Wolf<sup>4</sup>,  
Liss Böckler<sup>4</sup>, Dr.-Ing. Kerstin Rosenberger<sup>1</sup>, Noel Blunder<sup>2</sup>,  
Justin Ziegenbein<sup>2</sup>, Jana Purgander<sup>2</sup>, Julius Lohse<sup>2</sup>, Lukas Weber<sup>5</sup>

2022

## Projekt

Kombinierter Personen- und Warentransport  
in automatisierten Shuttles

## Zuwendungsempfänger\*innen

Technische Universität Hamburg (TUHH), Kreis Herzogtum Lauenburg

## Förderung

Das diesem Bericht zugrundeliegende 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

01MM19013

## Projektvolumen

1,99 Mio. Euro (davon 1,79 Mio. Euro Förderanteil durch BMDV)

## Projektlaufzeit

01/2020 – 06/2022

## Unter Mitarbeit von

Svea Berberich<sup>1</sup>, Yevgen Blank<sup>2</sup>, Maike Boerner<sup>1</sup>, Tyll Diebold<sup>1</sup>,  
Ingo Gierke<sup>7</sup>, Pia Groß<sup>1</sup>, David Grunow<sup>1</sup>, Mariya Harbalieva<sup>1</sup>,  
Anton Jenßen<sup>2</sup>, Lukas Koch<sup>2</sup>, Angie Pineda<sup>2</sup>, Benjamin Plate<sup>6</sup>,  
Corin Manuel Raabe<sup>2</sup>, Marie Sommer<sup>2</sup>, Andrea Strohkirch<sup>6</sup>  
Anja Sylvester<sup>5</sup>, Sascha Wiebers<sup>2</sup>, Andrew Yomi<sup>3</sup>

1 Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Technische Universität Hamburg

2 Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg

3 Kreis Herzogtum Lauenburg

4 Interlink GmbH, Partner im Büro autoBus

5 LaLoG LandLogistik GmbH

6 Stadt Lauenburg/Elbe

7 Yunex GmbH

# TUHH



KREIS HERZOGTUM LAUENBURG

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhalt

<b>Kurzfassung</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Kurzdarstellung des Projektrahmens</b>	<b>15</b>
1.1 Aufgabenstellung	15
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	16
1.2.1 Vorgängerprojekt	16
1.2.2 Stakeholder	18
1.2.3 Vergabeverfahren	19
1.2.4 Weitere Einflüsse	19
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	20
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	20
1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	22
1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	22
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22
<b>2 Eingehende Darstellung der Projektinhalte</b>	<b>24</b>
2.1 Systemanalyse zur Integration kombinierter Personen- und Gütertransporte in die bestehende Testumgebung des Projektes TaBuLa	29
2.1.1 Auswahl des Einsatzgebietes	29
2.1.2 Auswahl des logistischen Anwendungsfalls	31
2.1.3 Beschreibung und Darstellung der bestehenden Prozesse zur Beförderung der Hauspost der Verwaltung Lauenburg/Elbe	31
2.2 Entwicklung eines mobilen, automatisierten Transportroboters	35
2.2.1 Anforderungen an Transportroboter	35
2.2.2 Anforderungen an App und Server-Backend	40
2.2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Sicherheit von Transportrobotern	40
2.2.4 Roboterentwicklung – Hardware	41
2.2.5 Genehmigung zum Betrieb	49

2.3	Implementierung des Transportroboters in das Reallabor und das Betriebskonzept des automatisierten Shuttles	54
2.3.1	Fahrzeugsteuerung des Transportroboters und Umsetzung des Sicherheitskonzepts	54
2.3.2	Mapping von Innen- und Außenbereichen	57
2.3.3	Automatisierte Fahrt und Hinderniserkennung – Konzept und Implementierung	58
2.3.4	Kommunikationsschnittstellen zwischen Transportroboter und Shuttle sowie Infrastruktur	61
2.3.5	Kontinuierliche Tests innen/außen und iterative Verbesserungen	63
2.3.6	Kontinuierliche Tests an Shuttle und Mockup	64
2.4	Testbetrieb des kombinierten Personen- und Gütertransports	65
2.4.1	Test szenarien	65
2.4.2	Abstimmung Prozessabläufe mit Versender und Empfänger	76
2.4.3	Bereitstellung notwendiger Infrastruktur für den Testbetrieb	77
2.4.4	Iterative Weiterentwicklung des TaBuLa-Betriebes in Verbindung mit dem Transportroboter	83
2.4.5	Durchführung des Testbetriebes	84
2.5	Auswertung der Test szenarien	86
2.5.1	Begleitforschung zum Testbetrieb	86
2.5.2	Befragung der Nutzenden des öffentlichen Busverkehrs sowie der Bevölkerung der Stadt Lauenburg/Elbe	90
2.5.3	Befragung von Fachkundigen aus der Logistik und Industrie	97
2.5.4	Vorher-Nachher-Vergleich aus ökonomischer Perspektive	100
2.5.5	Evaluation eines automatisierten kombinierten Personen- und Gütertransports	103
2.5.6	Evaluation der aufgebauten Transportroboter	110
<b>3</b>	<b>Tabellarische Zusammenfassung</b>	<b>112</b>
3.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	112
3.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	115

<b>4</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b>	<b>118</b>
4.1	Systemanalyse Mobilitäts- und Logistikanforderungen	118
4.2	Entwicklung eines mobilen, automatisierten Transportroboters	118
4.3	Implementierung der Logistik-Schnittstelle in das Betriebskonzept des automatisierten Shuttles	119
4.4	Testbetrieb des automatisierten Shuttles und des automatisierten Transportroboters	119
4.5	Auswertung der Testszenarien	120
4.6	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Anwendungsfelder	120
4.7	Öffentlichkeitsarbeit / ITS World Congress 2021	120
4.8	Projektkoordination	122
<b>5</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans</b>	<b>123</b>
<b>6</b>	<b>Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b>	<b>125</b>
<b>7</b>	<b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses</b>	<b>127</b>
7.1	Wissenschaftliche Veröffentlichungen	127
7.2	Veranstaltungen und Vorträge	129
7.3	Aktivitäten im Rahmen des ITS World Congress	131
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>132</b>
8.1	Erzielte Ergebnisse und Zielerreichungsgrad	133
8.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse und Limitationen des Projektes	136
8.3	Anforderungen und Handlungsempfehlungen	138
8.4	Ausblick	141
	<b>Projektbezogenes Literaturverzeichnis</b>	<b>142</b>
	<b>Dokumentbezogenes Literaturverzeichnis</b>	<b>146</b>
	<b>Anlagen</b>	<b>148</b>

## Abbildungen

Abbildung 1:	Das Shuttle aus dem TaBuLa-Projekt an der Haltestelle Lauenburg/ZOB	17
Abbildung 2:	Darstellung der Beteiligten im Projekt TaBuLa-LOG	18
Abbildung 3:	Darstellung der Ober- und Teilziele im Projekt TaBuLa-LOG	26
Abbildung 4:	Projektarbeitsschritte aufbauend auf dem bestehenden Projekt TaBuLa	28
Abbildung 5:	Strecken und Haltestellen im öffentlichen Fahrgastbetrieb des Testzentrum Lauenburg/Elbe (vor Implementierung des Transportroboterbetriebes)	30
Abbildung 6:	Gebiet der Postverteilung in der Stadt Lauenburg/Elbe, in rot eingezeichnet sind die Fahrwege des automatisierten TaBuLaShuttle	32
Abbildung 7:	Abholung der Post am Posteinlagerungszentrum	33
Abbildung 8:	Verteilung der Eingangs- und Ausgangspost zwischen den Gebäuden der Lauenburger Verwaltung	33
Abbildung 9:	Überblick und Wirkungsrichtung identifizierter Anforderungen der Bereiche Genehmigung, Anwendung und Infrastruktur an Transportroboter	37
Abbildung 10:	Überblick und Wirkungsrichtung identifizierter Anforderungen der Bereiche Genehmigung, Anwendung und Transportroboter an Entwicklung, Infrastruktur und Anwendung	38
Abbildung 11:	Prototyp Version V1	43
Abbildung 12:	Sensorkonzept mit Sichtfeldern und Reichweiten	44
Abbildung 13:	Prototyp Version V2	45
Abbildung 14:	Prototypen Version V3	46
Abbildung 15:	Fertig beklebte Lauras	48
Abbildung 16:	Erster Prototyp des größeren Transportroboters im Shuttle-Mockup	48
Abbildung 17:	Technische Nachweise	51
Abbildung 18:	Funk-Not-Stopp-Taster und Bluetooth-Controller	55
Abbildung 19:	Hauptansicht der Benutzeroberfläche des Touch-Screen-Interface auf dem Roboter	56
Abbildung 20:	erstellte Karte sowie eine Überlagerung der Karte mit den Laserscans eines Transportroboters	58
Abbildung 21:	Screenshots der App zur Beauftragung von Transporten	63
Abbildung 22:	Prototyp Laura bei Einfahrt ins TaBuLaShuttle an der Haltestelle Fürstengarten	64
Abbildung 23:	Testszzenarien im Projekt TaBuLa-LOG	66
Abbildung 24:	Alle Strecken und Haltestellen im Rahmen der Umsetzung von TaBuLa-LOG	67
Abbildung 25:	Szenario 1: Prozessstart und Postanlieferung Posteinlagerungszentrum	68
Abbildung 26:	Szenario 1 und 2: Transport zu und von den Abteilungen am Amtsplatz	69

Abbildung 27: Szenario 1: Transport zum und vom Elbschiffahrtsmuseum	70
Abbildung 28: Szenario 2: Prozessstart und Postanlieferung Posteinlagerungszentrum	71
Abbildung 29: Szenario 2: Transport zum und vom Elbschiffahrtsmuseum	72
Abbildung 30: Szenario 3: Prozessstart und Postanlieferung Posteinlagerungszentrum	73
Abbildung 31: Szenario 3: Transport zu und von den Abteilungen am Amtsplatz	74
Abbildung 32: Szenario 3: Transportprozess am und vom Elbschiffahrtsmuseum	75
Abbildung 33: Prozessabschluss im Szenario 3	75
Abbildung 34: Karte der drei befahrenen Strecken mit notwendigen Infrastrukturmaßnahmen	77
Abbildung 35: Haltestelle am Posteinlagerungszentrum mit einem temporär eingesetzten Kunststoffpodest	79
Abbildung 36: Haltestelle am Fürstengarten	79
Abbildung 37: Temporär aus Holz unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes umgebaute TaBuLa-Haltestelle am Kirchplatz	80
Abbildung 38: Verkehrszeichen VZ101 »Gefahrenstelle« mit Zusatzzeichen für TaBuLa	81
Abbildung 39: Anzahl der durchgeführten Szenarien im Testbetrieb	87
Abbildung 40: Anzahl der Störungen im Betriebsablauf	89
Abbildung 41: Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Befragung »Wochenmarkt«	91
Abbildung 42: Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Fahrgastbefragung	92
Abbildung 43: Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Befragung am Public Day	92
Abbildung 44: Auswertung der Frage 1	93
Abbildung 45: Marktbefragung: Einstellungen, Erwartungen und Ängste	94
Abbildung 46: Fahrgastbefragung: Einstellungen, Erwartungen und Ängste	95
Abbildung 47: Public Day: Einstellungen, Erwartungen und Ängste	96
Abbildung 48: Herausforderungen für die Logistik	98
Abbildung 49: Potenzielle Einsatzszenarien von Transportrobotern im öffentlichen Raum	98
Abbildung 50: Notwendige Spezifikationen und Voraussetzungen für den Einsatz von Transportrobotern	99
Abbildung 51: Vergleich der Gesamtkosten pro Kilometer und prozentuale Verteilung der Kostenkomponenten	100
Abbildung 52: Kosten der Szenarien für die Stadt und die Verkehrsbetriebe	101
Abbildung 53: Komponentenkosten des Transportroboters »Laura«	102
Abbildung 54: Anzahl der Einsteigenden ins TaBuLaShuttle je Betriebstag im Jahr 2021 bei annähernd gleichem Fahrtenangebot	105
Abbildung 55: Anzahl der Einsteigenden ins TaBuLaShuttle je Zeitfenster im Jahr 2021 (Startzeit in die Strecke 3 ist maßgeblich für Einordnung in Zeitfenster)	105
Abbildung 56: TaBuLaShuttle und Transportroboter Laura auf dem ITS World Congress 2021	121
Abbildung 57: Transportroboter Laura im TaBuLaShuttle während der Fahrt	122
Abbildung 58: TaBuLa-LOG-Messestand auf dem ITS World Congress	131
Abbildung 59: Kurzübersicht über die Projektergebnisse und Handlungsbedarfe	132



## Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht Planung und Ablauf des Vorhabens	20
Tabelle 2:	Nutzen im B2B-Verkehr	36
Tabelle 3:	Nutzen im B2C-Verkehr	37
Tabelle 4:	Eskalationsplan bei Störungen im Transportprozess	76
Tabelle 5:	Prozesszeiten in den Szenarien vor und nach der Fahrplanänderung	88
Tabelle 6:	Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens A (TUHH)	112
Tabelle 7:	Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens B (Kreis)	114
Tabelle 8:	zahlenmäßiger Nachweis	115
Tabelle 9:	Verwertung Teilvorhaben A (TUHH)	123
Tabelle 10:	Verwertung Teilvorhaben B (Kreis)	124
Tabelle 11:	Veröffentlichungen Teilvorhaben A und B	127
Tabelle 12:	Veranstaltungen und Vorträge Teilvorhaben A und B während der Projektlaufzeit (Auszug)	129
Tabelle 13:	Aktivitäten im Rahmen des ITS-World Congress der Teilvorhaben A und B	131

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface
AVAS	Acoustic Vehicle Alert System (akustisches Warnsystem für geräuscharme Fahrzeuge)
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (ehemals BMVI)
BMI	Bundesministerium des Inneren
B2C	Business to Consumer
B2B	Business to Business
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FIN	Fahrzeugidentifikationsnummer
FZV	Fahrzeug-Zulassungsverordnung
GNSS	Globales Navigationsatellitensystem
HAW	Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
HS	Haltestelle
ITL	Institut für technische Logistik
ITS World Congress	World Congress on Intelligent Transport Systems

KEP	Kurierexpressdienst
Laura	Lauenburgs Automatisierte Roboter Auslieferung
LOG	LOGistik
LSA	Lichtsignalanlage
MWVATT	Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein
M2M	Machine to Machine
OBU	Onboard Unit
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
PEZ	Posteinlagerungszentrum
RSU	Road-Side Unit
SAE-Level	Von der Society of Automotive Engineers (SAE) definierte Automatisierungsklassen für automatisierte Fahrsysteme, die im SAE-Standard J3016 mit SAE-Level bezeichnet werden.
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SPAT	Signal Phase and Timing (Standardisierte Datensätze einer Road-Side Units)
SQL	Structured Query Language (Datenbanksprache)
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
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
TCO	Total Cost of Ownership
TLS	terrestrial laser scanner (Terrestrischer Laserscanner)
TUHH	Technische Universität Hamburg
UGV	Unmanned Ground Vehicle (unbemanntes Bodenfahrzeug)
VBE	Versorgungsbetriebe Elbe GmbH
VHH	Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH
VPL	Institut für Verkehrsplanung und Logistik
V&V	Verifikation und Validierung
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything

## Kurzfassung

Im Projekt TaBuLa-LOG wurde auf den Ergebnissen des Vorläuferprojektes »Testzentrums für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg« (TaBuLa) aufgebaut und dem funktionierenden automatisierten Shuttlebetrieb die Komponente des Gütertransports hinzugefügt.

Die Weiterentwicklung des reinen Personentransports als Kombination aus Personen- und Gütermobilität wurde erprobt, um die bisherige oftmals singuläre Konzentration auf getrennte Systeme vor dem Hintergrund der Ressourcenbündelung für automatisierte Transportmittel zu untersuchen. In ländlicheren Regionen kann die Verknüpfung von Personen- und Gütermobilität einen Beitrag zur Nachhaltigkeit von Verkehren leisten, wo die Konzentration auf getrennte Systeme bisher aus wirtschaftlicher Sicht keinen Erfolg verspricht.

Insgesamt wurde mit dem Projekt erfolgreich die Ermittlung von Einsatzpotenzialen und -szenarien für einen kombinierten Anwendungsfall von Personenbeförderung und Gütertransport erreicht, sowie die erfolgreiche Konzeption und der Bau von automatisierten Transportrobotern, die im Realbetrieb mit den Shuttlebussen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) eingesetzt wurden. Dabei stand die Erprobung der Einführung und Nutzung von Automatisierungstechnologie, der Verständnissgewinn über die Interaktionen von Mensch und Technik, die Auswirkungsabschätzung für den gemeinsamen Betrieb, die Akzeptanz der potentiellen Nutzenden sowie die Kosten für einen gemeinsamen Personen- und Gütertransport im Fokus des Projektes. Darüber hinaus sollten Erkenntnisse zu Entwicklungs- und Genehmigungsprozesse für Transportroboter im aktuellen Rechtsrahmen gesammelt werden.

Als Erfahrung kann im Hinblick auf den Bau von geeigneten Roboterplattformen genannt werden, dass es insbesondere an kompakten, für den Einsatz im Straßenverkehr ausgelegten Bauteilen und Sensoren mangelt und die Entwicklung zum derzeitigen Stand über SAE-Level 3 nur unter einer Weiterentwicklung der Randbedingungen hinaus käme.

Insgesamt ist es rechtlich und technisch möglich, kombinierten automatisierten Betrieb zu realisieren, auch wenn automatisierte Transportroboter aktuell nicht explizit vom Rechtsrahmen erfasst werden. Darüber hinaus sind Infrastrukturmaßnahmen in gewissem Maße für den Betrieb notwendig. Dies gilt vor allem für die digitalen Komponenten Mobilfunk, WLAN, Bluetooth und Ortung (GNSS) und die physische Komponente der Barrierefreiheit. Die Vernetzung von Infrastruktur, Shuttles und digitalen Anwendungen hat gute Lösungen hervorgebracht. Bei Störungen erwies sich dies jedoch als Herausforderung.

Im Hinblick auf den ÖPNV ist zu konstatieren, dass die Berücksichtigung von menschlichen Interaktionen mit automatisierter Technik nur in Anfängen entwickelt ist. Die Standardisierung von Schnittstellen ist daher empfehlenswert.

Auch die Kosten für Anschaffung und Betrieb sind aktuell noch zu hoch, um Transportroboter für Güter wirtschaftlich im ÖPNV einsetzen zu können. Einsparungen von Kosten sind zu erwarten, sobald eine Serienfertigung möglich und keine Begleitperson mehr erforderlich ist. Für kombinierte Logistikprozesse zeigen sich sinnvolle Anwendungsfälle bei hoher Akzeptanz der Bevölkerung, wie beispielsweise bei Hauspostlieferung, Gastronomie bis hin zur Quartierslogistik, die auch kooperative Ansätze umfassen können. Insbesondere in Handels- und Dienstleistungsunternehmen könnten Anwendungsbedarfe bestehen. Denkbar ist der Einsatz sowohl im Business to Business (B2B) als auch im Business to Customer (B2C) Bereich.

Durch das Fehlen standisierter Prozesse war der Projekterfolg insgesamt abhängig vom besonderen Engagement vieler Einzelner. Viel Wissen entstand daher bei Beteiligten in Verwaltung, Unternehmen, Forschung und Lehre. Potenzial, das in ganzheitlicher Verwertung in verschiedenen Folgeprojekten genutzt werden kann.

## Abstract

The TaBuLa-LOG project was based on the results of the previous project »Test center for automated buses in the district Duchy of Lauenburg« (TaBuLa) and added the component of goods transport to the functioning automated shuttle service. The further development of pure passenger transport towards a combination of passenger and goods mobility was tested in order to examine the previous, often singular concentration on separate systems against the background of resource bundling for automated means of transport. In more rural regions, the linking of passenger and goods mobility can make a contribution to sustainability of transport, where concentration on separate systems has so far not promised any success from an economic point of view.

Overall, the project successfully identified application potential and scenarios for a combined application of passenger and goods transport, as well as the successful design and construction of automated transport robots, which were used in real operation with the automated shuttle buses in local public transport. The focus of the project was on testing the introduction and use of automation technology, gaining understanding of the interactions between people and technology, assessing the impact of joint operation, acceptance by potential users and the costs of joint passenger and goods transport. In addition, findings on development and approval processes for transport robots in the current legal framework were collected.

With regard to the construction of suitable robot platforms, it can be mentioned from experience that there is a particular lack of compact components and sensors designed for use in road traffic and that the current development would only go beyond SAE-Level 3, if the boundary conditions were further developed. Overall, it is legally and technically possible to implement combined automated operation, even if automated transport robots are currently not explicitly covered by the legal framework. In addition, infrastructure measures are necessary to a certain extent for operation. This applies above all to the digital components of mobile communications, WLAN, Bluetooth and positioning (GNSS) and the physical component of accessibility. The networking of infrastructure, shuttles and digital applications has produced good solutions. In the event of disruptions, however, this proved to be a challenge.

With regard to public transport, it can be stated that the consideration of human interactions with automated technology is only in its infancy. The standardization of interfaces is therefore recommended. The costs for acquisition and operation are currently still too high to be able to use transport robots for goods economically in public transport. Cost savings can be expected as soon as mass production is possible and an accompanying person is no longer required. For combined logistics processes, there are useful applications with a high level of acceptance by the population, such as internal mail delivery, gastronomy and district logistics, which can also include cooperative approaches. Especially trading and service companies could have a need for application. Use in both the B2B and B2C sectors is possible.

Overall, the success of the project depended on the special commitment of many individuals due to the lack of standardized processes. A lot of knowledge was therefore created by many people involved in administration, research and teaching. Potential that can be used holistically in various follow-up projects.

## 1 Kurzdarstellung des Projektrahmens

Das nachfolgende Kapitel enthält, für einen ersten Überblick über die Ausgangsbedingungen, eine kurze Darstellung des Projektrahmens von TaBuLa-LOG. Zunächst wird eine Erläuterung der Aufgabenstellung gegeben, dann die unterschiedlichen Erfolgsfaktoren und Hemmnisse unter denen das Projekt durchgeführt wurde, wie beispielsweise die Darstellung der Stakeholder und die Anknüpfungspunkte aus dem Vorgängerprojekt, beschrieben. Daran anschließend wird kurz die Projekt- und Ablaufplanung erläutert, sowie auf den Stand der Technik eingegangen und entsprechende Literatur angegeben.

### 1.1 Aufgabenstellung

Um ein zukunftsfähiges und nachhaltiges Mobilitätssystem zu entwickeln, müssen neue Lösungen entwickelt werden, die dort eine Kombination aus Personenbeförderung und Gütertransport stärken und mitdenken, wo die Konzentration auf getrennte Systeme aus Ressourcengründen wenig Erfolg verspricht. Die Verknüpfung von Personen- und Gütermobilität kann eine Chance sein, das Mobilitätssystem der Zukunft nachhaltiger zu gestalten. Die Forschung im Bereich der Personen- und der Gütermobilität erfolgte bisher zumeist getrennt voneinander. Übergreifende Lösungen wurden wenig entwickelt, obwohl Bündelungs- und Reduzierungspotenziale von Verkehren naheliegend sind. An diesem Punkt setzte das Projekt TaBuLa-LOG an.

Inhalt der Aufgabenstellung des Projektes war, damit eine Mobilitätslösung zu finden, die den Gütertransport mit dem ÖPNV verbindet. Bestehende regelmäßige Verkehre des ÖPNVs zwischen zwei Punkten sollten genutzt werden, um Waren zu transportieren. Ein besonderer Fokus des Projektes lag daher auf der Integration des Gütertransportes in den bestehenden, realen und automatisierten Shuttle-Betrieb des Projektes TaBuLa im öffentlichen Raum der Stadt Lauenburg/Elbe. Für eine Verknüpfung dieser beiden Mobilitätsformen sollte für den Gütertransport eine Roboterplattform dienen, mit der Waren in das automatisierte Shuttle und zum Empfänger transportiert werden. Automatisierte Transportroboter als Schnittstelle zwischen Versendendem und Empfangenden waren bislang jedoch wenig erforscht. Sie waren lediglich als Service verfügbar und werden nicht einzeln vertrieben. Diese Forschungslücke sollte im Rahmen des Projektes TaBuLa-LOG geschlossen werden, indem Transportroboter speziell für diesen Anwendungsfall entwickelt wurden.

Die Zusammenführung dieser beiden Projektschwerpunkte sollte dabei durch eine Integration des Warenverkehrs in den bestehenden und weiterzuführenden automatisierten Shuttle-Betrieb mithilfe von drei Szenarien erfolgen:

In den ersten beiden Szenarien lag dabei der Fokus auf der Einbindung und Anpassung der logistischen Ketten des Gütertransports zur Integration in die Prozesse des Personentransports. Im dritten Szenario lag schließlich der Fokus auf der Automatisierung des Gütertransportes mit Hilfe des neu entwickelten Transportroboters.

Durch den stufenweisen Aufbau der Szenarien sollte eine kontinuierliche, weitere Steigerung dieser Komplexität sichergestellt werden. Gleichzeitig sollte dieses stufenweise Vorgehen ermöglichen, bei der Auswertung der Szenarien, eine differenzierte Wirkungsabschätzung und Evaluation der Akzeptanz der Empfangenden und Nutzenden des öffentlichen Shuttle-Betriebes zu erhalten. Aufbauend auf den Auswertungen sollten sich schlussendlich Bündelungs- und Verlagerungspotenziale zur nachhaltigen Effizienzerhöhung des Mobilitätssystems für den Waren- und Personentransport abschätzen lassen.

Mit diesem anwendungsnahen Forschungsvorhaben war das Ziel verbunden, die gewonnenen Erkenntnisse des Projektes sowohl für kommunale Organisationen zum Gütertransport als auch für Verkehrsunternehmen und Technologiehersteller nutzbar zu machen. Darüber hinaus bietet es Ansatzpunkte, um eine optimale Rahmensetzung für das automatisierte Fahren im Mobilitätssystem durch die Politik zu schaffen.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt war von Beginn der ersten Idee mit verschiedenen externen Erfolgs- und Hemmnisfaktoren verbunden, die im Nachfolgenden beschrieben werden.

### 1.2.1 Vorgängerprojekt

Das Projekt TaBuLa-LOG baute auf dem Vorgänger TaBuLa auf und das Projektteam konnte sich hierdurch zum größten Teil bereits. Als wesentliches Merkmal für den Start des Projektes hat sich die äußerst positive Perzeption des Vorgängerprojektes erwiesen. Die positive Resonanz auf das im Vorgängerprojekt TaBuLa entstandene Testzentrum für automatisiert fahrende Shuttle und die mit dem Projekt TaBuLa-LOG verbundene Fortführung des Shuttlebetriebes hatte von Beginn an bei beteiligten Ämtern, Behörden und bei der Politik gute Unterstützung.



Durch die Anknüpfung an bestehende Strukturen und Prozesse waren neben einem Shuttle auch bereits die notwendigen Genehmigungen für die Personenbeförderung mit automatisierten Shuttles vorhanden. Im Vorgängerprojekt wurden bereits zum Teil die Bushaltestellen rollstuhlgerecht ausgebaut, was auch rollenden Transportrobotern zugutekommt. Zusätzlich waren die Erfahrungen zur Durchführung eines automatisierten Betriebes aus dem vorangegangenen Projekt hilfreich, um die Transportroboter in den öffentlichen Verkehr zu implementieren.

**Abbildung 1:** Das Shuttle aus dem TaBuLa-Projekt an der Haltestelle Lauenburg/ZOB



Quelle: DP-Lünemedia

## 1.2.2 Stakeholder

Im Rahmen der Realisierung des kombinierten Personen- und Güterverkehrs waren verschiedene Akteur\*innen als Stakeholder zu involvieren. Zur maßgeblichen Mitwirkung wurden Obere und Untere Genehmigungsbehörden und eine technische Prüforganisation identifiziert. Hinzu kamen die Eigentümer bzw. Straßenbaulastträger der befahrenen Flächen, Verkehrsunternehmen und das Postverteilzentrum sowie die städtischen Einrichtungen.

Als Betroffene gelten Nutzende, Anwohnende und weitere Verkehrsteilnehmende.

Unter die Interessierten fallen die allgemeine Öffentlichkeit, Fachpublikum (besonders im Rahmen des »World Congress on Intelligent Transport Systems« (ITS World Congress)) und die kommunale Politik.

Eine Grundvoraussetzung für die Erreichung der Projektziele ist auch eine gute Kooperation und Beteiligung von verschiedenen Zulieferunternehmen und Dienstleistern. Hier konnte auf gute Kooperationen mit den assoziierten Partnern und bewährten Unternehmen aus dem Vorgängerprojekt zurückgegriffen werden. Die Abbildung 2 zeigt einen Überblick über die relevanten Beteiligten.

**Abbildung 2:** Darstellung der Beteiligten im Projekt TaBuLa-LOG



### 1.2.3 Vergabeverfahren

Kreis Herzogtum Lauenburg und TUHH haben als öffentliche Institutionen für alle Beschaffungen entsprechend der vorgegebenen Wertgrenzen Ausschreibungen durchgeführt.

Für die Bereitstellung automatisierter Shuttle für den kombinierten Personen- und Gütertransport wurde aufbauend auf TaBuLa eine erneutes Verhandlungsverfahren aufgesetzt, in dem von fünf Herstellern zwei Hersteller Angebote abgegeben haben. Den Zuschlag erhielt nach Abschluss des Vergabeverfahrens der Hersteller, der auch im Vorgängerprojekt die Leistungen hierzu erbracht hat.

Einige Vergaben in Bezug auf den etwaigen Anpassungsbedarf bei der lokalen Infrastruktur (z. B. lokale Wege befestigen oder wetterfeste Hütte samt Lademöglichkeit für Transportroboter ertüchtigen) wurden im Wesentlichen durch die Stadt Lauenburg/Elbe (als Eigentümerin dieser Objekte), unter Einhaltung der Vergabevorgaben, durchgeführt. Einige weitere Verträge konnten aus dem Vorgängerprojekt verlängert werden, wenn auf die Grundleistung aus dem Vorgängerprojekt aufgesetzt werden musste (z. B. Garage, weiterer Ausbau der Lichtsignalanlagentechnik, Bereitstellung von Fahrpersonal für Shuttle).

Alle Vergabeverfahren verliefen erfolgreich durch Beauftragung und Erbringung der Leistung. Weitere Angaben zu größeren Ausgaben im Projekt sind zu finden im Kapitel 3.2: Zahlenmäßiger Nachweis.

### 1.2.4 Weitere Einflüsse

Eine weitere ungeahnte Voraussetzung, unter der das Vorhaben durchgeführt wurde, war die COVID-19-Pandemie. Gesamtgesellschaftliche Einschränkungen führten dazu, dass der Betrieb zeitweise eingestellt werden musste. Hintergrund war der Schutz der Gesundheit des Begleitpersonals und der Mitfahrenden, Ausfall von Fahrpersonal durch Krankheit und Quarantäne etc.

Angelehnt an die beiden sogenannten »Lockdowns« wurde entschieden, dass zwischen dem 15.03.2020 und dem 18.05.2020 sowie zwischen dem 16.12.2020 und dem 31.05.2021 keine Fahrgäste im Shuttle befördert werden, um einen Teil zur Eindämmung der Pandemie beizutragen. Zwischen den vorgenannten Zeiträumen hat eine pandemiebedingte reduzierte Fahrgastplatzanzahl auf bis zu maximal drei Personen im Shuttle zu einer geringeren Fahrgastkapazität pro Tag und somit zu weniger Resonanz in der Fahrgastbefragung geführt. Zudem konnten mehrere vorgesehene Workshops und eine große Veranstaltung gar nicht, nur in reduzierter Form oder nur online ohne das Erlebnis im Reallabor, durchgeführt werden. Die Projektarbeit innerhalb des Teams war unter Pandemiebedingungen besonders herausfordernd und die Zusammenarbeit hat außerhalb der Versuche vor Ort fast ausschließlich digital stattgefunden. Hinzu kamen Lieferengpässe und Verzögerungen bei Bauteilkonstruktionen und die zeitweise Schließung der Werkstätten und Labore an der TUHH. Trotzdem konnten die wesentlichen Projektziele durch eine kostenneutrale Projektverlängerung um sechs Monate und den besonderen Einsatz der Projektbeteiligten erreicht werden.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß Förderantrag und -bescheid ergaben sich folgende Meilensteine für das Projekt. Es wurde ein ausführlicher Projektterminplan erstellt, um Projektverlauf, -abhängigkeiten und -risiken beobachten zu können. Folgende Meilensteine kennzeichnen den Projektverlauf (Tabelle 1):

**Tabelle 1:** Übersicht Planung und Ablauf des Vorhabens

Meilenstein Nr.	Geplanter Termin	Ziel	Tatsächlicher Termin
1	02/2020	Die Mobilitäts- und Logistikanforderungen sowie potenzielle Einsatzszenarien sind identifiziert.	02/2020
2	05/2020	Alle Transportroboter sind vollständig montiert und mit Sensorik ausgestattet.	05/2020 (unter Einschränkungen)
3	01/2021	Die Implementierung eines Transportroboters in den automatisierten Shuttle-Betrieb ist erfolgt.	07/2021
4	10/2021	Der Testbetrieb ist abgeschlossen. Ein weiterer Regelbetrieb bis Projektende ist möglich.	11/2021
5	12/2021	Die Evaluation und Wirkungsabschätzung sind abgeschlossen.	06/2022

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Eine Kombination von automatisiert fahrenden Transportrobotern mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen im ÖPNV ist den Projektbeteiligten aus anderen Projekten nicht bekannt. Hinsichtlich des Stands der Technik zu automatisierten Transportmitteln wird auf den Abschlussbericht des Projektes TaBuLa (Gertz et al. 2021) verwiesen.

In der bestehenden Literatur gibt es unterschiedliche Veröffentlichungen, die sich mit dem Einsatz von Transportrobotern im Allgemeinen auseinandersetzen. Der folgende wissenschaftliche Stand ist dem Artikel nach Grunow et al. (2022) entnommen, der im Rahmen des Projektes erstellt wurde:

»Der Einsatz von automatisierten Transportrobotern im urbanen Raum bzw. im B2C- und B2B-Bereich geht derzeit selten über Pilotprojekte hinaus

(vgl. Sonneberg et al. 2019:1540). Zu den relevanten herstellenden Unternehmen zählen Starship Technologies, Dispatch und Marble. Starship Technologies führte beispielsweise bereits Tests und Pilotprojekte zur Auslieferung von Fertiggerichten, E-Grocery oder Medikamenten sowie Kurier-, Express-, Paket-Dienstleistung (KEP) durch (vgl. Sonneberg et al. 2019: 1540f.; Fraunhofer IML und LNC 2020:27). Aufgrund der Entwicklung hin zu kleineren Warenströmen wird davon ausgegangen, dass Transportroboter zukünftig 80 bis 95% aller Paketsendungen transportieren könnten (vgl. Clausen et al. 2016: 44; Sonneberg et al. 2019:1540f.). Transportroboter verkehren derzeit mit einer Geschwindigkeit von bis zu 6 km/h auf Fußwegen und meiden Straßen (vgl. Boysen et al. 2020:28). Das Transportgut wird in integrierten Fächern befördert, welche während des Transports verschlossen sind und am Zielort individuell entriegelt werden können, so dass jede empfangende Person nur Zugang zu der für sie bestimmten Sendung hat. Aktuell können Transportroboter über bis zu vier solcher Fächer verfügen und somit bis zu vier verschiedene Kund\*innen pro Tour beliefern (vgl. Sonneberg et al. 2019:1540). Insgesamt ist eine maximale Zuladung von 15 kg möglich (vgl. Boysen et al. 2020:28; STARSHIP 2021). Während der Fortbewegung können die Transportroboter in der Regel unterschiedlichen Hindernissen automatisch ausweichen. Findet ein Transportroboter selbstständig keinen Ausweg, kann er aus der Ferne manuell gesteuert werden (vgl. Sonneberg et al. 2019:1540).

Auch in der Literatur wird sich intensiv mit dem Einsatz von automatisierten Transportrobotern im urbanen Raum auseinandergesetzt. Dabei werden verschiedene Perspektiven eingenommen. So werden u. a. technische Herausforderungen und mathematische Ansätze zur Optimierung von Transportabläufen untersucht (vgl. Boysen et al. 2020:27 ff.). Außerdem werden Modellsimulationen zur Abschätzung der Effekte auf Energieverbrauch, Emissionen oder Service Level durchgeführt (vgl. Poeting et al. 2019a; Poeting et al. 2019b; Figliozzi und Jennings 2020). Ebenso findet der rechtliche Rahmen für automatisierte Transportroboter Beachtung (vgl. Jennings und Figliozzi 2019). Auch die unterschiedlichen Anforderungen an den Einsatz von Transportrobotern in einem kombinierten Personen- und Warentransport werden in der bestehenden Literatur genannt (vgl. Thiel et al. 2021). Obwohl die Perspektive der Anwender\*innen von grundlegender Bedeutung für die Technologie- bzw. Produktentwicklung ist und dieser auf Basis von Anforderungen eine Orientierung geben kann (vgl. Bender und Gericke 2021:178 ff.), wird sie in der bestehenden Literatur zu Transportrobotern zumeist vernachlässigt. Durch die Beantwortung der einleitend gestellten Forschungsfragen wird im Folgenden ein Beitrag zum Schließen dieser Forschungslücke geleistet.« (Grunow et al. 2022)

### 1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Der Personenverkehr wurde mit den Technologien und Konstruktionen aus dem Vorgängerprojekt TaBuLa durchgeführt (siehe Gertz et al. 2021).

Die Entwicklung der Transportroboter nutzte keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte. Der Aufbau erfolgte damit als Eigenentwicklung auf Basis kommerziell erhältlicher Komponenten (zum Beispiel Roboterbasis, Rechner, Sensoren) sowie als Open Source verfügbaren Software-Lösungen (zum Beispiel Robot Operating System und Ubuntu Linux).

Auf Anfrage bei einem bereits in Deutschland tätigen Betreiber von Transportrobotern im öffentlichen Raum wurde auf das abweichende Geschäftsmodell verwiesen, welches nur den kompletten Service einer Transportdienstleistung umfasst, nicht den Vertrieb einzelner Roboter für externe Weiterentwicklungen. Dies entsprach nicht den in TaBuLa-LOG gesetzten Projektzielen eines offenen und transparenten Roboteraufbaus, weshalb die Transportroboter im Projekt komplett neu aufgesetzt wurden. Das gewählte Vorgehen stellt eine Neuheit dar, die offene Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten auf allen technischen Hard- und Softwareebenen an der TUHH zulässt.

### 1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Projekt wurde umfangreich auf internationale Literatur zurückgegriffen, die im Anhang unter »Projektbezogenes Literaturverzeichnis« aufgeführt ist.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zu Projektbeginn standen die Mitwirkenden bei Kreis und TUHH fest. In Kombination mit den nachfolgend aufgezeigten assoziierten Partner\*innen ist ein optimales Team entstanden.

## Assoziierte Partner\*innen

- ▶ **Büro autoBus** (Interlink GmbH) unterstützte in Zusammenarbeit mit **LaLog Landlogistik GmbH** als Unterauftragnehmer der TUHH das Projekt mit umfassenden Beratungsleistungen zu Betrieb, Genehmigung und Beschaffung. Darüber hinaus wurden Risikoanalysen für die Erweiterung der Shuttle-Einsatzumgebung (Operational Design Domain – ODD) sowie für den Einsatz des automatisierten Transportroboters erstellt, die auch Bestandteil der Genehmigung sind. Darüber hinaus wurde beim ITS World Congress im Rahmen der Ausstellung und Demonstration unterstützt.
  
- ▶ Die **Stadt Lauenburg/Elbe** war für das Projekt mit erheblicher lokaler Unterstützung bei Genehmigungsprozessen und der Umsetzung zur Realisierung und Unterhaltung der Strecken beteiligt. Darunter waren neben organisatorischen Aufgaben auch u. a. die Betreuung des Testbetriebes, die Beratungen hinsichtlich Verkehr, Denkmalschutz, Barrierefreiheit. Neben den Verkehrsflächen wurden auch Räumlichkeiten und Technik für Veranstaltungen und die Unterbringung der Fahrzeuge und des Materials bereitgestellt.
  
- ▶ **Siemens Mobility GmbH** (im späteren Projektverlauf unter dem Namen **Yunex GmbH**) stand dem Projekt mit technischer Unterstützung bei der Realisierung der V2X-Kommunikation zur Seite.
  
- ▶ Die **Versorgungsbetriebe Elbe GmbH** (VBE) hat eine Garage zur Einstellung der Shuttle mit Lademöglichkeit und mit Sanitärräumen sowie technischen Support in der Außenstelle Lauenburg/Elbe zur Verfügung gestellt.
  
- ▶ Die **Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH** (VHH) waren als Betreiber der automatisierten Shuttle eingebunden. Sie stellten das Begleitpersonal und Knowhow für die Personenbeförderung bereit.
  
- ▶ Die **E&K Automation GmbH** (E&K) unterstützte die Entwicklung der Fahrerlosen Transportsysteme.

**Büro autoBus**



**Interlink**  
Controlling



**LAND LOGISTIK**



**LAUENBURG ELBE**  
A TE  
SCHIFFERSTADT  
AM STROM



**Y U N = X**  
**TRAFFIC**



**Versorgungsbetriebe**  
**Elbe GmbH**



**VHH**  
Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein



**EK**  
**AUTOMATION**



Diese Liste der Unterstützenden ist bei Weitem nicht vollständig, es waren neben den Genehmigungsbehörden von Kreis und Stadt auch das **Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein** (MWVATT) engagiert. Hinzu kamen verschiedene lokale Betriebe und Nachunternehmer, die zum Projekterfolg beigetragen haben.

## 2 Eingehende Darstellung der Projekthinhalte

In diesem Kapitel werden nachfolgend alle inhaltlich relevanten Aspekte, Schritte und Themen aufgezeigt, die zur erfolgreichen Umsetzung eines kombinierten automatisierten Personen- und Güterverkehrs in Lauenburg/Elbe notwendig waren. Diese Kapitel sind in ihrer Reihenfolge überwiegend chronologisch angelegt für eine bessere Nachvollziehbarkeit. Nach einem kurzen generellen Problemaufriss wird zunächst eine Darstellung der notwendigen Systemanalyse mit der Auswahl des Einsatzgebiets und der Bestimmung des logistischen Anwendungsfalls sowie der Prozessbeschreibung als Vorarbeiten zur Entwicklung eines Transportroboters gegeben. Anschließend werden die zur Entwicklung notwendigen Schritte dargestellt, wie u. a. die Definition von Anforderungen, die Klärung rechtlicher Rahmenbedingungen und der iterative Aufbau von Prototypen. Daran schließt sich das Thema der Genehmigungen an, bevor auf den eigentlichen Implementierungsprozess des Roboters inklusive Mapping, Kommunikation, Infrastruktur und weiterer Themenblöcke eingegangen wird. Es folgt ein Einblick in entwicklungsbegleitenden Tests sowie die untersuchten praktischen Testszenarien, bevor dann u.a. die Erläuterungen zu Auswertungen, Evaluation und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen den Abschluss des Kapitels bilden.

### Einleitung

Ausgangsproblem im kleinstädtisch bis ländlich geprägten Raum für Transporte von Personen und Gütern ist die relative geringe Siedlungsdichte bei gleichzeitig relativ großer Flächenausdehnung der Siedlungsgebiete (Nadler, Fina 2021, S.179). Dies führt beim Personentransport zu den Phänomenen, dass individuelle Mobilitätswünsche realisiert werden sollen, die in der Anzahl aber insgesamt als Aufkommen über die Zeit in der Fläche zu gering sind, als dass ein regelmäßiger ÖPNV aus ökonomischer Sicht seitens der Kommunen in der Fläche betrieben werden kann, weshalb hier das Angebot zumeist auf Schülerverkehre beschränkt bleiben muss (Canzler et al. 2008). In kleinstädtischen Zentren sind es zumeist Linienverkehre, die eine Grundversorgung mit ÖPNV-Leistungen ermöglichen, die Taktung kann dabei sehr unterschiedlich ausfallen, ist aber durch die höhere Siedlungsdichte und Nachfrage meist höher als im ländlicheren Umland und bietet vorrangig Verbindungen zu den nächsten Zentren (Konzentration auf Pendlerverbindungen) (Difu 2002, S. 23).

Die gleiche Problematik stellt sich für Gütertransporte. Je nach Sendungsdichte und Lokalisierung der einzelnen Lieferpunkte in der Fläche können relativ pro Sendung hohe Distanzen entstehen und Bündelungen von Lieferungen mehr oder minder schwierig herzustellen sein.



Die urbane Logistik findet in einem speziellen und herausfordernden Kontext statt. Dieser ist geprägt durch Phänomene, wie der Anstieg der Produktvielfalt, die Erwartungshaltung der Kunden an die Lieferqualität, kürzer werdende Lieferzeiten durch »same day-delivery«-Angebote sowie ein Anstieg der Liefermenge durch einen steigende E-Commerce-Anteil am Einzelhandel (Bretzke 2020, S. 460; Bode 2016, S. 282). Im Umland ergeben sich durch die dargestellten Phänomene ansteigende Zahlen an Lieferungen, bei ebenfalls sinkender Liefermenge bei zumeist längeren Strecken.

Die genannten Aspekte bezüglich der letzten Meile sind die Ursache dafür, dass in Städten Luftverschmutzung, Lärmbelästigung und Staus entstehen (Bode 2016, S. 282). Besonders in historisch gewachsenen Städten stellen die räumlichen Verhältnisse in Altstädten ein Problem dar. Die Verkehrsinfrastruktur konnte in vielen Städten mit dem Bevölkerungswachstum und deren Motorisierung nicht mithalten und stellt die urbane Logistik nun vor unterschiedliche Herausforderungen (Bode 2016, S. 282; Bretzke 2020, S. 459). Diese sollen durch die zielgerichtete Entwicklung von maßgeschneiderten Lösungen bewältigt werden. Als Beispiel hierfür können neuartige Warenübergabesysteme, die Integration von Logistikfunktionen in bestehende Immobilien, Drohnen oder auch Elektromobilität genannt werden (Vastag 2014).

Eine weitere Lösung stellen Transportroboter dar. Autonome, elektrische Roboter bieten die Möglichkeit, die Anzahl großer Lieferfahrzeuge zu reduzieren und so den Verkehr zu reduzieren und die Umwelt zu schonen (Brandt et al. 2017, S. 8). Die Roboter können die Ware von sowohl nicht automatisierten als auch autonomen Lieferfahrzeugen übernehmen und zu Wohnungen oder Paketstationen transportieren. Die geringen Maße der Roboter ermöglichen es dabei, dass sie sich auf Gehwegen fortbewegen (Zilkens 2020, S. 196). Bereits in mehreren Ländern findet die Erprobung von Transportrobotern in unterschiedlichster Form statt. Durch rechtliche Einschränkungen handelt es sich dabei jedoch häufig um einen begleiteten Betrieb.

## Zielsetzung

Das Projekt TaBuLa-LOG hat sich zum übergeordneten Ziel gesetzt, den Personen- und Gütertransport mithilfe von Automatisierungstechnologie zu verknüpfen. Dabei gilt es, Verkehre des ÖPNV sowie des Gütertransports zu bündeln, zu verlagern und zu optimieren. Diese Kombination aus Personen- und Gütertransport dient dazu, den ÖPNV auch in Zukunft zu erhalten, auszubauen und attraktiver zu gestalten sowie negative Auswirkungen durch einen steigenden Gütertransport zu vermindern.

Zur Erreichung dieses übergeordneten Zieles wurden sieben Teilziele im Projekt formuliert:

- ▶ Das erste Ziel beinhaltet die **Konzeption und den Bau von Transportrobotern**, die im Testfeld Lauenburg/Elbe für den Transport der Behördenpost eingesetzt werden.

- ▶ Das zweite Ziel stellt die **Einführung und Nutzung von Automatisierungstechnologie** sowie deren Erprobung dar.
- ▶ Das dritte Ziel beschäftigt sich mit der Erprobung und des Bedarfs an **Infrastruktur**
- ▶ Das vierte Ziel dient dazu, das Verständnis der **Interaktionen von Mensch und Technik** zu schaffen, sodass die Verknüpfungen zwischen den Systemen deutlich werden.
- ▶ Im fünften Ziel sollen **Kosten für den Einsatz von Transportrobotern** im kombinierten Verkehr im öffentlichen Raum ermittelt werden.
- ▶ Das sechste Ziel im Projekt umfasst die **Abschätzung von Auswirkungen im Betrieb**, auch die **Akzeptanz der Nutzenden** und Bevölkerung
- ▶ Das siebte Ziel umfasst die **Ermittlung von Einsatzpotenzialen und -szenarien** für einen kombinierten Anwendungsfall eines Transportroboters in einem automatisierten Shuttlebetrieb und beinhaltet die Sammlung von Erfahrungen und die **Ableitung von Handlungsoptionen** für eine erfolgreiche Implementierung von Transportrobotern.

Abbildung 3: Darstellung der Ober- und Teilziele im Projekt TaBuLa-LOG



## Vorgehen

Die Erarbeitung der notwendigen Inhalte für die zuvor beschriebenen Ziele wurde gegliedert in Arbeitspakete (AP), die zerlegt in viele Arbeitsschritte im Folgenden vorgestellt werden.

Für das Projekt erfolgte zunächst die **Systemanalyse**, für die folgende Maßnahmen notwendig waren:

- ▶ Definition des Einsatzgebietes (in Abhängigkeit vom TaBuLaShuttle)
- ▶ Auswahl und Abstimmung eines Logistik-Anwendungsfalls
- ▶ Prozessbeschreibung für den ausgewählten Anwendungsfall

In Abhängigkeit des Anwendungsfalls, erfolgte die **Roboterentwicklung** mit folgenden Schritten:

- ▶ Definition der Anforderungen an die Transportroboter
- ▶ Entwicklung eines Roboterkonzepts
- ▶ Analyse rechtlicher Rahmenbedingungen und Sicherheitsanforderungen
- ▶ Identifikation und Beschaffung von Hardwarekomponenten (u.a. Roboterbasis und Sensoren)
- ▶ Aufbau und Test der Transportroboter
- ▶ Definition von Anforderungen an App und Server-Backend
- ▶ Erzielen einer Ausnahmegenehmigung

Nach Entwicklung des Transportroboters fand die **Implementierung** des Transportroboters in das Reallabor und das Betriebskonzept des automatisierten Shuttles mit folgenden Umsetzungsschritten statt:

- ▶ Entwicklung eines Konzepts für die Fahrzeugsteuerung der Transportroboter (u.a. Festlegung der Algorithmen für Teilfunktionen)
- ▶ Implementierung der Übergeordneten Fahrzeugsteuerung
- ▶ Implementierung der automatisierten Fahrfunktion und Hinderniserkennung
- ▶ Umsetzung des Sicherheitskonzepts
- ▶ Implementierung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Transportroboter und Shuttle sowie Infrastruktur
- ▶ Implementierung einer Benutzer\*innenschnittstelle und Anbindung an die App
- ▶ Mapping von Innen- und Außenbereichen
- ▶ Tests der Fahrzeugsteuerung (innen/außen sowie mit Mockup/Shuttle)

Der **Testbetrieb** erfolgte mithilfe des Shuttles und des Transportroboters in der Stadt Lauenburg/Elbe. Dafür wurden folgende Schritte umgesetzt:

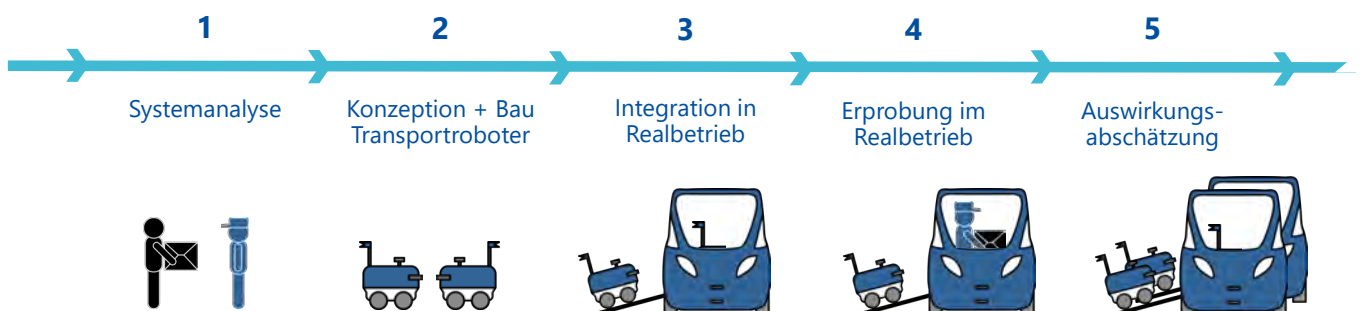
- ▶ Entwicklung von Testszenarien
- ▶ Abstimmung der Prozessabläufe
- ▶ Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur
- ▶ Iterative Weiterentwicklung des TaBuLa-Betriebes in Verbindung mit dem Transportroboter
- ▶ Durchführung des Testbetriebes

Nach Durchführung des Testbetriebes fand die **Auswertung der Testszenarien** hinsichtlich logistischer, gesellschaftlicher und ökonomischer Aspekte statt sowie mit Blick auf die entwickelten Transportroboter:

- ▶ Auswertung der Begleitforschung
- ▶ Akzeptanzforschung zum kombinierten Personen- und Gütertransport
- ▶ Befragung von Fachkundigen der Logistikbranche
- ▶ Ökonomische Analyse
- ▶ Evaluation eines automatisierten kombinierten Personen- und Gütertransports
- ▶ Evaluation der Transportroboter (Hard- und Software)

Die zuvor beschriebenen und in Abbildung 4 dargestellten Arbeitsschritte erfolgten nicht grundsätzlich chronologisch, sondern ineinandergreifend iterativ und werden im folgenden Kapitel ausführlicher beschrieben.

**Abbildung 4:** Projektarbeitsschritte aufbauend auf dem bestehenden Projekt TaBuLa



## 2.1 Systemanalyse zur Integration kombinierter Personen- und Gütertransporte in die bestehende Testumgebung des Projektes TaBuLa

Im ersten Schritt des Projektes erfolgte die Identifizierung von Potenzialen für die Integration von Gütertransporten in die bestehende Testumgebung des automatisierten Shuttle-Betriebes in der Stadt Lauenburg/Elbe. Hierbei wurde das Ziel verfolgt, einen Anwendungsfall für die Logistik sowie den Roboterbetrieb zu identifizieren und abzustimmen (Logistik Use-Case).

### 2.1.1 Auswahl des Einsatzgebietes

Über die bestehende kooperative Verbindung zur Stadt Lauenburg/Elbe wurde durch den Kreis und die TUHH ein passendes Umfeld für die Realisierung der Projektidee gesucht. Dabei wurden die angestellten Personen der Stadtverwaltung sowie die politischen Vertreter\*innen im Rahmen der relevanten Ausschusssitzungen während der Projektplanung befragt und informiert. Der Erprobungsort für einen kombinierten Personen- und Gütertransport im ÖPNV in der Stadt Lauenburg/Elbe bot sich aus mehreren Gründen an:

- ▶ Das Befördern von Personen mit einem automatisiert fahrenden Shuttle wurde bereits in der Kleinstadt auf einer etablierten Route erfolgreich umgesetzt.
- ▶ Die Bevölkerung, die Mitarbeitenden der Stadt sowie die örtlichen politischen Vertreter\*innen haben bereits Erfahrungen mit dem Vorgängerprojekt gemacht, waren daraufhin sensibilisiert und wohlwollend eingestellt.
- ▶ Die vorhandene Infrastruktur ist in weiten Teilen bereits geeignet für den Einsatz eines automatisiert fahrenden Shuttles und ist »nur noch« bei Bedarf gezielt für einen rollenden Transportroboter anzupassen.
- ▶ Das Umfeld ist mit der Altstadt in vielerlei Hinsicht vielfältig. Es gibt sämtliche Fahrbahnoberflächen, aber auch sehr unterschiedliche Bebauung, bewaldete Abschnitte und Brücken und Unterführungen.

Für den kombinierten Verkehr bedurfte es darüber hinaus eines Betreibers für die Personenbeförderung. Mit der Fortsetzung der Zusammenarbeit mit den Verkehrsbetrieben Hamburg Holstein GmbH (VHH) konnte eine erfahrene Betreiberin von Bussen und automatisiert fahrenden Shuttles in die Anforderungserstellung einbezogen werden. Die Anforderungen an den Fahrgastbetrieb wurden berücksichtigt, so dass sichergestellt werden konnte, dass der geteilte Personen- und Gütertransport sich in einen ÖPNV-Betrieb integriert.

Die Prozessabläufe wurden mit Mitarbeitenden und Fahrzeugbegleitern der VHH abgestimmt, so dass ein reibungsloser Betrieb möglich wurde.

Das Vorgängerprojekt TaBuLa, ebenfalls durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr von 2018 bis 2021 gefördert, bildet die Grundlage für den Testbetrieb in Lauenburg/Elbe. Im Rahmen des Projektes wurde ein Testzentrum für automatisiert fahrende Shuttle eingerichtet, das im Projekt TaBuLa-LOG als ein Teil der Infrastruktur im Testbetrieb diente. Das TaBuLa-Shuttle fuhr u. a. auf einer Strecke von 2,5 km entlang von acht Haltestellen von der Oberstadt in die Altstadt und zurück in einer Rundlinie (siehe Abbildung 5, Strecke 3).

**Abbildung 5:** Strecken und Haltestellen im öffentlichen Fahrgastbetrieb des Testzentrum Lauenburg/Elbe (vor Implementierung des Transportroboterbetriebes)



#### Die Fahrwege:

- 01** Amtplatzrunde: ZOB – Amtplatz – ZOB
- 02** Fürstengartenrunde: ZOB – Fürstengarten – ZOB
- 03** Altstadtrunde: Ringlinie ZOB – Altstadt – ZOB

### 2.1.2 Auswahl des logistischen Anwendungsfalls

In enger Abstimmung mit den vorgenannten beteiligten Partnern wurde ein Anwendungsfall für den kombinierten Personen- und Gütertransport gesucht. Dabei wurden im Hinblick auf die Realisierbarkeit im vorgegebenen Projektzeitraum drei Kriterien formuliert:

- ▶ Es muss eine Nachfrage nach der Beförderung von Gütern vorhanden sein, die entlang von TaBuLaShuttle-Strecken in Lauenburg/Elbe besteht.
- ▶ Die infrastrukturellen Voraussetzungen für den Einsatz eines Transportroboters müssen gegeben sein.
- ▶ Alle beteiligten Partner\*innen und Akteure der Logistikkette müssen den Testbetrieb unterstützen.

Entlang der Strecke 3 sind über eine kurze Entfernung der Amtsplatz mit den Behördengebäuden der Stadt Lauenburg/Elbe sowie das Elbschiffahrtsmuseum mit der Tourismusinformation, welches ebenfalls Teil der städtischen Behörden ist, erreichbar. Zwischen diesen Verwaltungseinheiten besteht die Nachfrage eines kontinuierlichen Transports von Hauspost.

Die Strecken aus dem Projekt TaBuLa wurden um Haltestellen und verschiedene Optimierungen ergänzt. Damit wurde die Voraussetzung geschaffen, um die Beförderung der Güter entlang einer Shuttle-Strecke zu erproben. Die Behördengebäude am Amtplatz sowie das Elbschiffahrtsmuseum in der Altstadt boten eine größtenteils barrierefreie ausgebaute Infrastruktur (wie z. B. automatische Türen und stufenfreie Eingänge), die für die Anfahrt durch einen Transportroboter geeignet ist, so dass Transporte zwischen den Standorten der Behörde möglich sind.

Die Stadt Lauenburg/Elbe sowie deren Beschäftigte unterstützten darüber hinaus die Einbindung eines Transportroboters in die bestehenden Prozesse des Posttransports. Damit waren alle drei Kriterien für den ausgewählten Anwendungsfall zur **Beförderung der Hauspost** als Anwendungsfall erfüllt.

### 2.1.3 Beschreibung und Darstellung der bestehenden Prozesse zur Beförderung der Hauspost der Verwaltung Lauenburg/Elbe

Zu Beginn bedurfte es zunächst einer Ermittlung der bestehenden Prozesse zum Transport der Behördenpost der städtischen Verwaltung in Lauenburg/Elbe.

Dafür wurden zunächst eine Befragung des Verwaltungspersonals durch die Projektbeteiligten durchgeführt. Die Befragung enthielt Informationen zu den einzelnen Prozessen, den Prozessbeteiligten, den Routen zum Posttransport, die zugrundeliegende Infrastruktur, das Transportmittel, die Lieferhäufigkeit,

die Dauer der Prozesse, die Anliefer- und Abholzeiten, festgelegte Öffnungszeiten der Abteilungen, die Liefermenge, die technischen Hilfsmittel sowie aktuelle Herausforderungen beim Transport der Post. Die Befragung wurde mit dem Personal des Rathauses sowie den Mitarbeitenden im Elbschiffahrtsmuseum durchgeführt.

Die Auswertung ergab, dass für den ausgewählten Anwendungsfall drei Haltepunkte des Shuttles in Lauenburg/Elbe von besonderer Relevanz sind: das Posteinlagerungszentrum (Nr. 1; Reeperbahn 35), der Amtsplatz mit den Gebäuden der Behörden (Nr. 2) sowie das Elbschiffahrtsmuseum in der Altstadt (Nr. 3) (siehe Abbildung 6).

**Abbildung 6:** Gebiet der Postverteilung in der Stadt Lauenburg/Elbe, in rot eingezeichnet sind die Fahrwege des automatisierten TaBuLaShuttle

① Start am Posteinlagerungszentrum (Reeperbahn 35)



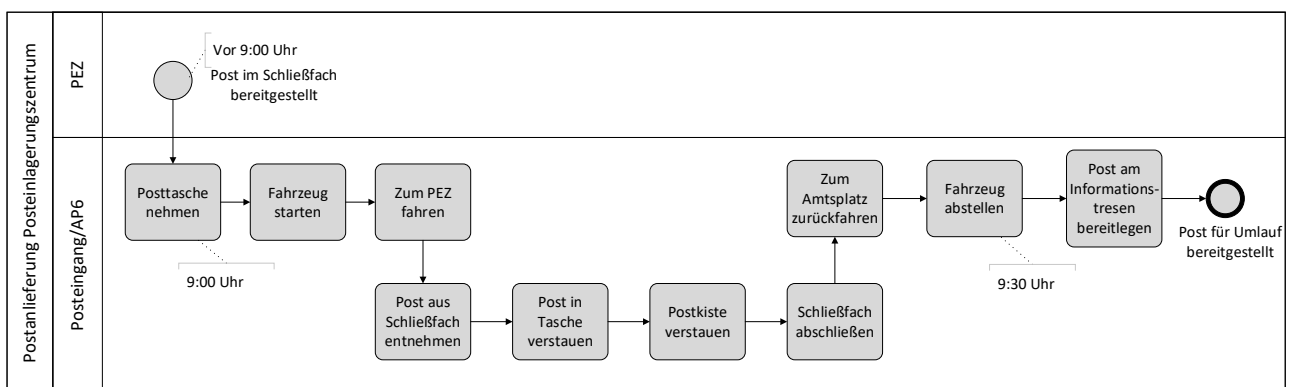
③ Transport zum und vom Elbschiffahrtsmuseum

② Transport zu und von den Standorten der Behörde in Lauenburg/Elbe



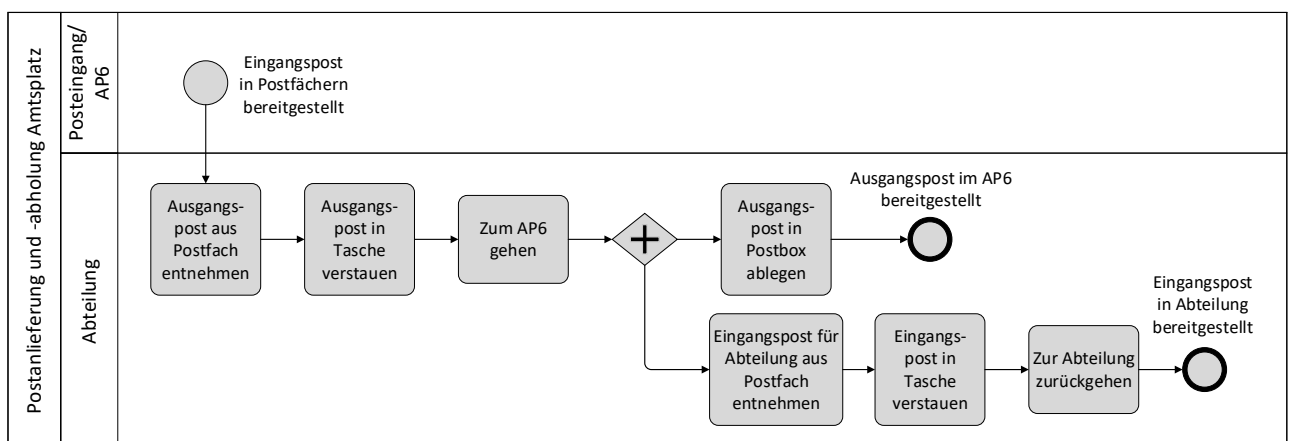
Mithilfe der Auswertung konnten zudem die detaillierten Prozesse zum Transport der Hauspost ermittelt werden. Die Post wird am Morgen vor 09:00 Uhr im Posteinlagerungszentrum durch die Deutsche Post/DHL bereitgestellt. Um 09:00 Uhr fährt ein\*e Mitarbeiter\*in der Stadt Lauenburg/Elbe zum Posteinlagerungszentrum und entnimmt die Post. Anschließend tritt diese/dieser den Rückweg zum Rathaus (Amtsplatz 6) an, sodass die Post um 09:30 Uhr für den Umlauf im Rathaus bereitgestellt werden kann. Der Prozess ist in Abbildung 7 visualisiert.

**Abbildung 7:** Abholung der Post am Posteinlagerungszentrum



Nachdem die Post im Rathaus sortiert wurde, wird diese in Postfächern der Abteilungen der Behörde bereitgestellt. Die Abteilungen entnehmen jeweils ihre eigene Ausgangspost in ihrem Gebäude, verstauen diese und begeben sich zum Amtsplatz 6. Dort wird die Ausgangspost in einem Postbehälter abgelegt und die Eingangspost dem Schließfach der jeweiligen Abteilung entnommen. Diese wird ebenfalls verstaut und zu der jeweiligen Abteilung gebracht. Aus jeder Abteilung sind demnach Mitarbeiter\*innen in den Prozess eingebunden, wobei der Transport zu Fuß erfolgt. Der Prozess ist in Abbildung 8 abgebildet.

**Abbildung 8:** Verteilung der Eingangs- und Ausgangspost zwischen den Gebäuden der Lauenburger Verwaltung



Die Stadtverwaltung Lauenburg/Elbe verschickt mehr Briefe als sie selbst erhält. In den Posteingangsfächern der einzelnen Abteilungen befinden sich täglich jeweils durchschnittlich 10 bis 20 Briefe. In den jeweiligen Ausgangspostfächern sammeln sich etwa 20 bis 100 Briefe täglich. Insgesamt umfasst die Ausgangspost der Lauenburger Verwaltung etwa 200 Briefe am Tag, die durch die Firma Nordbrief zu feststehenden Zeiten abgeholt werden::

1. Montag, Dienstag und Donnerstag um 14:30 Uhr
2. Mittwoch und Freitag um 12:30 Uhr

Neben der durchgeführten Befragung erfolgte zur Ermittlung des Transportaufkommens an elf Tagen eine Erhebung des Transportgewichts in drei ausgewählten Gebäuden der Stadtverwaltung (Amtsplatz 1, Amtsplatz 5 und Fürstengarten 29).

- ▶ Im Durchschnitt liegt das Gewicht der täglichen Eingangspost je Gebäude bei 0,68 kg. Dabei gibt es individuell große Schwankungen von 0 kg (keine Post) und maximal 4,05 kg.
- ▶ Die tägliche Ausgangspost liegt im Durchschnitt bei 1,06 kg je Gebäude. Dabei schwankt es auch hier zwischen 0 kg und 5,73 kg im Maximum.

Über alle drei Standorte summiert, hat die Eingangspost ein mittleres tägliches Gewicht von 2,05 kg (bei einer Spanne zwischen 0,82 und 4,74 kg) und die Ausgangspost ein mittleres tägliches Gewicht von 3,18 kg (bei einer Spanne zwischen 0,37 und 7,78 kg).

Zunächst wurden diese drei Gebäude als potenzielle Einsatzbereiche ausgewählt. Nach einer Begehung der Bereiche wurde festgestellt, dass das Gebäude Amtsplatz 1 nicht barrierefrei ausgebaut ist und somit nicht als Einsatzgebiet zur Verfügung stand.

Als Grundlage zur Ermittlung der Personalkosten für den Posttransport wurden darüber hinaus die Transportzeiten zwischen den Behördengebäuden in Lauenburg/Elbe aufgenommen, die die Mitarbeiter\*innen täglich zweimal zurücklegen. Hierbei handelte es sich um die Zeiten vom Rathaus (Amtsplatz 6), in welchem die Post gesammelt wird, zu den jeweiligen Gebäuden der Behörde (Amtsplatz 5, Fürstengarten 95, Elbschiffahrtsmuseum). Zur Absicherung wurden diese zweimal erfasst. Die Wege in eine Richtung erfordern in Summe etwa 13 Minuten. Da die Mitarbeiter\*innen auch den Rückweg zurücklegen sowie diesen Prozess zweimal täglich durchführen, beläuft sich die Transportzeit in Summe auf etwa 52 Minuten und bindet 5 Mitarbeiter\*innen mit ein.

## 2.2 Entwicklung eines mobilen, automatisierten Transportroboters

Im Rahmen des Projektes wurde das Ziel verfolgt, einen mobilen und automatisierten Transportroboter zum Einsatz im öffentlichen Straßenraum zu entwickeln.

Zunächst galt es, eine Anforderungsliste für einen Transportroboter zu erstellen. Im Weiteren wurde die Entwicklung einer Anforderungsliste für eine App zur Beauftragung der Transporte festgelegt. Anschließend sollte eine Überprüfung der rechtlichen Sicherheit sowie der nächsten Schritte bezüglich des Roboterbetriebes und der Genehmigung stattfinden.

Auf Grundlage der ermittelten Anforderungen fanden die Entwicklung und Beschaffung der Hardware des Roboters statt. Anschließend wurden Maßnahmen zur Erlangung der Genehmigung zum Betrieb ergriffen.

### 2.2.1 Anforderungen an Transportroboter

Die Anforderungen an den Transportroboter wurden in einem mehrstufigen Verfahren definiert und iterativ konkretisiert. Im Rahmen eines internen Workshops wurden mit neun Projektbeteiligten aus der Wissenschaft und der Praxis die grundsätzlichen Anforderungen an die Roboterentwicklung sowie potenzielle Anwendungsfälle von Transportrobotern im öffentlichen Straßenraum identifiziert. Der Workshop erfolgte als Brainstorming. Die Ergebnisse wurden anschließend hinsichtlich relevanter Themenschwerpunkte kategorisiert. Im Ergebnis wurde ein Leitbild für Transportroboter formuliert, das hinsichtlich des Nutzens zum einen für den B2B- und zum anderen für den B2C-Transport unterschieden werden kann. Das Leitbild diente als Basis für die weitere Roboterentwicklung.

Auf dieser Grundlage erfolgte die Ableitung der spezifischen Anforderungen an den Transportroboter im Hinblick auf den identifizierten Anwendungsfall, die Beförderung der Hauspost.

#### Leitbild eines Transportroboters

Mit einem Transportroboter soll die Raumüberwindung von Gütern erleichtert werden. Insbesondere schwere Güter und/oder standardisierte Behälter, wie Gitterboxen, sollen flexibel und sicher transportiert werden. Abgesehen vom Posttransport könnte in einem allgemeinen Wunschscenario der Roboter beispielsweise zum Transport von Einkäufen auf der letzten Meile eingesetzt werden. Der Transportroboter agiert entweder eigenständig oder als Begleiter des Menschen.

Eigenständig würde der Roboter die Güter beim Verkäufer einladen, dabei kann es sich zum Beispiel um Wasserkisten oder ähnlich schwere Gegenstände handeln, und direkt zum Auftraggeber transportieren. Als Begleiter würde der

Transportroboter den Menschen beim Einkauf begleiten und wie ein selbstfahrender Einkaufswagen die Einkäufe transportieren. In beiden Fällen kann sich das Transportbehältnis des Roboters flexibel den unterschiedlichen Gütern anpassen.

Während des Transports sollte es dem Auftraggeber jederzeit möglich sein, den Roboter dauerhaft per Tracking and Tracing zu überwachen. Für die Übermittlung von Informationen sowie zur Bedienung des Roboters dient eine App. Der Transportroboter sollte logistische Prozesse und Anforderungen selbstständig verstehen und umsetzen können. Dabei ist eine einfache Bedienung unabdingbar. Insgesamt ist es wichtig, dass der Einsatz des Transportroboters möglichst fehlerfrei funktioniert.

Der Roboter sollte so konzipiert sein, dass er unterschiedlichen topographischen Herausforderungen gewachsen ist. Es ist gleichermaßen möglich, unterschiedliche Steigungen zu befahren als auch Treppen, Bürgersteige oder Hauseingänge zu überwinden. Der Roboter kann zur Überbrückung längerer Strecken darüber hinaus mit dem ÖPNV oder anderen Verkehrsmitteln kooperativ kommunizieren.

Der Transportroboter soll sich sicher und möglichst unauffällig, geräuscharm sowie rücksichtsvoll in die Umgebung einfinden. Dafür soll es sich um ein umweltverträgliches und von der Bevölkerung akzeptiertes Transportmittel handeln. Der Roboter soll sich autonom, also ohne menschliche Hilfe, bewegen und jederzeit zur Verfügung stehen.

Aus wirtschaftlicher Perspektive sollte das Geschäftsmodell bezahlbar und ökonomisch sein, wobei die Investitionen für den Einsatz möglichst geringgehalten werden. Bei dem Geschäftsmodell handelt es sich um das Betreibermodell. Transportroboter können entweder im B2B-Verkehr oder im B2C-Verkehr eingesetzt werden. Die Tabelle 2 und Tabelle 3 beinhalten den Nutzen von Transportrobotern für die jeweiligen Akteure im B2B- und B2C-Verkehr.

**Tabelle 2:** Nutzen im B2B-Verkehr

Akteur	Nutzen
Versender	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ flexible Auslieferung der Güter</li> <li>▶ dauerhafte Überwachung des Transportmittels und der Ware</li> <li>▶ kleinere Sendungsgrößen, dafür jeder Zeit zustellbar</li> <li>▶ autonome Auslieferung der Ware</li> <li>▶ Transport eines standardisierten Behälters</li> </ul>
Empfänger	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ flexible Anlieferung von Gütern</li> <li>▶ On-Demand-Anlieferung</li> <li>▶ »bis ins Büro«-Lieferung</li> <li>▶ dauerhafte Überwachung der Güter</li> <li>▶ Just-in-Time Planung möglich</li> </ul>
Transporteur	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ neues Dienstleistungsangebot</li> <li>▶ App-Verwaltung</li> <li>▶ Vermeidung von Leerfahrten bei Pendeltour</li> <li>▶ Einsparung von (Personal-)Kosten</li> </ul>

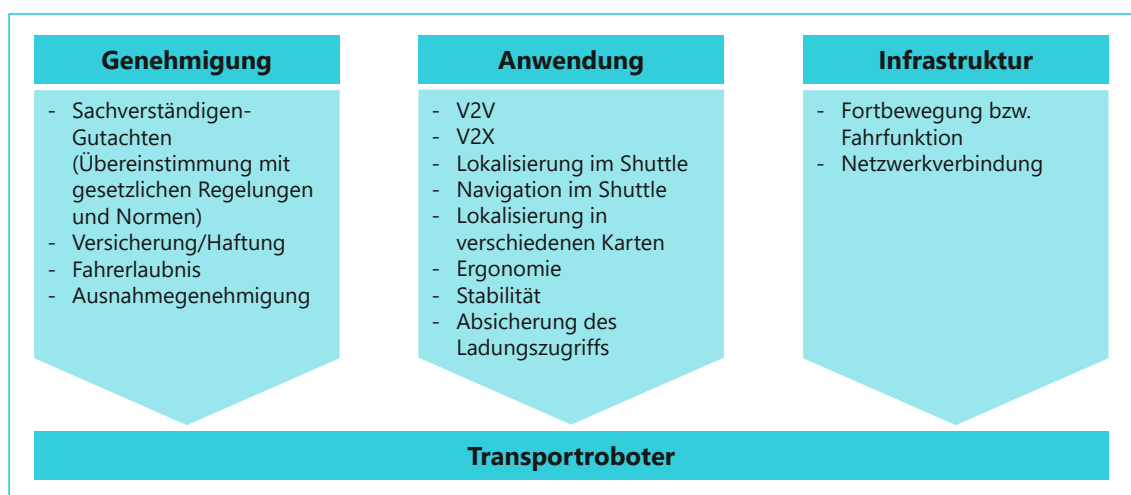
**Tabelle 3:** Nutzen im B2C-Verkehr

Akteur	Nutzen		
Versender	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ autonome Auslieferung der Güter</li> <li>▶ sichere Zustellung der Ware (z. B. für Apotheken)</li> </ul>		
Empfänger/ Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ flexible Anlieferung von Gütern</li> <li>▶ On-Demand-Anlieferung</li> <li>▶ »bis vor die Haustür«-Anlieferung</li> <li>▶ körperliche Entlastung</li> <li>▶ Begleitung während des Einkaufs</li> </ul>		
Transporteur	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ neues Dienstleistungsangebot</li> </ul>		
Roboter	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ geräuscharm</li> <li>▶ unauffällig</li> <li>▶ rücksichtsvoll</li> <li>▶ nachhaltig</li> <li>▶ flexibel einsetzbar</li> </ul> </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ On-Demand-Leistung</li> <li>▶ entlastend</li> <li>▶ sicher</li> <li>▶ fehlerarm</li> <li>▶ einfache Bedienbarkeit</li> </ul> </td> </tr> </table>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ geräuscharm</li> <li>▶ unauffällig</li> <li>▶ rücksichtsvoll</li> <li>▶ nachhaltig</li> <li>▶ flexibel einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ On-Demand-Leistung</li> <li>▶ entlastend</li> <li>▶ sicher</li> <li>▶ fehlerarm</li> <li>▶ einfache Bedienbarkeit</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ geräuscharm</li> <li>▶ unauffällig</li> <li>▶ rücksichtsvoll</li> <li>▶ nachhaltig</li> <li>▶ flexibel einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ On-Demand-Leistung</li> <li>▶ entlastend</li> <li>▶ sicher</li> <li>▶ fehlerarm</li> <li>▶ einfache Bedienbarkeit</li> </ul>		

## Konkretisierung der Anforderungen für den Anwendungsfall

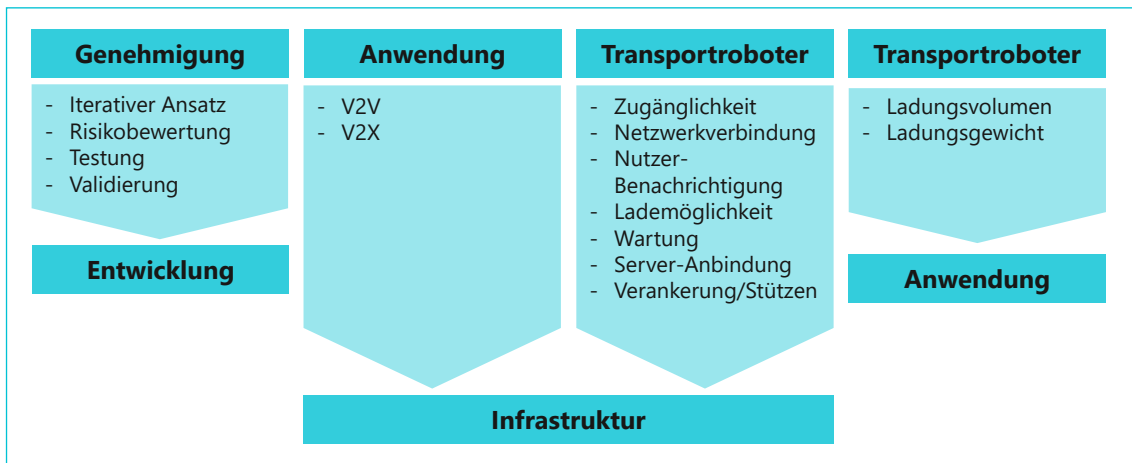
Das Leitbild stellte eine erste Idee von Transportrobotern im öffentlichen Straßenraum dar. Bei der Auswertung der in den Workshops gesammelten Anforderungen hat sich gezeigt, dass sich diese wechselseitig aus folgenden Bereichen ergeben: Genehmigung, Anwendungsfall, Infrastruktur, und Roboter (vgl. Thiel, Tjaden, Schrick, Rosenberger, Grote 2021) (siehe Abbildung 9 und 10).

**Abbildung 9:** Überblick und Wirkungsrichtung identifizierter Anforderungen der Bereiche Genehmigung, Anwendung und Infrastruktur an Transportroboter



Quelle: übersetzt aus Thiel, Tjaden, Schrick, Rosenberger, Grote 2021

**Abbildung 10:** Überblick und Wirkungsrichtung identifizierter Anforderungen der Bereiche Genehmigung, Anwendung und Transportroboter an Entwicklung, Infrastruktur und Anwendung



Quelle: übersetzt aus Thiel, Tjaden, Schrick, Rosenberger, Grote 2021

Aus Perspektive des Transportroboters ergeben sich Anforderungen maßgeblich aus der spezifischen Transportanwendung, welche ebenfalls die Nutzung des Shuttles für Teilstrecke beinhaltet, der benötigten Genehmigung für Fahrten im öffentlichen Raum sowie infrastrukturellen Gegebenheiten im Einsatzgebiet.

Der Anwendungsfall, die Beförderung der Hauspost der Verwaltung Lauenburg/Elbe, stellte hierbei insbesondere Anforderungen an den Laderaum und Ladungsträger sowie an die Nutzerschnittstelle des Roboters. Zur Bestimmung des benötigten Transportvolumens und -gewichts wurden über einen Zeitraum von elf Tagen Messungen der zu transportierenden Postsendungen und Unterlagen durchgeführt. Um weiterhin ein möglichst einfaches Be- und Entladen des Roboters zu gewährleisten, wurde an dieser Stelle die Notwendigkeit eines wechselbaren Normladungsträgers festgelegt. Zunächst wurde von der Verwendung eines Ladungsträgers mit einer Grundfläche von 60 cm x 40 cm ausgegangen. Unter Hinzunahme der aufgenommenen Daten zur Bestandspost wurde die minimale Grundfläche des Ladungsträgers auf 40 cm x 30 cm reduziert. Weiterhin wurde die Konstruktion eines Mechanismus zur Ladungssicherung für notwendig befunden. Eine Anforderung des Anwendungsfalles über den Transportraum des Roboters hinaus stellte die Implementierung einer am Roboter angebrachte Benutzerschnittstelle dar, die mithilfe eines Displays umgesetzt werden sollte.

Der kombinierte Transport des Roboters innerhalb des Shuttles brachte weitere Anforderungen an die Konstruktion und den Betrieb des Roboters hervor. Der Roboter sollte in der Lage sein, über die Rampe in den Innenraum des Shuttles zu fahren. Weiterhin sollte ein Kippen des Roboters im

Rahmen von Beschleunigungs- oder Abbremsvorgängen des Shuttles verhindert werden. Um dies zu gewährleisten, wurde die Notwendigkeit des Parkens quer in Fahrtrichtung bestimmt, lehnd an der vorderen Sitzreihe (vgl. Abbildung 57). Darüber hinaus sollte der Roboter in der Lage sein, sich innerhalb des relativ begrenzten Shuttleinnenraums zu bewegen, was relativ kompakte Fahrzeugdimensionen erfordert, die aber erst während des Konstruktionsprozesses genauer festgelegt werden sollten. Hinsichtlich der zu verbauenden Sensorik erforderte die Kombination von Shuttle und Roboter die Umsetzung einer Erkennung des Shuttles an der Haltestelle sowie eine Erfassung des direkten Nahbereichs des Roboters zur Navigation im Shuttle.

Der Betrieb des Roboters im öffentlichen Raum verlangte die Gestaltung und Ausrüstung des Roboters im Einklang mit der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). Dies betraf unter anderem die Anbringung konformer Beleuchtung, Integration eines sekundären, mechanischen Bremssystems und Einbau einer Einrichtung für Schallzeichen. Weiterhin musste die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) aller verbauter Komponenten sowie des gesamten Roboters gewährleistet werden. Weitere Anforderungen, die aus verschiedenen Normen herausgearbeitet wurden, waren ein funkbasiertes Fern-Not-Stopp System sowie ein physisches Not-Stopp System am Roboter (siehe Rechtliche Sicherheit). Darüber hinaus resultierte die Notwendigkeit einer Begleitperson für den Roboter, die durchgehend das Verkehrsgeschehen beobachtet und jederzeit in der Lage ist, in den Roboterbetrieb einzugreifen. Hinsichtlich der Cybersecurity des Gesamtsystems galt es außerdem sicherzustellen, dass kein offenes WLAN-Netzwerk oder weitere Schnittstellen frei zugänglich sind. Hinsichtlich der zu verbauenden Sensorik musste im Rahmen des Betriebes im öffentlichen Raum vor allem gewährleistet werden, dass eine Erkennung von Personen als Hindernisse umsetzbar ist.

Abschließend wurden Anforderungen erarbeitet, die aus dem generellen Fahrbetrieb des Roboters entstehen. Ein Kippen des Fahrzeugs beim Überfahren von Bodenunebenheiten sollte mithilfe einer möglichst niedrigen Schwerpunktage verhindert werden. Weiterhin musste das Fahren auf Steigungen gewährleistet werden, die aus dem natürlichen Gefälle der Umgebung entstehen. Die Aufrechterhaltung des Fahrbetriebes über die Dauer eines Betriebstages stellte außerdem Anforderungen an die Mindest-Kapazität des Fahrzeug-Akkus. Hinsichtlich der zu verbauenden Sensorik sollte beachtet werden, dass sowohl eine Erfassung des Fernbereichs zur Lokalisierung sowie eine Erfassung des Nahbereichs zur Hinderniserkennung realisiert werden kann.

Mit dem Anforderungsworkshop und den resultierenden Ergebnissen konnte der erste Meilenstein des Projektes (»Die Mobilitäts- und Logistikanforderungen sowie potenzielle Einsatzszenarien sind identifiziert«) erfüllt werden. Die Ergebnisse sind in die weitere Transportroboterentwicklung eingeflossen. Eine weitere Präzisierung des Anwendungsfalls wurde im Rahmen des Workshops festgehalten, welche die Aufnahme der logistischen Prozesse zur Beförderung der Behördenpost in Lauenburg/Elbe umfasst.

### 2.2.2 Anforderungen an App und Server-Backend

Die Anforderungsliste für eine App sowie das entsprechende Server Backend zur Beauftragung der Transporte umfasste insbesondere Anforderungen aus Sicherheitsgesichtspunkten sowie Anforderungen aus dem Anwendungsfall. Sicherheitsbedingt sollte vor einem Zugriff auf die Kundenschnittstelle zur Beauftragung von Transporten eine Authentifizierung der Nutzenden stattfinden, die zeitlich begrenzt ist, z. B. über Session-Tokens. Jegliche Kommunikation zwischen App, Server und Roboter hat verschlüsselt zu erfolgen. Aus dem Anwendungsfall heraus ergaben sich darüber hinaus Anforderungen an den Umfang der in der App beinhalteten Funktionen. Im Rahmen dieser sollten von Nutzenden Transporte in Auftrag gegeben, der Zugriff auf Ware beantragt, sowie Auftragsdetails dargestellt werden können.

### 2.2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Sicherheit von Transportrobotern

Im Projektverlauf galt es, die rechtliche Sicherheit bezüglich des Roboterbetriebes und der Genehmigung zu überprüfen und entsprechende nächste Schritte zu planen. Hierbei fand zunächst eine Prüfung der anzuwendenden Gesetze statt. Da es sich bei dem Roboter um ein reines Forschungsfahrzeug handelte, das nicht kommerziell vertrieben werden soll, musste im Rahmen der Roboterkonstruktion kein Produktionssicherheitsrecht angewendet werden. Weiterhin wurde eine Notwendigkeit der Einordnung des Roboters in das Straßenverkehrsrecht festgestellt und die zu berücksichtigenden (Industrie-)Normen abgeleitet, welche bereits in die vorangegangene Ableitung der Anforderungen mit eingeflossen sind. Zur Abstimmung des allgemeinen rechtlichen Rahmens des Genehmigungsprozesses sowie des zukünftigen Roboterbetriebes wurde initial ein gemeinsamer Beratungstermin in Kiel unter Beteiligung behördlicher Vertreter durchgeführt. Beteiligt waren neben den Projektpartnern unter anderem die Obere Verkehrsbehörde im Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus; die Untere Verkehrsbehörde des Kreises und TÜV Nord Mobilität mit einem Sachverständigen. Das Verständnis der rechtlichen Rahmenbedingungen wurde durch Sichtung der relevanten Gesetze und Verordnungen sowie durch Abstimmungen mit dem TÜV Nord Mobilität weiter vertieft (u. a. StVZO, FZV, StVO). Wesentliches Ergebnis ist die Einstufung des Transportroboters als Kraftfahrzeug. Hieraus ergibt sich unter anderem die Notwendigkeit von Begleitpersonen des Roboters, die im Rahmen einer initialen Schulung ausgebildet wurden. Weiterhin sind die Bau- und Betriebsvorschriften der StVZO für die konstruktive Gestaltung des Roboters relevant. Solange die bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit nicht mehr als 6 km/h beträgt, ist der Transportroboter aber zulassungs- und betriebs-erlaubnisfrei. Mit der Einstufung als Kfz geht auch die Relevanz automobilspezifischer Normen einher, welche die Entwicklung und Prüfung sicherheits-



relevanter Systembestandteile und automatisierter Fahrfunktionen betreffen (u. a. ISO 26262, ISO 21448 und ISO/SAE 21434). Darin enthalten sind Vorgehensmodelle, die z. B. notwendige Dokumentationen definieren, das Durchführen von Gefahren und Risikoanalysen darstellen, aber auch den Nachweis der erstellten (Sicherheits-)Systeme beschreiben. Zur Unterstützung der inhaltlichen Arbeit sowie zur Durchführung unabhängiger Assessments der erstellten Arbeitsprodukte wurden Fachexperten des TÜV Nord Mobilität beauftragt.

Im Rahmen einer Begehung in Lauenburg/Elbe am 09.10.2020 wurden weitere technische Anforderungen an den Betrieb des Roboters erarbeitet, neben der Identifikation der lokalen Besonderheiten der vorgesehen anspruchsvollen Streckenverläufe auch die Notwendigkeit zweier unabhängiger Bremssysteme als Teil des Sicherheitskonzeptes. Der Automatisierungsgrad der angestrebten automatisierten Fahrfunktionen wurde entsprechend SAE-Level 2<sup>1</sup> festgelegt. Dieses beschreibt eine automatisierte Fahrfunktion des Roboters (Quer- und Längsführung), welche aber einer durchgehenden Überwachung durch ein\*e Fahrzeugführer\*in bedarf.

#### 2.2.4 Roboterentwicklung – Hardware

Zu Beginn stand bei der Entwicklung die Suche nach einer potenziell geeigneten Roboterplattform im Vordergrund, welche als Basis des Transportroboter-Prototyps genutzt werden kann. Dabei wurden acht verschiedene kommerziell verfügbare Plattformen recherchiert und anhand von Faktoren wie Größe, Gewicht, maximaler Traglast, Hardware- und Softwareschnittstellen, Outdoorfähigkeit sowie Umfang und Qualität der technischen Dokumentation auf ihre Eignung geprüft. Weiterhin musste der in AP1 festgelegte Anwendungsfall umsetzbar sein. Für den Transport der Behördenpost musste dementsprechend ein Ladungsträger der Größe 40 cm x 30 cm aufgenommen werden können. Unter Betrachtung der verschiedenen Kriterien fiel die Wahl auf den Clearpath Jackal UGV. Bis zur Lieferung der Plattform im September 2020 stand ein Leihgerät des Händlers zur Verfügung.

---

<sup>1</sup> Die SAE-Norm J3016 beschreibt neben der Definition die Klassifikation von Begriffen für straßengebundene Kraftfahrzeuge mit automatisierten Systemen inkl. deren Einstufung in die SAE-Level 1-5, wobei Level 5 als Vollautomatisierung die höchste Stufe ohne die Notwendigkeit eines menschlichen Eingriffs darstellt. Level 2 ist die Teilautomatisierung, in der die Umgebung weiterhin von einer Begleitperson überwacht wird und diese als Rückfallebene für besondere Fahraufgaben dient.

Weitere Aspekte bei der Entwicklung des Transportroboters waren die Auswahl von geeigneten Sensoren sowie die Erstellung eines Sensor-konzeptes. 128 kommerziell erhältliche Sensoren unterschiedlicher Messprinzipien (Ultraschallsensoren, Stereo-Kameras, RGB-Kameras, Laserscanner, Time-of-Flight-Kameras, Drucksensoren) wurden auf Eignung geprüft. Dabei wurden Eigenschaften wie Auflösung, Abtastfrequenz, Größe des Blickfeldes, Outdoorfähigkeit, Hardware und Software-Schnittstellen sowie Preis und Verfügbarkeit ausgewertet. Eine Vorauswahl von fünf geeigneten Sensormodellen wurde je einmal beschafft und Praxistests am ITL unterzogen. Die finale Sensor-Auswahl umfasste:

- ▶ 1x Velodyne VLP-16 LiDAR für die Lokalisierung
- ▶ 4x Intel RealSense D435 Stereo-Kameras für die Überwachung des Nahbereichs und Navigation innerhalb des Shuttles
- ▶ 2x Stereolabs ZED 2 Stereo-Kameras für die Erkennung des Shuttles an den Haltestellen
- ▶ 4x Ultraschallsensoren für Nahbereichsüberwachung

Auf Basis des Sensorkonzeptes und der Anforderungen aus AP1 wurde die innerhalb des Roboters benötigte Rechnerkonfiguration ausgelegt. Dabei wurden 15 kommerziell erhältliche Rechner-Systeme basierend auf Faktoren wie Prozessor, Arbeitsspeicher, Festplattenspeicher, Anschlüsse, Dimensionen und Gewicht evaluiert. Daraufhin wurden zwei Rechner ausgewählt und beschafft: Ein Industrie-PC, Modell Pokini I v3, als zentrale Recheneinheit und Core des eingesetzten Robotik-Frameworks (ROS) und eine auf Computer-Vision-Anwendungen spezialisierte Recheneinheit vom Typ Nvidia Jetson AGX Xavier. Als dritter Rechner wird ein bereits in der Roboterplattform integrierter Rechner genutzt.

## Prototyp Version V1

In weiteren Workshops wurde ein erstes Konzept für die Gestaltung des Transportroboters erarbeitet. Dieses Konzept beinhaltet die Unterbringung und Verteilung aller relevanten Komponenten (Sensorik, Recheneinheiten, Motoren und anderen elektronischen Bauteilen). Auch die Aufnahme des in AP1 ausgewählten Transportbehälters von (zu dem Zeitpunkt noch) 60 cm x 40 cm wurde berücksichtigt.

Für eine erste praktische Evaluation des Konzepts wurde ein prototypischer Aufbau durchgeführt. Das Grundgerüst des Aufbaus besteht aus Aluminium-Konstruktionsprofilen und im 3D-Druck hergestellten Halterungen für die Sensorik. In Fahrversuchen zeigte sich der Gesamtaufbau aus Roboterplattform und Aluminiumrahmen jedoch als zu instabil. Durch einen zu hohen Fahrzeugschwerpunkt kam es bei starken Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen zu einer Kippneigung. Ursächlich ist neben dem Schwerpunkt der im Vergleich kurze Radstand der gewählten Roboterplattform. Dieser wäre aber nur mit hohem konstruktivem Aufwand und umfangreicher Modifikation der zugekauften Roboterplattform anzupassen. Abbildung 11 zeigt den Prototyp V1.

**Abbildung 11:** Prototyp Version V1



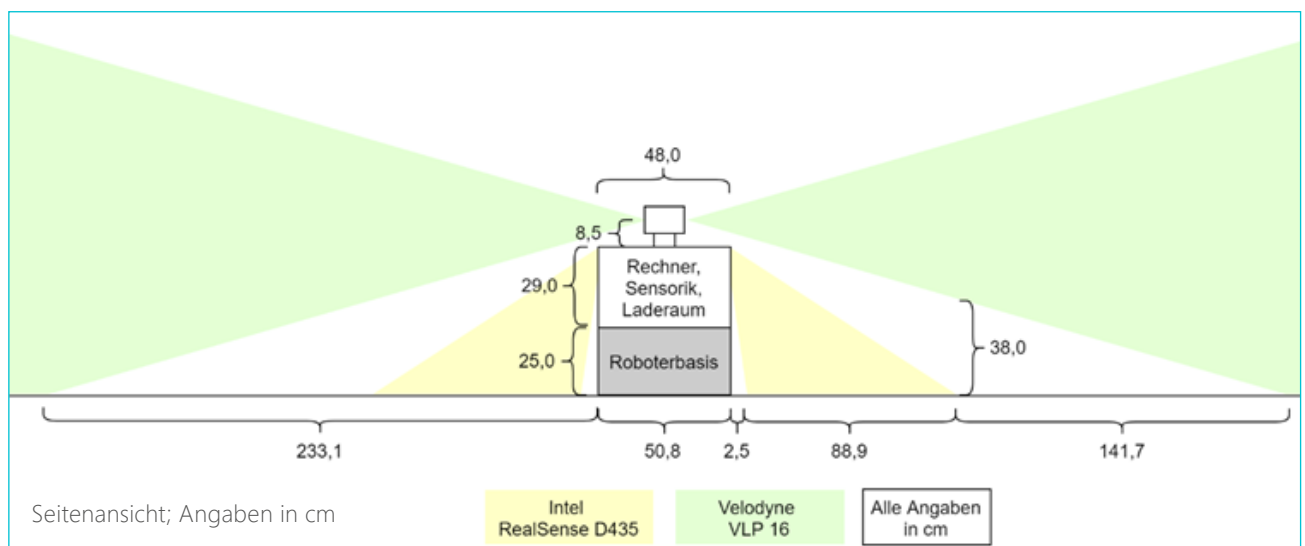
## Prototyp Version V2

Auf Basis der mit dem ersten Prototyp gewonnenen Erfahrungen wurde in aufbauenden Workshops ein zweites Roboter-Konzept entwickelt. Basis des Konzepts ist eine deutliche Verringerung des Schwerpunkts, insbesondere auch durch Nutzung eines kompakteren Ladungsträgers von 40 cm x 30 cm. Dieser hatte sich nach einer Ermittlung des durchschnittlichen Volumens der Behördenpost als ausreichend erwiesen. Für den Bau des Prototyp V2 wurden zwei Hauptvarianten untersucht. Zum einen die Variante »Pick-Up«, bei der ein wesentlicher Teil der Komponenten in einem vorderen Fahrzeugaufbau unterbracht ist, während der hintere Teil des Transportroboters für Nutzlast zur Verfügung steht. Zum anderen die Variante »Tor«, bei der der Ladungsträger in der Mitte der Plattform mit seitlichem Zugang untergebracht ist und sowohl im vorderen als auch hinteren Bereich des Roboters Bauraum zur Integration von Fahrzeug-Komponenten entsteht. Die Wahl fiel auf die Variante »Tor«, da diese eine gleichbleibende horizontale Position des Schwerpunkts im beladenen und nicht beladenen Zustand ermöglicht.

Im Rahmen der Versuche mit dem Prototyp V1 wurde insbesondere die Schwerpunktlage als kritisch für die Fahrstabilität ermittelt. Daher sollte für alle weiteren Auslegungen des Roboteraufbaus die maximal verträgliche Schwerpunkthöhe der Roboterplattform ermittelt werden. Hierzu wurden verschiedene Bremsversuche mit unterschiedlichen Belastungszuständen durchgeführt und so eine maximale Schwerpunktlage abgeleitet. Bei der anschließenden Erstellung des finalen Konzepts für den Prototyp V2 wurde Wert daraufgelegt, dass die Sensorik bereits nahe ihrer finalen Einbauposition verortet wird, also von einer weiteren Auskonstruktion nicht maßgeblich beeinflusst ist. Die Priorität beim Aufbau lag insbesondere auf der schnellen Erreichung eines fahrfähigen Zwischenstands für weitere Fahrzeugtests. Die Integration einzelner Komponenten (Ultraschallsensoren, Fail-Safe-Bremsen, Beleuchtung) sowie die Verkleidung des Roboters wurde für eine weitere Iteration des Prototyps zurückgestellt.

Das in mehreren Workshops erarbeitete Gesamtkonzept mit Position und Ausrichtung der Sensoren ist in Abbildung 12 dargestellt.

**Abbildung 12:** Sensorkonzept mit Sichtfeldern und Reichweiten



Nach Lieferung der eigenen Roboterplattform im Oktober 2020 wurde mit dem Aufbau des Prototyps V2 begonnen. Die beschafften Recheneinheiten sowie andere Hardwarekomponenten wurden an die Stromversorgung des Roboters angeschlossen und eingerichtet. Das Roboter Betriebssystem (ROS) wurde installiert, die Sensorik angeschlossen und die entsprechenden Treiber installiert. Abbildung 13 zeigt den Prototyp V2. Um die Roboter sowie die Smartphones der Begleitpersonen mit einer Internetverbindung auszustatten, wurden SIM-Karten mit M2M-Datentarifen beschafft. Der M2M-Datentarif erlaubt die stabile Nutzung der Mobilfunknetze verschiedener Mobilfunkanbieter mit nur einer SIM-Karte.

Als Vorbereitung auf die Genehmigung zum Betrieb der Roboter wurde der Prototyp V2 dem TÜV-Nord Mobilität am 23. November 2020 in Hannover vorgeführt. Eine vorläufige Prüfung der Schallemissionen ergab, dass ein AVAS (Soundgenerator) voraussichtlich nicht benötigt wird. Weitere Ergebnisse waren unter anderem Details zur Vergabe und Anbringung der Fahrzeugidentifikationsnummer und des Herstellerschilds sowie eine weitere Detaillierung zur Ausgestaltung der Beleuchtung.

Nach Absicherung des Konzepts wurde im Oktober 2020 die Beschaffung eines zweiten Jackal UGV und der benötigten Hardware (Recheneinheiten, Sensorik) eingeleitet.

**Abbildung 13:** Prototyp Version V2



## Prototyp Version V3

Der Prototyp V3 stellt die finale Iteration des Transportroboter-Prototyps dar. Zum einen wurden die beim Aufbau und Test der vorherigen Prototypen gewonnenen Erfahrungen aufgegriffen, zum anderen wurde die finale technische Konfiguration mit allen benötigten Komponenten umgesetzt. Hierzu gehörte insbesondere ein geschlossenes, wettergeschütztes Gehäuse. Als Name für die fertiggestellten Roboter wurde Laura gewählt, kurz für **L**auenburgs **A**utomatisierte **R**oboter **A**uslieferung. Abbildung 14 zeigt die beiden montierten Transportroboter bzw. die beiden Lauras.

Abbildung 14: Prototypen Version V3



Wesentliche Änderung zum vorhergehenden Prototyp ist die Integration von Fail-Safe-Bremsen und Entwicklung eines Not-Stopp-Systems zur Ansteuerung dieser. Hierzu wurden die vorhandenen Motoren der Roboterplattform durch Motoren mit einer zweiten Abtriebswelle für Bremsen ausgetauscht. Aufgrund von Einschränkungen im vorhandenen Bauraum musste dafür auf Motoren mit zusätzlichem Winkelgetriebe zurückgegriffen werden, was eine weitere Anpassung der Gestaltung des Robotergehäuses erforderte. Weiterhin wurde zur Ansteuerung der Fail-Safe Bremsen ein Not-Stopp-Mechanismus entwickelt, der sowohl per Funk als auch per am Roboter montierten Taster ausgelöst werden kann. Im Falle der Auslösung wird der Roboter in kurzer Zeit passiv gebremst und nach Stillstand über mechanische Bremsen festgesetzt. Dieser Mechanismus greift gleichermaßen bei Ausfall der Energieversorgung und ist somit wesentlicher Teil des Sicherheitskonzepts. Die Auslösung der Bremsen per Funktaster stellt ein redundantes System zur Bluetooth-Verbindung des Controllers dar.

Zur Verlängerung der Betriebszeit wurde ein Akku mit einer größeren Kapazität zur Reichweitenverlängerung beschafft. Auf Grund des Platzbedarfes der neuen Motoren, des Akkus und des Not-Stopp-Mechanismus wurde das Robotergehäuse angepasst und gering höher gesetzt. Der Grundsätzliche Aufbau aus Aluminium-Konstruktionsprofilen blieb erhalten. Die Seitenpaneele wurden aus Acrylglas gefertigt. Für den Zugang zur innenliegenden Transportkiste wurde eine magnetisch schließende Klappe mit zwei 3D-gedruckten Griffen in Fahrtrichtung links integriert. Diese kann abgenommen werden, sodass die Transportkiste entnommen werden kann. Eine zukünftige Integration eines Systems zur Absicherung des Zugriffs auf den Laderaum ist denkbar.

Bei der Planung wurde weiterhin auf die Umsetzung straßenverkehrsrechtlicher Anforderungen geachtet. Maßnahmen, die hierfür unter anderem ergriffen wurden, sind die Abrundung der Außenkanten, Beschaffung und Montage bauartgeprüfter Beleuchtungskomponenten sowie die Anbringung eines Herstellerschilds und einer Fahrzeugidentifikationsnummer (FIN). Nicht explizit gefordert, aber Teil des Sicherheitskonzepts, war die Montage einer Fahne zur Erhöhung der Sichtbarkeit.

Neben der Abdichtung des Gehäuses für den Schutz vor Wettereinflüssen war auch die Anbringung einer umfassenden Aluminium- und Kupfer-Schirmung notwendig, welche die elektromagnetische Verträglichkeit des Gesamtsystems gewährleistet. Dabei wurde ein schirmungsfreier Montageraum für die Antennen (Funk-Not-Aus, Bluetooth, Mobilfunk) berücksichtigt. Die umfassende Abschirmung des Roboters erforderte weiterhin die Entwicklung eines Lüftungskonzeptes, für das wettergeschützte Lüftungsöffnungen in einer EMV-unkritischen Größe unter 2 cm an Front und Heck des Roboters angebracht wurden. Weiterhin wurden je drei Lüfter an den Seiten des Roboters integriert, die Frischluft zuführen.

Als redundantes System zur Nahbereichsüberwachung wurde der Roboter mit je zwei Ultraschallsensoren an Front und Heck ausgestattet. Die Anbindung der Sensoren an den Steuerungsrechner erfolgt über eine gemeinsam genutzte Arduino Mikroprozessor-Platine. Alle bisher erfolgten Tests des Systems weisen darauf hin, dass die Zuverlässigkeit der verwendeten Sensoren noch keinen Einsatz als Sicherheitssystem gestattet. Aus diesem Grund wurde darauf geachtet, das Sicherheitskonzept auch ohne Rückgriff auf die Ultraschallsensoren auszugestalten.

Im September 2021 erfolgte die bauliche Fertigstellung des zweiten Transportroboters der Iteration V3. Die Gestaltung des Aufbaus entsprach hierbei der des ersten Transportroboters. Abweichungen bestanden bei der Farbe der Außenverkleidung (weiße Acrylglasplatten statt schwarzer, schwarze Aluprofile statt silberner, Sensorhalterungen in schwarz) sowie in der Wahl des Materials zur elektromagnetischen Schirmung. Nach Rücksprache mit einem EMV-Experten wurde statt Aluminium eine Kupferfolie mit besseren Schirmungseigenschaften verwendet.

Im Zuge des ITS 2021 wurden die beiden Prototypen von außen mit einer Folierung versehen, die sich am Design der TaBuLaShuttles orientiert. In Abbildung 15 sind die beklebten Lauras zu sehen.

**Abbildung 15:** Fertig beklebte Lauras



### Prototyp Version V1L

Eine für die Erprobung größerer Transportroboter, hier bezeichnet als V1L(arge), vorgesehene Roboterbasis vom Typ Husky des Herstellers Clearpath wurde Ende 2021 ausgeliefert und in Betrieb genommen. Es wurden erste Testfahrten in der Versuchshalle des ITL durchgeführt und im Rahmen eines Workshops ein erstes Aufbau- und Sensorkonzept festgelegt. Ab März 2022 erfolgte die Montage des ersten Prototyps des größeren Transportroboters (siehe Abbildung 16).

**Abbildung 16:** Erster Prototyp des größeren Transportroboters im Shuttle-Mockup





### 2.2.5 Genehmigung zum Betrieb

Der zweite Teil des Arbeitspaketes beschäftigt sich vorrangig mit der Erlangung der Genehmigung für den Betrieb der beiden Transportroboter im öffentlichen Raum bzw. Straßenverkehr. Dabei wurde zunächst in der ersten Stufe eine Genehmigung für den manuellen Betrieb (manuelle Steuerung durch die Begleitperson) angestrebt, welche in einer zweiten Stufe für den automatisierten Betrieb erweitert wurde. Dieses Vorgehen erlaubte es, frühzeitig Fahrten im realen Einsatzumfeld durchzuführen und Sensordaten zur weiteren Entwicklung der automatisierten Fahrfunktion aufzuzeichnen. Weiterhin wurde das zuvor bereits erwähnte zweite Shuttle des Herstellers Navya beschafft und zugelassen. Die Zulassung erfolgte nach dem bereits etablierten Vorgehen des ersten Shuttles im Projekt TaBuLa und wird daher in diesem Projekt nicht eingehender vertieft. Details können der Veröffentlichung »Genehmigungsprozesse beim Einsatz von automatisierten Shuttle-Bussen im ÖPNV am Beispiel des Projektes TaBuLa in Lauenburg/Elbe« entnommen werden (Böckler et al. 2021).

In Vorbereitung auf die Erlangung der Genehmigung für die Transportroboter wurden zunächst die für einen Betrieb im öffentlichen Raum relevanten Normen recherchiert und beschafft. Im Einzelnen waren dies:

- a ISO 26262 Road vehicles — Functional safety
- b ISO/PAS 21448 Road vehicles — Safety of the intended functionality
- c ISO/SAE 21434 Road vehicles — Cybersecurity engineering

Ende April 2021 wurde der Prozess für die Genehmigung der manuellen Fahrfunktion bei der Oberen Verkehrsbehörde des Landes Schleswig-Holstein in Kiel angestoßen. Im Rahmen der Normenarbeit, unterstützt durch Sachverständige des TÜV Nord Mobilität, wurde eine Gefahren- und Risikoanalyse für den manuellen Betrieb der Roboter durchgeführt. Teil der Betrachtungen war unter anderem eine detaillierte Aufnahme der Betriebsbereiche in Lauenburg/Elbe. Weiterhin wurde in Vorbereitung auf die technische Begutachtung eine ausführliche technische Beschreibung des Transportroboters angefertigt. Teil der Anforderungen war außerdem eine elektromagnetische Schirmung der Roboter. Um zunächst den Umfang der Maßnahmen zur elektromagnetischen Schirmung der Roboter zu ermitteln, wurden Messungen im EMV-Labor der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) durchgeführt. Es erfolgte weiterhin eine Beratung hinsichtlich der konstruktiven Ausführung und Integration der Schirmung. Die fertiggestellte Schirmung wurde anschließend einer zweiten Messung im EMV-Labor unterzogen und experimentell validiert.

Die technische Begutachtung des ersten Transportroboters erfolgte am 27.05.2021 durch den TÜV Nord Mobilität. Im Rahmen der Begutachtung wurde die korrekte Umsetzung der sich aus dem Straßenverkehrsrecht ergebenden Anforderungen erfolgreich gezeigt. Die finale Übereinstimmung der elektro-

magnetischen Verträglichkeit des Roboters mit den Vorgaben der UN/ECE Regelung 10 wurde am 01.06.2021 im zertifizierten Messlabor des TÜV Nord Mobilität in Hamburg nachgewiesen. Nach erfolgter EMV-Prüfung und technischer Begutachtung sowie dem Erhalt der entsprechenden Gutachten wurden am 21.06.2021 alle Unterlagen für die Ausnahmegenehmigung des Transportroboters über die Oberen Verkehrsbehörden in Kiel an die Zulassungsbehörde des Kreises in Elmenhorst eingereicht. Diese Unterlagen bestanden aus:

1. Anschreiben
2. Betriebskonzept / Vorhabenbeschreibung
3. Darstellung der Fahrbereiche
4. Gutachten nach §70 StVZO vom amtlich anerkannten Sachverständigen des TÜV Nord inkl. Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit und des Sicherheitskonzepts und weiterer Anlagen
5. Risikoanalyse inkl. Maßnahmen für die befahrenen Strecken (erst im Zuge der automatisierten Fahrfunktionen) nach Abstimmung mit der Unteren Verkehrsbehörde
6. Haftungserklärung der TUHH
7. Versicherungsbestätigung einer Haftpflichtversicherung
8. Einwilligungserklärung der jeweils zuständigen Straßenbaulastträger/ Eigentümer

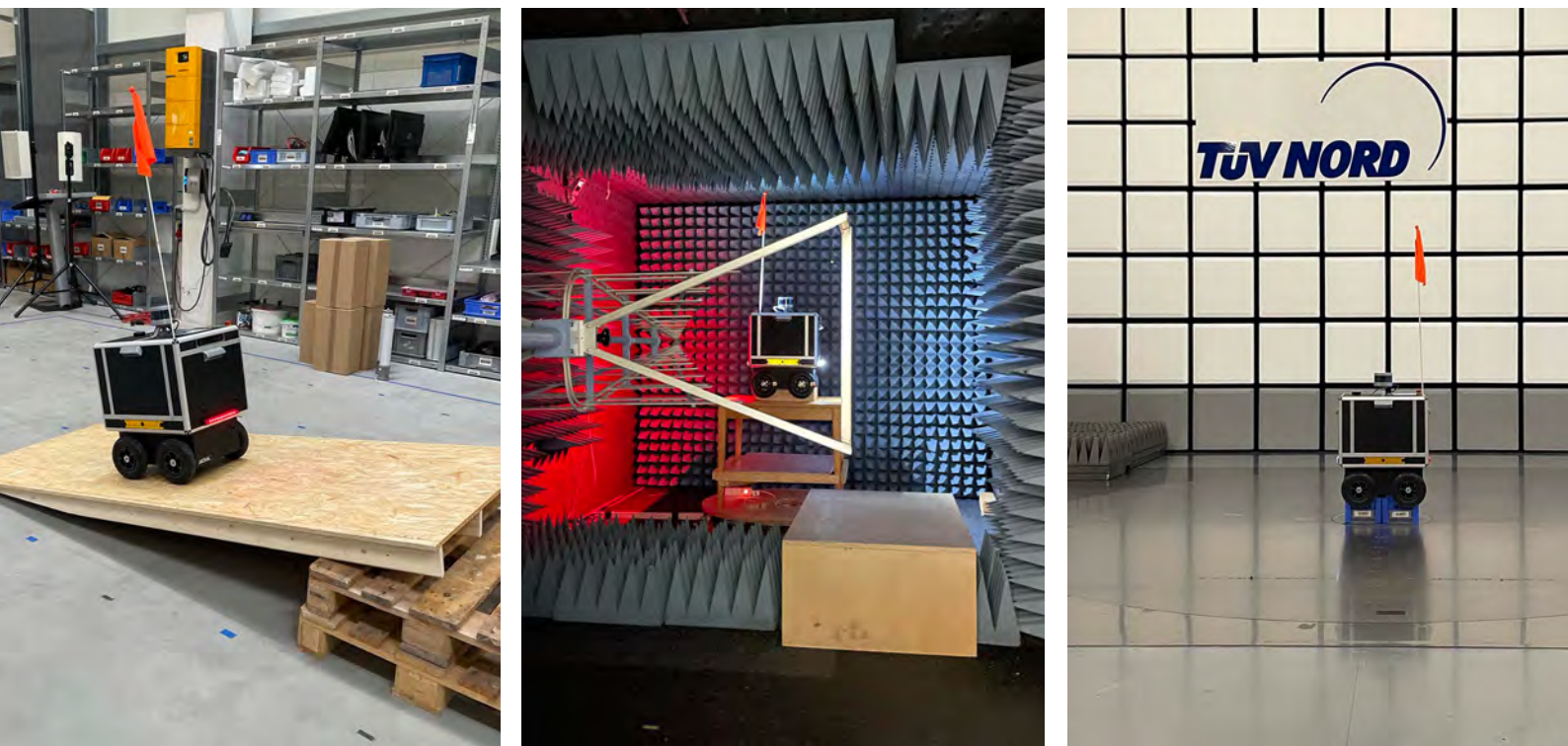
Die Ausnahmegenehmigung (des manuellen Betriebes) gemäß §70 (2) im öffentlichen Raum erfolgte nach Bestätigung der Plausibilitätsprüfung der Oberen Verkehrsbehörde durch den Kreis am 07.07.2021 für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. In einem zweiten Schritt konnte im Anschluss am 09.07.2021 der Antrag für die manuelle Fortbewegung des Transportroboters eine Ausnahme gemäß § 46 der StVO von den Vorgaben des § 2 der StVO für das Stadtgebiet Lauenburg beantragt werden. Die Unterlagen bestanden aus:

1. Anschreiben
2. Ergebnis der Plausibilitätsprüfung der Oberen Verkehrsbehörde
3. Betriebskonzept / Vorhabenbeschreibung
4. Darstellung der Fahrbereiche
5. Gutachten nach §70 StVZO vom amtlich anerkannten Sachverständigen des TÜV Nord inkl. Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit und des Sicherheitskonzepts und weiterer Anlagen
6. Einverständniserklärung der Stadt Lauenburg/Elbe als Straßenbaulastträger auf Basis der Risikoanalyse inkl. Maßnahmen für die befahrenen Strecken
7. Unbedenklichkeitserklärung der Polizei
8. Ausnahmegenehmigung des Kreises gemäß §70 (2) der StVZO

Am 16.07.2021 lag sowohl eine Ausnahmegenehmigung nach §70 StVZO zur Nutzung des Roboters im Straßenverkehr (beschränkt auf die Bundesrepublik Deutschland) sowie eine Ausnahmegenehmigung nach §46 StVO zur Nutzung der Gehwege im Stadtgebiet Lauenburg/Elbe vor. Der Betrieb hat durch geschulte Begleitpersonen zu erfolgen.

Der zweite, baugleiche Transportroboter Laura II wurde nach Fertigstellung ebenfalls einem KFZ-Sachverständigen des TÜV Mobilität vorgeführt. Aufgrund der baugleichen Ausgestaltung konnten die Funktionstests am 20.09.2021 in reduzierter Form durchgeführt werden. Seit dem 21.09.2021 liegt das positive technische Gutachten vor. Das Genehmigungsverfahren für den Transportroboter Laura II wurde am 05.10.2021 abgeschlossen. Analog zu Laura I liegen zwei Ausnahmegenehmigungen nach §70 StVZO und §46 StVO vor.

**Abbildung 17:** Technische Nachweise



(von links nach rechts):

- (a) Nachweis des Haltens auf einem Gefälle in der Versuchshalle des ITL,
- (b) Initiale EMV-Messung im EMV-Labor der HAW,
- (c) EMV-Messung im Labor des TÜV NORD CERT

Für die zeitnahe Erprobung der automatisierten Fahrfunktionen im öffentlichen Raum konnte am 13.09.2021 eine Ausnahmeerlaubnis für automatisierte Fahrten auf dem Amtplatz in Lauenburg/Elbe erreicht werden. Bestandteile des Antrages waren:

1. Anschreiben
2. Darstellung der Fahrbereiche
3. Einverständniserklärung der Stadt Lauenburg/Elbe als Straßenbaulastträger auf Basis der Risikoanalyse inkl. Maßnahmen für die befahrenen Strecken
4. Unbedenklichkeitserklärung der Polizei
5. Ausnahmegenehmigung des Kreises gemäß §70 (2) der StVZO
6. Ausnahmegenehmigung des Kreises gemäß §46 StVO zur Nutzung der Gehwege im Stadtgebiet Lauenburg/Elbe

In der Genehmigung enthaltende Auflage für die Durchführung der automatisierten Fahrten sind eine formlose vorherige Ankündigung der geplanten Zeiträume bei der zuständigen lokalen Verkehrsbehörde sowie die Absicherung der Fahrt durch eine zweite mit einer Warnfahne ausgestattete Person, welche Fahrwege anderer Fahrzeuge beaufsichtigt.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens der automatisierten Fahrt fand am 08.10.2021 eine Begutachtung der automatisierten Fahrfunktion durch einen KFZ-Sachverständigen des TÜV Nord Mobilität in Lauenburg/Elbe statt. Dabei wurden sowohl die Fahrt zu über das Display auswählbaren Zielpositionen als auch die implementierten Sicherheitsmechanismen vorgeführt und deren Funktion nachgewiesen. Am 29.10.2021 wurde der aktuelle Entwicklungsstand der automatisierten Fahrfunktionen erneut zwei KFZ-Sachverständigen der TÜV Nord Mobilität vorgeführt, Sicherheitsfunktionen demonstriert und Implementierungsdetails diskutiert.

Die technische Entwicklung der automatisierten Fahrfunktion (siehe Abschnitt 2.2) wurde weiterhin durch parallele Tätigkeiten im Rahmen der Normenarbeit ergänzt. Zunächst wurde das Konzept zur funktionalen Sicherheit um die neuen automatisierten Fahrfunktionen und Systembestandteile ergänzt. Eine Gefahren- und Risikoanalyse zur Sicherheit der Sollfunktionen wurde erstellt und darauf aufbauend Triggering Events in einem Workshop abgeleitet. Zur Abbildung von Ursachen möglicher Fehlfunktionen und deren Folgen wurden Fehlerbäume für in den Sicherheitsanalysen abgeleitete Gefahren erstellt.

Der Nachweis des Sicherheitskonzepts der Transportroboter setzt umfangreiche Tätigkeiten zur Verifikation und Validierung (V&V) sowie deren Dokumentation voraus. Im ersten Schritt wurde dazu das V&V-Konzept der Software zur Robotersteuerung dokumentiert. Dieses Konzept stützt sich auf eine hohe Abdeckung aus Unit und Integration Tests sowie wechselseitige Code-Reviews. Weiterhin wurden auf Basis der Sicherheitsanalysen nötige Maßnahmen zur V&V der Funktionen auf Fahrzeug- und Systemebene abgeleitet. Im Rahmen

der Durchführung dieser Maßnahmen wurden am 04.12.2021 Fahrversuche vor Ort in Lauenburg/Elbe durchgeführt. Gegenstand waren die verschiedenen Bremssysteme und deren Betätigungseinrichtungen sowie das Verhalten des Transportroboters beim Ausweichen unterschiedlichster Hindernisse. Es folgten fünf weitere Testfahrten in der Versuchshalle des Instituts für Technische Logistik. Im Zuge dieser wurden die statischen Belastungsgrenzen der Ladungssicherung erprobt sowie die Reichweiten der Controller- und Funk-Not-Stopp-Verbindung ermittelt. Für die Lokalisierung des Roboters wurde gezeigt, dass diese nicht durch die typischerweise driftbehafteten Messdaten der Inertialen Messeinheit (Inertial Measurement Unit – IMU) beeinträchtigt ist. Die ebenfalls erforderliche Ermittlung der technisch bedingten Grenzen der verbauten Umfeld-Sensorik beinhalteten die Hinderniserkennung bei unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten und schlechten Lichtverhältnissen sowie die durch Verschmutzung im Fahrbetrieb auftretende Verdeckung/Verschmutzung der Sensoren. Im Rahmen dieser Testfahrten wurde gezeigt, dass die im Sicherheitskonzept definierten Sicherheitsmechanismen technisch erfüllt sind. Sicherheitsmechanismen, welche explizit den Eingriff der Begleitperson betreffen, wurden in den Schulungen bzw. Schulungsunterlagen für Begleitpersonen verankert. Die zusammengefassten Unterlagen und Nachweise wurden am 09.03.2022 dem TÜV Nord zur Begutachtung übersandt. Im Juni 2022 lag eine positive Rückmeldung vor.

Der Antrag für die automatisierte Fahrt (ohne zweite Aufsichtsperson) auf allen Strecken wurde nach Projektende an die Untere Verkehrsbehörde (in Kopie Obere Verkehrsbehörde) gestellt mit folgenden Dokumenten:

1. Anschreiben
2. Betriebskonzept / Vorhabenbeschreibung
3. Darstellung der automatisierten Fahrbereiche
4. (Um alle automatisierten Funktionen) erweitertes Gutachten nach §70 StVZO vom amtlich anerkannten Sachverständigen des TÜV Nord inkl. Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit und des Sicherheitskonzepts und weiterer Anlagen zur Funktionalen Sicherheit
5. Ausnahmegenehmigung des Kreises gemäß §46 StVO zur Nutzung der Gehwege im Stadtgebiet Lauenburg/Elbe
6. Fortgeschriebene Risikoanalyse inkl. verkehrsbehördlich anzuordnende Maßnahmen für die befahrenen Strecken nach Abstimmung mit den zuständigen Verkehrsbehörden
7. Haftungserklärung der TUHH
8. Versicherungsbestätigung einer Haftpflichtversicherung
9. Einwilligungserklärung der jeweils zuständigen Straßenbaulastträger/Eigentümer

Die abschließende Genehmigung für die beiden Transportroboter Laura I und II wurde nach Projektende erteilt.

## 2.3 Implementierung des Transportroboters in das Reallabor und das Betriebskonzept des automatisierten Shuttles

Ein weiteres Projektziel bestand in der Integration des Transportroboters in das Betriebskonzept des automatisierten Shuttles in Lauenburg/Elbe. Alle hierzu notwendigen Entwicklungen, von Softwarefunktionalitäten zur manuellen und automatisierten Fahrt der entwickelten und aufgebauten Roboter-Hardware, sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

### 2.3.1 Fahrzeugsteuerung des Transportroboters und Umsetzung des Sicherheitskonzepts

Das im Projekt erarbeitete Sicherheitskonzept stellte verschiedene Anforderungen an die Transportrobotersteuerung. Eine Analyse dieser Anforderungen brachte insbesondere drei wesentliche Sicherheitsfunktionen hervor, über die der Roboter verfügen sollte: Eine Unterbrechbarkeit der Fahrt des Roboters muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Daneben muss es dem Begleitpersonal möglich sein, jederzeit eine manuelle Übernahme der Fahrfunktion durchzuführen und die Fahrt ferngesteuert fortzuführen. Schließlich ist eine kontinuierliche interne Selbstdiagnose notwendig, welche im Falle von Fehlfunktionen die Fahrt über den angeführten Mechanismus zur Fahrtunterbrechung stoppen kann (z. B. Überwachung der Funkverbindung zum Controller).

Um eine geeignete Architektur für die Transportrobotersteuerung zu wählen, wurden zunächst mögliche Architekturen recherchiert und nach Vorauswahl drei Softwarepakete miteinander verglichen, welche Robotersteuerungen implementieren. Es zeigte sich, dass eine Integration der angeführten Sicherheitsmechanismen in den verglichenen Implementierungen nur schwer umsetzbar ist. Als Alternative wurde daher ein eigenes Konzept für eine Robotersteuerungs-Architektur erstellt, das auf einer State-Machine mit Fokus auf Sicherheitsfunktionen beruht. Dieses enthält einen Leitfaden für die Architektur neuer Softwarekomponenten und beschreibt die Prozesse, die bei der Entwicklung eingehalten werden müssen. Zu diesen gehören unter anderem Software-Tests, Code-Reviews und eine Struktur zur Versionskontrolle der Codebasis. Für die Netzwerkkommunikation von Roboter, Server und App wurden insgesamt 24 Schnittstellen definiert. Zur Modellierung des Roboterbetriebes wurden in einem Workshop weiterhin alle notwendigen Prozesse erarbeitet und mit Hilfe eines Programmablaufplans visualisiert.

Softwareseitig implementiert wurde die Kontrolle des Roboterbetriebes, wie im Konzept geplant, mit einer State-Machine. Diese ist in der Lage, die iterative Natur des Entwicklungsprozesses zu unterstützen. Sicherheitsaspekte wie z. B. die Möglichkeit, jederzeit die automatisierte Fahrt durch eine Begleitperson unterbrechen zu können, sind ein integraler Bestandteil des entwickelten

Systems. Weiterhin wurden die vom Roboter zurückgelegten Fahrstrecken für eine spätere Auswertung erfasst und ein Auftragsmanagement zur Abwicklung der Transportfahrten wurde erstellt. Zusätzlich wurde die permanente, automatisierte Funktionskontrolle der Einzelsysteme im Rahmen einer internen Selbstdiagnose systematisch implementiert. So erfolgte eine kontinuierliche Überwachung der Funktionsfähigkeit der Subsysteme sowie ein Unterbrechen des Roboterbetriebes bei der Registrierung von Fehlfunktionen. Die Funktionsfähigkeit bzw. der Degradationsstatus aller System-Komponenten wurden über einen zentralen Heartbeat-Mechanismus bzw. einen System-Monitor überwacht. Außerdem wurde ein Logging-Mechanismus zur Offline-Fehlerdiagnose konzeptioniert und implementiert.

Als erste Ausbaustufe des Transportroboters wurde zunächst die Möglichkeit einer manuellen Fahrt geschaffen, die ferngesteuert durch das Begleitpersonal erfolgt. Hierzu wurde eine Fernsteuerung über einen Bluetooth-Controller (siehe Abbildung 18) konzeptioniert und implementiert sowie mit allen Funktionalitäten in die oben genannte State-Machine integriert. Auf einige Merkmale wurde hier ein besonderes Augenmerk gelegt. Die Auswahl der Tastenbelegungen erfolgte nach Gesichtspunkten der Ergonomie und sicheren Bedienung. Weiterhin wurde eine kontinuierliche Überwachung der Funk-Verbindung implementiert und Fehlbedienungen mithilfe eines Totmanntasters gemäß des Sicherheitskonzepts verhindert. Des Weiteren wurden drei Fahrstufen mit jeweils unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten implementiert, wobei der Roboter sich beim Start automatisch auf der niedrigsten Stufe befindet und von der Begleitperson aktiv hochgeschaltet werden muss. Außerdem wurde ein Hup-Mechanismus implementiert, dessen Ton-Frequenzen einer genormten Kfz-Hupe entsprechen. Mithilfe der manuellen Fahrt konnte der Roboter schnellstmöglich den realen Testfeldbetrieb aufnehmen.

Diese Fernsteuerung erlaubte es, vorher festgelegte Fahrmanöver/-befehle mit dem Roboter durchzuführen. Mit diesen wurden die Fahreigenschaften der Roboterplattform mit montiertem Aufbau getestet. Für die manuelle Steuerung per Bluetooth-Controller wurden weitere Funktionen und Sicherheitsmechanismen implementiert. Die Vorgabe der Sollgeschwindigkeit am Joystick wurde über eine nichtlineare Kennlinie abgebildet, um ein genaueres Navigieren bei

**Abbildung 18:** Funk-Not-Stopp-Taster und Bluetooth-Controller



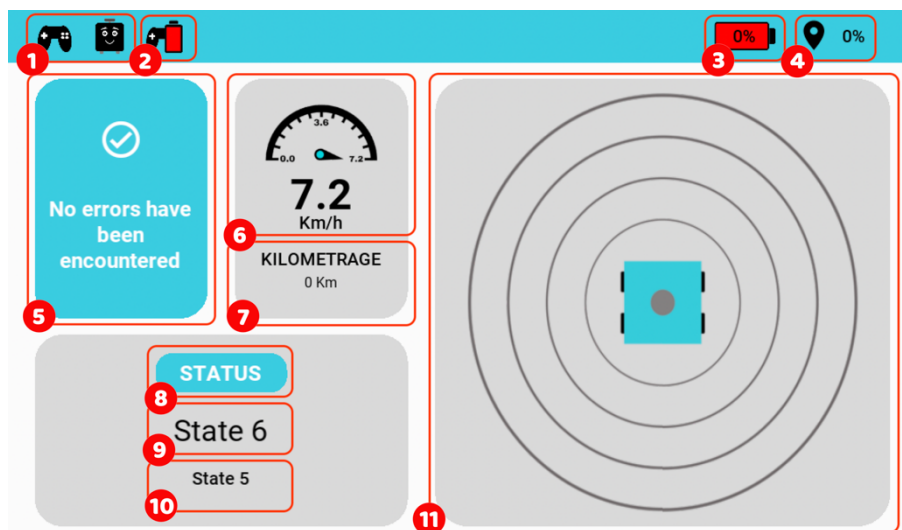
geringen Geschwindigkeiten zu ermöglichen. Außerdem wurde bei Störung oder Abbruch der Bluetooth-Verbindung eine Bremsung des Transportroboters ausgelöst.

Auf die Entwicklung der zweiten Ausbaustufe des Transportroboters, der automatisierten Fahrt, wird im folgenden Abschnitt detaillierter eingegangen. In der Steuerungs-Architektur musste zur Einbindung der automatisierten Fahrt ein Übergabe- bzw. Übernahmemechanismus implementiert werden, um während des Betriebes zwischen manueller und automatisierter Fahrfunktion wechseln zu können. Die Roboter-Begleitpersonen können damit jederzeit die Kontrolle übernehmen und manuell in die Fahrfunktion eingreifen. Nach Eingriff ist sowohl eine Rückkehr in die automatisierte Fahrt als auch eine Beendigung dieser möglich.

Als zusätzliche Benutzerschnittstelle zwischen Begleitperson und Roboter wurde der Transportroboter darüber hinaus mit einem Touch-Display ausgestattet, das in die Robotersteuerung eingebunden wurde (siehe Abbildung 19). Für dieses Display wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt, die für den Betrieb relevante Statusinformationen zusammenfasst und gut sichtbar darstellt (Fahrmodus [automatisiert, manuell], Geschwindigkeit, Fahrstufe, Ergebnis Selbstdiagnose Subsysteme, Systemfehler, Ladestand Traktionsbatterie, Fahrzeug-Logs, Zustandshistorie). Weiterhin können auf der grafischen Benutzeroberfläche Fehler direkt am Roboter diagnostiziert werden und es kann Einsicht auf einen Nachweis, dass die Systemkonfiguration dem vom TÜV abgenommenen Stand entspricht, gewährt werden.

Weiterhin wurde ein Server- und Datenbanksystem implementiert. Dieses dient unter anderem dem Management von eingehenden Lieferaufträgen und der Kommunikation zum TaBuLaShuttle. Das System wurde auf der Server-Infrastruktur der TUHH gehostet.

**Abbildung 19:** Hauptansicht der Benutzeroberfläche des Touch-Screen-Interface auf dem Roboter



1. Navigationsmodus (manuell, automatisiert)
2. Akkustand Controller
3. Akkustand Roboter
4. (Zukünftig: Lokalisierungsgenauigkeit)
5. Fehler-Steuererelement
6. Tacho
7. Kilometerstand
8. Zustandsübersicht
9. Aktueller Betriebszustand
10. Vorheriger Betriebszustand
11. Hindernisübersicht



### 2.3.2 Mapping von Innen- und Außenbereichen

Als erster vorbereitender Schritt hinsichtlich der automatisierten Fahrt musste zunächst die Auswahl eines geeigneten Kartenerstellungsverfahrens erfolgen. Hierzu wurden zunächst mögliche Lösungen recherchiert und mit »Cartographer« und »Octomap« zwei verschiedene SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) Ansätze miteinander verglichen und hinsichtlich der automatischen Generierung von Karten mithilfe des Roboters getestet. Weiterhin wurde mit Verfahren des Terrestrischen Laserscannings eine weitere Alternative identifiziert und ebenfalls am Institut für Technische Logistik getestet.

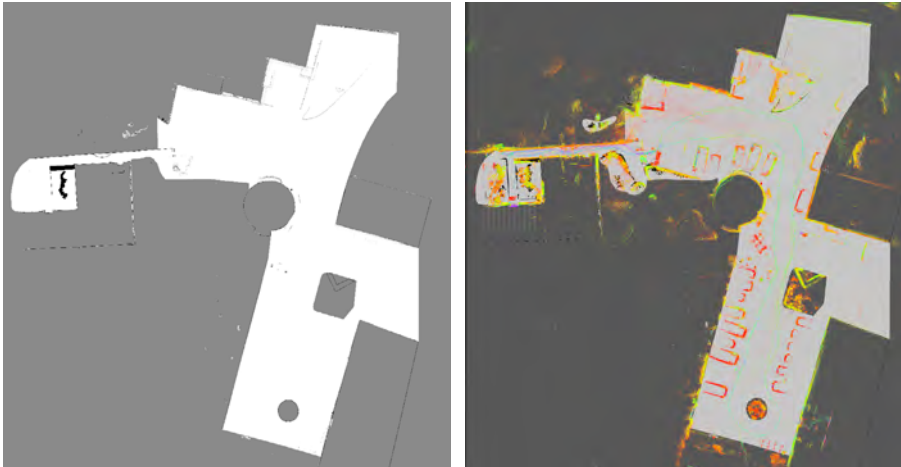
Aufgrund des hohen Anteils von Kopfsteinpflasterstraßen im Testbereich Lauenburg/Elbe und basierend auf den Testresultaten wurde entschieden, dass der Roboter zur Aufnahme von Kartendaten in Lauenburg/Elbe ungeeignet ist. Die Sensordaten wären durch die starken Vibrationen zu stark verrauscht worden. Stattdessen wurde ein stationärer, terrestrischer Laserscanner des Herstellers FARO verwendet. Zwei Mitarbeiter des ITL wurden im Umgang mit dem Gerät geschult.

Als Grundlage der Lokalisierung der Transportroboter wurde daraufhin eine digitale Karte des Betriebsbereiches am Arbeitsplatz in Lauenburg/Elbe erstellt. Die Karte basiert auf vorher durchgeführten 3D-Aufnahmen der Umgebung mittels eines terrestrischen Laserscanners (TLS). Die aus den 3D-Aufnahmen resultierende Punktwolke wurde nachträglich manuell von Fehlmessungen sowie von falsch interpretierbaren Kanten bereinigt. Bereiche, die nicht ausreichend vom TLS erfasst wurden, wurden außerdem durch zusätzliche SLAM-Kartierungsfahrten unter Zuhilfenahme der Transportroboter ergänzt. Im Verlauf wurde die digitale Karte um zusätzliche Bereiche am Arbeitsplatz und am Fürstengarten erweitert. Aus diesem Prozess resultierte eine zweidimensionale Grundrisskarte der Umgebung, anhand derer der Roboter sich lokalisieren und navigieren konnte. Diese Karte wurde durch mehrere Testfahrten iterativ getestet, verbessert und validiert (z. B. nachträgliche Ergänzung des Arbeitsplatz Parkplatzes). Abbildung 20 zeigt die erstellte Karte sowie eine Überlagerung der Karte mit den Laserscans eines Transportroboters.

Für die Zieleingabe am Roboter wurden verschiedene Zielpunkte auf den digitalen Karten erstellt und mit den Gegebenheiten vor Ort in Lauenburg/Elbe abgeglichen. Darüber hinaus wurden innerhalb der Karten nicht befahrbare Strecken ausgewählt und für eine weitere Verarbeitung durch die Robotersteuerung markiert. Diese nicht befahrbaren Flächen stellen beispielsweise Grasflächen oder tief abgesenkte Kanaldeckel dar, also Hindernisse, die zwar nicht in den Scanner basierten Grundrisskarten verortet, für den Roboter jedoch nicht ohne weiteres zu überwinden sind.

Eine weitere Anpassung der Karten fand hinsichtlich der Umsetzung eines Rechtsfahrgebots statt. Die hierfür zu meidenden Fahrkorridore wurden entsprechend ausgewählt und ähnlich der vorangegangenen, nicht befahrbaren Flächen, markiert.

**Abbildung 20:** erstellte Karte sowie eine Überlagerung der Karte mit den Laserscans eines Transportroboters



Um die automatisierte Einfahrt in das Shuttle vorzubereiten, wurden weiterhin die entsprechenden Karten per »Cartographer« SLAM erstellt. Größte Herausforderung hierbei war, die Begrenzungen der Shuttle-Rampe als nicht befahrbar zu markieren. Dies wurde mithilfe einer iterativen Verbesserung der Karte erzielt, wodurch ein möglichst orthogonales Auffahren des Roboters auf die Rampe gewährleistet werden konnte.

Neben den Karten der Betriebsbereiche in Lauenburg/Elbe wurde ebenfalls eine digitale Karte der Versuchshalle des Instituts für Technische Logistik erstellt. Diese diente der Durchführung von Testfahrten und Experimenten in den Institutsräumlichkeiten. Anhand dieser Karte konnten die Implementierung des »Cartographer« SLAM-Ansatzes, die Festlegung der Zielpunkte innerhalb der Karten sowie das Rechtsfahrgebot erprobt und verbessert werden.

### 2.3.3 Automatisierte Fahrt und Hinderniserkennung – Konzept und Implementierung

Die Navigation der Transportroboter wurde basierend auf dem ROS Navigation Stack entwickelt. Dieser beruht insbesondere auf zwei Funktionalitäten: einem Mechanismus zur Bewertung der Befahrbarkeit des Roboterumfelds sowie einem Mechanismus zur darauf aufbauenden Trajektorienplanung.

Die Befahrbarkeit der Roboterumgebung wurde mithilfe einer »Costmap« bewertet. Diese stellt auf Basis der Navigationskarte und den aufgenommenen Sensordaten des Roboters Hindernisse in dessen Umfeld mithilfe eines Kostenwerts dar. Hierbei wurden die Außenmaße des Roboters sowie ein zusätzlicher Sicherheitsabstand miteinbezogen, um eine Kollision jedes Teils des Roboters mit einem Hindernis auszuschließen. Die Hinderniskosten wurden über den Sicherheitsabstand des Roboters zu einem wahrgenommenen Hindernis

gewichtet. Befand sich der Roboter nah an einem Hindernis, wurde dies analog mit einem hohen Kostenwert versehen. Auch in der Karte als nicht befahrbar markierte Bereiche flossen mit einem hohen Kostenwert in diese Darstellung mit ein.

Der Costmap Mechanismus besteht weiterhin aus zwei verschiedenen Ansätzen, einem auf globaler und einem auf lokaler Ebene. Die globale Costmap ist eine Darstellung der Umgebung, die auf den statischen Hindernissen der Navigationskarten basiert. Bei der lokalen Costmap wiederum handelt es sich um eine dynamische Darstellung eines definierten Radius von 2,5 Metern um den Roboter herum, der dynamisch auf Basis der Sensordaten von Lidar und RealSense Stereokameras aktualisiert wird.

Aufbauend auf diesen Costmap Darstellungen der Roboterumgebung wird ein ROS Standard Mechanismus zur Trajektorienplanung eingesetzt. Auch bei diesem wird zwischen globaler und lokaler Ebene unterschieden. Der »global Planner« nutzt beide Costmaps für eine erste Annäherung an die Trajektorie von Start- zum Zielpunkt der zu planenden Route. Da sich die Transportroboter nicht an einer festgelegten virtuellen Schiene orientieren, sondern innerhalb vorgegebener Fahrkorridore frei bewegen können, sind die zu fahrenden Strecken algorithmisch zu bestimmen. Hierzu wird die Route über eine kostenminimierende Funktion ausgewählt, wobei sich die Planungskosten aus einer Kombination der Routenlänge sowie den Hinderniskosten von zu überfahrenen Koordinaten zusammensetzt. Diese globale Trajektorie wird periodisch Neuberechnet und um Hindernisse aus beiden Costmaps herum geplant. Diese globale Trajektorienplanung wurde implementiert, parametrisiert und intensiv getestet. Das Rechtsfahrgebot wurde mithilfe einer Fahrstreckenpriorisierung in der Trajektorienplanung umgesetzt. Einzelne Bereiche, deren Befahrung eine verminderte Fahrstabilität zur Folge haben können (z. B. Grasnarben, abgesenkte Kanaldeckel) wurden mit demselben Mechanismus von der Trajektorienplanung ausgeschlossen.

Der »local Planner« hingegen dient insbesondere der periodischen Berechnung konkreter Motorbefehle, um der vom global Planner geplanten Route möglichst genau folgen zu können. Während es dem local Planner nicht möglich ist, eine Ausweichroute basierend auf lokalen Hindernissen zu berechnen, kann jedoch die Fahrt vor einem Hindernis gestoppt werden und auf eine Neuplanung durch den global Planner gewartet werden. Diese lokale Trajektorienplanung wurde implementiert und dementsprechend parametrisiert, um dynamische Hindernisse zu erkennen und entsprechend der Fahrsituation auf diese zu reagieren. Mögliche Reaktionen bestehen z. B. in der Neuberechnung der Fahrstrecke, also einem Ausweichen, oder aber auch im Abbremsen und Anhalten.

Die konkrete Umsetzung des bereits angesprochenen Rechtsfahrt-Features fand mithilfe einer Erweiterung der Costmaps statt. Diesen wird eine Ebene hinzugefügt, in der je Fahrtrichtung nicht zu befahrende Bereiche mit sehr hohen Kosten belegt werden. Dementsprechend werden diese Bereiche bei freier Wegstrecke nicht berücksichtigt. Sind jedoch alle anderen Bereiche durch Hindernisse blockiert, kann auf diese Bereiche ausgewichen werden.

Um die automatisierte Fahrt weiterhin an verschiedene Fahrziele anzupassen, wurde ein Mechanismus zum Wechsel der Navigationskarte implementiert. Jedes verfügbare Ziel wurde daher mit einer eigenen Karte verknüpft. Nach der Auswahl des Ziels über das Touch-Display wird zunächst innerhalb der Robotersteuerung die Karte des ausgewählten Ziels mit der aktuell verwendeten Karte abgeglichen. Falls diese Karten nicht übereinstimmen, wird die beste Karte gegen die Karte des ausgewählten Ziels getauscht. Nach einem Kartentausch findet automatisch eine Neuberechnung der globalen Costmap statt, was dementsprechend auch ein Update der nicht befahrbaren Bereiche sowie der Rechtsfahr-Gebot Ebene beinhaltet.

Für die Lokalisierung des Roboters innerhalb der Navigationskarten wurde zunächst eine Vorauswahl geeigneter Lokalisierungsverfahren getätigt. Die Algorithmen »AMCL« und »LaMa« wurden anschließend in einer am Institut für Technische Logistik aufgebauten Testumgebung praktischen Erprobungsfahrten unterzogen. Das Lokalisierungssystem der Transportroboter wurde in Form von AMCL daraufhin implementiert, parametrisiert und mehrfach vor Ort in Lauenburg/Elbe getestet.

Ergänzend zur Fahrfunktion in den einzelnen Betriebsbereichen wurde daraufhin die automatisierte Fahrt in das Shuttle implementiert und erprobt. Zur Fahrt in das Shuttle nutzen die Transportroboter die am Shuttle befindliche, ausfahrbare Rollstuhlrampe. Herausfordernd war hierbei der durch die ausgefahrene Rampe deutlich verkleinerte Bereich zum Rangieren vor dem Shuttle bzw. auf dem Gehweg. Für die Lokalisierung im Shuttle-Innenraum wurden verschiedene Konzepte erstellt und im Grundsatz evaluiert (z.B. Versuche zur Erkennung von Reflektoren in den Stereokameradaten). Resultierend zeigte sich zunächst die Lokalisierung auf Basis von AMCL für statische Anwendungsfälle als ausreichend. Ein Erweiterungspotenzial durch den Einsatz von Reflektoren zur stabileren Lokalisierung in dynamischem Umfeld wurde jedoch identifiziert und für zukünftige Anwendungen notiert.

Ein weiterer Ausbau der Funktionalität des Roboters zur Integration in den Shuttlebetrieb stellte die Entwicklung eines KI-basierten Systems zur Erkennung des TaBuLaShuttles anhand von RGB-Kameradaten dar. Hierfür wurden vor Ort in Lauenburg/Elbe Trainingsdaten aufgenommen. Eine Workstation zum Training solcher neuronalen Netze wurde ausgewählt, beschafft und zum Training des oben genannten Shuttle-Erkennungssystems genutzt.

Zur Abwicklung der eigentlichen Transportfahrten wurden die Robotersteuerung um mehrere Initialisierungsfunktionen ergänzt. Damit versetzen sich die Roboter nach dem Hochfahren selbstständig in einen betriebsbereiten Modus, ohne notwendige manuelle Eingriffe.

### 2.3.4 Kommunikationsschnittstellen zwischen Transportroboter und Shuttle sowie Infrastruktur

Zur optimierten Integration des Roboters in den Shuttlebetrieb wurde mit der Firma Navya, dem Hersteller der Shuttles, die notwendige Funktionalität einer **Internet-API-Schnittstelle** zum äußeren Zugriff auf den Bus in den Anforderungen definiert. Diese wurde u. a. benötigt, damit die Transportroboter dem Shuttle Befehle erteilen können (z. B. Fahrtwunsch zu bestimmter Haltestelle, Not-Stopp, Tür öffnen). Um auf Livedaten der Shuttle zugreifen zu können, wurde mit Navya ein mehrstufiger Prozess durchlaufen. Im Rahmen dieses Prozesses mussten alle Anwendungen und deren Funktionalität innerhalb einer Simulation getestet und von Navya zwischengeprüft werden, um den Zugriff auf die Livedaten zu erhalten. Über die Live-Daten der API-Schnittstelle der Shuttles wurden ab Juli 2021 per Internetanruf die Polleranlagen in der Altstadt gesteuert und die Homepage des Projektes mit exakten Standortinformationen versorgt. Hinsichtlich der hier ansetzenden Kommunikation der Transportroboter mit dem Shuttle musste wegen des enormen Ressourcenaufwandes für die Entwicklung und Genehmigung dieser herstellerübergreifenden Schnittstelle zurückgestellt werden. Insbesondere im Hinblick auf die Ausführung sicherheitsrelevanter Eingriffe (Not-Stopp, Tür schließen, Rampe ausfahren) besteht erheblicher weiterer Entwicklungsbedarf.

Neben der vorgenannten Kommunikation über Mobilfunknetze wurde eine **Bluetooth-Kommunikation** zur Vernetzung mit der Infrastruktur realisiert. Menschen mit Sehbehinderung oder Rollstuhl können ähnliche Einschränkungen wie die an der TUHH entwickelten Transportroboter aufweisen (Eigenschaften wie z. B. auf Räder angewiesen, ohne Arme, eingeschränkte Seheigenschaften). Wegen der großen Synergien wurden die Entwickler der bereits existierenden App LOC.id beauftragt ihre Schnittstelle für diese besonderen Bedürfnisse von Mensch und Roboter gemeinsam mit der TUHH weiter zu entwickeln. Folgende neuentwickelten Bestandteile konnten im Projekt realisiert werden:

- ▶ Installation von 15 Bluetooth-Modulen an zwei Lichtsignalanlagen an den Fußgängerfurten, an drei Haltestellen und in den zwei Shuttles (letztere fünf jeweils via Internet angebunden).
- ▶ Update der App LOC.id mit der Ergänzung zur Erkennung neuer Komponenten (z. B. neue ID für automatisierte Shuttle), so dass in der App Shuttle, Haltestellen oder Lichtsignalanlagen mit ihren Eigenschaften identifiziert werden können.
- ▶ Durch das Aussenden individueller Eigenschaften via App kann der menschliche Anwender oder der Transportroboter an Infrastruktur oder das Shuttle Eigenschaften aussenden (als Beispiele: »Ich bin sehr langsam, verlängere die Freigabezeit der Lichtsignalanlagenphase für mich.« oder »Mir fehlt mangels Arme die Funktionalität, einen Taster am Shuttle zu drücken, führe diese Funktion aus« oder »Ich kann nichts sehen, aktiviere das Sprachsystem«).

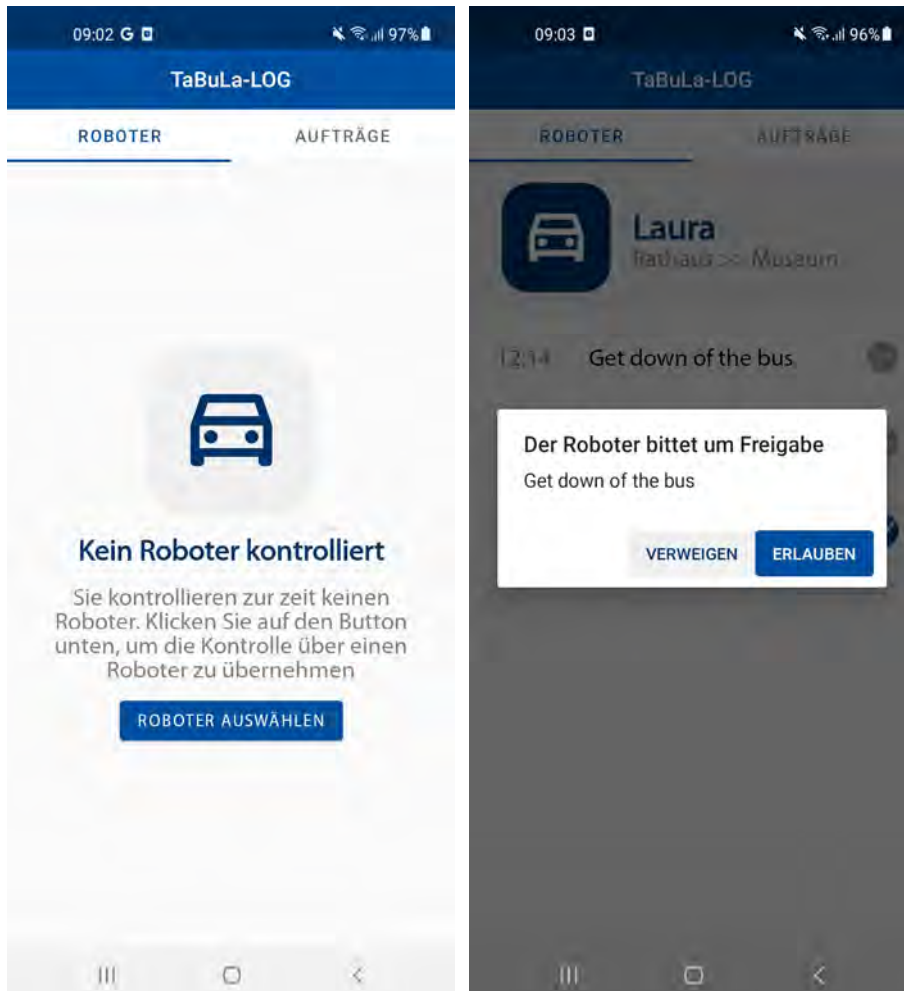
Für die Anwendung im Transportroboter wurde die Bluetooth-Schnittstelle vorbereitet. Aufgrund des begrenzten Projektzeitraumes und zur Entzerrung bei vielen Beteiligten wurde die Entwicklung allerdings parallel auf mobilen Endgeräten vorangetrieben und darüber intensiv vor Ort getestet. Die App LOC.id selbst konnte von den Entwicklern mit den neuen Funktionen in den üblichen App-Stores ausgerollt werden. Auch hier zeigt sich hinsichtlich sicherheitsrelevanter Eingriffe (Not-Stopp, Tür schließen, Rampe ausfahren) enormer weiterer Entwicklungsbedarf, auch hinsichtlich rechtlicher Vereinbarungen in der Schnittstelle zwischen verschiedenen Herstellern.

Aus dem Vorgängerprojekt wurden die Road-Side Units an zwei Lichtsignalanlagen übernommen. Diese übermitteln SPAT-/MAP-Daten mittels **pWLAN über ITS-G5 Standard**, was eine digitale Übertragung von Statusinformationen z. B. der Signalgeber an die On-Board Units in jeglichen Fahrzeugen und Robotern erlaubt. Weitere Informationen hierzu finden sich im Kapitel 2.4.3 Bereitstellung notwendiger Infrastruktur für den Testbetrieb.

Das Konzept einer Android App als Benutzer\*innenschnittstelle sowie der damit verbundenen REST-Schnittstellen und Sicherheitsaspekte wurde konzipiert. Hierfür wurde zunächst die Funktionalität der App mithilfe von 38 Designs (Wireframes) visualisiert, um eine grobe Darstellung der Zusammenhänge verschiedener Nutzeransichten und Funktionen innerhalb der App zu gewährleisten. Die zugrundeliegenden REST-Schnittstellen zwischen Server-Backend, Roboter und App sowie der Informationsfluss zwischen den einzelnen Prozessen wurden mithilfe von elf Sequenzdiagrammen dargestellt. Die dafür notwendigen Schnittstellen wurden weiterhin eindeutig definiert und dokumentiert. Das erarbeitete Sicherheitskonzept basiert weiterhin auf Komponenten zur Nutzer\*innenverwaltung sowie auf der Beschränkung der Nutzer\*innenzugriffsrechte. Hierfür wurden bestimmte Rollen für die jeweiligen Nutzer\*innen definiert, mit denen entsprechende Zugriffsrechte einhergehen.

Auf diesen Konzepten aufbauend wurde eine Smartphone-App entwickelt. Die App dient der Abwicklung des Auftragsmanagements sowie zur generellen Überwachung der Transportroboter, sowohl durch Nutzer\*innen als auch durch die Begleitpersonen. So sollen beispielsweise Auftragsdetails sowie -status überprüft werden können. Umgesetzt wurde dies mithilfe einer Serveranwendung zur Auftragsverwaltung. Mithilfe einer REST-Schnittstelle konnten Aufträge aus der App heraus angelegt werden und Aufträge vom Roboter angefordert werden. Die Verwaltung der Aufträge wurde durch die Anbindung einer SQL-Datenbank gewährleistet. Neben dem Management der Transportaufträge umfasste die Anwendung weiterhin Komponenten zur Nutzer\*innenverwaltung für die Realisierung des zuvor erarbeiteten Sicherheitskonzepts. Die Anwendung wurde weiterhin auf der Hardwareinfrastruktur des Rechenzentrums der TUHH ausgerollt. Aufgrund der Priorisierung der Robotergenehmigung wurde zwar ein funktionsfähiger Prototyp der App erstellt, dieser wurde jedoch bisher nicht zum Betrieb der Roboter genutzt und nur im Labormaßstab getestet. Abbildung 21 zeigt Ansichten des App-Prototyps.

Abbildung 21: Screenshots der App zur Beauftragung von Transporten



### 2.3.5 Kontinuierliche Tests innen/außen und iterative Verbesserungen

Es fanden regelmäßig Tests aller implementierten Funktionen der Roboter, sowohl in der Halle des Instituts für Technische Logistik, als auch am TUHH-Campus sowie vor Ort in Lauenburg/Elbe statt. So wurden zur Evaluierung der Nahbereichsüberwachung mittels der Stereo-Kameras mehrere Tests durchgeführt und auch das Lokalisierungssystem der Transportroboter wurde implementiert, parametrisiert und mehrfach vor Ort in Lauenburg/Elbe getestet. Anhand der durchgeführten Tests konnten die Funktion und Genauigkeit der Lokalisierung weiter verbessert werden. Unterstützend fanden zahlreiche Testfahrten in der Laborhalle des Instituts für Technische Logistik statt.

Ein Algorithmus zur Lokalisierung des Roboters im Innenraum des Shuttles wurde anhand verschiedener erstellter Konzepte im Grundsatz evaluiert. Beispielsweise wurde getestet, ob mithilfe von Reflektoren im Sichtbereich der Stereokameras eine Verbesserung der Lokalisierung erzielt werden kann. Aufgrund unzureichender Verbesserungspotenziale wurde auch im Innenraum auf die, im vorangehenden Abschnitt erwähnte, Lokalisierungsmethode zurückgegriffen, die auch in Außenbereichen verwendet wurde.

Versuchsfahrten hinsichtlich des Tests der Trajektorienplanung fanden sowohl vor Ort in Lauenburg/Elbe statt, konnten durch vorher aufgezeichnete Sensordaten aber auch teilweise digital erfolgen. Es wurden insbesondere die Hinderniserkennung sowie das Ausweichverhalten weiter verbessert und mithilfe verschiedener prototypischer Hindernisse erprobt.

### 2.3.6 Kontinuierliche Tests an Shuttle und Mockup

Um weiterhin die Entwicklung der Lokalisierung und Navigation im Innenraum des Shuttles zu vereinfachen, wurde ein Mock-Up des Shuttles konzipiert. Hierzu wurde das Shuttle vermessen und ein digitales Modell erzeugt. Die zum Bau benötigten Materialien wurden beschafft und in den Räumlichkeiten des Instituts für Technische Logistik montiert. Anhand dieses 1:1 Modells konnten Fahrversuche mit dem Transportroboter in der Versuchshalle durchgeführt werden, ohne hierfür eine Dienstreise antreten zu müssen. Die Ergebnisse konnten auf reale Anwendungen übertragen werden. Insbesondere hinsichtlich der Fahreigenschaften beim Ein- und Ausfahren des Roboters über die Shuttle-Rampe sowie hinsichtlich der Navigation auf engem Raum konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Über die Tests am Mock-Up hinaus wurden weitere Tests auf dem TU-Campus sowie vor Ort in Lauenburg/Elbe durchgeführt und Funktionalitäten anschließend verbessert. Abbildung 22 zeigt einen Transportroboter bei der Einfahrt in das Shuttle.

**Abbildung 22:** Prototyp Laura bei Einfahrt ins TaBuLaShuttle an der Haltestelle Fürstengarten





## 2.4 Testbetrieb des kombinierten Personen- und Gütertransports

Für den Testbetrieb im Projekt wurden zwei Ziele verfolgt: Zum einen die Umsetzung der drei Testszenarien im Realbetrieb sowie zum anderen der Test des Roboters unter zunehmend anspruchsvolleren Rand- bzw. Testbedingungen im Außeneinsatz. Dieses Kapitel umfasst die Beschreibung der drei in Lauenburg/Elbe angewendeten Testszenarien sowie Erfahrungen zum automatisierten Transportroboter.

### 2.4.1 Testszenarien

Auf Grundlage der in Kapitel 2.1.3 ermittelten Ausgangssituation zum Transport der Hauspost sowie dem Wunschscenario wurden drei Testszenarien entwickelt, die im Realbetrieb erprobt werden sollten. Die Testszenarien umfassen jeweils die gleichen inhaltlichen Prozesse, setzen diese aber durch einen zunehmenden Automatisierungsgrad um.

Aufbauend auf der Ausgangssituation, bei der mehrere Mitarbeitende der Lauenburger Verwaltung jeweils die Post transportieren, diente zunächst ein erstes Szenario dazu, zu untersuchen, wie der Posttransport erfolgt, wenn nur eine Person für den gesamten Prozess verantwortlich ist. Das erste Szenario »manueller Transport« umfasste den Transport der Behördenpost mithilfe einer Person, die die Post von einem Standort zu einem anderen manuell beförderte.

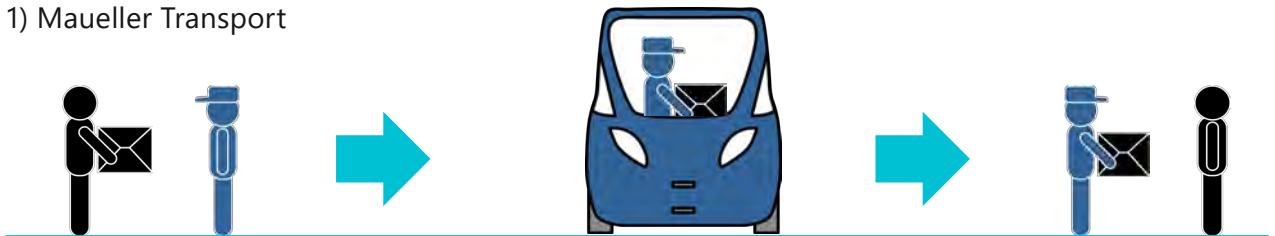
Basierend auf den Prozessen des ersten Szenarios wurde ein zweites Szenario entworfen, bei dem keine Person mehr die Post transportiert. Im zweiten Szenario »shuttlebasierter Transport« wurde die Post mithilfe des Shuttles transportiert, sodass die Versender und Empfänger ihre Post direkt an das Shuttle übergeben bzw. aus diesem entgegennehmen. Hierbei müssen allerdings die Wege am Arbeitsplatz und die Wege der letzten Meile manuell durch eine Person überwunden werden.

Aus diesem Grund wurde ein drittes Szenario »automatisierter Transport« entwickelt, bei dem die langen Distanzen durch das Shuttle zurückgelegt wurden und die kurzen Wege (»erste und letzte Meile« ca. 50 m) durch einen Transportroboter. Im dritten Szenario wurde die Post mithilfe eines Transportroboters in Kombination mit dem TaBuLaShuttle zwischen den Behördengebäuden transportiert. Die drei Szenarien sind in Abbildung 23 visualisiert und werden im Weiteren näher beschrieben.

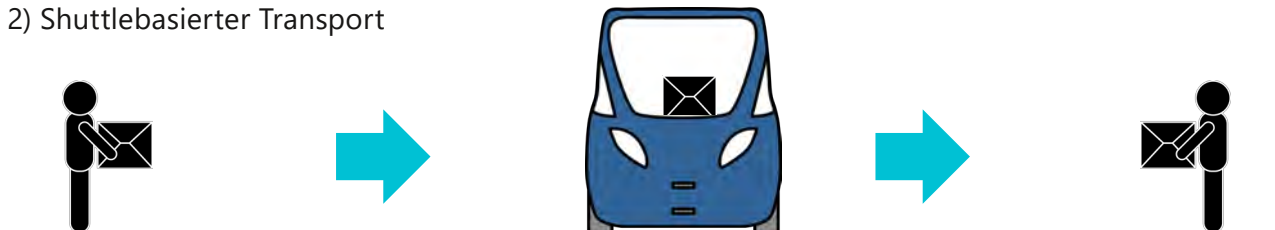
Die Szenarien wurden im Vergleich zum Antrag angepasst. In Szenario 1 sollte ursprünglich das Personal aus dem Elbschiffahrtsmuseum mit dem Shuttle zum Rathaus und wieder zurück zum Elbschiffahrtsmuseum fahren. Diese Rolle wurde im Testbetrieb durch eine Begleitperson von der TUHH, einem »Buddy«, übernommen, der im Testfall den Transportroboter als Aufsicht begleitet und im Bedarfsfall eingreift. Im zweiten Szenario war zunächst geplant, dass die Behördenpost in das Shuttle geladen und in der Altstadt entnommen wird, dabei sollte keine Begleitung durch Personal erfolgen, da auch nur ein Haltepunkt auf dieser Tour geplant gewesen war. Da im Testbetrieb das Shuttle in Regelbetrieb an acht Haltestellen hielt, wurde aus Sicherheitsgründen eine Begleitperson eingesetzt, die die Post dauerhaft überwachte.

Abbildung 23: Testszzenarien im Projekt TaBuLa-LOG

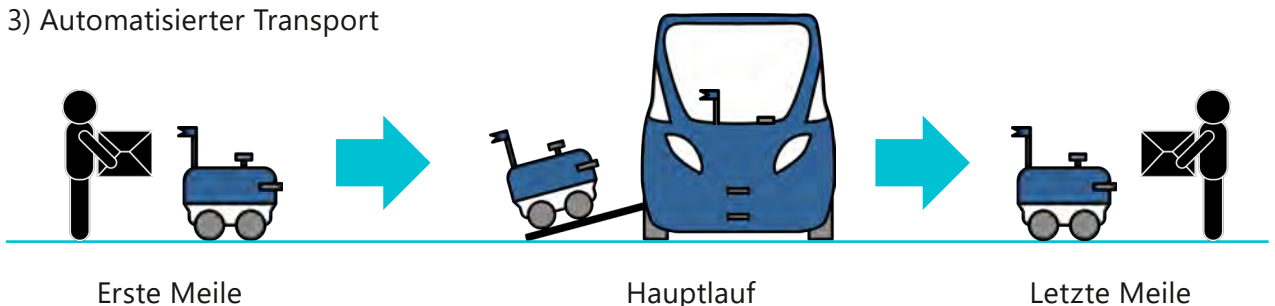
1) Maueller Transport



2) Shuttlebasierter Transport

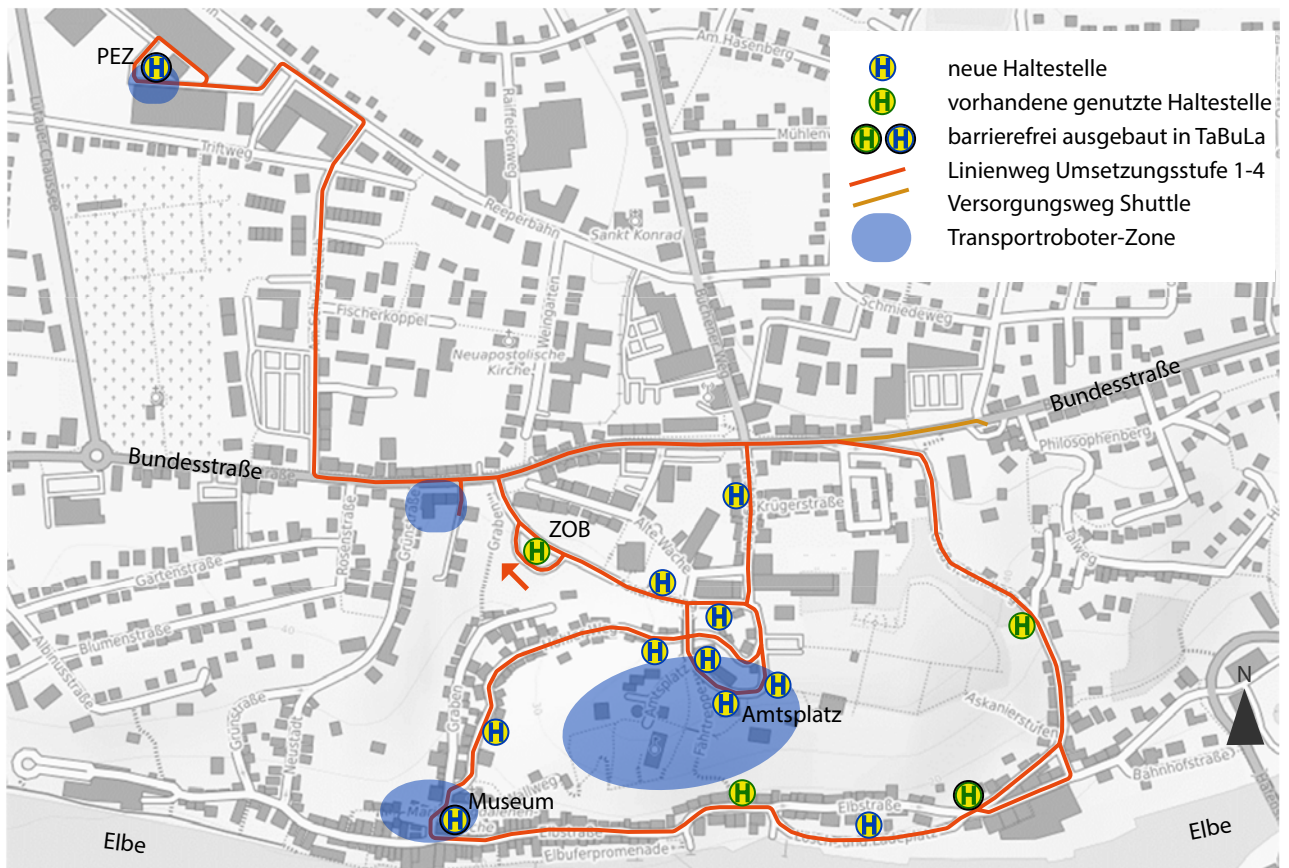


3) Automatisierter Transport



Basierend auf den bestehenden Prozessen zur Beförderung der Hauspost und den Strecken des TaBuLaShuttles ergab sich dann der in Abbildung 24 dargestellte Streckenverlauf mit Transportroboterzonen.

**Abbildung 24:** Alle Strecken und Haltestellen im Rahmen der Umsetzung von TaBuLa-LOG



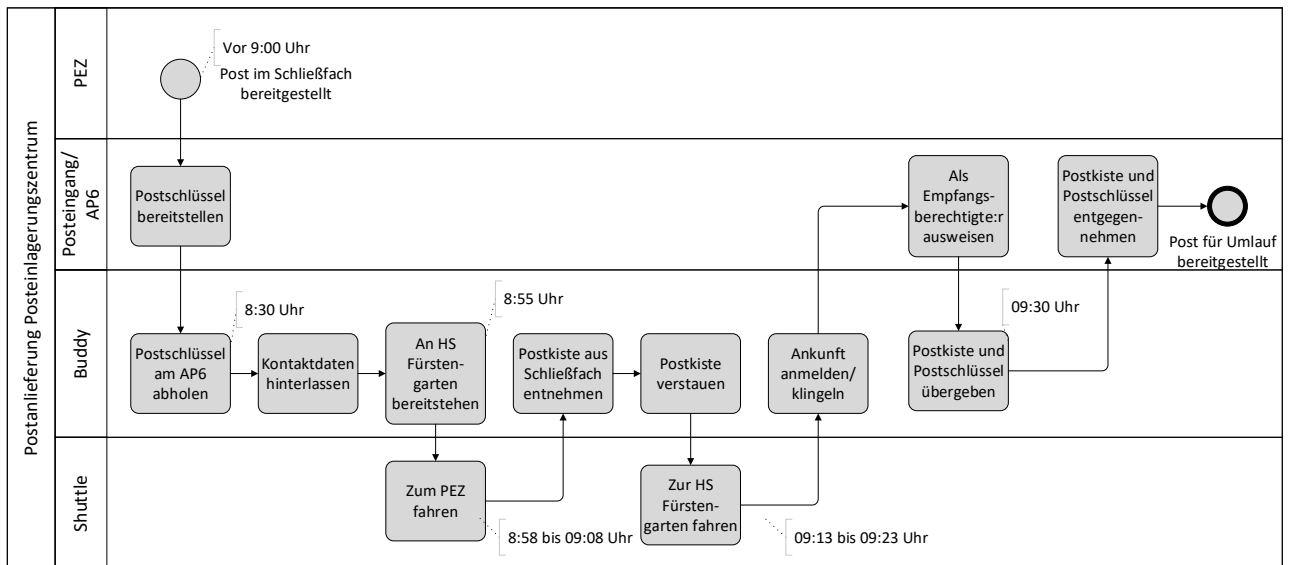
Quelle: eigene Darstellung auf Basis Kartendaten: © OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM  
|Kartendarstellung: © OpenTopoMap (CC-BY-SA)

Nachfolgend werden die drei Szenarien mit ihren Prozessabläufen einmal ausführlicher dargestellt.

### Szenario 1: Manueller Transport

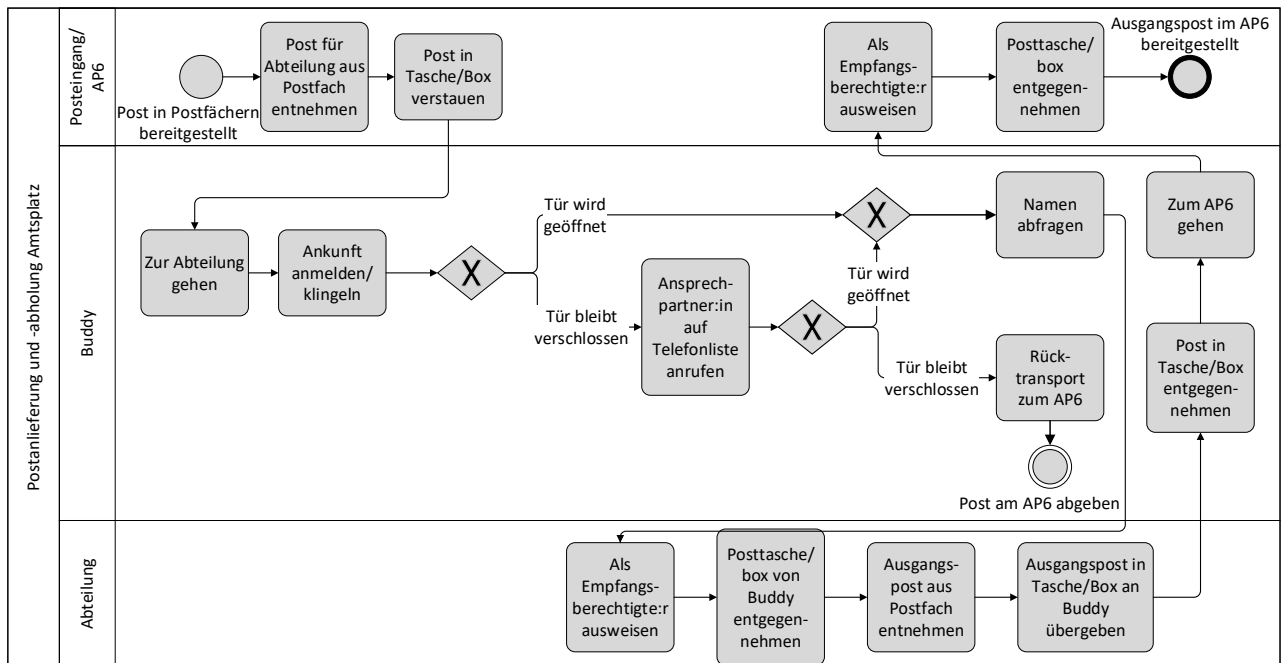
Im Gegensatz zur Ist-Situation übernimmt im Szenario »manueller Transport« eine einzige Person den kompletten Posttransport und nutzt darüber hinaus das Shuttle für die langen Distanzen zum Posteinlagerungszentrum und zum Elbschiffahrtsmuseum. Der Prozess beginnt damit, dass die Post im Posteinlagerungszentrum (PEZ) bereitgestellt wird. Die Mitarbeiter\*innen im Rathaus liegen parallel den Schlüssel für das PEZ bereit. Um etwa 08:30 Uhr wird der Schlüssel durch einen Buddy am Rathaus abgeholt. Dieser hinterlässt seine Kontaktdaten und fährt anschließend mit dem Shuttle zum PEZ. Dort öffnet der Buddy das Schließfach, entnimmt die Post, verstaut diese und fährt mit dem Shuttle zurück zur Haltestelle Fürstengarten. Dort angekommen überwindet der Buddy die letzte Meile zu Fuß, sodass die Post um 09:30 Uhr an die Mitarbeiter\*innen der Stadt Lauenburg/Elbe übergeben werden kann, wie in Abbildung 25 dargestellt.

**Abbildung 25:** Szenario 1: Prozessstart und Postanlieferung Posteinlagerungszentrum



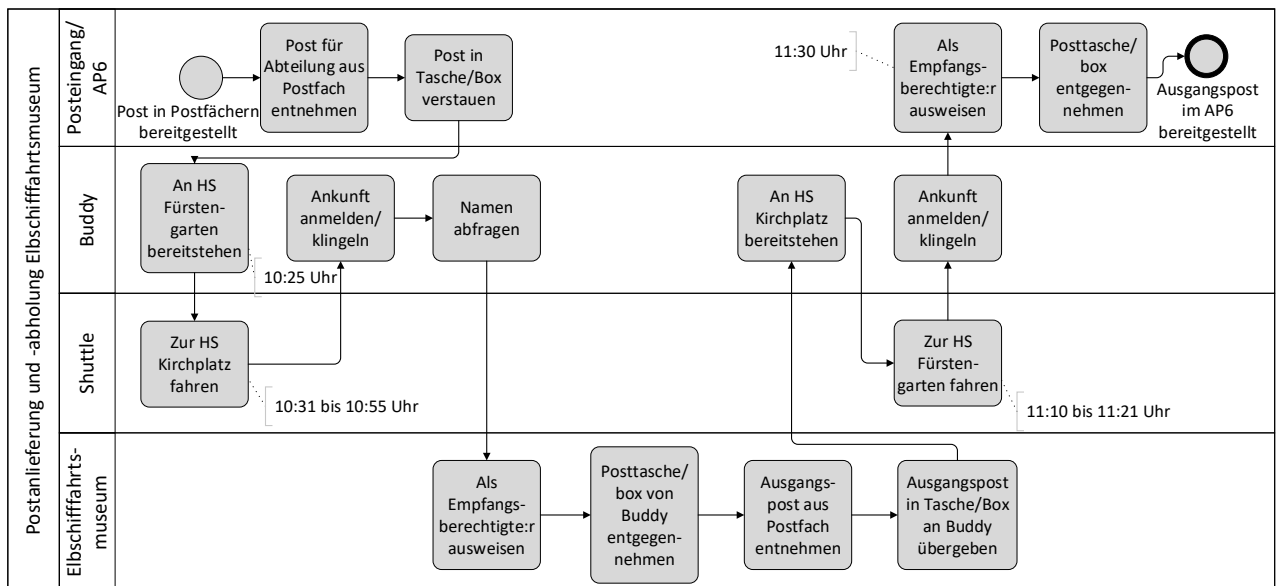
Nachdem die Post sortiert und auf die Postfächer verteilt wurde, wird diese von den Mitarbeitenden der Stadt Lauenburg/Elbe aus dem Fach wiederum entnommen und in einer Tasche oder Box dem Buddy bereitgestellt. Dieser läuft nun zu den jeweiligen Gebäuden der Behörde, klingelt und übergibt die Eingangspost den Mitarbeiter\*innen der jeweiligen Abteilung. Diese wiederum händigen dem Buddy die Ausgangspost aus, der diese zurück zum Rathaus (Amtsplatz 6, AP6) bringt. Dieser Prozess ist in Szenario 1 und 2 identisch (siehe Abbildung 26).

**Abbildung 26:** Szenario 1 und 2: Transport zu und von den Abteilungen am Amtsplatz



Die Belieferung des Elbschiffahrtsmuseums erfolgt in Kombination mit dem automatisierten Shuttle. Dies hält um 10:31 Uhr an der Haltestelle Fürstengarten, die am Amtsplatz liegt. Dort steigt der Buddy mit der Hauspost ein, die er am AP6 entgegengenommen hat. Gemeinsam mit dem Shuttle fährt der Buddy in die Altstadt und verlässt das Shuttle an der Haltestelle Kirchplatz, welche sich am Elbschiffahrtsmuseum befindet. Der Buddy übergibt dort die Post den Mitarbeiter\*innen und nimmt die Ausgangspost wiederum entgegen. Anschließend fährt der Buddy gemeinsam mit dem Shuttle zurück zur Haltestelle Fürstengarten und bringt die Post zu Fuß zum AP6, wo die Post durch eine\*n Mitarbeiter\*in des Rathauses entgegengenommen wird. Der Prozess ist in Abbildung 27 visualisiert.

Abbildung 27: Szenario 1: Transport zum und vom Elbschiffahrtsmuseum



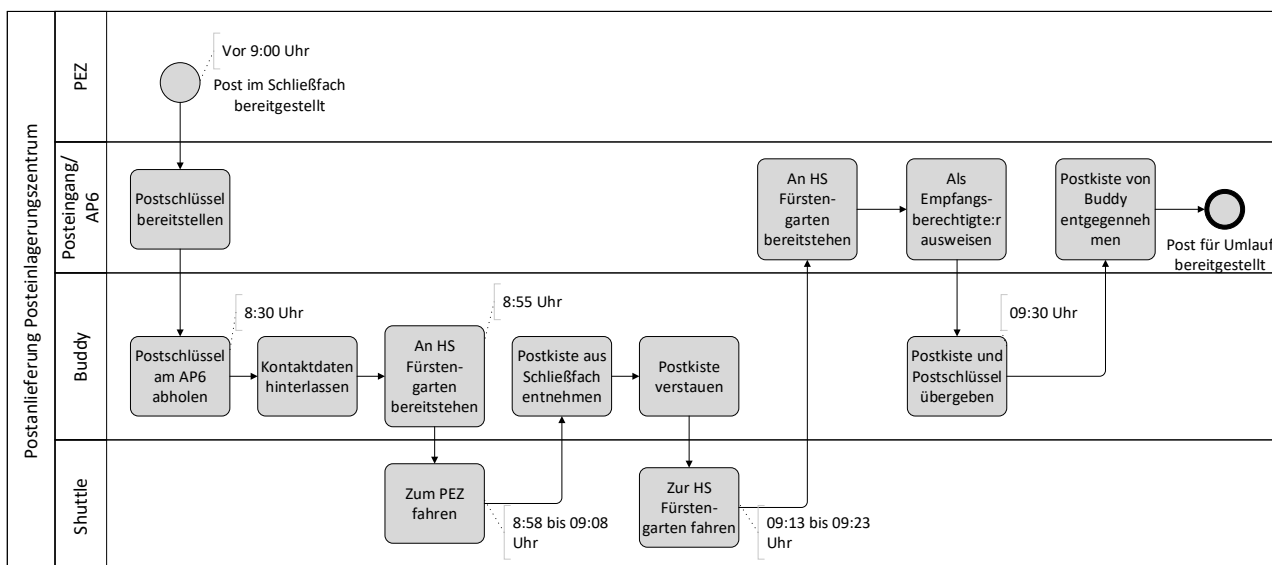
Der Shuttlefahrplan wurde während des Testbetriebes angepasst. Zu Beginn der Testphase fuhr das Shuttle nach dem Stopp an der Haltestelle Kirchplatz direkt weiter, sodass der Buddy an der Haltestelle warten musste, bis das Shuttle auf seiner Rundtour wieder die Haltestelle Kirchplatz erreicht. Dies wurde im August 2021 geändert, sodass das Shuttle eine Pause von 15 Minuten am Kirchplatz machte und dies dem Buddy die Möglichkeit gab, mit dem Shuttle direkt zurück zum Fürstengarten fahren zu können. Auch wurde die Abfahrtszeit von ursprünglich 12:31 an der Haltestelle Fürstengarten auf 10:31 Uhr vorverlegt (Fahrplan siehe Anlagen).

### Szenario 2: Shuttlebasierter Transport

Im Szenario 2 wurde die Post nicht mehr durch eine Begleitperson vom AP6 zur Haltestelle Fürstengarten und zurück transportiert, sondern durch eine\*n Mitarbeiter\*in der Stadt Lauenburg/Elbe. Der Buddy begleitete trotzdem den Transport, um sicherzustellen, dass die Post nicht durch Unbefugte entnommen wurde.

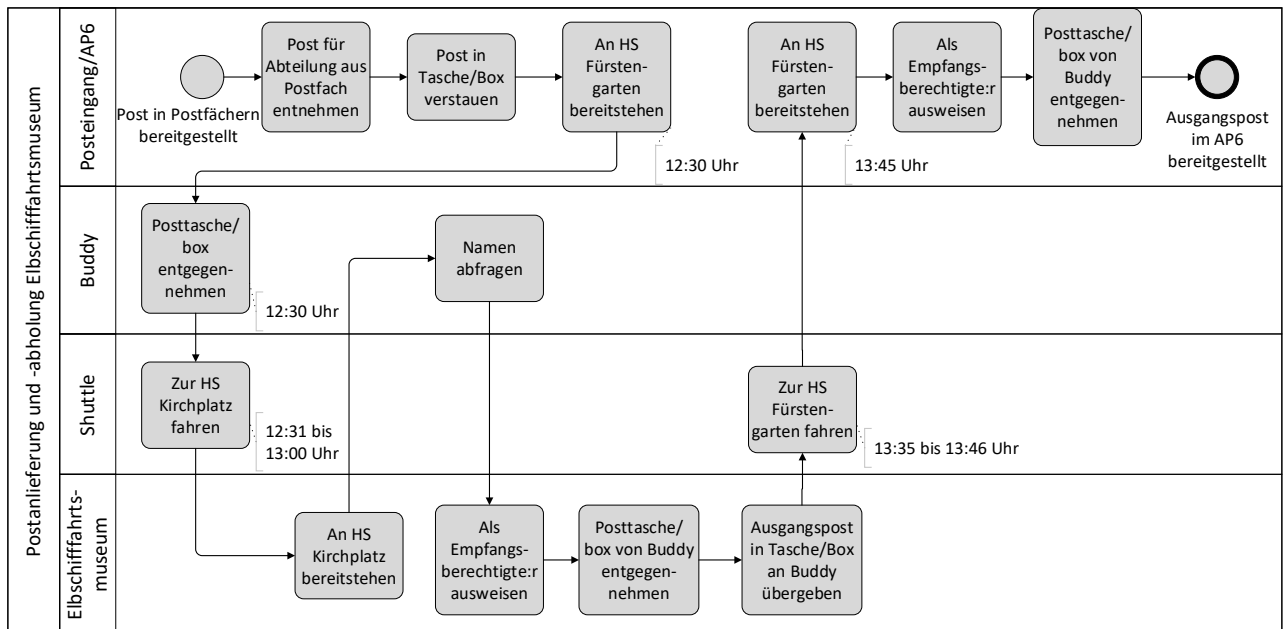
Da keine Kooperation mit der Deutschen Post/DHL möglich war, wurde die Post wie im Szenario 1 durch den Buddy vom Posteinlagerungszentrum abgeholt. An der Haltestelle Fürstengarten wartete anschließend eine\*n Mitarbeiter\*in der Stadt Lauenburg/Elbe um die Post entgegenzunehmen (siehe Abbildung 28). Wie bereits beschrieben, erfolgte die Verteilung der Post am Arbeitsplatz wie in Szenario 1.

**Abbildung 28:** Szenario 2: Prozessstart und Postanlieferung Posteinlagerungszentrum



Für den Transport zum Elbschiffahrtsmuseum wurde die Post um 12:30 Uhr an der Haltestelle Fürstengarten durch eine\*n Mitarbeiter\*in der Stadt Lauenburg/Elbe an das Shuttle übergeben. In diesen Szenarien kam der alte Fahrplan, der von April 2021 bis August 2021 galt, zum Einsatz, da dieses Szenario vor August 2021 erprobt wurde. Am Elbschiffahrtsmuseum wurde die Post durch eine\*n Mitarbeiter\*in entgegengenommen und die Ausgangspost an das Shuttle übergeben. Nachdem das Shuttle wieder die Haltestelle Fürstengarten erreichte, übernahm ein\*e Mitarbeiter\*in der Stadt Lauenburg/Elbe die Post und brachte sie zu Fuß zum Rathaus. Der Prozess ist in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29: Szenario 2: Transport zum und vom Elbschiffahrtsmuseum



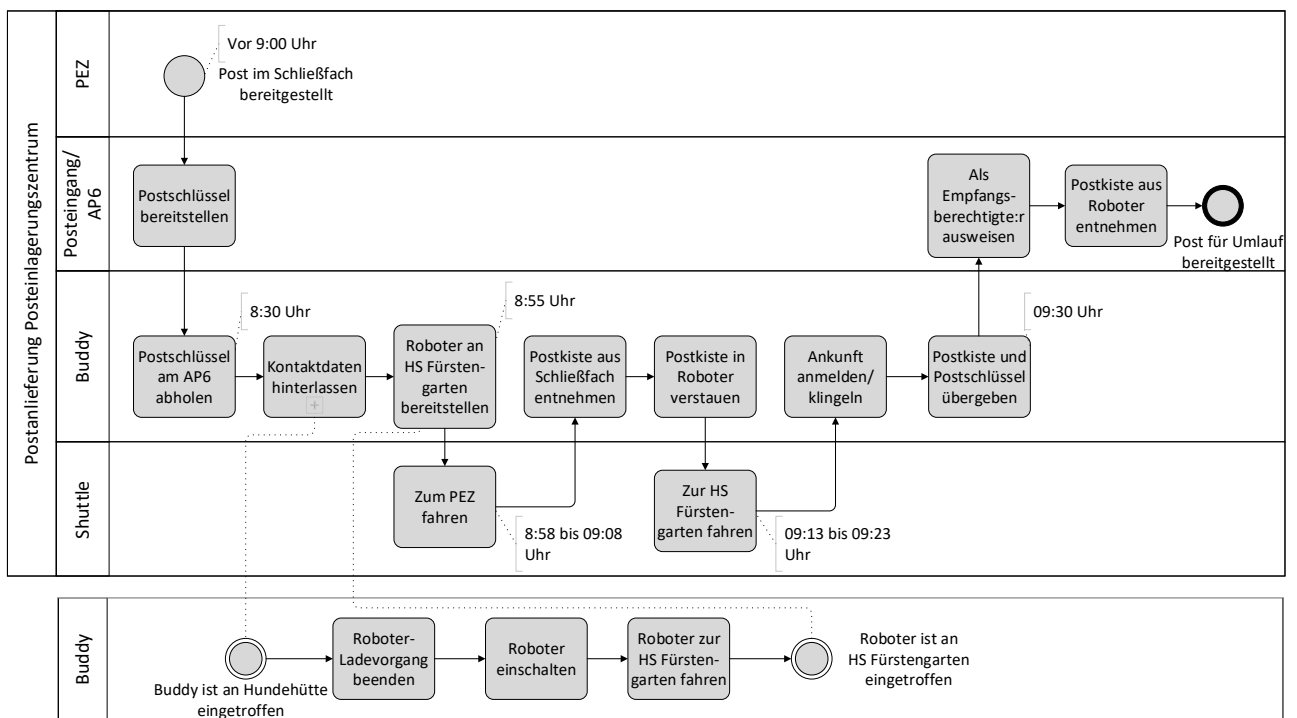


### Szenario 3: Automatisierter Transport

Das dritte Szenario umfasst die Prozesse am PEZ, dem Arbeitsplatz sowie am Elbschiffahrtsmuseum in der Altstadt. Kurze Distanzen überwindet der Transportroboter eigenständig, während längere Distanzen mithilfe des Shuttles in Form eines »Huckepacktransports« zurückgelegt werden. Der Transportroboter wird zu jeder Zeit von einem Buddy als Aufsicht begleitet, der im Notfall eingreifen und die Systeme übersteuern oder abschalten kann.

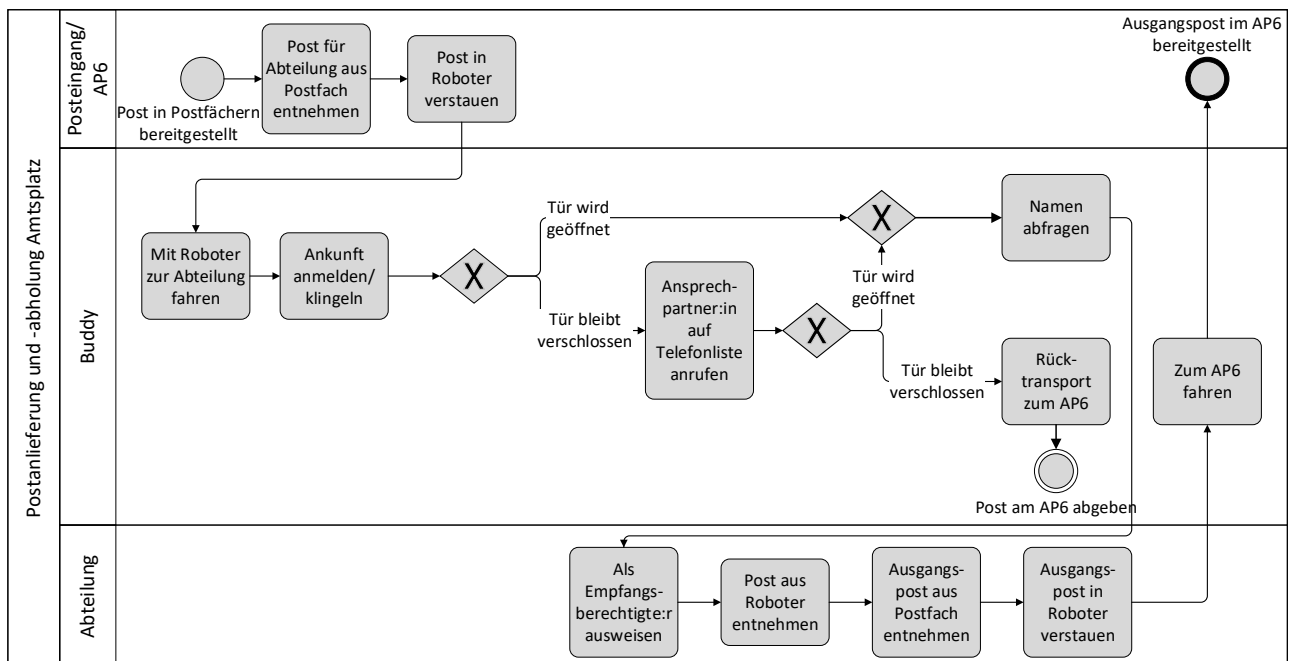
Nachdem der Transportroboter am Morgen gestartet wurde, beginnt er seine Tour am Arbeitsplatz 6 und bewegt sich zur Haltestelle Fürstengarten. Dort erfolgt die Fahrt mithilfe des Shuttles zum Posteinlagerungszentrum, an dem der Transportroboter die Eingangspost der Lauenburger Behörden aufnimmt und ebenfalls mithilfe des Shuttles zum Arbeitsplatz 6 zurückbringt. Die detaillierten Prozesse sind in der Abbildung 30 aufgeführt.

Abbildung 30: Szenario 3: Prozessstart und Postanlieferung Posteinlagerungszentrum



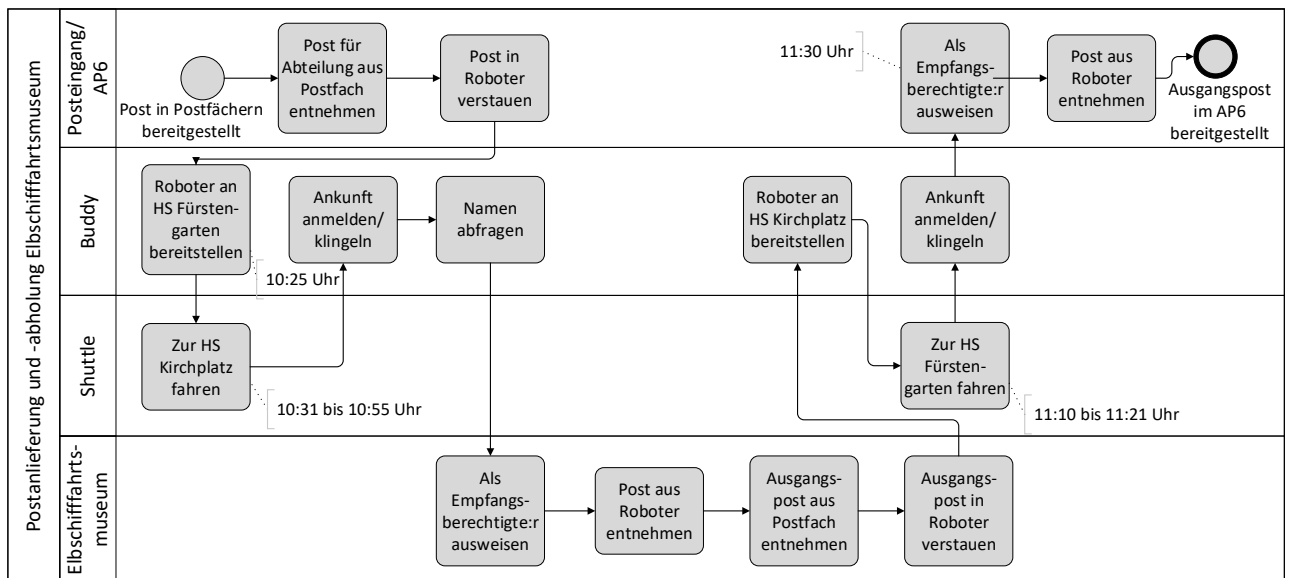
Im Laufe des Vormittags verteilt der Transportroboter die Eingangspost, die er vom Posteinlagerungszentrum abgeholt hat, zwischen den Standorten der Lauenburger Behörde am Amtplatz. Dort wird die Eingangspost an die Mitarbeiter\*innen übergeben, die Ausgangspost der Behörden eingeladen und anschließend zur Post-Sammelstelle am Amtplatz 6 transportiert. Die Abbildung 31 zeigt die detaillierten Abläufe.

**Abbildung 31:** Szenario 3: Transport zu und von den Abteilungen am Amtplatz



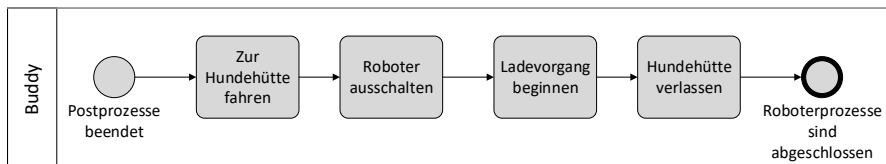
Die letzte Tour des Transportroboters erfolgt von der Oberstadt in die Altstadt zum Elbschiffahrtsmuseum. Hierbei transportiert der Transportroboter die Post, die er am Amtsplatz 6 für das Elbschiffahrtsmuseum aufgenommen hat, zunächst zur Haltestelle Fürstengarten, steigt dort in das automatisierte Shuttle ein und wird zur Haltestelle Kirchplatz gebracht. Am Kirchplatz verlässt der Transportroboter das Shuttle und übergibt die Eingangspost den Mitarbeiter\*innen des Elbschiffahrtsmuseums. Gleichzeitig übernimmt der Transportroboter die Post des Museums. Das Shuttle wartet parallel auf den Transportroboter, der anschließend in das Shuttle einfährt und dieses an der Haltestelle Fürstengarten wieder verlässt. Anschließend fährt der Transportroboter zum AP6. Der detaillierte Ablauf ist der Abbildung 32 zu entnehmen.

Abbildung 32: Szenario 3: Transportprozess am und vom Elbschiffahrtsmuseum



Nachdem der Postbetrieb abgeschlossen ist, fährt der Transportroboter zu seiner Basisstation und der Buddy verlässt die Station (siehe Abbildung 33).

Abbildung 33: Prozessabschluss im Szenario 3



Falls kein Betrieb stattfinden konnte, wurde ein Eskalationsplan abgearbeitet, der Handlungsanweisungen im Fall von Störungen oder Ausfällen enthielt (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4:** Eskalationsplan bei Störungen im Transportprozess

Störung	Anweisung
Es kann am gesamten Tag keine Post ausgeliefert/abgeholt werden	Meldung an AP6 bis spätestens 8:00 Uhr am potentiellen Auslieferungstag
Ausfall von Laura auf der Strecke	Meldung durch den Buddy an AP6 und manueller Transport durch den Buddy
Nichtantreffen einer Abteilung	Telefonische Kontaktaufnahme oder Rücktransport zum AP6

#### 2.4.2 Abstimmung Prozessabläufe mit Versender und Empfänger

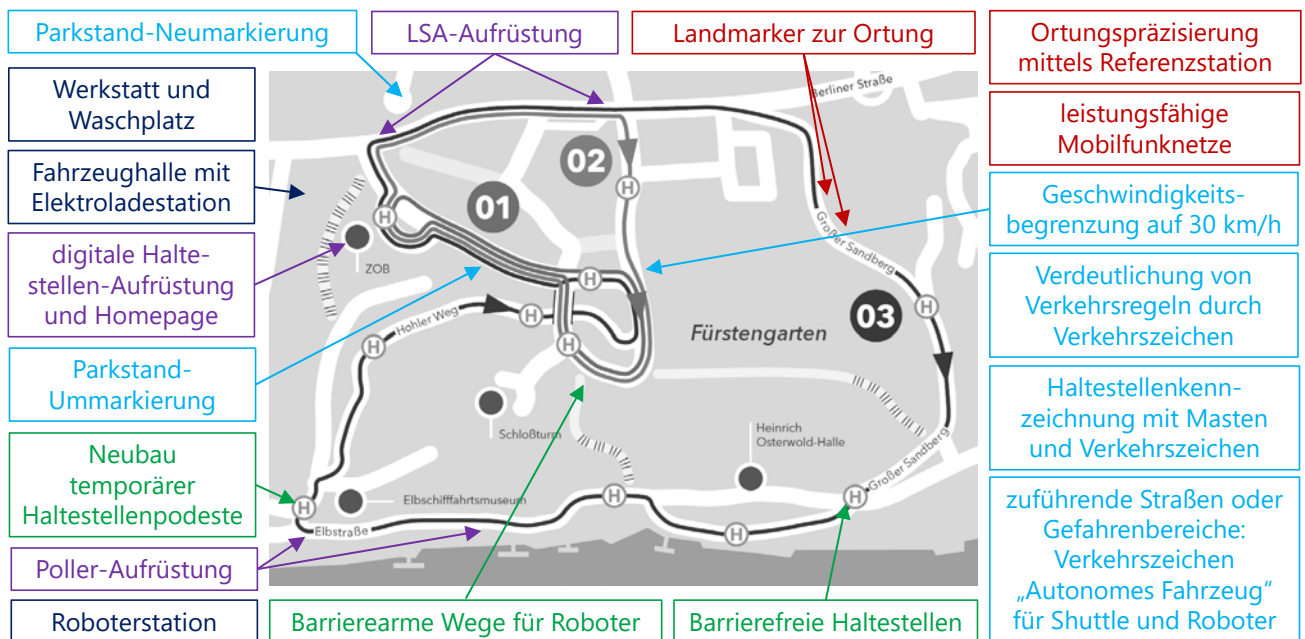
Die Prozesse wurden in enger Abstimmung mit der Stadt Lauenburg/Elbe konkretisiert. Die Kommunikation erfolgte zwischen einer Ansprechpartnerin der Stadt Lauenburg/Elbe und der TUHH (VPL). In iterativen Schleifen wurden die Prozesse im ersten Halbjahr 2020 ausgearbeitet und mit den Beteiligten der Stadt Lauenburg/Elbe abgesprochen. Hierbei erfolgte am 18.08.2020 eine Aufnahme der Ausgangsprozesse sowie eine Zeitaufnahme der einzelnen Transportwege. Die Ansprechpartnerin der Stadt Lauenburg/Elbe begleitete diese Prozesse und stand für Frage jederzeit zur Verfügung. Im weiteren Verlauf des Jahres 2020 wurden die jeweiligen Prozesse für die geplanten Szenarien weiter konkretisiert. Die Verfeinerung der Prozesse dient im Weiteren als Grundlage für die Erstellung der Risikoanalyse und der Auswahl und Vorbereitung der Infrastruktur. Nach der konzeptionellen Fertigstellung der Prozessabläufe wurden diese im Rahmen eines Pre-Tests am 26.01.2021 durch die Mitarbeiter\*innen der TUHH in Lauenburg/Elbe erprobt. Die Stadt Lauenburg/Elbe ermöglichte und unterstützte diesen Test. In Vorbereitung für den regelmäßigen Testbetrieb erfolgte am 12.04.2021 in Lauenburg/Elbe das Briefing des Personals der Stadt Lauenburg/Elbe sowie der Buddies der TUHH.

### 2.4.3 Bereitstellung notwendiger Infrastruktur für den Testbetrieb

Ähnlich wie bereits im vorangehenden TaBuLa-Projekt wurde auch bei TaBuLa-LOG die Rolle zur Bereitstellung der Infrastruktur durch den Kreis Herzogtum Lauenburg übernommen. Die bereits bestehende Infrastruktur aus dem Projekt TaBuLa konnte weiterhin genutzt werden. Eine Übersicht der Maßnahmen, die im Rahmen des Vorgängerprojektes durchgeführt wurden, ist Abbildung 34 zu entnehmen.

Aus den Anforderungen eines geteilten Personen- und Güterverkehrs ergaben sich weitere Anforderungen an die Infrastruktur, die über die bestehenden Maßnahmen aus dem Vorgängerprojekt hinausgehen und entsprechend ergänzt werden mussten. Nach der Identifikation des Bedarfs zur Beschaffung von Infrastruktur auf Basis der Hardware- und Softwareanforderungen sowie auf Basis der entwickelten Szenarien, wurden folgende Maßnahmen umgesetzt:

**Abbildung 34:** Karte der drei befahrenen Strecken mit notwendigen Infrastrukturmaßnahmen



Quelle: in Anlehnung an Grote 2021

## Gebäude für Shuttle

Hierzu konnte ein bestehender Mietvertrag zwischen Kreis und Versorgungsbetrieben Elbe GmbH fortgesetzt werden, der eine entsprechende Fahrzeughalle für die beiden Shuttle inkl. leistungsfähigem Stromanschluss sowie Sanitäreinrichtungen geboten hat.

## Gebäude für Transportroboter

Herrichtung eines Unterstands für den Transportroboter Laura, um diesen vor Witterungseinflüssen und Vandalismus zu schützen und um das Wiederaufladen von Laura sowie das unfallfreie Hin- und Herfahren zu gewährleisten. Um die bereits bestehende Gartenhütte als Unterstand für Laura herzurichten, wurden Tischlereiarbeiten, Malerarbeiten sowie Elektroinstallationen und Arbeiten zum Wegebau durch den Kreis Herzogtum Lauenburg bzw. die Stadt Lauenburg/Elbe beauftragt. Zwischen dem Kreis und der Stadt wurde ein Kooperationsvertrag geschlossen und die Gartenhütte dem Kreis während der Nutzungsdauer mietfrei überlassen.

## Haltestellen

Sowohl um Personen als auch dem Transportroboter einen barrierefreien Einstieg und Ausstieg zu ermöglichen, wurden an vier Standorten Maßnahmen umgesetzt:

### *Zusätzliche Haltestellen*

Zur Realisierung des geteilten Personen- und Güterverkehrs wurden zusätzlich zu den bereits aus dem Vorgängerprojekt vorhandenen Haltestellen zwei neue Haltestellen eingerichtet:

- ▶ Posteinlagerungszentrum (PEZ) zur Abholung der eingehenden Behördenpost aus dem Postfach der lokalen Post
- ▶ Fürstengarten als nächstgelegene Haltestelle zum Arbeitsplatz mit den Verwaltungsgebäuden

Zum einen wurde eine Haltestelle beim Posteinlagerungszentrum (siehe Abbildung 35) und zum anderen beim Haus der Begegnung bzw. an der Unterstellung von Laura eingerichtet (siehe Abbildung 36).

Abbildung 35: Haltestelle am Posteinlagerungszentrum mit einem temporär eingesetzten Kunststoffpodest



Abbildung 36: Haltestelle am Fürstengarten



### *Rollstuhl-tauglicher Ausbau von Haltestellen*

Der Kreis Herzogtum Lauenburg hat dabei die frühzeitige Identifikation und Abstimmung zwischen den Beteiligten zur Beantragung der Genehmigung der Infrastruktur übernommen und die Umsetzungen durch Baufirmen und Stadt beauftragt: Zwei Haltestellen im Streckenverlauf wurden bereits im Vorgängerprojekt dauerhaft und die zwei Haltestellen

- ▶ Posteinlagerungszentrum und
- ▶ Kirchplatz

temporär für Rollstuhlfahrende und Transportroboter nutzbar umgebaut und dafür Haltestellenpodeste mit 14 bis 18 cm Höhe realisiert mit Rampen von maximal 6% Steigung, so dass über die automatische Rampe des Shuttles der Ein- und Ausstieg ermöglicht wird. Die Haltestelle Posteinlagerungszentrum wurde mit einem Hersteller für Kunststofframpen realisiert (siehe Abbildung 35). Ein Tischler wurde unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes beauftragt, ein Holzpodest an der Haltestelle Kirchplatz beim Elbschiffahrtsmuseum für den erleichterten Ein- und Ausstieg in das Shuttle auszubauen (siehe Abbildung 37). Zudem wurde ein Eventmanager bzw. Bühnenbauer mit einem weiteren Alu-Podest beauftragt, das für flexible Haltestellen eingesetzt werden sollte. Neben den Vorteilen für Menschen mit Behinderung und Laura sollten Erfahrungen mit verschiedenen zum Einsatz kommenden Materialien gesammelt werden. Schließlich ergab sich aus den drei Optionen, dass die Variante aus Holz zwar kostengünstig sowie schnell und flexibel zu installieren ist, jedoch nur kurzlebig ist und bereits nach wenigen Monaten abgängig. Die Kunststoffvariante ist beständig, aber schwer und vergleichsweise unflexibel in der Handhabung. Das Podest aus Metall war das teuerste der drei Varianten, jedoch langlebig und flexibel einsetzbar gewesen. Es ist vorstellbar, dass zuletzt genanntes Podest auch zukünftig eingesetzt wird oder als Beispiel für den ÖPNV dient, wenn temporäre Haltestellen behindertengerecht eingerichtet werden sollen.

**Abbildung 37:** Temporär aus Holz unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes umgebaute TaBuLa-Haltestelle am Kirchplatz





Alle dauerhaft sowie temporär eingerichteten Podeste haben ihren Zweck erfüllt. Die zudem dauerhaft eingerichteten Haltestellen bieten den Menschen mit Behinderung langfristig den leichten Einstieg in einen Bus im regulären Linienverkehr.

## Verkehrszeichen

Für geänderte und neue Haltestellen waren verkehrsbehördliche Anordnungen notwendig. Die übrige Beschilderung und Markierung wurde bereits im Vorgängerprojekt angeordnet.

Weitere Verkehrsschilder (Verkehrszeichen Z 101 + Z 1000 »Autonomes Fahrzeug« + Z 1000-30 »kreuzend« mit Hinweis auf die Gefahr) als Hinweis zum Betrieb automatisierter Fahrzeuge wurden installiert. Zur Erhöhung der Aufmerksamkeit auf Besonderheiten eines Testfeldes für automatisiertes Fahren, war es eine Auflage der Genehmigung, auf den zuführenden Straßen ein entsprechend angeordnetes Gefahr- mit Zusatzzeichen zu installieren. Da sich das Einsatzgebiet der automatisierten Fahrzeuge aufgrund der geteilten Personen- und Gütermobilität ausgedehnt hat, wurden zusätzlich zu den bestehenden Verkehrszeichen weitere Verkehrszeichen angebracht.

**Abbildung 38:** Verkehrszeichen VZ101 »Gefahrenstelle« mit Zusatzzeichen für TaBuLa



Quelle: Gertz et al. 2021

## Barrierefreie Vernetzung

Um die Kommunikation von Technik zu Menschen mit Seh- und Gehbehinderung sowie den Transportrobotern zu ermöglichen, wurden an Lichtsignalanlagen, ausgewählten Haltestellen und Fahrzeugen Bluetooth-Module installiert (vgl. Kapitel 2.3.4). Hierdurch wird ermöglicht, dass gehandicapte Menschen und Roboter ihre Einschränkung an die Infrastruktur übermitteln und entsprechende Aktionen auslösen können. Dies umfasst die Möglichkeit der automatischen Aktivierung einer Phasen Anforderung oder -dehnung an einer LSA, die Aktivierung einer Blindenakustik und Lautsprecheransagen an LSA und Haltestellen und viel Potenzial zur Kommunikation mit den Fahrzeugen, wie Türöffnung, Rampennutzung, Freigaben zur Abfahrt oder Auslösen eines Nothalts des Fahrzeuges über die zugehörige App LOC.id, die im Rahmen des Projektes weiterentwickelt und mit einer neuen Version (inkl. Fahrzeugkommunikation) weltweit zur Verfügung gestellt wurde. Die Realisierung erfolgte über den assoziierten Partner Siemens Mobility und einem Nachunternehmer.

## Weitere V2I-Vernetzung

Ebenfalls mit Siemens Mobility wurden die bereits im Vorgängerprojekt realisierten Road-Side Units (RSU) weiterentwickelt. Dies ermöglichte die Realisierung einer Prognosecloud mit Künstlicher Intelligenz, in der von der verkehrsabhängigen Steuerung der beiden Lichtsignalanlagen (LSA) über mehrere Wochen Daten zu den Phasenumläufen gesammelt wurden, die anschließend ermöglicht haben, dass konkrete Zeitschätzungen für den Start des nächsten Phasenwechsels an Onboard Units (OBU) gesendet werden können. Im gleichen Zuge konnte eine Fernüberwachung der Aktivitäten der LSA über eine Webanwendung realisiert werden. Auch eine Funktionalität in der OBU wurde freigeschaltet, dass über den G5-Standard eine Anmeldung der ÖPNV-Fahrzeuge möglich wurde. Aufgrund der fehlenden Kompatibilität der Shuttle der Firma Navya zu dem aktuellen ETSI-Standard konnten mit den Shuttles keine Testfahrten unter Anwendung der Prognosedaten mit Busanmeldung umgesetzt werden. Die Kommunikation der Shuttle beschränkte sich auf den Empfang von SPAT-/MAP-Nachrichten, um den aktuellen Phasenzustand (grün/gelb/rot) für den zu befahrenen Fahrstreifen automatisiert verarbeiten zu können. Nach dem Projekt ist eine Installation von On-Board Units in regulären Linienbussen und eine Weiternutzung der Road-Side Units vorgesehen.

## Streckeninstandhaltung

Um die Fahrwege für Transportroboter nutzbar zu machen, erfolgte vereinzelt die Instandsetzung bestehender Wege. Damit wurden in zwei Teilbereichen mangelhafte Kanten und Wege anhand von barrierefreien Vorgaben instandgesetzt. Die Arbeiten konnten durch den Bauhof der Stadt Lauenburg/Elbe umgesetzt werden, der auch für Grünschnitt im Fahrweg und Sauberkeit an den Haltestellen sorgte.

## Weitere Infrastruktur

Landmarker und GNSS-Antenne zur Ortungsverbesserung des Shuttles, aufgerüstete Lichtsignalanlagen und bauliche Maßnahmen an Straßen wurden aus dem Vorgängerprojekt weiterverwendet. Weitere Details zur Infrastruktur im Projekt TaBuLa finden sich in den Veröffentlichungen von Gertz et al. 2021, Grote 2021 und Grote et al. 2021.

### 2.4.4 Iterative Weiterentwicklung des TaBuLa-Betriebes in Verbindung mit dem Transportroboter

Im Rahmen des Shuttle-Betriebes des TaBuLa- und TaBuLa-LOG-Projektes wurde die Anzahl der Shuttles vor dem Pilotbetrieb des geteilten Personen- und Güterverkehrs von eins auf zwei erweitert. Die Kapazitätserhöhung erfolgte, um Ausfallzeiten in der Personenbeförderung durch Versuche mit dem Transportroboter und dem Aufsetzen neuer Shuttle-Soft- und Hardware gering zu halten (höhere Betriebssicherheit), sowie um die Kapazität für Veranstaltungen und im Zuge von Besuchergruppen zu erhöhen. Der Betrieb der automatisiert fahrenden Shuttles stellte eine Grundvoraussetzung für die Erprobung des Transportroboters und des kombinierten Verkehrs dar. Die VHH wurden durch den Kreis beauftragt, den Shuttlebetrieb sicherzustellen. Der kombinierte Transport von Roboter und Personen wurde im Regelbetrieb kontinuierlich erprobt. Dabei ist es zu Einschränkungen gekommen, da es aufgrund der COVID-19 Pandemie zu krankheits- und quarantänebedingten Ausfallzeiten gekommen ist, was zu Beschränkungen im Betrieb geführt hat (siehe Kapitel 1.2.4). Außerdem wurde pandemiebedingt eine geringere Anzahl an Passagieren befördert (max. drei Fahrgäste), um Abstands- und Hygieneregeln gerecht zu werden.

Der im Rahmen des TaBuLa-Projektes entwickelte Fahrplan des Fahrgastbetriebes wurde in mehreren Versionen überarbeitet und an den Prozessablauf der geteilten Personen- und Güterbeförderung angepasst (Fahrplan siehe Anlagen). Aufgrund erheblicher Aufwände zur Koordination der verschiedenen Beteiligten (Shuttle und Shuttlehersteller, Transportroboter, VHH-Leitstelle und Fahrpersonal, Empfänger und Sender sowie täglich im Projekt eingesetztes Personal) im laufenden Betrieb, wurde eine organisatorische Leitstelle im Sinne einer zu allen Betriebszeiten erreichbaren Person nachträglich eingerichtet, die für effizientere Abläufe und Reduzierung von Störungen und besseren Informationsfluss verantwortlich war. Das Büro autoBus wurde mit der Etablierung einer Leitstellenfunktion sowie mit der Auswertung der Anrufe und Anforderungen an die Leitstelle beauftragt.

### 2.4.5 Durchführung des Testbetriebes

Nachdem die Weiterentwicklungen einen Stand erreicht hatten, der einen Testbetrieb ermöglichte, wurde der reguläre Shuttleverkehr weiterhin von Dienstag bis Samstag durchgeführt und der Testbetrieb mit dem Roboter schrittweise erprobt und integriert.

Die Planung dieses Testfeldbetriebes wurde hierfür im Vorfeld in mehreren Workshops durchgeführt. Dabei wurde festgelegt, dass der Roboter entsprechend seines Funktionsstandes im Regelbetrieb getestet werden soll. Der Regelbetrieb umfasste die Auslieferung der Behördenpost zwischen den verschiedenen Standorten der Lauenburger Stadtverwaltung. Dazu fand am 09.10.2020 ein erster Termin mit dem TÜV Nord in Lauenburg/Elbe statt, um die Einsatzgebiete des Roboters zu ermitteln. Zur Begleitung des Roboters wurden drei Begleitpersonen vorgesehen und entsprechend geschult und geprüft.

Zunächst wurde nach der erfolgten Genehmigung des Transportroboters ein manueller Regelbetrieb eingerichtet. Der Roboter wurde dabei durch eine geschulte Begleitperson manuell gesteuert. Fehler, die währenddessen aufgetreten sind, wurden in Begleitbögen dokumentiert.

Nach Erhalt der Ausnahmegenehmigung zum automatisierten Betrieb der Transportroboter wurden verschiedene automatisierte Testfahrten auf dem Arbeitsplatz im öffentlichen Raum durchgeführt. Im Rahmen dieser wurde auch die Erprobung der verschiedenen Sicherheitsmechanismen durchgeführt, die für die Verifikation und Validierung im Rahmen der Genehmigung benötigt wurden. Zu diesen Tests zählte z.B. das Verhalten der Roboter beim Antreffen unterschiedlicher Hindernisse.

Die Be- und Entladung des Shuttles wurde im Rahmen des manuellen Regelbetriebes ebenfalls kontinuierlich getestet. Dabei hat die Begleitperson des Roboters diesen manuell über die Rampe des Shuttles ein- und an der nächsten Haltestelle wieder ausfahren lassen. Dieser Vorgang wurde auch in diversen Vorführungen auf dem ITS demonstriert.

Die Überprüfung des automatisierten Ein- und Ausfahrens in/aus dem Shuttle wurde losgelöst vom Regelbetrieb durchgeführt. Zunächst wurde das am ITL gebaute Mock-Up des Shuttles für erste Testfahrten genutzt. Später wurden die Ergebnisse in Lauenburg/Elbe an den realen Shuttles überprüft.

Als besondere Herausforderung bei der Fahrt mit dem Shuttle zeigte sich unter anderem in Bezug auf den Datenschutz, dass das Schaffen von rechtlichen Vereinbarungen zwischen dem Hersteller und der TUHH bezüglich des Datenschutzes noch einmal nachgeschärft werden musste. Da im automatisierten Betrieb datenschutztechnisch sensible Daten erhoben wurden (z. B.: potentiell konnten Videos von Personen im Innen- und Außenraum des Shuttles aufgenommen werden, die zur Sicherheit und zur Navigation des Shuttles dienen). Zur Prüfung der DSGVO-Konformität wurde mit dem externen Datenschutzbeauftragten der TUHH zusammengearbeitet. Die gemeinsamen Gespräche ergaben, dass die Sicherstellung des Datenschutzes durch den Hersteller und Eigentümer des Busses, in diesem Fall Navya, erfolgen muss.

Nach diesen schrittweisen Erprobungen wurde am 13. April 2021 der Testbetrieb hinsichtlich der Logistikszenerarien im Projekt TaBuLa-LOG in mehreren Schritten aufgenommen:

- ▶ 13.04. – 30.05.2021: Erprobung Szenarien 1 und 2; dienstags und donnerstags
- ▶ 01.06. – 15.07.2021: Erprobung Szenario 1; dienstags und donnerstags
- ▶ 30.07. – 30.11.2021: Erprobung Szenario 3; dienstags, donnerstags und freitags

Die ausgewählten Erprobungstage orientierten sich an den Betriebszeiten des Shuttles sowie an den internen Postprozessen der Stadtverwaltung. Unter der Woche standen drei Tage zur Verfügung, welche sowohl ein ausreichendes Zeitfenster zur Abwicklung des Posttransports per Roboter boten, als auch in den Betriebszeitraum des Shuttles fielen.

Für den dritten Testbetriebsblock zwischen Juli und November 2021 wurde das Szenario 3 erprobt. An Erprobungstagen, die keinen Betrieb im Szenario 3 erlaubten, z. B. aufgrund von widrigen Witterungsverhältnissen außerhalb der Roboterspezifikation, wurde ersatzweise auf das Szenario 1 ausgewichen.

## Mensch-Maschine-Schnittstellen

Bezüglich der Interaktion mit dem Transportroboter sind neben den Begegnungen mit Menschen während der Fahrt zwei weitere Personengruppen zu berücksichtigen: Kunden der Transportdienstleistung sowie die Begleitpersonen des Roboters. Zur Kommunikation mit Kunden bzw. zur Beauftragung von Transporten wurde ein Server-Backend sowie eine Smartphone-App entwickelt. Aufgrund der umfangreichen, höher priorisierten Arbeiten zur Erlangung der Ausnahmegenehmigungen wurde der Test der App nur im Labormaßstab durchgeführt. Die Schnittstellen zu den Begleitpersonen/Buddies wurden hingegen durchgängig im Regelbetrieb erprobt. Die wichtigsten Schnittstellen bilden dabei der Controller zur manuellen Übernahme der Fahrzeugsteuerung sowie das Touch-Display als Status- und Diagnoseinstrument. Fokus beim Test der Controllersteuerung war eine hohe Ergonomie während der Langzeitnutzung bei gleichzeitig guter und schneller Erreichbarkeit aller benötigten Taster. Parallel sollte sichergestellt werden, dass die Kennlinien der Controller-Joysticks eine feinfühligere Steuerung in allen Fahrsituationen ermöglichen - sowohl bei einer Fahrt mit Maximalgeschwindigkeit als auch beim langsamen Navigieren auf engem Raum. Im Rahmen der Tests des Touch-Displays wurde überprüft, dass die bereitgestellten Ansichten alle wichtigen Statusinformationen aufführen und diese übersichtlich und leicht zu erfassend darstellen.

## 2.5 Auswertung der Testsznarien

Für die Auswertung der Testsznarien wurden im Antrag vier Ziele formuliert: Das erste Ziel umfasst die Wirkungsabschätzung und Evaluation der Akzeptanz des Testbetriebes. Als zweites Ziel wurde die Evaluation des aufgebauten Transportroboters festgelegt. Das dritte Ziel stellt die Evaluation des Roboterbetriebes in den verschiedenen Testsznarien dar. Das letzte und vierte Ziel beinhaltet die Evaluation der Schnittstellen zu Kunden und Shuttle.

Gegenstand dieses Kapitels ist, basierend auf den vorangegangenen Zielen, die Abschätzung der logistischen, sozialen und ökonomischen Wirkungen sowie die Evaluation des Roboterbetriebes. Dabei erfolgen zunächst die detaillierte Analyse und Bewertung der entwickelten logistischen Abläufe unter Berücksichtigung der eingesetzten Technologien in dem bestehenden Mobilitätssystem in Lauenburg/Elbe. Des Weiteren findet die Beurteilung der Akzeptanz in der Öffentlichkeit und von den Passagieren des öffentlichen Personennahverkehrs statt. Um die Wirkungen aus ökonomischer Perspektive zu ermitteln, findet eine Kostenanalyse auf Basis einer Szenarien-Berechnung statt. Basierend auf den Ergebnissen werden Maßnahmen für eine verbesserte Integration des Transportroboters im Rahmen eines kombinierten Personen- und Gütertransports abgeleitet. Dieses Kapitel umfasst zudem die technische Analyse und Bewertung des Transportroboters. Zuletzt erfolgt eine Bewertung des kombinierten Betriebes automatisierter Roboter und Shuttle im Realbetrieb.

### 2.5.1 Begleitforschung zum Testbetrieb

Während des Testbetriebes wurde eine Begleitforschung in Form von zwei Begleitbögen einmal durch die Verwaltung der Stadt Lauenburg/Elbe und einmal durch die Begleitpersonen des Transportroboters durchgeführt. Ziel der Begleitforschung war die Ermittlung der logistischen Abläufe, der Qualität, des Transportaufkommens sowie von Störungen und Verbesserungsvorschlägen, aus Sicht der Verwaltung und aus Perspektive der Begleitpersonen.

Der Begleitbogen der Verwaltung enthielt personenbezogene Informationen, wie Vor- und Nachname, sowie das Datum und das durchgeführte Szenario. Anschließend wurden Fragen zur erfolgreichen Abholung des Schlüssels, als Startpunkt der Prozesse, sowie zur Pünktlichkeit des Ablaufs gestellt. Auch die Qualität der Briefe und Pakete sowie deren Anzahl wurde abgefragt. Zuletzt wurden offene Fragen zur Zufriedenheit sowie mögliche Gründe für die Unzufriedenheit, Verbesserungsvorschläge und weitere Anmerkungen gestellt, die im Freitext ausgefüllt werden konnten.

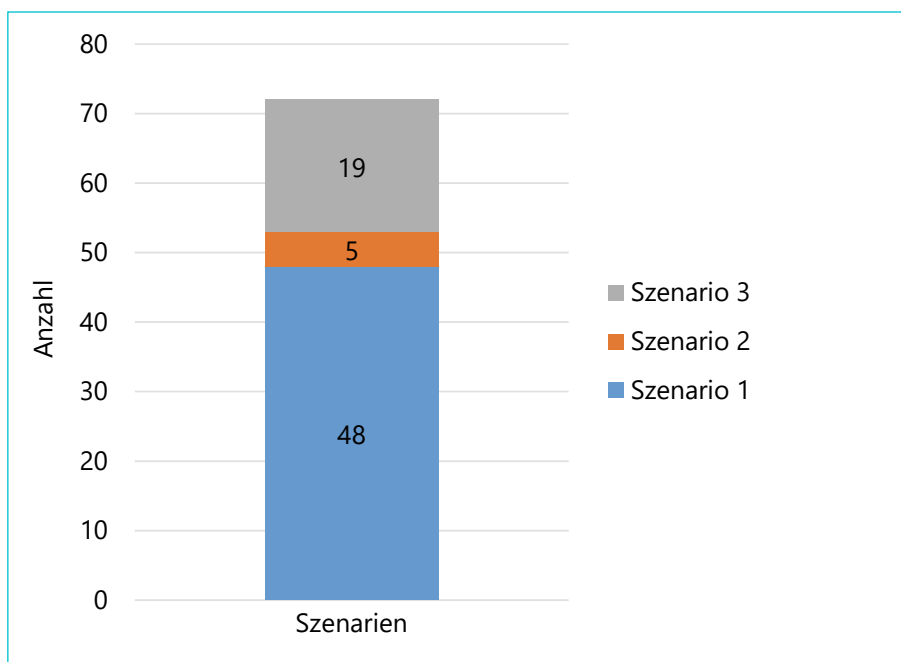
Der Begleitbogen der Begleitpersonen »Buddies« enthielt ebenfalls zunächst personenbezogene Informationen und das Datum. Anschließend konnte auch in diesem Bogen das Szenario ausgewählt werden. Darüber hinaus wurden technische Fragen zum Transportroboter, wie Akku- und Kilometerstand zum

Start und zum Ende des Tages gestellt. Auch das Wetter, die Temperatur sowie Anzahl und Gewicht der Briefe und Pakete wurden festgehalten. Des Weiteren wurden alle Prozesszeiten tabellarisch nach den Prozessen aufgeführt sowie mögliche Gründe für Verspätung oder Störungen. Es war zudem möglich, Anmerkungen im Freitext niederzuschreiben sowie Orte, an denen Störungen auftraten, in einer Karte zu markieren.

Im Rahmen des Testbetriebes wurden Begleitbögen durch die Lauenburger Verwaltung sowie die Begleitpersonen der TUHH festgehalten und durch die Projektbeteiligten anschließend ausgewertet.

Insgesamt wurden im Projekt 72 Durchläufe durchgeführt, von denen 48 dem Szenario 1, fünf dem Szenario 2 und 19 dem Szenario 3 zugeordnet werden können, wie die Abbildung 39 zeigt. Die unterschiedliche Anzahl der Szenarien ist mit dem Genehmigungszeitpunkt des Transportroboters begründet. Ab April 2021 war zunächst nur die Durchführung der Szenarien 1 und 2 möglich.

**Abbildung 39:** Anzahl der durchgeführten Szenarien im Testbetrieb



Während der 72 Durchläufe wurden insgesamt 3.386 Briefe und 50 Pakete transportiert. Im Durchschnitt betrug das Transportaufkommen 47 Briefe und 0,7 Pakete pro Tag. Das Gewicht aller transportierten Briefe und Pakete betrug 183 kg, wobei das durchschnittliche Tagessendungsgewicht bei etwa 2,6 kg und damit unterhalb des zulässigen Transportgewichts von Laura mit 3,4 kg lag.

Aus den Rückmeldungen der Verwaltung ging hervor, dass die Lieferungen insgesamt pünktlich und hinsichtlich des Sendungszustands einwandfrei waren.

Das Szenario 1 »manueller Transport« wurde als robust gegenüber Störungen eingeordnet. Die Verwaltung hatte hierbei nur einen minimalen Aufwand, da die Transporte vollständig durch die Begleitpersonen der TUHH übernommen wurden. Die Mitarbeitenden mussten die Post an den Eingangstüren durch die Begleitpersonen entgegennehmen und übergeben und nicht an den Postfächern der jeweiligen Gebäude.

Bei der Durchführung des zweiten Szenarios »shuttlebasierter Transport« zeigte sich, dass zwar die Durchlaufzeiten im Gegensatz zum ersten Szenario reduziert wurden, da keine Wartezeiten am Elbschiffahrtmuseum mehr entstanden, aber der Aufwand für das Verwaltungspersonal im Vergleich zum herkömmlichen Transport deutlich zunahm. Das Personal musste im shuttlebasierten Szenario zur Haltestelle Fürstengarten gehen, um dort die Post vom Posteinlagerungszentrum und Elbschiffahrtmuseum abzuholen und für das Elbschiffahrtmuseum zu übergeben, da die Begleitpersonen nicht für den Posttransport vom Posteinlagerungszentrum und zum bzw. vom Elbschiffahrtmuseum zuständig waren. Nach fünf Durchläufen wurde die Erprobung des zweiten Szenarios aufgrund der Rückmeldungen durch das Verwaltungspersonal eingestellt.

Nach Beendigung des zweiten Szenarios wurde eine Zwischenbilanz zu den bislang aufgenommenen Prozessen gezogen. Dabei zeigte sich, dass zwischen dem Posttransport am Morgen und dem Transport zum Elbschiffahrtmuseum eine Pause von mehr als zwei Stunden für die Begleitpersonen bestand, da laut des Fahrplans die Fahrt zum Elbschiffahrtmuseum durch das Shuttle erst um 12:31 Uhr startete. Aus diesem Grund wurde der Shuttlefahrplan angepasst, sodass Wartezeiten der Begleitpersonen auf etwa 45 Minuten reduziert wurden. Nach dem neuen Fahrplan fuhr das Shuttle zum Elbschiffahrtmuseum bereits um 10:31 Uhr ab. Die Dauer der Szenarien im Testbetrieb vor und nach der Fahrplanänderung zeigt die Tabelle 5.

**Tabelle 5:** Prozesszeiten in den Szenarien vor und nach der Fahrplanänderung

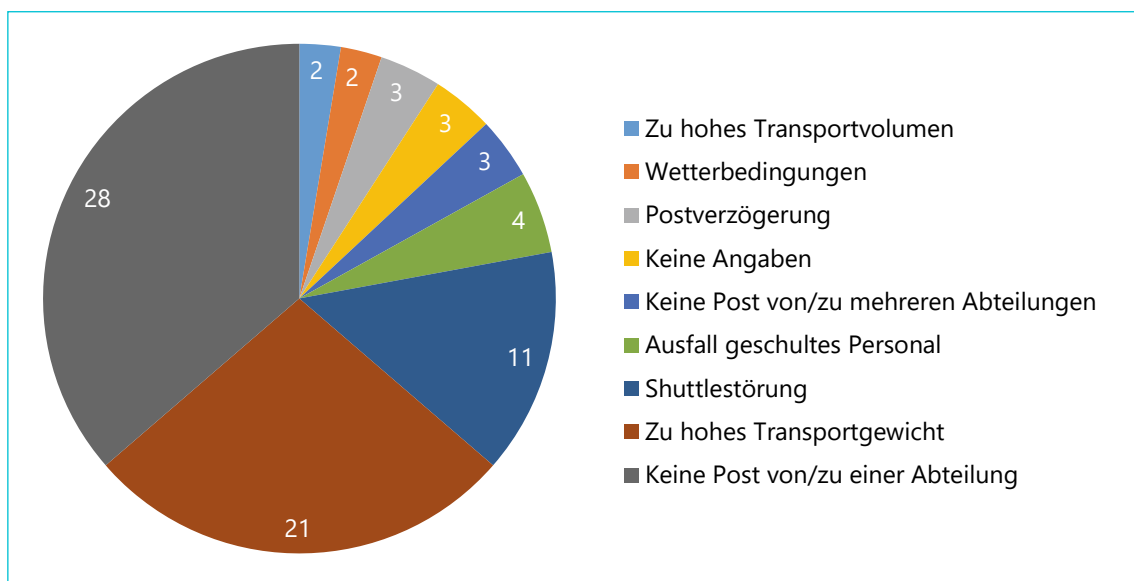
Zeitpunkt	Prozess	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Vor der Fahrplanänderung	Transportzeit der Begleitpersonen und des Transportroboters	01:11 h	00:52 h	02:36 h
	Fahrzeit Shuttle	01:00 h	01:00 h	01:00 h
	Pausenzeit	02:45 h	02:45 h	02:28 h
	Gesamtprozesszeit	04:56 h	04:37 h	05:04 h
Nach der Fahrplanänderung	Transportzeit der Begleitpersonen und des Transportroboters	00:46 h	-	01:18 h
	Fahrzeit Shuttle	00:55 h	-	00:55 h
	Pausenzeit	00:47 h	-	00:42 h
	Gesamtprozesszeit	02:28 h	-	02:45 h



Vor der Fahrplanänderung belief sich die Gesamtprozesszeit auf durchschnittlich 04:37 bis 05:04 Stunden pro Tag. Nach der Fahrplanänderung konnte die Prozesszeit auf durchschnittlich 02:28 bis 02:45 Stunden pro Tag reduziert werden. Ausgehend von den Prozessen der Ausgangssituation von etwa 52 Minuten erhöhen sich die Transportzeiten jedoch in den jeweiligen Szenarien und können auch durch die Fahrplanänderung nicht unter 52 Minuten fallen. Zu berücksichtigen ist, dass in der Ausgangssituation kein Shuttletransport stattfand, sondern das Personal der Verwaltung selbstständig oder mit einem ePkw die Strecken zurückgelegt hat. Durch den kombinierten Transport von Personen und Gütern richten sich die Fahrzeiten nach dem vorgegebenen Fahrplan des ÖPNV, weshalb zusätzliche Fahrzeiten die Folge sind.

Auch im dritten Szenario wurde der Transport als pünktlich und einwandfrei durch die Verwaltung beurteilt. Bei der Analyse der Begleitbögen des Personals der TUHH wird deutlich, dass das dritte Szenario im Gegensatz zu den ersten beiden Szenarien störungsanfälliger sein kann. Dies ist insbesondere auf das geringe zulässige Transportgewicht aufgrund des Transportrobotereinsatzes zurückzuführen. Werden alle Störungen im Betriebsablauf analysiert, wird deutlich, dass mindestens eine Störung pro Betriebstag auftrat (siehe Abbildung 40).

**Abbildung 40:** Anzahl der Störungen im Betriebsablauf



Eine Herausforderung im Betriebsablauf stellten Shuttlestörungen dar. Diese traten an elf Tagen auf, sodass entweder kein Shuttle fahren, oder nur eine Teilstrecke mit dem Shuttle zurückgelegt werden konnte. Im Fall des nicht durchführbaren automatisierten Betriebs von Shuttle und Transportroboter, der auch auf den »Ausfall von geschultem Personal« zurückzuführen war, müsste der Transportroboter Laura diese Strecken zusätzlich selbstständig zurücklegen. Dies könnte – selbst, wenn diese Strecken für eine autonome Roboterfahrt freigegeben wären – zu weiteren Herausforderungen (z. B. Akku-Entladung oder Fahruntauglichkeit) führen.

Die Störungen »Keine Post von/zu einer Abteilung«, »Keine Post von/zu mehreren Abteilungen« sowie »Postverzögerungen« traten in allen drei Szenarien an insgesamt 34 Tagen auf. Durch einen On-Demand-Verkehr könnten diese Störungen behoben werden, indem Transporte nur angefragt werden, wenn Post zur Abholung bereitgestellt werden kann.

Von den 72 durchgeführten Durchläufen lag das Transportgewicht an 21 Tagen bei einem oder mehreren Wegen über 3 kg. Bei einem Transportgewicht über 3 kg kann der Roboter im Einsatzfall nicht das gesamte Transportaufkommen transportieren. Zu berücksichtigen ist, dass alle Transporte des Szenario 3 im Erprobungszeitraum ferngesteuert durchgeführt wurden. Eine Begleitperson des Transportroboters war zu jeder Zeit anwesend. Diese konnte beispielsweise das zu hohe Transportgewicht ausgleichen, indem sie die restlichen Briefe und Pakete manuell transportierte. Gleiches galt bei der Störung »zu hohes Transportvolumen«, die an zwei Tagen bei einer oder mehreren Strecken auftrat. Im Fall eines autonomen Betriebs wäre dies nicht möglich gewesen.

Eine weitere Störung, die den Betriebsablauf insbesondere im Szenario 3 beeinträchtigte, war »Wetterbedingungen«, da der Transportroboter bei Regen nicht zum Einsatz kommen konnte.

## 2.5.2 Befragung der Nutzenden des öffentlichen Busverkehrs sowie der Bevölkerung der Stadt Lauenburg/Elbe

Im Rahmen der Begleitforschung wurden neben den logistischen Veränderungen auch soziale Wirkungen erhoben. Dafür wurden drei Fragebogenerhebungen durchgeführt, um Einstellungen, Erwartungen und Ängste der Bevölkerung gegenüber Transportrobotern im kombinierten Personen- und Güterverkehr zu ermitteln.

Die Fragebögen waren jeweils gleich aufgebaut und bestanden aus vier Teilen mit einer allgemeinen Einstiegsfrage und zwei Fragenblöcken mit Likert-Skala. Im ersten Fragenblock wurden Einstellungen abgefragt, während im zweiten Teil Erwartungen und Ängste erhoben wurden. Der letzte Teil bestand aus demographischen Fragen zu Alter, Geschlecht und Tätigkeit.

Die erste Umfrage erfolgte mit Besuchenden des Wochenmarktes in Lauenburg/Elbe im August 2021. Hierbei wurde das Projekt auf dem Wochenmarkt mit Informationsmaterialien und dem Transportroboter Laura vorgestellt. Insgesamt konnten 46 Fragebögen erhoben werden.

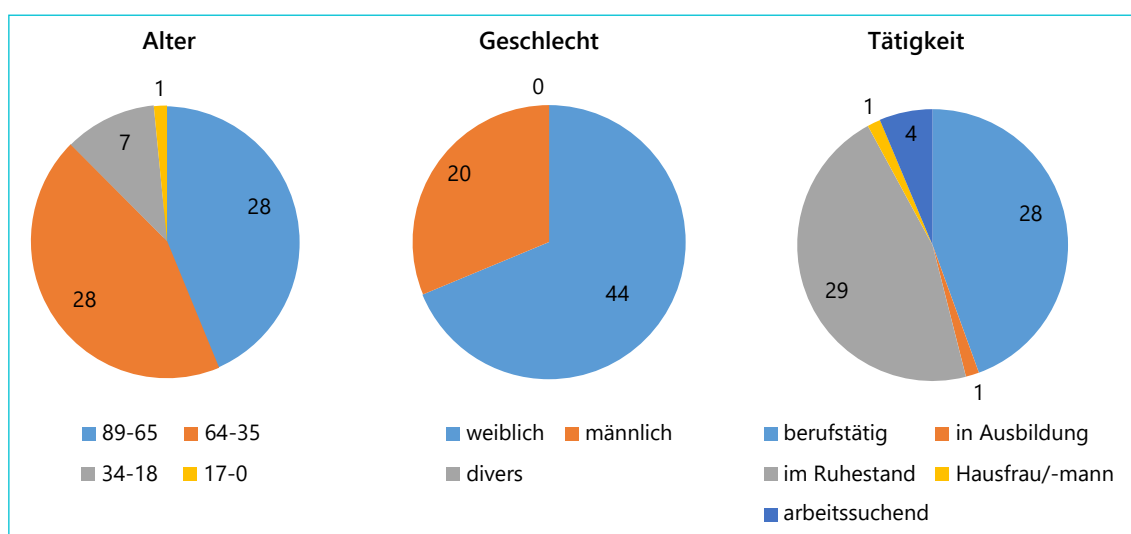
Aufbauend auf der Wochenmarkt-Erhebung wurden einige Fragen leicht abgewandelt. Die zweite Befragung fand mit den Fahrgästen im TaBuLaShuttle im August und September 2021 statt, um auch die Meinungen derjenigen zu erheben, die die neue Technologie im Realbetrieb erproben konnten. Dies erfolgte zu mehreren Zeitpunkten: An zwei Wochenenden wurden Fahrgäste durch das Projektteam befragt. Hierbei wurden insgesamt 30 Fragebögen erhoben.

Die letzte Befragungsrunde erfolgte mit der Bevölkerung der Stadt Lauenburg/Elbe sowie Wochenend-Touristen im Rahmen des Public Days des ITS World Congress am 16. Oktober 2021 in Lauenburg/Elbe. Das Projekt wurde zum einen am Rathaus in der Oberstadt präsentiert und automatisierte Fahrten mit Laura gezeigt, zum anderen konnten Interessierte mit dem TaBuLaShuttle fahren. Hierbei wurden die gleichen Fragen wie bei der Fahrgastbefragung gestellt. Bei dieser Befragung wurden insgesamt 86 Fragebögen erhoben.

## Demographische Struktur der Befragungen

An der Befragung auf dem Wochenmarkt in Lauenburg/Elbe nahmen knapp 70% weibliche und etwa 30% männliche Personen teil. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmenden lag bei 58 Jahren, wobei etwa 46% der Teilnehmenden angaben, bereits im Ruhestand zu sein und etwa 44% noch berufstätig, 6% der Teilnehmenden sind arbeitssuchend, 2% sind in der Ausbildung und 2% gaben an, Hausfrau bzw. Hausmann zu sein. Die demographischen Strukturen sind in Abbildung 41 zu sehen.

**Abbildung 41:** Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Befragung »Wochenmarkt«



Die Abbildung 42 zeigt Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Fahrgastbefragung. Bei der Fahrgastbefragung lag das demographische Alter der Teilnehmenden mit 53 Jahren unter dem Alter bei der Befragung auf dem Wochenmarkt. Dies lag am höheren Anteil von Personen im Alter von 35 bis 64 Jahren. Ähnlich, wie zu der Befragung auf dem Wochenmarkt, wurden 57% weibliche Personen und 43% männliche Personen befragt. Die Personen waren dabei mehrheitlich berufstätig. Etwa 37% waren im Ruhestand und 10% in der Ausbildung. 3% der Teilnehmenden gaben an, Hausfrau oder Hausmann zu sein.

Die Abbildung 43 zeigt Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Befragung am Public Day. Bei der Befragung am Public Day waren ebenfalls 50% der Teilnehmenden im Alter von 35 bis 64 Jahren. Das durchschnittliche Alter lag jedoch bei 47 Jahren. Wie bei den Befragungen zuvor gab es auch bei dieser Befragung mehr weibliche (62%) als männliche (38%) Teilnehmende. 58% der Teilnehmenden gab an, dass sie berufstätig sind. 19% der Teilnehmenden waren im Ruhestand und 18% in der Ausbildung. Jeweils 1% arbeitssuchende und Hausfrauen bzw. -männer nahmen zudem an der Befragung teil. Zudem wurden 4% der Teilnehmenden unter »sonstiges« eingeteilt.

Abbildung 42: Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Fahrgastbefragung

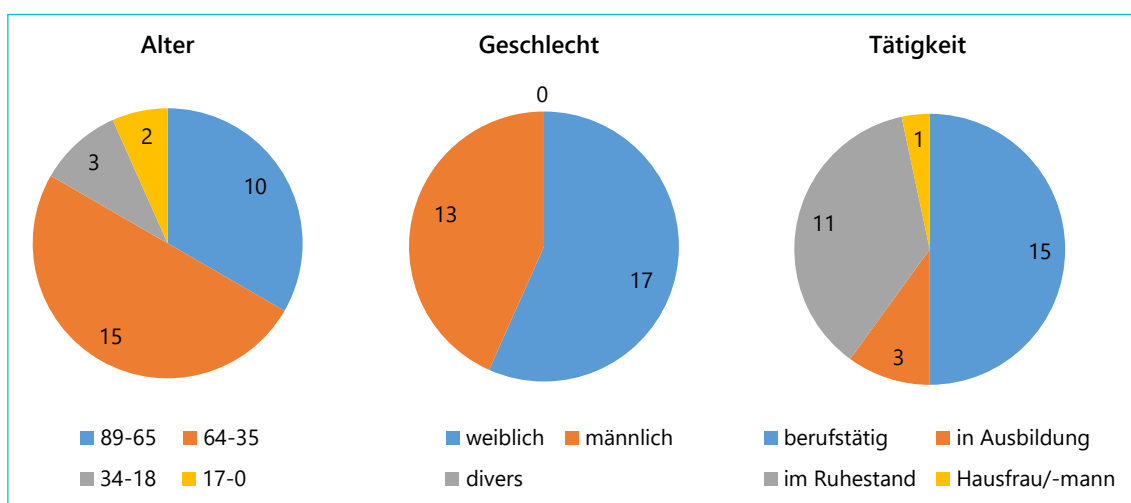
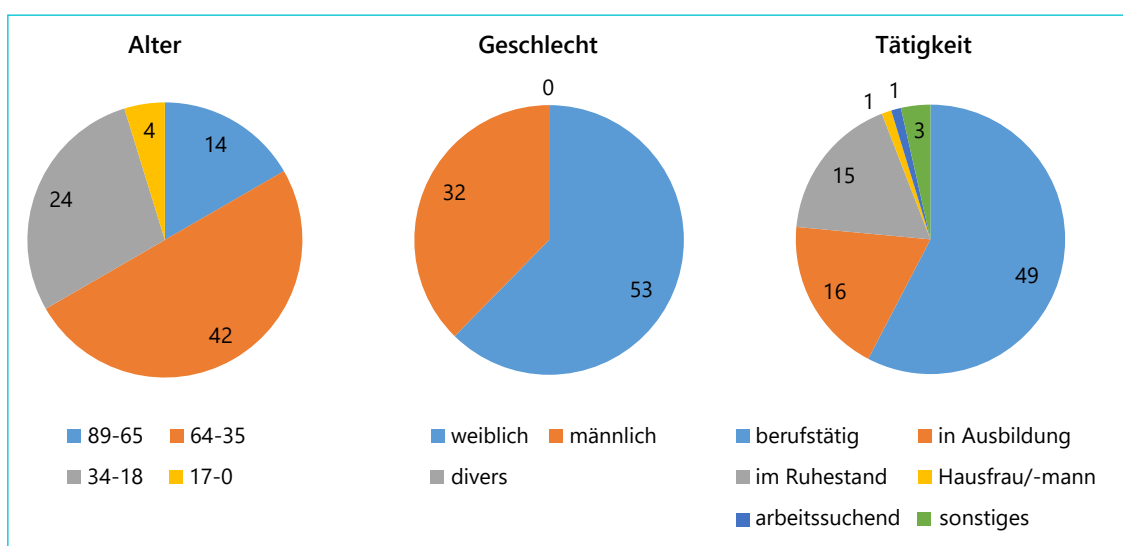


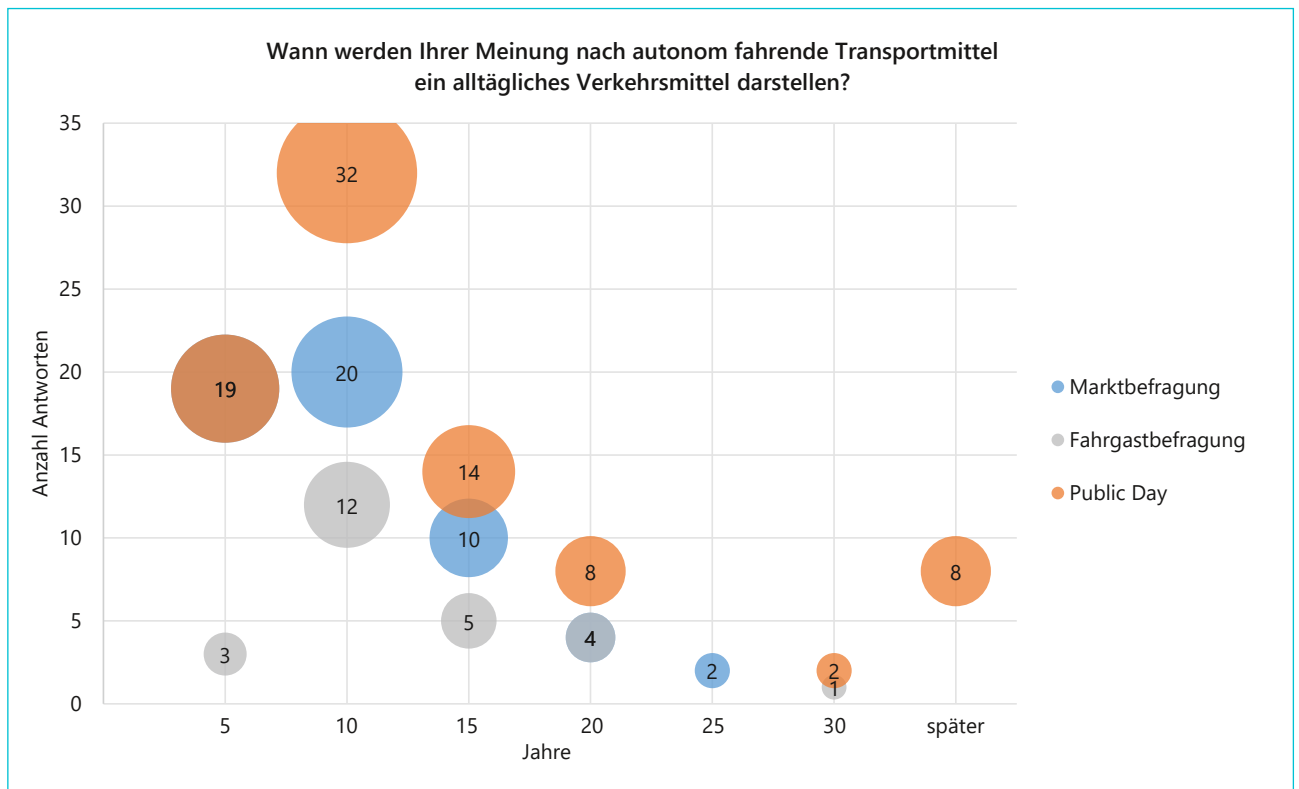
Abbildung 43: Altersstruktur, Geschlecht und Berufsstand der Befragung am Public Day



## Autonom fahrende Transportmittel werden alltäglich werden – aber nicht so bald

Die erste Frage aller Fragebögen lautete »Wann werden Ihrer Meinung nach autonom fahrende Transportmittel ein alltägliches Verkehrsmittel darstellen?«. Die Antworten der drei Befragungsgruppen sind in der Abbildung 44 visualisiert. Die Angaben verteilten sich schwerpunktmäßig auf die Antworten »in 5 Jahren« bis »in 20 Jahren«. Drei Teilnehmende gaben an, dass sich die Technologie nicht durchsetzen wird und acht Teilnehmende antworteten mit »weiß nicht«. Die Antworten der Frage 1 zeigen, dass die Mehrheit der Teilnehmenden die Umsetzung des autonomen Fahrens für realistisch hält, der Zeitraum der Einführung jedoch vage bleibt.

Abbildung 44: Auswertung der Frage 1



## Bedenken trotz positiver Einstellung gegenüber Transportrobotern

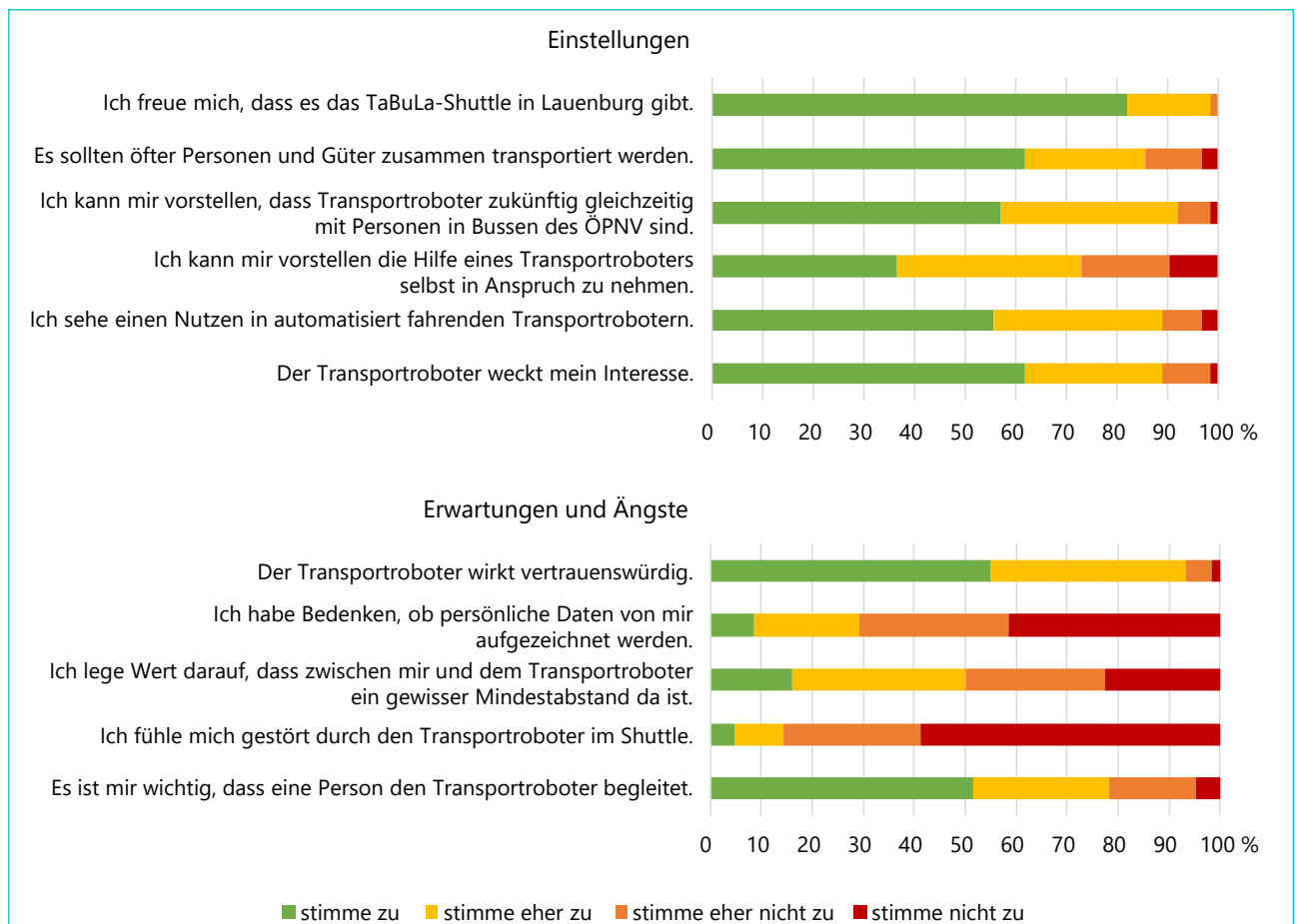
Bei der Marktbefragung zeigte sich ein positives Bild gegenüber dem TaBuLa-Shuttle, dem kombinierten Personen- und Gütertransport und den Transportrobotern. Während sich knapp 60% der Befragten vorstellen können, dass Transportroboter und Personen zukünftig gleichzeitig Busse des ÖPNV nutzen, würden nur etwa 35% die Hilfe eines Transportroboters selbst in Anspruch nehmen, obwohl ein Nutzen in automatisiert fahrenden Transportrobotern von 55% der Teilnehmenden gesehen wird und der Transportroboter bei über 60% der Befragten Interesse weckt (siehe Abbildung 45).

Bei der Auswertung der Erwartungen und Ängste wird zudem deutlich, dass der Transportroboter zwar vertrauenswürdig auf die Befragten wirkt und diese sich auch nicht durch den Transportroboter im Shuttle gestört fühlen würden, es ihnen aber wichtig ist, dass eine Person den Transportroboter begleitet.

Bedenken hinsichtlich der Aufzeichnung von persönlichen Daten besteht nur bei knapp 10% der Befragten. Ein gemischtes Bild herrscht bei der Frage, ob die Befragten Wert darauflegen, dass zwischen ihnen und dem Transportroboter ein gewisser Mindestabstand vorhanden ist.

Insgesamt zeigt die Befragung bei den Besuchenden des Wochenmarktes, dass eine positive Grundeinstellung besteht, aber weiterhin Bedenken bezüglich des Transportroboters herrschen.

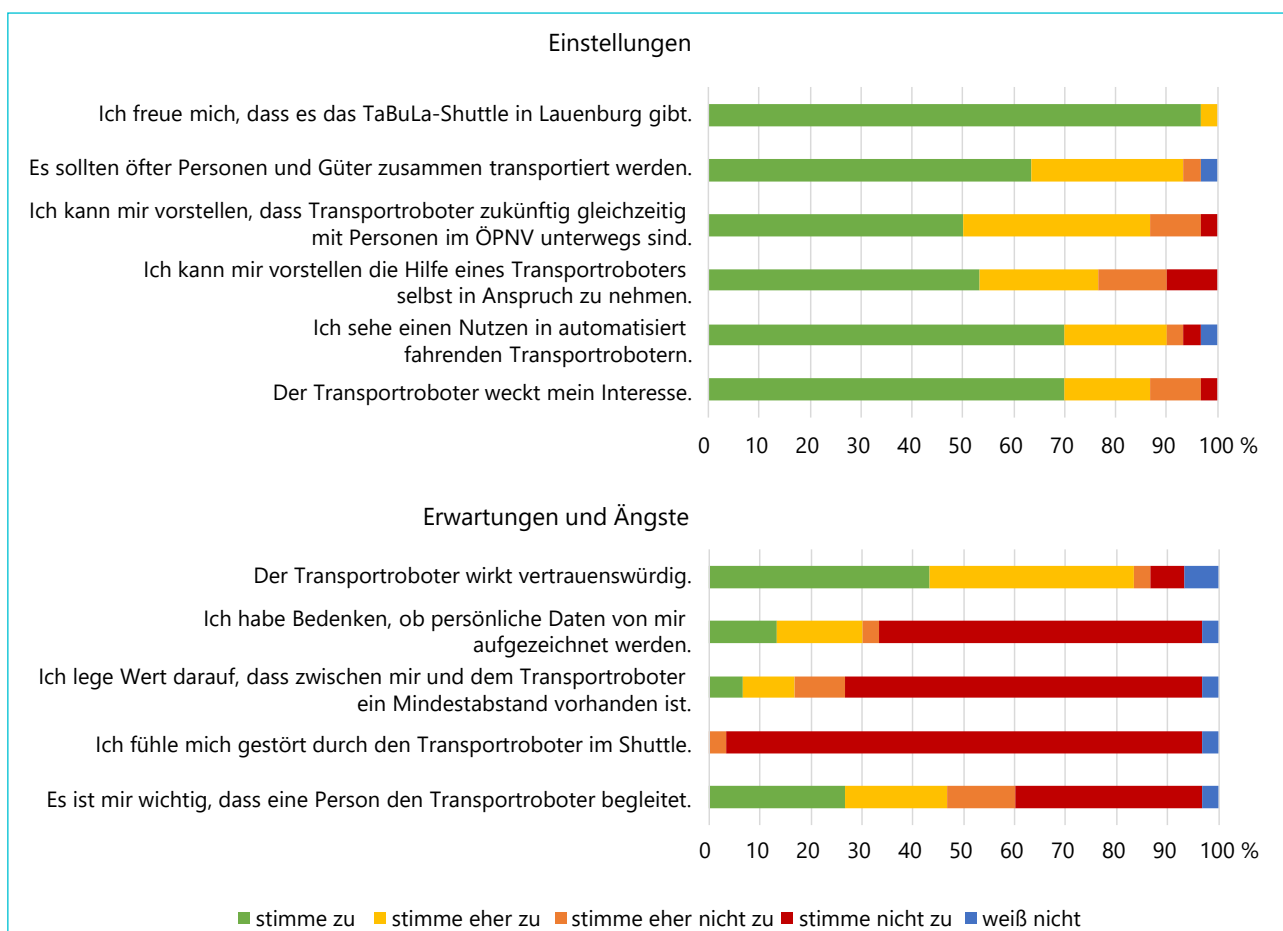
Abbildung 45: Marktbefragung: Einstellungen, Erwartungen und Ängste



Während der Fahrgastbefragung wurden die Fahrgäste im Shuttle hinsichtlich ihrer Einstellungen, Erwartungen und Ängste befragt. Zusätzlich stand der Transportroboter mit im Fahrraum, sodass die Fahrgäste die Erfahrung eines kombinierten Personen- und Gütertransports im Realbetrieb machen konnten. Im Gegensatz zur Befragung auf dem Wochenmarkt stieg die Anzahl der Zustimmungen hinsichtlich der eigenen Nutzung eines Transportroboters.

Darüber hinaus zeigte sich, dass sich die Erfahrung eines kombinierten Transports positiv auf die Ängste der Befragten ausgewirkt hat. Während bei der Marktbefragung noch etwa 15% der Befragten zustimmten oder eher zustimmten, dass sie sich durch den Transportroboter im Shuttle gestört fühlen und auch noch etwa 25% eher nicht zustimmten, antworteten über 90% der Teilnehmenden während der Fahrgastbefragung, dass sie sich nicht durch den Transportroboter im Shuttle gestört fühlen. Auch auf die Aussage, dass sie Wert darauflegen, dass zwischen ihnen und dem Transportroboter ein Mindestabstand vorhanden ist, antworteten in der Fahrgastbefragung etwa 70% mit »stimme nicht zu«. Die Antworten hinsichtlich der Aussage »Es ist mir wichtig, dass eine Person den Transportroboter begleitet« fielen weiterhin gemischt aus, allerdings antworteten mehr Teilnehmende mit »stimme nicht zu« als während der Marktbefragung, wie die Abbildung 46 zeigt.

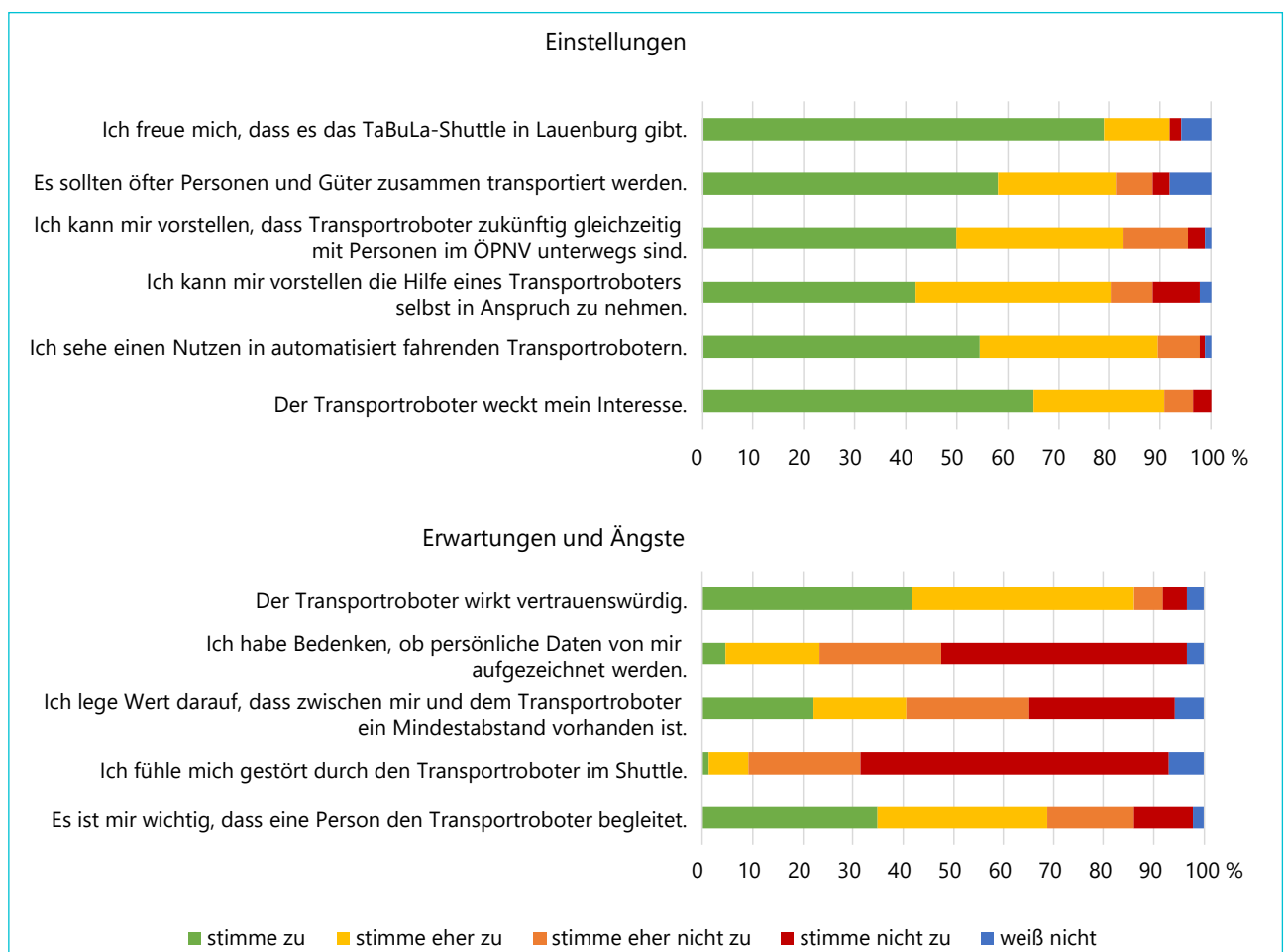
Abbildung 46: Fahrgastbefragung: Einstellungen, Erwartungen und Ängste



Während des Public Days wurden sowohl Passagiere des Shuttles als auch Besuchende der Stadt Lauenburg/Elbe befragt. Darüber hinaus nahmen Interessierte im Rahmen des ITS World Congress 2021 an der Befragung teil, die sich zuvor über das Projekt TaBuLa-LOG informierten.

Bei dieser Befragung wird ebenfalls eine positive Grundeinstellung gegenüber dem Shuttle, dem Transportroboter und dem kombinierten Transport deutlich. Diese ist jedoch weniger positiv als bei der Fahrgastbefragung. Auch im Hinblick auf die Erwartungen und Ängste zeigt sich ein gemischtes Bild, ähnlich zu dem der Marktbefragung. Im Gegensatz zur Fahrgastbefragung sind jedoch die Bedenken hinsichtlich der Aufzeichnung von persönlichen Daten etwas zurückgegangen (siehe Abbildung 47). Daran kann sich ableiten lassen, dass umso enger der Kontakt zum Transportroboter wird, Bedenken bezüglich der Datenaufzeichnung zunehmen, allerdings Ängste im Hinblick auf den Einsatz von Transportrobotern abnehmen.

Abbildung 47: Public Day: Einstellungen, Erwartungen und Ängste





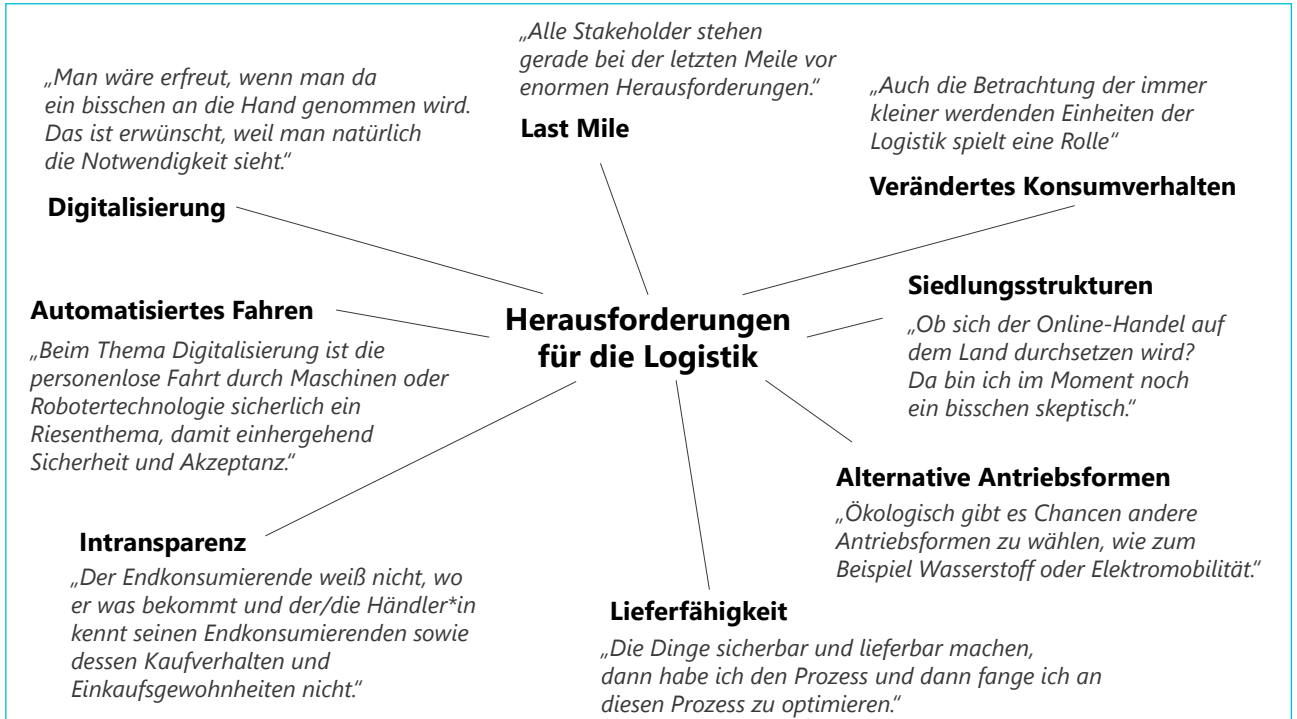
Aus den Befragungen wird deutlich, dass die Teilnehmenden eine überwiegend positive Einstellung gegenüber den unterschiedlichen Technologien und dem kombinierten Personen- und Gütertransport haben. Obwohl ein Nutzen in Transportrobotern gesehen wird, stehen die Teilnehmenden jedoch weniger positiv einer eigenen Nutzung der Technologie gegenüber. Die Befragung zeigt auch, dass umso stärker die Erfahrungen im Realbetrieb werden, desto mehr gehen Ängste und Bedenken zurück. Damit kann abgeleitet werden, dass für eine Implementierung von autonomen Transportmitteln die Erfahrung im Realbetrieb essentiell zur Steigerung der Akzeptanz ist. Auch sollte bei der Erprobung im Realbetrieb darauf geachtet werden, dass Bedenken hinsichtlich der Aufzeichnung von persönlichen Daten reduziert werden. Aufklärungsarbeit kann einen wichtigen Beitrag leisten. Bei den Befragungen ist zu berücksichtigen, dass es sich um verhältnismäßig geringe Stichproben mit 30 bis 86 Teilnehmenden handelt und eine gewisse demographische Struktur vorherrscht.

### 2.5.3 Befragung von Fachkundigen aus der Logistik und Industrie

Im Rahmen des Projektes wurden halbstandardisierte leitfadengestützte Expert\*inneninterviews durchgeführt. Die elf formulierten Fragen können in drei Themenschwerpunkte eingeteilt werden. Im ersten Teil wurden Herausforderungen für die Logistik im Allgemeinen erfragt. Im zweiten Teil fokussierten sich die Fragen auf potenzielle Einsatzmöglichkeiten in der B2B- und B2C-Logistik von Transportrobotern. Um notwendige Spezifikationen und Voraussetzungen für den Einsatz von diesen zu ermitteln, konzentrierte sich der dritte Teil des Interviews auf Fragen zu den Rahmenbedingungen von Transportrobotern im Hinblick auf ihren Einsatz im öffentlichen Straßenraum. Die neun befragten Fachkundigen verteilten sich auf die Gruppen der Speditions- und Logistikdienstleistungsunternehmen, der Kurier-, Express- und Paketdienste, der Handels- und Dienstleistungsunternehmen sowie Kommunen und Wirtschaftsverbände, und deckten damit typische Organisationen im Logistiksystem ab. Die 30- bis 60-minütigen Interviews wurden systematisch mit der Software MAXQDA ausgewertet. Aus diesen Interviews ging hervor, dass sowohl zum damaligen Zeitpunkt als auch zukünftig unterschiedliche logistische Herausforderungen gesehen wurden. In der Abbildung 48 sind die identifizierten Themen wie Digitalisierung, letzte Meile, das kleinteiligere Sendungsaufkommen aufgrund des veränderten Konsumverhaltens, die Auswirkungen von Intransparenz und Lieferfähigkeit sowie Siedlungsstruktur auf die Logistikleistung oder auch alternative Antriebe und das automatisierte Fahren im Bereich der Transportlogistik mit Statements der Interviewten hinterlegt.

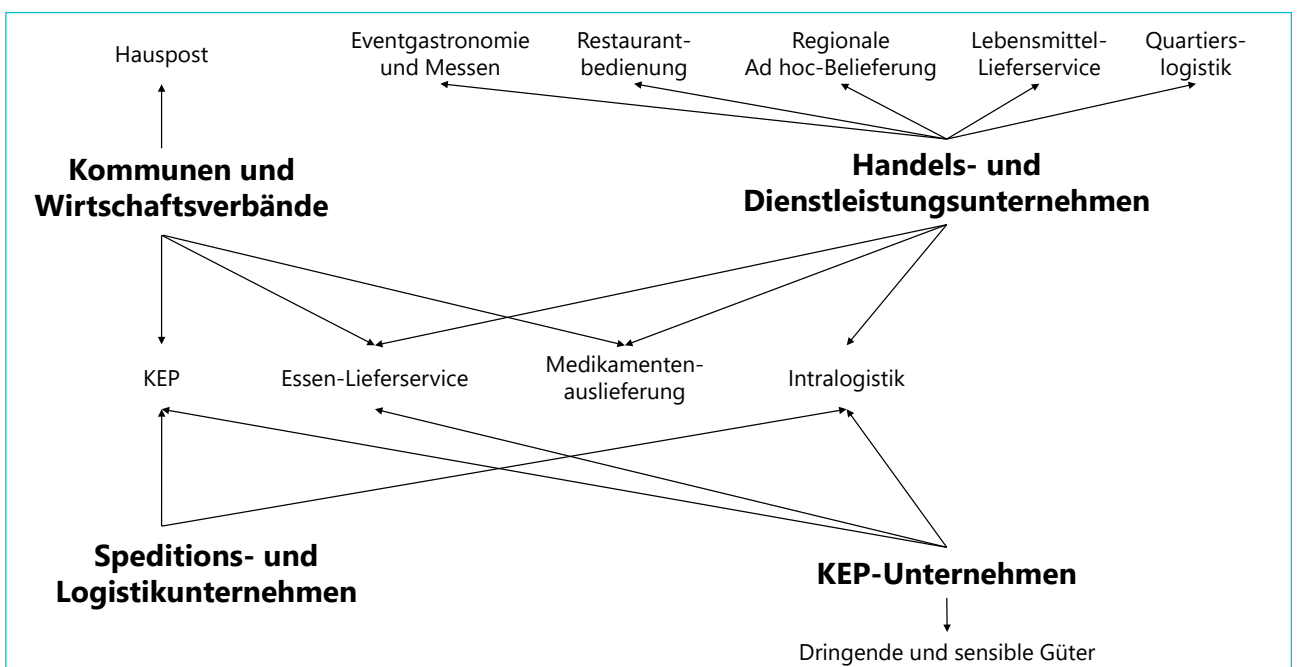
Als eine potenzielle Lösung wird der Einsatz von Transportrobotern auf der Letzten Meile im urbanen Raum durch die Projektbeteiligten abgeleitet. Im Rahmen der Interviews konnten elf Einsatzgebiete für Transportroboter ermittelt werden, wie beispielsweise KEP-Dienste, Essens-Lieferservice, Medikamentenauslieferung oder die Intralogistik. Die Ergebnisse zeigten ein breites Bild an potenziellen Einsatzmöglichkeiten, wie in Abbildung 49 dargestellt.

Abbildung 48: Herausforderungen für die Logistik



Quelle: eigene Darstellung mithilfe von MAXQDA

Abbildung 49: Potenzielle Einsatzszenarien von Transportrobotern im öffentlichen Raum



Quelle: Grunow et al. 2022

Vier Anwendungsfelder wurden von allen Fachkundigen-Gruppen genannt: KEP, Essens-Lieferservice, Medikamentenauslieferung und die Intralogistik.

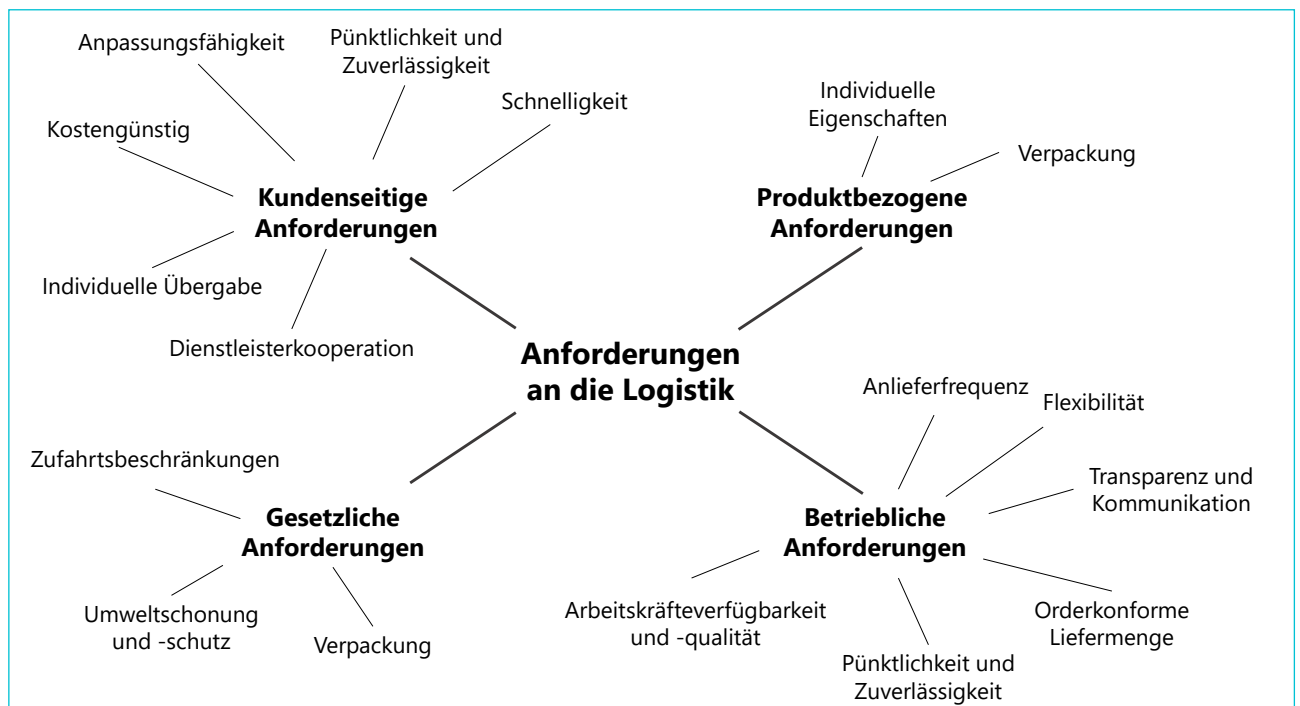
Die ermittelten Anwendungsfelder für Transportroboter decken sich mit den Überlegungen des Projektteams zu Auswahl des logistischen Anwendungsfalls. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse aus den Fachkundigeninterviews ist in Grunow et al. (2022) zu finden.

Im Rahmen der Interviews wurden zudem notwendige Spezifikationen und Voraussetzungen für den Einsatz von Transportrobotern im öffentlichen Raum erhoben.

Die in den Interviews ermittelten Anforderungen an den Einsatz von Transportrobotern in der Logistik, decken sich mit den Anforderungen aus Kapitel 2.2.1, die im Rahmen des Projektes durch interne Workshops ermittelt wurden (siehe Abbildung 50).

Insgesamt konnten anhand der Interviews vier Themenschwerpunkte identifiziert werden: Kundenseitige, produktbezogene, betriebliche und gesetzliche Anforderungen. Eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen an den logistischen Einsatz von Transportrobotern anhand der Fachkundigeninterviews ist in Grunow et al. (2022) zu finden. Die Abfrage der Anforderungen aus Sicht der Praxis diente im Projekt zur Validierung der eigens aufgestellten Anforderungen, sodass auch die Perspektive der Nutzenden in den Entwicklungsprozess einfließen konnte.

**Abbildung 50:** Notwendige Spezifikationen und Voraussetzungen für den Einsatz von Transportrobotern



Quelle: in Anlehnung an Grunow et al. 2022

### 2.5.4 Vorher-Nachher-Vergleich aus ökonomischer Perspektive

Für einen Vorher-Nachher-Vergleich der umgesetzten Szenarien dient eine verkürzte Prozesskostenberechnung, welcher eine Total Cost of Ownership (TCO)-Berechnung der einzelnen Transportmittel (ePkw, eMinibus, Shuttle und Transportroboter) zugrunde liegt. Dieser Ansatz ermöglicht es, dass neben den reinen Nutzungskosten auch die anteiligen Prozesszeiten des Personals bzw. der Transportmittel in die Berechnung integriert werden können.

Die Berechnung findet zum einen für einen regulären Busbetrieb sowie die Ausgangssituation des Posttransports (wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben) statt, sodass die Kosten für einen separaten Personen- und Gütertransport ermittelt werden können. Dem wird das Szenario eines kombinierten automatisierten Shuttle- und Transportroboterbetriebs gegenübergestellt, sodass abgeleitet werden kann, ob der kombinierte autonome Personen- und Gütertransport aus ökonomischer Perspektive vorteilhaft gegenüber einem voneinander unabhängigen Transport ist. Eine detaillierte Beschreibung der Kostenanalyse ist in Tjaden et al. (2022) sowie zu den Kosten eines autonomen Shuttlebetriebs in Grote und Röntgen (2021) zu finden.

Mithilfe der Berechnung konnte zunächst festgestellt werden, welche Kostenkomponenten in die Gesamtkosten pro Kilometer prozentual einfließen. Die Kosten wurden für den spezifischen Anwendungsfall in Lauenburg/Elbe ermittelt. Angenommen wird, dass es sich um elektrifizierte Transportmittel handelt, bei denen der Pkw und Minibus durch Personal gesteuert wird, während sich das Shuttle und der Transportroboter autonom und ohne menschliche Hilfe bewegen. Die Abbildung 51 zeigt, dass der Transportroboter die höchsten Gesamtkosten pro Kilometer mit 29,30 Euro aufweist, während der Pkw die geringsten Kosten mit 2,43 Euro verursacht. Die hohen Kosten des Transportroboters können zum einen mit der geringen Geschwindigkeit sowie mit der Jahresfahrleistung begründet werden.

**Abbildung 51:** Vergleich der Gesamtkosten pro Kilometer und prozentuale Verteilung der Kostenkomponenten

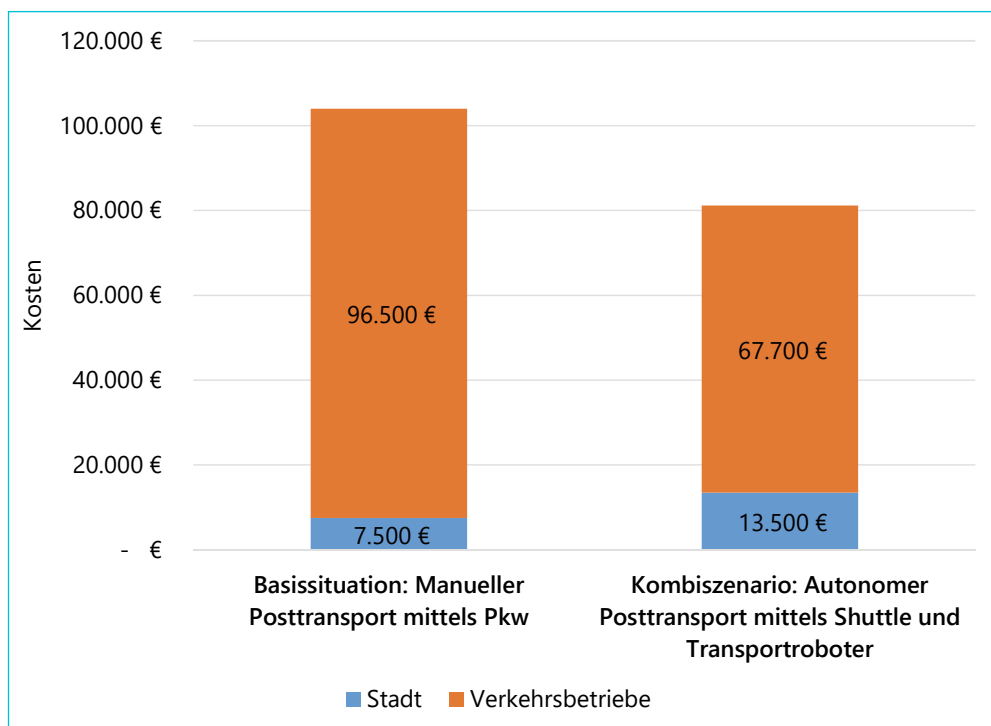
Verkehrsmittel	Pkw	Minibus	Autonomes Shuttle	Autonomer Transportroboter
<i>Gesamtkosten / km</i>	2,43 €/km	3,91 €/km	2,60 €/km	29,30 €/km
<b>Kostenkomponenten</b>				
Fahrzeugkosten	27,9%	20,7%	25,9%	82,7%
Energiekosten	2,4%	11,7%	10,0%	0,1%
laufende Kosten	3,9%	21,7%	31,6%	6,7%
Infrastrukturkosten	1,0%	2,7%	3,3%	1,7%
Fahrzeugbegleitpersonen	59,4%	35,1%		
weitere Personalkosten	5,4%	7,9%	16,9%	7,5%
weitere Kosten		0,3%	12,3%	1,4%

Quelle: in Anlehnung an Tjaden et al. 2022

Die Gesamtkosten pro Kilometer wurden für die Berechnung der Gesamtkosten pro Jahr der einzelnen Szenarien mit den Personalkosten addiert und mit der zurückgelegten Strecke pro Jahr sowie den anteiligen Prozesszeit verrechnet. Dabei handelt es sich um eine fiktive Szenario-Berechnung in Anlehnung an den Anwendungsfall in Lauenburg/Elbe. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Ausgangssituation Kosten für die Stadt in Höhe von 7.500 Euro pro Jahr für den Posttransport entstehen. Gleichzeitig fallen für die Verkehrsbetriebe Kosten für einen Minibus-Betrieb in Höhe von 96.500 Euro an. In Summe betragen die Kosten für die Ausgangssituation 104.000 Euro pro Jahr.

Wird ein autonomes kombiniertes Szenario zugrunde gelegt, können die Kosten um etwa 23.000 Euro reduziert werden. Die Kostenreduktion erfolgt dabei insbesondere auf Seiten der Verkehrsbetriebe, sodass Kosten pro Jahr von 67.700 Euro entstehen. Die Kosten der Stadt nehmen hingegen durch den Einsatz des Transportroboters in Kombination mit dem Shuttle-Transport zu, sodass die Kosten bei 13.500 Euro pro Jahr liegen. Insgesamt entstehen Kosten von 81.200 Euro pro Jahr für ein kombiniertes autonomes Szenario, wie die Abbildung 52 zeigt.

**Abbildung 52:** Kosten der Szenarien für die Stadt und die Verkehrsbetriebe



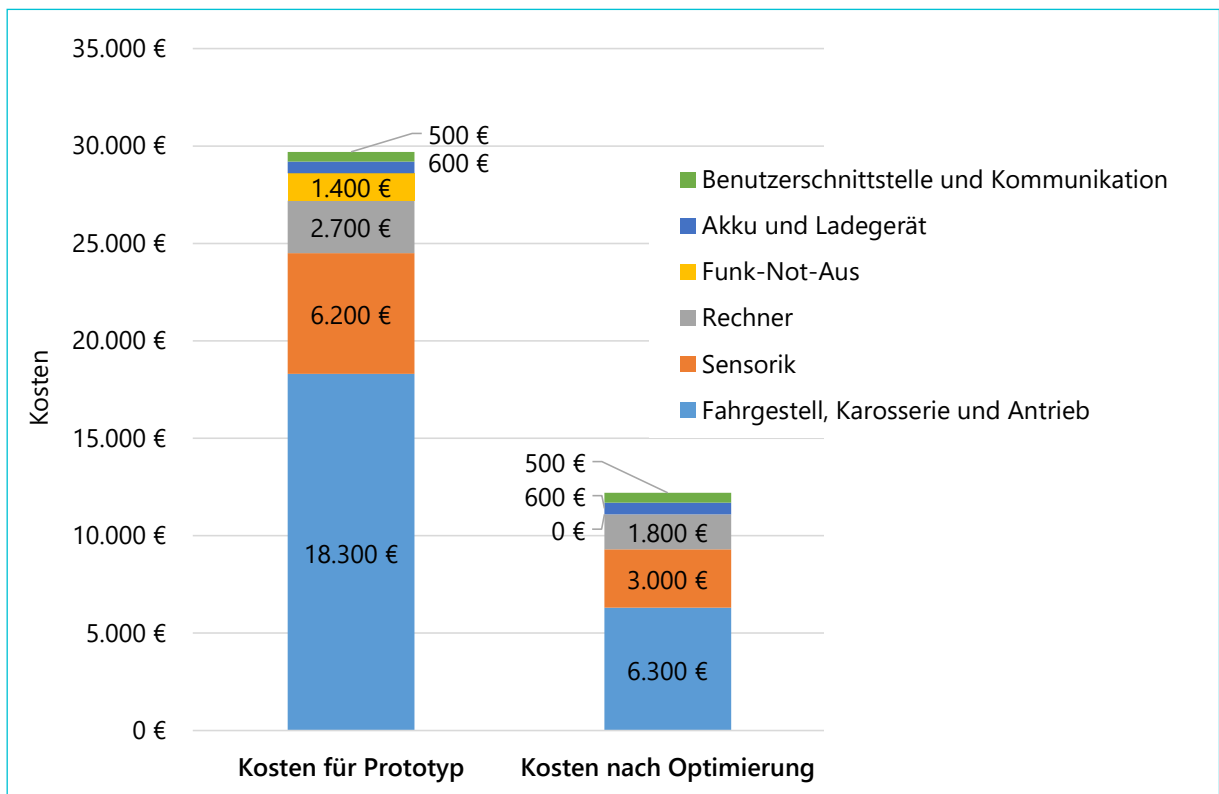
Quelle: in Anlehnung an Tjaden et al. 2022

Auch die Prozesskosten pro Sendung können durch die Berechnung ermittelt werden. Diese liegen bei der Ausgangssituation bei 0,62 Euro pro Sendung, wenn ein durchschnittliches Sendungsaufkommen von 47 Briefen pro Tag angenommen wird. Im kombinierten Szenario steigen die Kosten auf 1,13 Euro pro Tag.

Die Berechnung zeigt, dass die Kosten pro Jahr durch ein autonomes kombiniertes Szenario für die Verkehrsbetriebe zwar sinken, diese aber für die Stadt durch den Einsatz des Transportroboters ansteigen. Tjaden et al. (2022) leiten daher ab, dass es zu einer Kostenreduktion des Transportroboters kommen muss, damit ein kombiniertes autonomes Szenario auch für die Stadt ökonomisch vorteilhaft wird. Insgesamt müssen sich die Fahrzeugkosten des Transportroboters von ursprünglichen 29.700 Euro um 17.500 Euro auf 12.200 Euro reduzieren, damit die Kosten für den Transport der Hauspost der Stadt unter die der Ausgangssituation fallen.

Bereits heute können Annahmen getroffen werden, wie diese Kostenreduktion möglich ist. Dafür wurde ein Komponentenmodell des Transportroboters entwickelt, das zeigt, welche Kosten durch welche Komponenten entstanden sind und welche durch eine Optimierung vermindert werden können (siehe Abbildung 53).

**Abbildung 53:** Komponentenkosten des Transportroboters »Laura«



Quelle: in Anlehnung an Tjaden et al. 2022

Die größten Einsparungen können bei dem Fahrgestell, der Karosserie und dem Antrieb ermöglicht werden. Auch die Kosten für die Sensorik könnten durch eine Optimierung halbiert werden. Bei einem autonomen Betrieb wird zudem der Funk-Not-Aus Knopf redundant, da dieser nur für eine Begleitperson erforderlich ist.

Auf Grundlage des Kostenvergleichs kann abgeleitet werden, dass für eine breite Implementierung von Transportrobotern in den Hauspostprozess die Kosten für den Roboter, insbesondere dessen technische Komponenten, deutlich reduziert werden müssen. Eine Senkung der Prozesskosten kann aber auch durch ein erhöhtes Sendungsaufkommen bzw. weitere überlagerte Anwendungsfälle erzielt werden. Diese können zwar tendenziell die Gesamtkosten aufgrund steigender Jahresfahrleistung steigen lassen, allerdings würden sich dann die Fixkosten auf mehrere Kostenträger verteilen. Dies bedarf einer erneuten Berechnung.

### 2.5.5 Evaluation eines automatisierten kombinierten Personen- und Gütertransports

Die Evaluation des kombinierten automatisierten Personen- und Gütertransports ist vor allem für die gesamtgesellschaftliche Perspektive essenziell. Folgend wird beschrieben, wie sich die Einführung solcher Systeme in Zukunft auf beispielsweise die Entlastung des Verkehrssystems, die Wirtschaftlichkeit des ÖPNV und die Daseinsvorsorge auswirken können.

#### Entlastung des Verkehrssystems

Zum Anfang des Projektes erhofften sich die Projektpartner eine Entlastung des Verkehrs durch Bündelung von Personen- Gütertransport im ÖPNV. Entsteht wirklich eine Entlastung – sprich eine messbare Verminderung der Verkehrsbelastung – im Verkehrssystem?

Vor dem Anwendungsfall des TaBuLa-LOG Projektes und dem Transport der Behördenpost mit Laura wurde in der Stadt Lauenburg/Elbe die Verteilung von Post zu Fuß oder mit einem vorhandenen Pkw der Stadtverwaltung erledigt. Das Erprobungsbeispiel zeigt, dass der Verkehr im ersten Moment nur verlagert wird und die Anzahl an Fahrzeugen quantitativ nicht zwingend abnimmt. Allerdings wird mit einem Transportroboter ein kleineres Transportgefährt eingesetzt, das sich zeitweise im Bus befindet, so die totale Anzahl motorisierter Gefährte im Straßenraum und vor allem auf der Straße abnimmt sowie zu dieser Zeit Verkehrsraum eingespart wird. Ein Transportroboter, wie Laura, verbraucht qualitativ weniger Platz und größere Parkflächen oder das Parken in zweiter Reihe sind nicht erforderlich. Laura stellt kein Verkehrshindernis auf der Straße dar. Auch ein Verkehrschaos auf einem Bürgersteig ist nicht vorgekommen und ist somit bei der Übertragung auf andere Kommunen nicht zu

erwarten. Dem Grunde nach wurde also motorisierter Verkehr auf der Straße eingespart. Der Fahrzeugbestand konnte durch die Pilotanwendung jedoch nicht reduziert werden, da der zuvor genutzte elektrifizierte Pkw grundsätzlich schon bei der Stadt im Bestand war und auch für weitere Zwecke im Bestand bleibt.

Insgesamt ist somit keine nennenswerte Einsparung des Verkehrs erfolgt (Veränderung vom Fahrzeug auf der Straße hin zu kleinerer Gefäßgröße auf dem Gehweg), sondern eher eine Verlagerung. Sollte der Anwendungsfall für weitere Nutzungen im größeren Rahmen (mehrere Lauras in einem größeren Einsatzgebiet mit verschiedenen Aufträgen) eingesetzt werden, so ist davon auszugehen, dass sich durchaus der Verkehr reduzieren lässt und Pkw-Verkehr eingespart werden könnte. In der Zeit, in der der Transportroboter im Shuttle ist, würde sich dieser nicht einmal auf dem Gehweg befinden.

Grundvoraussetzung für einen sinnvollen Anwendungsfall oder Einsatz von Transportrobotern im kombinierten Personen- und Güterverkehr ist, dass es einen Bedarf für einen Gütertransport gibt und entweder eine ÖPNV Verbindung vorhanden ist oder sinnvoll eine neue Verbindung eingerichtet werden kann, um den Personen- mit dem Gütertransport zu bündeln. Ob der kombinierte Personen- und Gütertransport dann die gewünschten Effekte wie Personal- und Kosteneinsparung sowie möglicherweise Effizienzsteigerung erfüllt, hängt von der gesamten Systemarchitektur inkl. der Passfähigkeit der benötigten Tourenmuster der Warenauslieferung mit denen des ÖPNV ab. Eine solche Passfähigkeit könnte in einem weiteren Forschungs- und Entwicklungsvorhaben überprüft werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Laura zu den regulären Lieferzeiten an Werktagen freie Kapazitäten nutzen konnte, um die Auslastung des Shuttles zu erhöhen. Laura konnte trotz der COVID-19-bedingten Kapazitätsbeschränkungen größtenteils ohne Wartezeiten im Shuttle transportiert werden.

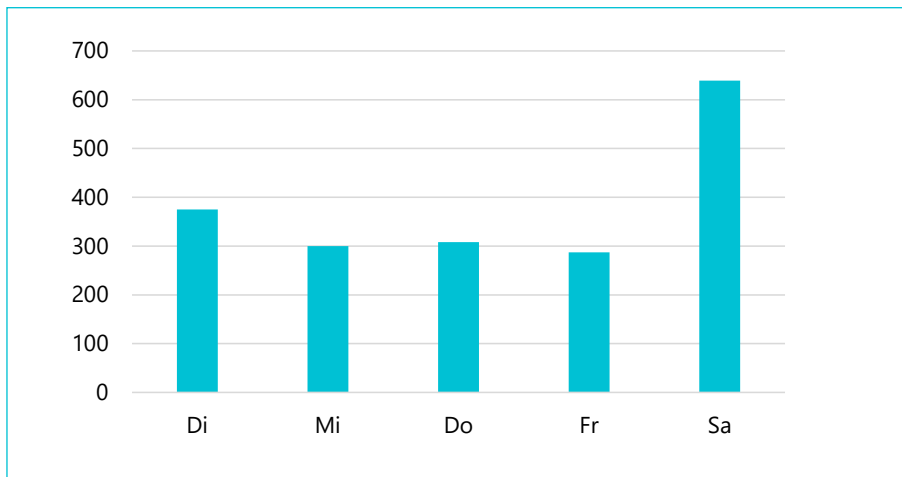
Für die realisierten Betriebszeiten ergaben sich folgende Zahlen:

- a. 2020 (ab 19.05.): In 799 Umläufen (auf Strecke 3) wurden 1.131 Personen befördert, dies entspricht im Schnitt 1,42 Personen je Runde. Es sind auf 196 Umläufen drei und 603 Umläufen weniger als drei Personen eingestiegen.
- b. 2021: In 934 Umläufen (auf Strecke 3) wurden 1.941 Personen, dies entspricht im Schnitt 2,08 Personen je Runde, befördert. Es sind auf 306 Umläufen drei und 628 Umläufen weniger als drei Personen eingestiegen.

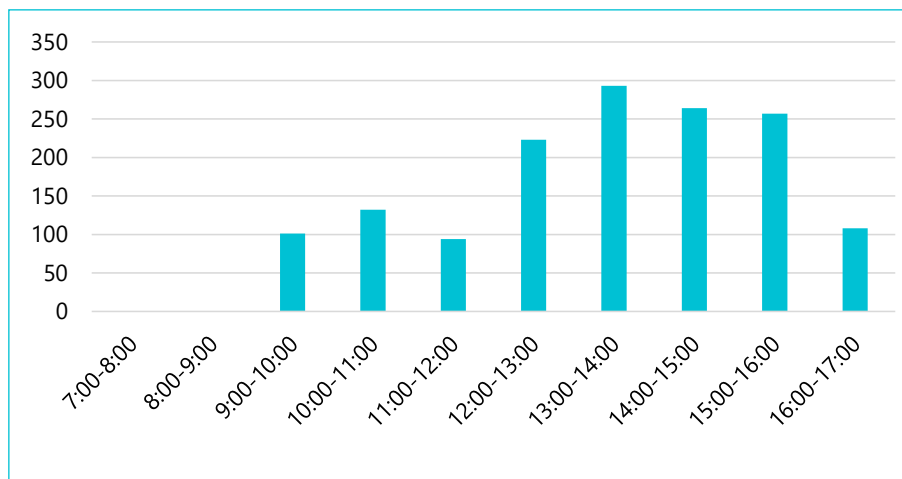
Die durchschnittlichen Fahrgastzahlen sind demnach niedrig und in 71 Prozent der Umläufe war die Auslastung geringer als 100 Prozent (aufgrund der COVID-19-Pandemie war im gesamten Projektzeitraum die maximal zulässige Fahrgastanzahl auf drei beschränkt), was zumindest montags bis freitags eindeutig hinreichend freie Kapazitäten für Transportroboter aufzeigt (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55).



**Abbildung 54:** Anzahl der Einsteigenden ins TaBuLaShuttle je Betriebstag im Jahr 2021 bei annähernd gleichem Fahrtenangebot



**Abbildung 55:** Anzahl der Einsteigenden ins TaBuLaShuttle je Zeitfenster im Jahr 2021 (Startzeit in die Strecke 3 ist maßgeblich für Einordnung in Zeitfenster)



Das Risiko im kleinstädtisch oder ländlich geprägtem Umfeld ist tendenziell eher gering, dass ein Transportroboter im ÖPNV keinen Platz findet. Aktuell stehen lediglich Touristen- und Schülerverkehre im Konflikt, wobei letztere weitgehend von den Zeiträumen kalkulierbar erscheinen.

Es wäre in einem zukünftigen Projekt zu prüfen, welche Voraussetzungen erforderlich sind, um einen Transportroboter im herkömmlichen ÖPNV mitfahren zu lassen und ob dies einen Mehrwert bietet. Es ist anzunehmen, dass auch hier Synergien bestehen und freie Beförderungskapazitäten in Bussen für die Beförderung von Gütern genutzt werden können, um den Verkehr zu minimieren.

Der kombinierte Personen- und Gütertransport konnte im TaBuLa-LOG-Projekt automatisiert, mit Begleitpersonal, realisiert werden. Somit hat immer eine Person die gesamte Route des Gütertransportes durch den Transportroboter begleitet. Um wirtschaftliche und verkehrliche Vorteile zu realisieren, ist eine Automatisierung der Transportroboter essenziell (vgl. Tjaden et al. (2022)). Um diese zu realisieren ist neben gesetzlichen und technischen Entwicklungen vor allem die Übergabe der Güter ein zu adressierendes Thema. Auch andere Projekte und Hersteller von Transportrobotern sehen sich dieser Herausforderung gegenüber (vgl. Kapalschinski 2021).

Im Gegensatz zu dem hohen Transportaufkommen von konventionellen KEP-Dienstleistern könnte bei einem niedrigen Transportaufkommen, wie beispielsweise bei Hauspost, Blutkonserven, einzelnen Apothekenlieferungen oder anderen kleinen Transportvolumina, der Transportroboter sowohl im B2B- als auch B2C-Bereich sinnvoll eingesetzt werden.

Die Verknüpfung vorhandener Ressourcen in der Personenbeförderung und beim Gütertransport kann dazu führen, dass Verkehre gebündelt und Kosten eingespart sowie neue Ressourcen erschlossen werden können.

- ▶ In Bereichen mit hohem Verkehrsaufkommen (urban, suburban) kann dieses zu einer Entlastung der Straßen führen. Folgeerscheinungen des hohen Verkehrsaufkommens, wie Staus, Parkplatznot sowie Lärmbelastung und Schadstoffbelastung durch Abgase können somit für das durch die Kleingüterbeförderung induzierte Verkehrsaufkommen reduziert werden.
- ▶ In ländlichen Regionen gilt es, große Distanzen zu überwinden und die Region mit Gütern zu versorgen. Ein Transportroboter, der Kapazitäten im vorhandenen ÖPNV nutzt, kann hier zur Sicherstellung der ländlichen Versorgung beitragen und könnte unwirtschaftliche Wege aufgrund der hohen Distanzen und geringen Bevölkerungsdichte wirtschaftlicher machen.
- ▶ Zuvor nicht vorhandene Transportressourcen können sowohl im ländlichen als auch im suburbanen und urbanen Raum erschlossen werden und so Potenziale ausschöpfen.

Es galt in diesem Projekt die Voraussetzungen zu schaffen, dass der automatisierte ÖPNV für einen automatisierten Gütertransport nutzbar gemacht werden kann. Zudem war trotz der geteilten Personen- und Güterbeförderung der Betrieb des ÖPNV sicherzustellen. Zu beachten ist, dass die Größe und damit auch die Ladekapazitäten eines Transportroboters limitiert sind, sofern dieser im ÖPNV befördert wird.

## Gesellschaftlicher Mehrwert

Unternehmen sind immer mehr gefordert, Kundenlieferungen zeitnah und möglichst kundengerecht individuell zu bearbeiten. Mit diesem Projekt möchte der Kreis Herzogtum Lauenburg anderen Kleinstädten und Kommunen ein Vorbild sein und Unternehmen Anreiz geben, das erprobte und nachhaltige Logistikkonzept auszubauen. Der Kreis Herzogtum Lauenburg möchte demnach Ansprechpartner und Vorbild für vergleichbare Umsetzungsideen sein: Anstelle von diversen einzelnen kleinen Lieferdiensten, die jeweils einen eigenen Pkw nutzen, könnten Verkehre gebündelt und der vorhandene ÖPNV und dessen freie Kapazitäten besser genutzt werden. Dies könnte zur Entlastung des Verkehrssystems durch Logistkdienstleister führen. Ferner können so weitere Deckungsbeiträge für den ÖPNV erwirtschaftet werden und vermutlich die Angebotsausweitung in suburbanen und ländlichen Gebieten unterstützen.

Als Aufgabenträger ÖPNV möchte der Kreis Herzogtum Lauenburg, gemeinsam mit den Verkehrsbetrieben Hamburg-Holstein GmbH standardisierte Anforderungen definieren, die einen zukunftsfähigen ÖPNV ermöglichen. Hierbei kann sowohl der automatisierte Shuttlevverkehr als auch die automatisierte Gütermithnahme (in konventionellen und automatisierten Verkehren) einen wesentlichen gesellschaftlichen Beitrag leisten:

- ▶ Jeder Bus ist barrierefrei, daher passend für Transportroboter wie Laura.
- ▶ Es muss in Zukunft eine Möglichkeit zur automatisierten Sicherung für den Roboter geben (Rollstuhlfahrende machen das selbst).
- ▶ Es ist eine standardisierte technische Schnittstelle erforderlich, damit die Information vom Roboter an den Bus übertragen werden kann, wann und wo der Roboter ein- bzw. aussteigen möchte.
- ▶ Bushaltestellen sind häufig nicht barrierefrei ausgestaltet. Dies ist eine Grundvoraussetzung für den Ein- und Ausstieg eines Transportroboters auf Rädern. Der Ausbau von barrierefreien Bushaltestellen findet mit Nachdruck statt und hätte grundsätzlich gem. § 8 Abs. 3 Satz 4 PBefG bis zum 01.01.2022 im gesamten Kreisgebiet abgeschlossen sein sollen. Dies ist aber noch nicht flächendeckend erfüllt.

## Wirtschaftlichkeit

Der im Rahmen dieses Forschungsprojektes umgesetzte Anwendungsfall der geteilten Personen- und Güterbeförderung ist ein Pilotbetrieb des zuvor definierten logistischen Anwendungsfalls. Zudem handelt es sich bei der selbst entwickelten und eigens erbauten Roboterplattform um einen Prototyp. Auf dieser Basis ist die Abschätzung einer zukünftigen Wirtschaftlichkeit erschwert und nur schematisch umsetzbar. Die Umsetzung eines Pilotbetriebes und Entwicklung eines Transportroboters verursacht hohe Anschaffungs- und Implementierungskosten (vgl. auch Kapitel 2.5.4). Der Betrieb des Transportroboters und des Shuttles führt durch personelle Begleitung beider Fahrzeuge zu hohen Betriebskosten. Es ist zu erwarten, dass sobald ein standardisierter und serienreifer Transportroboter entwickelt sein wird und Skaleneffekte durch eine große Anzahl von Robotern zu niedrigeren Anschaffungskosten bei Komponenten führen, die Kosten deutlich reduziert werden. Ferner ist damit zu rechnen, dass zukünftig eine menschliche Begleitung der Fahrzeuge nicht mehr erforderlich sein wird. Alsdann werden die Betriebskosten signifikant sinken. Sobald diese Effekte wirken, ist damit zu rechnen, dass der Einsatz von Transportrobotern im öffentlichen Straßenverkehr durchaus wirtschaftlich sein kann. Insgesamt zahlen beide Einschätzungen auf das Ziel ein, zusätzliche Deckungsbeiträge im ÖPNV zu erwirtschaften sowie den innerstädtischen Lieferverkehr stadtverträglicher und effizienter zu gestalten. Folgend werden die dadurch identifizierten Potenziale aufgezeigt:

### *Förderung der Wirtschaftlichkeit des ÖPNV*

Die kombinierte Gütermithnahme im Personennahverkehr ist durch den »kombi-BUS« in der Uckermark bereits erfolgreich erprobt und dauerhaft umgesetzt. Was fehlt ist die automatisierte Verknüpfung. Dieser Punkt wird im Projekt TaBuLa-LOG aufgegriffen. Es wird ermöglicht, dass die im Rahmen von TaBuLa-LOG entwickelten Fahrzeug(-komponenten) in einem größeren Rahmen in der Stadt Lauenburg/Elbe eingesetzt werden.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes wurden keine Entgelte erhoben. Bei der realen Implementierung einer geteilten Personen- und Güterbeförderung wäre dies anders. Ferner können die erprobte Strecke als auch Lieferbeziehungen ausgeweitet werden. Demnach entstehen zusätzliche Deckungsbeiträge für den ÖPNV im ländlichen Raum bei gleichbleibenden Kosten. Hiermit kann die Verfügbarkeit von öffentlicher Mobilität sichergestellt und ggf. erweitert werden.

Denkbar wäre auch, Transportroboter für die automatisierte Auslieferung von Gütern im konventionellen ÖPNV auszuprobieren. Eine direkte Überführung der beiden automatisierten Prozesse oder der Roboterlieferung mithilfe des konventionellen ÖPNV in den Regelbetrieb gilt jedoch nicht als Ziel des Projektes, da hier weitere Entwicklungen und Testläufe vonnöten sind.

Sowohl bei der Nutzung des konventionellen ÖPNV als auch bei der Nutzung des automatisierten Shuttleverkehrs könnten vorhandene Kapazitäten mehr ausgelastet werden und bei gleichbleibenden Kosten des ÖPNV die Umsätze gesteigert werden.

### *Wirtschaftlichkeit für (Logistik-) Unternehmen*

Für Unternehmen könnte der Einsatz von Transportrobotern für den Transport von Gütern zukünftig wirtschaftlich sinnvoll sein. Insbesondere im ländlichen und kleinstädtischen Raum gilt es, hohe Distanzen zwischen den einzelnen Zielen zu überwinden. Diese Fahrten mit zum Teil hohen Umwegen mit einem eigenen PKW und Mitarbeitenden durchzuführen, ist wirtschaftlich in vielen Fällen unattraktiv. Es ist zu erwarten, dass die Nutzung von vorhandenen ÖPNV-Kapazitäten ökonomisch sinnvoller und attraktiver ist.

### *Förderung der Wirtschaft durch potenziell neues Gütertransportangebot*

Im ländlichen oder kleinstädtischen Raum könnte die Möglichkeit zur Auslieferung mithilfe eines Transportroboters zu Angebotsenerweiterung und die Entlastung bzw. Unterstützung regionaler Erzeuger führen: Für kleine Unternehmen ohne eigenen Lieferdienst, aber individuellen Transportanforderungen, könnte der automatisierte Gütertransport eine attraktive Möglichkeit sein, um ihr Kundenangebot attraktiver zu gestalten und ihre Produkte in einen breiteren Markt zu verkaufen. Diese Förderung müsste vermutlich kommunal unterstützt oder forciert werden.

### Beitrag zur Daseinsvorsorge

Wie zuvor bereits beschrieben, können durch die Verbindung von Personen- und Gütertransport potenziell weitere Deckungsbeiträge für den ÖPNV erwirtschaftet werden. Dieses Potenzial ermöglicht eine Unterstützung der Bereitstellung von Mobilität im Rahmen der Daseinsvorsorge. So ist es vor allem im ländlichen und suburbanen Raum eine große Herausforderung für die Kommunen, einen wirtschaftlich neutralen ÖPNV außerhalb der Schülerbeförderung bereitzustellen. Je peripherer die Strukturen werden, desto größer wird diese Herausforderung. Durch zusätzliche Deckungsbeiträge können potenziell Angebote erhalten und möglicherweise sogar ausgebaut werden. Auch die Gütermithnahme von Lebensmitteln oder ähnlichen Artikeln zur Daseinsvorsorge können durch einen geteilten Personen- und Gütertransport ermöglicht werden.

### Akzeptanz und Umsetzung

Zu den Untersuchungen der Akzeptanz wird auf das Kapitel 2.5.2 verwiesen. Die Umsetzung des geteilten Personen- und Gütertransportes wird eingehend in Kapitel 2.4.5 dargestellt.

### 2.5.6 Evaluation der aufgebauten Transportroboter

Zur Evaluation des Transportroboters werden im Folgenden die Stärken und Schwächen dargestellt, die sich unter Betrachtung der Testszenarien ableiten lassen. Darauf aufbauend können Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

#### Stärken

Der Transportroboter ist mit einem Ladungsraum für einen genormten und wechselbaren Ladungsträger ausgestattet. Dadurch ist der Einsatz des Roboters für sämtliche Anwendungsfälle gewährleistet. Die relativ geringe Größe des konstruierten Roboters ermöglicht außerdem den Transport durch Einzelpersonen mithilfe von Pkw sowie den kombinierten Personen- und Gütertransport innerhalb des ÖPNV (Shuttle). Weiterhin wurde eine kommerziell erhältliche Roboterplattform als Fahrgestell genutzt. Der konstruierte Transportroboter verfügt weiterhin über eine deutschlandweite Genehmigung, die Testfahrten und eine weitere Erprobung im öffentlichen Verkehrsraum ermöglicht.

Die Gestaltung der einzelnen Teilsysteme ermöglicht ebenfalls eine weitere Verwendung als Basis für zukünftige Entwicklungen. So können die entwickelten Not-Stopp Mechanismen in Zusammenhang mit den Fail-Safe Motoren sowie Benutzerschnittstellen (Display & App) auf Neuentwicklungen übertragen werden. Auch die auf einer sicherheitsgerichteten State-Machine basierende Steuerungssoftware ist leicht um zusätzliche Funktionalitäten erweiterbar.

Hinsichtlich der verbauten Recheneinheiten lassen sich freie Rechenkapazitäten identifizieren. Diese können für eine Erweiterung der Automatisierung des Roboters verwendet werden. So können beispielsweise mithilfe des Nvidia Jetson Xavier Rechners weitere Computer Vision Funktionalitäten realisiert werden. Darüber hinaus erfolgte die Entwicklung der Steuerungssoftware rein auf Basis von Open Source Software (Linux, ROS).

#### Schwächen

Der Transportroboter hat zu Teilen Probleme mit der Fahrstabilität. Auf unebenen Böden ist das Fahrverhalten in Ermangelung einer Federung unruhig. Bei starker Beschleunigung oder Bremsung auf Wegen mit hoher Steigung kommt es auf Grund des hohen Gewichtes und des ungünstigen Schwerpunktes zu der Gefahr des Kippens. Für die Einfahrt in einen Bus des ÖPNV ist der Transportroboter auf die gleichen Kriterien wie Rollstuhlfahrende hinsichtlich Neigung und Wendeflächen angewiesen, so dass ein Zu- und Ausstieg nur an barrierefreien Haltestellen möglich ist. Ein Überwinden von Stufen oder Bordsteinen ist nicht möglich, was Ziele und Wege einschränkt.

Die Prototypplattform bringt auch einige Beschränkungen mit sich. So ist die maximale Payload der Roboterplattform durch den Aufbau bereits erreicht, was zu einer relativ geringen Zuladungskapazität von 3 kg führt. Weiterhin sorgt der begrenzte Bauraum der Jackal Plattform für eine ungünstige Anordnung der Komponenten im Aufbau des Roboters. Diese führt auch zu der Notwendigkeit einer aufwendigen durchgehenden Kupfer-/Aluschirmung, die vermieden werden könnte, wenn alle Komponenten in der Basis platziert würden. Eine weitere Folge der Schirmung ist die schlechte Reparaturzugänglichkeit. Außerdem ist auch die Realisierung modularer Aufbauten erschwert, da nach dem Austausch des Aufbaus die Schirmung erst wiederhergestellt werden müsste.

Der Kauf der Roboterplattform macht Anpassungen schwer, da gewisse unveränderliche Bedingungen in Kauf genommen werden müssen. Dazu gehören unter anderem der unveränderliche kurze Radstand und die Abmessungen der Basis, die die vorhergegangenen Probleme deutlich beeinflussen. Es fehlt auch ein Einblick und der direkte Zugriff auf die Motorcontroller. Insgesamt wird die Risikobewertung durch die hochintegrierte und intransparente Elektronik erschwert, genauso wie die Umsetzung der TÜV Anforderungen. Selbiges gilt für die verbaute Sensorik. Diese ist leider nicht in Form von Automotive Standardkomponenten verfügbar, was die Erfüllung der TÜV-Anforderungen weiter erschwert hat.

Eine weitere Schwäche der Roboterplattform besteht in der bisher erfolgten Teilautomatisierung des Roboters. Es herrscht weiterhin Bedarf von Begleitpersonal zur durchgehenden Überwachung, was den Nutzen einer solchen Plattform im Realbetrieb stark einschränken würde. Weiterhin sind auch die begrenzten Einsatzbedingungen eine Schwäche, bisher ist der automatisierte Betrieb nur bei Tageslicht und passender Wetterlage (trocken) möglich. Bisher ist auch keine automatische Erkennung der Betriebsgrenzen, wie zum Beispiel die Bewertung der Lokalisierungsqualität, möglich. Auch die Robustheit der automatisierten Funktionalität ist noch ausbaufähig und erfordert weitere Testfahrten. Diese Aspekte machen häufige Eingriffe des Begleitpersonals notwendig.

Die Kommunikation des Transportroboters mit seiner Umgebung ist eingeschränkt. Da keine Unterscheidung von begegnenden Menschen, Rollstuhlfahrenden, Kinderwagen, Radfahrenden oder Hunden erfolgt, ist eine entsprechende individuelle Reaktion auf zu erwartende Ereignisse noch nicht möglich. Ebenso besteht noch keine Möglichkeit, dass der Transportroboter seinem fremden Gegenüber (außerhalb der Übergabepunkte) Mitteilungen oder Interaktionen zu vermitteln.

### 3 Tabellarische Zusammenfassung

Im Folgenden werden die geleisteten Arbeiten nochmals bezogen auf die Arbeitspakete und größten Kostenpositionen tabellarisch zusammengefasst.

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

Die nachfolgende Tabelle geht mit Bezug auf die im Antrag geplanten Ergebnisse auf das erzielte inhaltliche Ergebnis zum Projektende je Arbeitspaket (AP) ein.

**Tabelle 6:** Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens A (TUHH)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
<b>AP 1:</b> Ermittlung und Analyse der logistischen Abläufe und Identifizierung möglicher Schnittstellen von Personen- und Gütertransport in der Stadt Lauenburg/Elbe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ermittlung eines Anwendungsfalls und Visualisierung der relevanten logistischen Prozesse mithilfe von BPMN-Diagrammen</li> </ul>
<b>AP 1:</b> Abgestimmter Use-Case für die Logistik und den Roboterbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Anwendungsfall: Transport interne Behördenpost</li> </ul>
<b>AP 1:</b> Anforderungsliste für einen Transportroboter	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ermittlung von Anforderungen mithilfe interner Workshops und Validierung durch Experteninterviews</li> <li>▶ Erstellung einer Anforderungsliste, gegliedert nach Anwendungsfall und Genehmigung</li> </ul>
<b>AP 1:</b> Anforderungsliste für eine App zur Beauftragung der Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ App-Konzept (Wireframes und Kommunikationsprotokoll) und Server-Konzept</li> </ul>
<b>AP 1:</b> Rechtliche Sicherheit und nächste Schritte bezüglich des Roboterbetriebs und der Genehmigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Anzuwendender Rechtsrahmen und Einordnung der Transportroboter ins Straßenverkehrsrecht</li> </ul>
<b>AP 2:</b> Entwicklung eines funktionsfähigen, mobilen und automatisierten Transportroboters zum Einsatz im öffentlichen Straßenraum	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Zwei funktionsfähige und genehmigte Transportroboter (manuelle + automatisierte Fahrt) sowie ein größerer Transportroboter-Prototyp; beides für die Nutzung im öffentlichen Raum</li> </ul>
<b>AP 3:</b> Bereitstellung der notwendigen Rahmenbedingungen zur Implementierung des Transportroboters in den bestehenden automatisierten Shuttle-Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Nutzung bestehender Infrastruktur aus dem Projekt TaBuLa</li> <li>▶ Einrichtung der Gebäude für die Shuttle sowie für den Transportroboter</li> <li>▶ Implementierung zusätzlicher Haltestellen und Verkehrszeichen in Lauenburg/Elbe</li> <li>▶ Abstimmungen mit den Verkehrsbetrieben</li> <li>▶ Einrichtung einer barrierefreien Vernetzung sowie weitere V2I-Vernetzung</li> <li>▶ Organisation der Streckeninstandhaltung</li> </ul>



Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
<p><b>AP 3:</b> Implementierung des entwickelten automatisierten Transportroboters in den bestehenden automatisierten Shuttle-Betrieb</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Entwicklung einer sicherheitsorientierten Robotersteuerung inkl. automatisierter Fahrfunktion zur Fahrt in Lauenburg (manuell und automatisiert)</li> <li>▶ Integration in den bestehenden Shuttle-Betrieb (manuelle Fahrt)</li> <li>▶ Integration in den bestehenden Shuttle-Betrieb (automatisierte Fahrt): teilweise (Befahren des Shuttles erprobt – keine automatisierten Tests im Fahrgastbetrieb)</li> </ul>
<p><b>AP 4:</b> Erprobung der drei Testszenarien mit den vorherrschenden Güterströmen im Zusammenspiel mit dem automatisierten Transportroboter im öffentlichen Raum unter Realbedingungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ermittlung und Erprobung drei Testszenarien (manueller, shuttlebasierter, automatisierter Transport) im Realbetrieb</li> </ul>
<p><b>AP 5:</b> Detaillierte Analyse und Bewertung der entwickelten logistischen Abläufe unter Berücksichtigung der eingesetzten Technologien in dem bestehenden Mobilitätssystem sowie Beurteilung der Akzeptanz der Abläufe im öffentlichen Personennahverkehr und Ableitung von Maßnahmen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Auswertung der Begleitforschung hinsichtlich der logistischen Abläufe und Störungen</li> <li>▶ Durchführung und Auswertung der drei Befragungen der Bevölkerung, Shuttlepassagiere und im Rahmen des ITS-Public Day hinsichtlich Erwartungen, Einstellungen und Ängsten</li> <li>▶ Durchführung und Auswertung der Experteninterviews mit neun Fachkundigen zur Ermittlung potenzieller Anwendungsfelder und Anforderungen an den Robotereinsatz</li> <li>▶ Durchführung einer Prozesskostenrechnung mit integrierter TCO zur Ermittlung der ökonomischen Veränderungen durch einen kombinierten Personen- und Gütertransport</li> </ul>
<p><b>AP 5:</b> Evaluation des aufgebauten Transportroboters; Evaluation des Roboterbetriebs in den verschiedenen Testszenarien; Evaluation der Schnittstellen zu Kunden und Shuttle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Evaluation und Dokumentation der Erfahrungswerte beim Aufbau und Betrieb der Transportroboter</li> </ul>
<p><b>AP 6:</b> Identifikation von Anforderungen an den Betrieb von Transportrobotern; Ableitung von Handlungsempfehlungen für weitere Anwendungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Identifikation von weiteren Anforderungen und Ableitung von Handlungsempfehlungen auf Basis des Testbetriebes der Roboter</li> </ul>
<p><b>AP 7:</b> Öffentlichkeitsarbeit und ITS World Congress</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Zahlreiche Veranstaltungen wurden erfolgreich durchgeführt. Im täglich laufenden Betrieb konnten sich Interessierte informieren und mit der Technik vertraut machen. Der ITS fand unter umfangreicher Beteiligung des Teams erfolgreich statt.</li> </ul>
<p><b>AP 8:</b> Projektkoordination</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Das Projekt konnte unter sehr guter Zusammenarbeit und Erfüllung der Ziele abgeschlossen werden.</li> </ul>

**Tabelle 7:** Verwendung der Zuwendung des Teilvorhabens B (Kreis)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
<b>AP 1:</b> Umfeldanalyse der Stadt Lauenburg/Elbe im Rahmen der Systemanalyse Mobilitäts- und Logistikanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Umfeldanalyse der Stadt Lauenburg/Elbe unter Berücksichtigung der vorhandenen Daten, der gegebenen Infrastruktur und der gesammelten Erfahrungen aus dem vorangegangenen Projekt TaBuLa sowie unter Einbeziehung der VHH für den Shuttlebetrieb.</li> </ul>
<b>AP 2:</b> Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur für einen mobilen Transportroboter	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Neben den durch TaBuLa-LOG vorhandenen Infrastrukturmaßnahmen weitere notwendige Infrastruktur bereitgestellt: unter anderem eine gesicherte Gartenhütte gegen Vandalismus und Wettereinflüsse samt Lademöglichkeit, befestigte und begradigte Zuwegung sowie abgesenkte Bordsteine</li> </ul>
<b>AP 2:</b> Beantragung und Beantwortung genehmigungsrelevanter Fragestellungen in Abstimmung mit den Beteiligten für Transportroboter	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Genehmigung für manuelle Fahrt des Transportroboters im öffentlichen Straßenraum auf Gehwegen für die Stadt Lauenburg/Elbe in den relevanten Einsatzgebieten vorhanden</li> </ul>
<b>AP 3:</b> Unterstützung bei Untersuchung geeigneter Logistikströme für Betriebskonzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Use-Case gefunden: Transport von interner behördlicher Post (Hauspost) und Prozesse abgebildet</li> </ul>
<b>AP 3:</b> Herstellung nötiger Infrastruktur für den Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Notwendige Infrastruktur hergestellt: vorhandene Infrastrukturmaßnahmen aus dem Projekt TaBuLa weiter genutzt, Rampen an Bushaltestellen für den sicheren Einstieg des Transportroboters umgesetzt</li> </ul>
<b>AP 4:</b> Begleitung des Shuttlebetriebes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Shuttlebetrieb begleitet und mit Einschränkungen durch Lockdown und COVID19-bedingte Ausfallzeiten sichergestellt</li> </ul>
<b>AP 6:</b> Aufbereitung von Projektergebnissen und Übertragbarkeiten auf andere Anwendungsfelder	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Projektergebnisse sind aufbereitet und potentielle zukünftige Handlungsfelder identifiziert</li> </ul>
<b>AP 7:</b> Öffentlichkeitsarbeit und ITS World Congress	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Bevölkerung und breite Öffentlichkeit durch Öffentlichkeitsarbeit informiert: Pressemitteilungen, Webseite, Videos, Veranstaltungen, etc.</li> <li>▶ Vorbereitungen des ITS World Congress unterstützt, aber kreisseitige Teilnahme und Demonstration der Projektergebnisse eingeschränkt (Vertretung wegen Krankheit)</li> </ul>
<b>AP 8:</b> Unterstützung bei Projektkoordination	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Unterstützung bei Projektkoordination zur termin- und budgetgerechten Durchführung des Projektes erfolgt</li> </ul>

### 3.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die nachfolgende Tabelle beschreibt alle größeren externen monetären Positionen des Projektantrages und die abschließende inhaltliche Verwendung und Ergebniserzielung zum Projektabschluss. Personalkosten der beiden Projektpartner selbst werden nicht aufgeführt.

**Tabelle 8:** zahlenmäßiger Nachweis

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
TUHH 0835	Lfd. Nr. 1 Juristische Beratung	Die juristische Beratung erfolgte zur Klärung der Vertragsverhältnisse und Haftungen zwischen verschiedenen Partnern und Unternehmen inkl. Konsequenzen aus automatisierter Fahrweise für die Verhältnisse zwischen Fahrzeugentwickler (Shuttle/Roboter), Betreiber, Versicherung und Hersteller von Komponenten oder Entwickler von Programmierleistungen. Ferner mussten Datenschutzvereinbarungen hinsichtlich der Speicherung von Daten aus den automatisierten Fahrzeugen an die aktuelle Rechtslage angepasst werden. Aufgrund der Vorarbeiten im Projekt TaBuLa hielt sich der Aufwand im Rahmen.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 2 API-Controll-Schnittstelle für Shuttle	Die Schnittstelle wurde implementiert, wodurch ein sehr genauer Echtzeitzugriff auf den Standort und weitere Betriebsinformationen der Shuttle möglich waren. Hieraus wurden Aktivitäten wie die Standortanzeige auf der Homepage oder die Ansteuerung von Infrastruktur gesteuert.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 3 Genehmigung Roboterplattform und Shuttle	Zusätzliche Beauftragung einer weiteren Abteilung des TÜV Nord Mobilität im Bereich Automotive Electronics (ursprünglich nicht im AZA vorgesehen): Unterstützung der Normenarbeit durch Workshops sowie begleitendes und abschließendes Assessment der im Rahmen der Normenarbeit verfolgten Vorgehensweise sowie der erstellten Arbeitsprodukte. Bezüglich der Shuttle erfolgte eine Zulassung des zweiten Shuttles und wiederholt die Überprüfung durch einen Sachverständigen des TÜV Nord bei Softwareupdates und kleineren Veränderungen der Strecke. Die Kosten entwickelten sich hier deutlich geringer als erwartet aufgrund von Synergien aus dem Vorgängerprojekt.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 4-6 Bereitstellung der Shuttle	Die Fortsetzung des TaBuLaShuttle-Betriebes konnte wie geplant fortgesetzt werden. Es kam zu zeitlichen und kapazitiven Restriktionen durch die COVID-19-Pandemie, der Betrieb konnte jedoch automatisiert auf der Strecke 3 bis 30.11.2021 aufrecht erhalten werden und ermöglichte neben dem kombinierten Transport auch einen täglichen Fahrgastbetrieb im ÖPNV in Lauenburg/Elbe.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 7 Lichtsignalanlagen	Die Road-Side Units an den Lichtsignalanlagen wurden weiter betrieben und neue Softwareversionen getestet. Aufgrund mangelnder Kompatibilität des Shuttleherstellers im ETSI-Standard konnte die ÖPNV-Beschleunigung in Verbindung mit Prognosedaten der Lichtsignalanlage bis zum Ende des Betriebszeitraumes nicht mit den Shuttles umgesetzt werden.

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
TUHH 0835	Lfd. Nr. 8 Beratungsleistungen zu automatisierten und kombinierten Verkehren	Zusammen mit der kostenneutralen Projektverlängerung um sechs Monate mussten weitere Kosten eingestellt werden, da die längere Bearbeitungsdauer erhöhten Personalaufwand verursacht hat.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 9 Laborwerkstatt	Die Fertigung roboterspezifischer Bauteile konnte abweichend in der institutseigenen Werkstatt geleistet werden. Dies war möglich durch die Beschaffung von spezifisch zugeschnittenem Material sowie durch eigene Herstellung im 3D-Druck-Verfahren.
TUHH 0835	Lfd. Nr. 10 App-Entwicklung	In Abweichung zum AZA wurde die Entwicklung der App nach Umwidmung in Eigenleistung durchgeführt. Aufgrund einer Repriorisierung zugunsten der umfangreichen Genehmigungsprozesse der Transportroboter wurde ein App-Prototyp bisher nur im Labormaßstab getestet.
TUHH 0850	Lfd. Nr. 1 Be- und Entladestation	Die Übergabe der transportierten Güter erfolgte – abweichend zur ursprünglichen Planung – innerhalb der Verwaltungsgebäude. Daher konnte auf den Aufbau von Übergabepunkten verzichtet werden.
TUHH 0850	Lfd. Nr. 4 Roboter/Sensorik/ Zubehör	Es wurden drei Transportroboter entwickelt und mit Sensorik und Rechnerkapazität ausgestattet. Daneben wurde eine Workstation für das Training neuronaler Netze beschafft.
TUHH 0850	Lfd. Nr. 5 ITS-Messestand	Der Messestand auf dem World Congress on Intelligent Transport Systems in Hamburg vom 11.-14.10.2021 konnte erfolgreich realisiert werden und war durch Unterstützung der Freien und Hansestadt Hamburg günstiger als geplant.
Kreis 0835	Lfd. Nr. 1 Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH	Der regelmäßige Shuttlebetrieb stellte eine Grundvoraussetzung für das Ausprobieren des kombinierten Personen- und Gütertransportes dar. Die Auslieferung der Sendungen und Päckchen durch den Transportroboter Laura musste der Shuttlebetrieb gewährleistet sein. Dies erfolgte durch die VHH. Maßgeblich aufgrund der COVID-19-bedingten Ausfallzeiten ist ein erheblicher Anteil an finanziellen Mitteln in dieser Position eingespart worden.
Kreis 0835	Lfd. Nr. 1 (neue Pos.) Leitstellenaufgaben	Aufgrund erheblicher Aufwände zur Disponierung im laufenden Betrieb (Shuttle, Transportroboter, Empfänger und Sender sowie täglich eingesetztes Personal) wurde eine Leitstelle im Sinne einer zu allen Betriebszeiten erreichbaren Person nachträglich eingerichtet, die für effizientere Abläufe und Reduzierung von Störungen und besseren Informationsfluss gesorgt hat. Die Kosten konnten durch übrig gebliebene Mittel aus der Position 0835 für die Verkehrsbetriebe abgedeckt werden.
Kreis 0835	Lfd. Nr. 2 Versorgungsbetriebe Elbe GmbH (VBE)	Der assoziierte Partner VersorgungsbetriebeElbe GmbH (VBE) stellte eine geeignete Garage samt Ladeinfrastruktur und Stromversorgung zentral in Lauenburg für die elektrobetriebenen Shuttles gegen Miete und Deckung von Stromkosten zur Verfügung.

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
Kreis 0835	Lfd. Nr. 3 Stadt Lauenburg/Elbe	Die Stadt Lauenburg/Elbe hat bei der Vorbereitung, Beschilderung, Einrichtung von Parkverbotszonen und Ausrüstung von Veranstaltungen unterstützt (z.B. ITS-World-Congress, Maus TürÖffner Tag). Hierbei sind vergleichsweise geringe Kosten angefallen.
Kreis 0850	Lfd. Nr. 1 Marketingmaßnahmen	Für das Projekt TaBuLa-LOG und insbesondere im Rahmen des ITS-World-Congress wurden Film- und Videoaufnahmen gemacht. Außerdem wurde ein TaBuLa-LOG Imagefilm vom Transportroboter Laura und den Teammitgliedern des Projektes gedreht und in unterschiedlichen Versionen (deutsch, englisch, lang, kurz), der online und im Rahmen vieler Veranstaltungen gezeigt werden konnte. Der Imagefilm ist online unter <a href="http://www.tabulashuttle.de">www.tabulashuttle.de</a> abrufbar. Ferner wurde ein animierter Erklärfilm produziert und noch einmal adressatengerecht geschnitten und auf Englisch übersetzt, so dass auch internationales Publikum des ITS-World-Congress das Video verstehen konnte.
Kreis 0850	Lfd. Nr. 2 Infrastrukturmaßnahmen	Infrastrukturmaßnahmen waren vor Ort in Lauenburg erforderlich, damit der Transportroboter Laura sich in Lauenburg fortbewegen und sicher vor Vandalismus und anderen äußeren Einflüssen wie beispielsweise dem Wetter geschützt werden konnte. Zu den ergriffenen Maßnahmen gehörten Anpassungen von Bürgersteig- und Wegabschnitten, damit Laura diese unfallfrei überwinden konnte sowie den Ausbau einer Gartenhütte für die »Übernachtung« und das Laden erforderlich waren. Die Aufwendungen fielen aufgrund der Vorleistungen aus dem Projekt TaBuLa relativ gering aus, da infrastrukturelle Voraussetzungen für das Shuttle bereits vorgenommen wurden.
Kreis 0850	Lfd. Nr. 2 Infrastrukturmaßnahmen	Im Rahmen digitaler Infrastrukturen wurde eine Vernetzung an den Lichtsignalanlagen und Haltestellen installiert. Der Partner Yunex Traffic sorgte dafür, dass Kreuzungen, Haltestellen und Fahrzeuge mit Bluetooth-Komponenten ausgestattet wurden, die eine Kommunikation mit den Transportrobotern sowie Menschen mit (Seh-)Behinderung ermöglichen.

## **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Grundsätzlich besteht die Motivation beider Projektpartner darin, neue Technologien zu erproben und weiter zu entwickeln, greifbar zu machen und mit Fachpublikum und Öffentlichkeit in den Austausch zu gehen. Hierzu sind weder bei TUHH noch dem Kreis Eigenmittel in dem Umfang vorhanden, um solch aufwändige und wirksame Reallabore zu realisieren. Die Ausführung des Projektes erfolgte im Einklang mit den Projektzielen und war eng am Projektplan des Antrags ausgerichtet. Verschiedene notwendige Anpassungen sind in enger Abstimmung mit dem Projektträger erfolgt.

### **4.1 Systemanalyse Mobilitäts- und Logistikanforderungen**

Im ersten Arbeitsschritt des Projektes erfolgte die Identifizierung von Potenzialen für die Integration von Gütertransporten in die bestehende Testumgebung des automatisierten Shuttle-Betriebes in der Stadt Lauenburg/Elbe. Dieser Prozess war notwendig, um grundsätzlich zu verstehen, welche Personen und Institutionen für welchen Zweck Transportroboter als Hilfsmittel mit Potenzial ansehen und um einen sinnvollen und »echten« Anwendungsfall im Projekt abzubilden. Mit dem Transport der Hauspost für die Stadt Lauenburg/Elbe konnte ein bestehender Prozess für den Projektzeitraum automatisiert werden, was aus dem Projekt heraus (neben dem Ziel von Forschung und Entwicklung) auch einen realen Nutzen zugetragen und die allgemeine Akzeptanz gesteigert hat.

### **4.2 Entwicklung eines mobilen, automatisierten Transportroboters**

Wurden vor dem Projekt hauptsächlich nur automatisierte Roboter für die Intra-logistik erforscht, erfolgte über das Projekt TaBuLa-LOG erfolgreich der Sprung aus dem Labor in den öffentlichen Verkehrsraum. Der Einsatzort Lauenburg/Elbe stellt durch die speziellen Gegebenheiten vor Ort (Altstadt, Kopfsteinpflaster) eine besonders herausfordernde Einsatzumgebung dar. Hierdurch wurden neue Anforderungen an Transportroboter identifiziert, die bisher aus der Literatur und anderen Projekten nicht abzuleiten waren. Die drei im Projekt gebauten Transportroboter wurden am 30.06.2022 samt Zubehör kostenneutral an das Folgeprojekt TaBuLa-LOGplus übergeben, welches ebenfalls vom BMDV gefördert wird, und in dessen Rahmen die vorhandene Technik weiterentwickelt wird.

### **4.3 Implementierung der Logistik-Schnittstelle in das Betriebskonzept des automatisierten Shuttles**

Um die entwickelten Transportroboter-Plattformen manuell, vor allem aber automatisiert in das Betriebskonzept des Shuttles integrieren zu können, bedarf es einer übergeordneten Robotersteuerung sowie verschiedener Sub-Systeme, die einzelne Teilaufgaben der Fahrfunktion implementieren. Zur Kernaufgabe der übergeordneten Steuerung zählt es, die Durchführung der einzelnen Teilschritte eines Transportauftrags zu koordinieren. Eine weitere wesentliche Funktion ist aber auch, Mechanismen zur Reaktion auf Systemfehler oder eine manuelle Steuerungsübernahme durch Begleitpersonen bereitzustellen. Hierfür wurde eine neue Robotersteuerung auf Basis einer State-Machine entwickelt und implementiert, welche genau diese Funktionalitäten mit Sicherheitsfokus ermöglicht. Im Bereich der Sub-Systeme wurden vorhandene Algorithmen für die verschiedenen Umgebungen des realen Einsatzumfelds untersucht, ggf. erweitert und - als wesentliche Voraussetzung für eine Genehmigung - für die Nutzung im öffentlichen Raum validiert.

### **4.4 Testbetrieb des automatisierten Shuttles und des automatisierten Transportroboters**

Auch wenn längst nicht alle Prozesse in Lauenburg/Elbe automatisiert werden konnten, resultierte aus dem Betrieb der beiden für den öffentlichen Verkehrsraum genehmigten Transportroboter im Reallabor ein enormer Wissensgewinn für weitere Entwicklung und alle Projektbeteiligten sowie die Lehre an der TUHH und den Austausch von Wissen mit Dritten. Die Kombination von zwei verschiedenen automatisierten Verkehrsträgern blieb auch während der Projektlaufzeit einzigartig. Das Projekt hat dazu beigetragen, dass die Verkehrsbetriebe aus dem ÖPNV einen Blick auf neue Geschäftsmodelle werfen, denen mit dem Projekt und der zunehmenden Automatisierung neue Chancen eines höheren Kostendeckungsgrades aufgezeigt werden können. Auch wenn der real durchgeführte kombinierte Anwendungsfall in Lauenburg/Elbe in seinem Umfang begrenzt war, ergaben sich viele Antworten auf bestehende und neue Fragestellungen hinsichtlich technischer und rechtlicher Schnittstellen zwischen den immer mehr werdenden Beteiligten. Die kostenneutrale Projektverlängerung sowie das Nachfolgeprojekt TaBuLa-LOGplus profitierten von den bereits im Projekt gesammelten Erfahrungen und der problemlosen Verlängerung bestehender Kooperationen und Verträge. Somit konnten zeitintensive Aspekte wie eine erneute Erarbeitung von Ausschreibungs- und Verhandlungsunterlagen mit Partnern im Reallabor entfallen.

## 4.5 Auswertung der Testszenarien

Neben der Entwicklung und Erprobung neuer Technologien war auch die Auswertung der Testszenarien von hoher Relevanz für den Projekterfolg. Die Auswertung zeigte qualitativ und quantitativ die logistischen Veränderungen durch den Einsatz eines Transportroboters im Realbetrieb. Es war im Projekt zudem erforderlich, neben den logistischen Veränderungen auch die Akzeptanz hinsichtlich Transportroboter, eines autonomen Shuttlebetriebes und eines kombinierten Personen- und Gütertransports zu erheben, damit nicht nur die Veränderungen in den beteiligten Institutionen deutlich werden, sondern auch die Veränderungen innerhalb der Bevölkerung. Zudem wurde eine ökonomische Kostenanalyse des dritten Szenarios (»Automatisierter Transport«) im Vergleich zur Ausgangssituation durchgeführt und ausgewertet. Die gesammelten Ergebnisse im Projekt liefern für zukünftige Projekte sowie für das Nachfolgeprojekt TaBuLa-LOGplus wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse hinsichtlich der prozessualen, gesellschaftlichen und ökonomischen Veränderungen durch den Einsatz von Transportrobotern in einem kombinierten Personen- und Gütertransport.

## 4.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Anwendungsfelder

Im Projekt TaBuLa-LOG wurde aus den in Kapitel 2.1.2 dargelegten Gründen ein bestimmter Anwendungsfall ausgewählt und erprobt: Der Transport der Hauspost der städtischen Verwaltung in Lauenburg/Elbe. Weitere Anwendungsfelder wurden beispielsweise in den Workshops mit Expert\*innen identifiziert (siehe Kapitel 2.5.3), z. B. Auslieferung von Medikamenten, Lieferservice für Lebensmittel oder Essensbestellungen, Quartierslogistik. Da im Projektverlauf aufgrund der Rahmenbedingungen nur ein Anwendungsfall erprobt werden konnte, wäre die Erprobung oder Simulation anderer Wege und Güterkombinationen von Interesse, um weitere Erfahrungen zu sammeln. Gleichwohl konnten durch den ausgewählten Fall die zentralen Randbedingungen für die Umsetzung sowie damit verbundene Herausforderungen erkannt werden.

## 4.7 Öffentlichkeitsarbeit / ITS World Congress 2021

Die breit angelegte Öffentlichkeitsarbeit während der gesamten Projektlaufzeit sowie der ITS World Congress im Oktober 2021 haben zur Akzeptanz zum Einsatz von Transportrobotern beigetragen (siehe Kapitel 2.5.2). Die Möglichkeit, einen Transportroboter und ein automatisiert fahrendes Shuttle im Reallaborbetrieb erleben zu können sowie Pressearbeit, eine transparent gestaltete



Webseite, Videos und diverse Veranstaltungen sowie der aktive Austausch mit interessierten Personengruppen (siehe Tabelle 7) hat zum positiven Image des Projektes beigetragen und gezeigt, dass Fördermittel sinnvoll eingesetzt werden. Trotz erschwelter Umstände durch die COVID-19-Pandemie haben diverse digitale, persönliche und hybride Veranstaltungen, Workshops und der ITS World Congress stattgefunden, bei denen die breite Öffentlichkeit sowie Fachbesucher adressiert und über das Projekt und dessen Ergebnisse informiert werden konnten. Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt wurden aufbereitet und sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen einsehbar – auch noch lange nach dem Förderzeitraum. Hierdurch können auch andere Personengruppen die objektiven Ergebnisse nutzen, auf diesen aufbauen und damit die Forschung und Entwicklung weiter vorantreiben.

**Abbildung 56:** TaBuLaShuttle und Transportroboter Laura auf dem ITS World Congress 2021



von links nach rechts: Prof. Carsten Gertz, Prof. Heike Flämig, Jacqueline Maaß, Jana Purgander, Matthias Grote, Sandra Tjaden (alle TUHH) und Katharina Fegebank (Zweite Bürgermeisterin/Senatorin für Wissenschaft, Forschung, Gleichstellung und Bezirke der Freien und Hansestadt Hamburg) sowie Prof. Andreas Timm-Giel (Präsident der TUHH) und Prof. Jochen Kreutzfeldt (TUHH)

## 4.8 Projektkoordination

Die an der TUHH angesiedelte Projektkoordination hat den Zusammenhalt und die Kommunikation der Verbundpartner (bestehend aus Kreis und zwei Instituten der TUHH), den weiteren sieben assoziierten Partnern (Büro autoBus, LaLOG LandLogistik GmbH, Yunex GmbH (ehemals Siemens Mobility GmbH), Versorgungsbetriebe Elbe GmbH, Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH, E&K Automation GmbH, Stadt Lauenburg/Elbe) sowie unzähligen Nachunternehmern gewährleistet und für effiziente und zielgerichtete Bearbeitung gesorgt. Hinzu kamen alle Abstimmungen mit Genehmigungsbehörden, Dritten, Nachunternehmern, die externen Netzwerke und die Öffentlichkeitsarbeit. Neben zahlreichen Besprechungen und der Überwachung des Real-laborbetriebes wurden von der Projektkoordination in der Laufzeit ungefähr 12.000 projektbezogene E-Mails verarbeitet. Der Ansatz einer Stelle in Vollzeit bewährte sich und hat wesentlich zum Erfolg des Projektes (nach innen und außen) beigetragen.

Abbildung 57: Transportroboter Laura im TaBuLaShuttle während der Fahrt



## 5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Tabelle 9: Verwertung Teilvorhaben A (TUHH)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Studentische Arbeiten	Insgesamt konnten <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ vier Qualifikationsarbeiten in der Verkehrsplanung und Logistik und</li> <li>▶ acht Qualifikationsarbeiten in der Technischen Logistik</li> </ul> im Rahmen des Projektes abgeschlossen werden und die Studierenden in diesem Gebiet neue Qualifikationen erlangen.
Lehrveranstaltungen	Es erfolgten studentische Exkursionen ins Reallabor Lauenburg/Elbe und gewonnene Inhalte und Erkenntnisse konnten in die verschiedenen Lehrveranstaltungen eingebaut werden. Das Projekt wurde mehrfach im Rahmen des Zukunftstags (ehemals Girls Day) an der TUHH vorgestellt.
Erfahrungsaustausch	Umfangreicher Wissenstransfer/Austausch mit anderen Projekten (Projekte Reallab Hamburg, NAF-Bus Schleswig-Holstein, HEAT Hamburg, efeuCampus, verschiedene StartUps und Herstellern...)
Fachveröffentlichungen	Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes bis zum Ende der Projektlaufzeit am 30.06.2022 sechs Artikel in Fachzeitschriften veröffentlicht (siehe Kapitel 7.1). Weitere sind in Vorbereitung.
Fachkonferenzen	Siehe Auflistung diverser Veranstaltungen und Vorträge unter Kapitel 7.2.
Transportroboterplattform inkl. Softwareentwicklung	Die Transportroboterplattformen werden inkl. Hard- und Software kostenneutral in ein Folgeprojekt des BMDV überführt. Weitere Projekte profitieren von den Entwicklungen.

Tabelle 10: Verwertung Teilvorhaben B (Kreis)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Interaktion und Beteiligung von interessierten Personen	Insgesamt waren in den Projekten TaBuLa und TaBuLa-LOG 1.495 Personen persönlich und digital beteiligt. Die Interaktionen erfolgten in Form von Beteiligung in Workshops, Befragungen und Interviews.
Presseberichte	Bis zum Veröffentlichungszeitpunkt des Projektschlussberichtes wurden mindestens 179 Presseberichte rund um das Shuttle sowie den Transportroboter veröffentlicht.
Fachlicher Austausch mit anderen Projekten	Insgesamt haben sich Beteiligte aus 26 Projekten mit dem Schwerpunkt automatisiertes Fahren haben sich mit Projektmitgliedern fachlich ausgetauscht.
Fachvorträge	Im Rahmen des Projektes wurden 29 Fachvorträge mit unterschiedlichen Inhalten und Projektschwerpunkten gehalten.
Pressemitteilungen	Der Kreis Herzogtum Lauenburg hat insgesamt 24 Pressemitteilungen im Rahmen des Projektes veröffentlicht.
Fernsehberichte	Das Fernsehen hat insgesamt in mindestens 3 Fernsehausstrahlungen ausführlich über das Projekt berichtet. In mindestens weiteren 10 Fernsehbeiträgen wurde das Projekt erwähnt.
Veranstaltungen	Bei vier Veranstaltungen wurden mehr als 25.000 Personen über das Projekt informiert (vgl. auch Veranstaltungen unter 2.11).
ITS World Congress und Deutscher Ingenieurpreis	Im Rahmen des ITS World Congress 2021 wurde als eines der Leuchtturmprojekte auf internationaler Ebene das Projekt vorgestellt (vgl. auch 2.8.7). Zusätzlich wurden im Rahmen des sogenannten Public Days in der Stadt Lauenburg/Elbe den Fachbesuchern der Messe, geladenen Gästen und interessierten Besuchenden das Projekt zugänglich und der kombinierte Personen- und Güterverkehr im automatisiert fahrenden ÖPNV erlebbar gemacht. Das Projekt wurde 2021 mit dem Deutschen Ingenieurpreis in der Kategorie »Neue Mobilität« ausgezeichnet, der jedes zweite Jahr vergeben wird. Dies hat für nationale Aufmerksamkeit gesorgt, mehrere Fachartikel wurden in diesem Zusammenhang veröffentlicht (vgl. auch 2.11) und das Projekt wurde auf der Webseite des BSVI vorgestellt.
Videos	Im Rahmen von TaBuLa-LOG sind mehrere Videos entstanden und veröffentlicht worden: <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ein animiertes Erklärvideo</li> <li>▶ ein Imagefilm mit Interviews der Projektbeteiligten und bewegten Impressionen aus dem Projekt in mehreren Ausführungen (deutsch, englisch, lang, kurz)</li> <li>▶ zwei Streckenvideos, um die Fahrt im Shuttle erlebbar zu machen</li> <li>▶ eine filmische Zusammenfassung des ITS World Congress</li> </ul>
Webseite	Auf der Webseite <a href="http://www.tabulashuttle.de">www.tabulashuttle.de</a> lassen sich relevante Inhalte und Informationen zum Projekt ansehen und herunterladen.
Verstetigung des Personenbetriebes in automatisierten Shuttles	Der Betrieb von zeitweise zwei automatisiert fahrenden Shuttles in der Stadt Lauenburg/ Elbe konnte ausprobiert und erlebt werden. Dieses Angebot wurde von mehr als 4.600 Fahrgästen auf fast 7.500 km genutzt.
Automatisierter Gütertransport	Der Reallaborbetrieb von kombinierter Personen- und Güterbeförderung konnte in der Stadt Lauenburg/Elbe erlebt werden.

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

Das Projekt TaBuLa-LOG ist durch die kombinierte Personen- und Güterbeförderung in einer automatisierten Transportkette in einem Reallabor einzigartig, während es weltweit rund zwei Dutzend Projekte mit Transportrobotern und noch weit mehr Projekte mit automatisierten Shuttlefahrzeugen gibt.

### Fortschritte auf dem Gebiet der Entwicklung und Genehmigung von Transportrobotern

Folgende als relevant einzustufende Fortschritte wurden während der Projektlaufzeit bekannt:

- ▶ Im Rahmen des Projektes efeuCampus mit gleichnamigem Innovationszentrum in Bruchsal entwickelt der dortige Projektpartner SEW einen Lieferroboter, der im lokalen Testfeld erprobt werden soll. Zum jetzigen Zeitpunkt sind keine Veröffentlichungen dazu bekannt.
- ▶ Im Rahmen des UrBant-Projektes entwickelt das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen ein autonomes Transportfahrzeug für die Nutzung auf Gehwegen.
- ▶ Das Unternehmen StarShip Technologies testet mobile Lieferroboter in Hamburg Eimsbüttel.

### Fortschritte auf dem Gebiet der kombinierten Verkehre

Folgende als relevant einzustufende Fortschritte wurden während der Projektlaufzeit bekannt:

Seit erstmalig 2010 mit dem Modellvorhaben »kombiBUS Uckermark«, gefördert durch das Bundesministerium des Inneren (BMI), die konzeptionellen, juristischen und operativen Grundlagen für die Gütermittnahmen im straßengebundenen öffentlichen Personenverkehr (Linien- und Bedarfsverkehr) für ein neues Logistiksystem im ländlichen Raum geschaffen wurden (Sylvester 2017), nimmt das Interesse an diesem Thema nicht nur in der Fachwelt,

sondern insbesondere in der Wirtschaft spürbar zu. Dabei bleibt zurzeit der »kombiBUS Uckermark« jedoch die einzige operative Umsetzung, die den Betrieben im Landkreis Uckermark seit nun zehn Jahren eine verlässliche Güterbeförderung ohne Ausnahmegenehmigung anbietet.

Mittlerweile zeigt sich die folgende Entwicklung, die überwiegend von Machbarkeitsstudien oder geförderten Forschungsprojekten geprägt ist:

- ▶ Übertragung des o. g. Ansatzes auf schienengebundenen ÖPNV im urbanen Raum – hier dominieren insbesondere die sog. »CargoTram«-Lösungen, wie z. B. in Frankfurt am Main (Schocke et al. 2020). Interessanter ist indes das im Jahr 2021 gestartete Projekt »regioKArgo« in Karlsruhe, dessen Stadtbahn-System den urbanen und ländlichen Raum durch dessen Streckenführung im Bedienungsgebiet verbindet (o. A. 2020a). Aber auch die Hauptstadt Berlin hat eine Machbarkeitsstudie zur Nutzung des Berliner S-Bahn-Betriebes beauftragt, um neue Logistikkapazitäten für den städtischen Wirtschaftsverkehr zu heben und den Straßenverkehr zu entlasten (o. A. 2021a).
- ▶ Verstärkt wird jedoch an weiteren Lösungen für den ländlichen Raum erprobt – so folgte dem »kombiBUS«-Projekt die Machbarkeitsstudie »kombiBAHN Nordhessen« (o. A. 2020b), um aufzuzeigen, dass auch der Verkehrsträger Regionalbahn für die Gütermithnahme geeignet erscheint. Weitere Umsetzungen, die sich insbesondere auf den Busverkehr konzentrieren, sind in Vorbereitung und warten auf eine Fördermittelzusage.
- ▶ Das vor Kurzem gestartete mFUND-Projekt »CargoSurfer« umfasst die digitale Umsetzung der kombinierten Transportkette mit Personen- und Güterverkehr (o. A. 2021b). Nach Erprobung der operativen Machbarkeit gilt es nun, den Transportprozess zu digitalisieren, um insbesondere die Transparenz verfügbarer Ladekapazitäten herzustellen und die Senkung des administrativen Aufwandes zur Organisation von Transporten zu steuern. Mit einer KI-gesteuerten Vermittlungsplattform soll insbesondere eine Lösung für das Störungsmanagement erarbeitet werden.

## Fortschritte auf dem Gebiet der automatisieren Shuttle-Busse

Der Stand zum automatisierten Fahren mit kleinen Minibussen ist dem frei verfügbaren Abschlussbericht des Projektes TaBuLa (Gertz et al. 2021) zu entnehmen.

## 7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Projektverlauf wurden zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen publiziert sowie Veranstaltungen und Vorträge organisiert, die im Nachfolgenden aufgeführt werden.

### 7.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Tabelle 11: Veröffentlichungen Teilvorhaben A und B

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Requirements for robots in combined passenger/freight transport	09/2021	Hamburg International Conference of Logistics (HICL)	Lieferroboter versprechen vor allem auf kurzen Strecken in vielerlei Hinsicht einen Gewinn für die Logistik. Allerdings mangelt es an einem geordneten und systematisierten Überblick über die Anforderungen für ihren erfolgreichen Einsatz.
Infrastruktur für eine automatisierte Buslinie - Erfahrungen aus dem Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg (TaBuLa)	12/2021	VSVI Information	Mit den eingesetzten Fahrzeugen unter Einsatz der beschriebenen Infrastrukturmaßnahmen ist es gelungen eine zusätzliche Buslinie in Lauenburg/Elbe automatisiert und unfallfrei zu betreiben. Ein Regelbetrieb automatisierter Busse im ÖPNV ist ohne erhebliche Förderung noch nicht vorstellbar. Verschiedene Aspekte der Fahrzeugtechnik und -software bedürfen der Weiterentwicklung. Gleichzeitig muss es gelingen, die infrastrukturseitigen Maßnahmen auf tatsächlich notwendige Technik zu beschränken.
Infrastruktur im Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg	12/2021	Straße und Autobahn	Auf einer Ringbuslinie konnte auf 2,5 km Länge ein sicherer öffentlicher Fahrgastbetrieb realisiert werden. Insgesamt wurden im Laufe des Projektes rund 250.000 Euro für die Ertüchtigung der technischen Infrastruktur (Verkehrsanlagen, -technik, Energie und Kommunikation) aufgebracht. Um zukünftig das automatisierte Fahren im ÖPNV in einen Regelbetrieb überführen zu können, ist es nicht nur erforderlich, den Automatisierungsgrad hin zum autonomen Fahren zu steigern, sondern es muss auch gelingen, die infrastrukturseitigen Maßnahmen auf ein Minimum zu reduzieren.

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Einsatzpotenziale von Transportrobotern in der urbanen Logistik aus Anwendungsperspektive	03/2022	Journal für Mobilität und Verkehr	Automatisierte Roboter werden als eine potenzielle technologische Transportlösung in der urbanen Logistik gesehen. In diesem Artikel erfolgt eine explorative Analyse praktischer Einsatzpotenziale von Transportrobotern aus Sicht möglicher AnwenderInnen mithilfe von Leitfadeninterviews. Die Interviews zeigen, dass die Fachkundigen ein breit gefächertes Bild von Einsatzmöglichkeiten sehen, welche jedoch unterschiedlichen Anforderungen unterliegen. Der Artikel leistet einen Beitrag zur Implementierungsphase von Transportrobotern.
Integrierte Mobilität und Automatisierung - Transportroboter unterwegs im TaBuLaShuttle	03/2022	ATZ - Automobil-technische Zeitschrift	Im Sinne einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Mobilität, die auf eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens und Steigerung der Auslastung von Transportkapazitäten abzielt, wird der kombinierte Personen- und Gütertransport im Projekt TaBuLa-LOG durch die Integration von Transportrobotern neu entdeckt.
Verbindung von Transportroboter und Shuttle als eine autonome Transportlösung - Eine ökonomische Analyse eines kombinierten Personen- und Gütertransports	05/2022	Internationales Verkehrswesen	Personen- und Güterverkehr werden in der Regel getrennt voneinander betrachtet und gestaltet. In jüngster Zeit verstärkt sich aufgrund des steigenden Mangels an Fahrpersonal sowie der zunehmenden ökonomischen und ökologischen Anforderungen an die Transporteffizienz die Suche nach innovativen Transport- und Fahrzeugtechnologien. Ein Ansatz ist der kombinierte Transport von Personen und Gütern. Der Artikel untersucht mit Hilfe einer Prozessanalyse und einer Total Cost of Ownership (TCO)-Berechnung den ökonomischen Nutzen eines in einem autonomen Shuttle mitfahrenden Transportroboters.
Integration and Evaluation of a Close Proximity Obstacle Detection for Mobile Robots in Public Space	ange- nommen	Kolloquium der Wissenschaftlichen Gemeinschaft für Technische Logistik	Die Erkennung von Hindernissen spielt eine entscheidende Rolle für die sichere Navigation mobiler Roboter im öffentlichen Verkehrsraum. Im Rahmen dieses Papers wird ein Ansatz zur kamerabasierten Echtzeit-Hinderniserkennung im Nahbereich in die Architektur des TaBuLa-LOG Transportroboters integriert und die Performance des Systems anhand von acht verschiedenen Testszenarien evaluiert. Bei diesen Testszenarien handelt es sich um typische Situationen aus dem Betrieb eines mobilen Roboters im öffentlichen Raum, die mithilfe von universellen Metriken ausgewertet werden.
Comparison of Varied 2D Mapping Approaches by Using Practice-Oriented Evaluation Criteria	ange- nommen	Kolloquium der Wissenschaftlichen Gemeinschaft für Technische Logistik	Für die Auswahl eines geeigneten 2D Kartenerstellungsverfahrens gibt es mehrere Möglichkeiten zur Auswertung dieser. Das Ziel des Papers ist die Durchführung von drei unterschiedlichen Kartenerstellungsverfahren in den Bereich SLAM, TLS und Konturableitung aus bestehendem Kartenmaterial. Diese werden anschließend anhand einer eigens erstellten Metrik evaluiert. Dabei erfolgt die geometrische Verifikation der Karte und die experimentelle Auswertung der Lokalisierungsperformance.
Experimental, data-based performance assessment of a driverless, autonomous shuttle in a complex, public-road environment (geplant für 2023)	in Vor- bereitung		



## 7.2 Veranstaltungen und Vorträge

**Tabelle 12:** Veranstaltungen und Vorträge Teilvorhaben A und B während der Projektlaufzeit (Auszug)

Titel	Datum	Ort
Vorstellung des Projektstandes im öffentlichen Regio Ausschuss Kreis Herzogtum Lauenburg	27.10.2020	Ratzeburg
Projektauftaktpräsentation TaBuLa-LOG	26.11.2020	Online/ Lauenburg/Elbe
Präsentation bei der digitalen Abschlussveranstaltung des BMVI-NAF-Bus-Projektes in Enge-Sande zu »Erkenntnissen des Automatisierten Fahrens in Lauenburg/Elbe«	23.02.2021	Online
Präsentation im Rahmen einer digitalen Veranstaltung des Alumni-Vereins der TUHH (sowohl für Alumni als auch für Industrie- und Stiftungsvertreter*innen)	10.03.2021	Online
LinkedIn-Livestream-Event: Wie kann man ein autonomes Shuttle in Kleinstädten erfolgreich einsetzen?	11.05.2021	Online
Vortrag: Automatisiertes Fahren versus Infrastruktur? Im Rahmen des VSVI-Seminars Mecklenburg-Vorpommern	26.05.2021	Online
Vorstellung des Projektes bei der KION Research Series	08.06.2021	Online
Öffentlichkeitswirksames Event zur Vorstellung Laura am auf dem Markt in Lauenburg/Elbe	17.07.2021	Lauenburg/Elbe
Vortrag bei einem Fachworkshop von camo.nrw zum Thema »Automatisierte Shuttlebusse: Heilsbringer oder Illusion für Kommunen?«	18.08.2021	Online
Projektvorstellung als Gewinner des Deutschen Ingenieurpreises in der Kategorie »Neue Mobilität« im Rahmen der Preisverleihung	17.09.2021	Koblenz
Vortrag auf der Hamburg International Conference of Logistics	23.09.2021	Hamburg
Vortrag bei einer Veranstaltung von breidenbach + frost zum automatisierten Fahren im ÖPNV	23.09.2021	Leipzig
Projekt im Rahmen des WDR »Tag der Maus« unter dem Motto »Hallo Zukunft« mit rund 150 interessierten Kindern und Elternteilen in Lauenburg erklärt und erlebbar gemacht	03.10.2021	Lauenburg/Elbe
Vorstellung des Projektstandes im öffentlichen Ausschuss für Regionalentwicklung und Mobilität (REGIO) beim Kreis Herzogtum Lauenburg	01.11.2021	Ratzeburg
Vorstellung der Zwischenergebnisse in der Facharbeitsgruppe Verkehr der Metropolregion Hamburg	11.11.2021	Online
Vortrag digital für DVWG-Bezirksvereinigung Hamburg mit einem Status zu den Projekten zum automatisierten Fahren im ÖPNV	29.11.2021	Online
Offizielle Abschlussfahrt am letzten Betriebstag mit allen am Projekt beteiligten Partner*innen (intern) und anschließender Pressemitteilung	30.11.2021	Lauenburg/Elbe

Titel	Datum	Ort
Austausch der Reallabor-Projekte in Norddeutschland	06.12.2021	Online
Vortrag auf Veranstaltung der BVL Young Professionals	14.12.2021	Online
Intelligente Transportsysteme - Welche Potenziale stecken darin und wo können solche Systeme schon heute unterstützen? Vortrag auf der digitalen Vortragsreihe der VSVI Hamburg	23.02.2022	Online
Potenziale und Herausforderungen des automatisierten Fahrens im Testzentrum TaBuLa in der öffentlichen Vortragsreihe »Talk Around the World« der Technischen Universität Hamburg	09.03.2022	Online
Vorstellung des aktuellen Projektstatus' und Präsentation der bisherigen Projektergebnisse auf Kreisebene beim Ausschuss für Regionalentwicklung und Mobilität (REGIO) mit Vertreter*innen der Kreisverwaltung und Teilnehmer*innen aus der Politik sowie der Öffentlichkeit	15.03.2022	Ratzeburg
Austausch mit der TU Bergakademie Freiberg zu mobilen Robotern im öffentlichen Raum (Anforderungen und Genehmigungsprozesse)	16.03.2022	Online
Vorstellung des aktuellen Projektstatus und Präsentation der bisherigen Projektergebnisse bei der Stadt Lauenburg/Elbe beim Ausschuss für Umwelt, Energiewende und Digitalisierung mit Teilnehmer:innen aus der Stadtverwaltung, der kommunalen Politik und der Öffentlichkeit.	21.03.2022	Lauenburg/Elbe
Preisverleihung Innovationspreis Reallabore 2022, Veranstaltung des Bundeswirtschaftsministeriums (Vorstellung bei der Fishbowl-Diskussion zum Thema »Planung, Beratung und Genehmigung von Reallaboren – Herausforderungen und Lösungen der Praxis? Wie kann ein One-Stop-Shop helfen?«)	31.05.2022	Berlin
Vernetzung im automatisierten Fahren - Entwicklung zwischen Mensch, Natur und Technik	09.06.2022	Lüneburg
Impulsvortrag zum Thema »Perspektiven automatisierten Fahrens im ÖPNV«, 3. Expertenworkshop	29.06.2022	Online
Abschlussveranstaltung des Projektes mit den Schwerpunkten Entwicklung von Transportrobotern, Anwendungsfällen, Infrastruktur und Genehmigungsprozesse (5 Vorträge)	30.06.2022	Online
Fahrgast- und Interessierteninformation über Begleiter*innen von Shuttle und Lauras	täglich	Lauenburg/Elbe
Verschiedene geschlossene Besuchergruppen aus Politik, Vereinen und Verbänden, Verkehrsbetrieben und öffentlichen Institutionen	fortlaufend	Lauenburg/Elbe

### 7.3 Aktivitäten im Rahmen des ITS World Congress

Tabelle 13: Aktivitäten im Rahmen des ITS-World Congress der Teilvorhaben A und B

Datum	Ort	Inhalt (kurz)
11.10.-14.10.2021	Hamburg	Das Projekt war mit einem Shuttle und einer Laura sowie einem großen Expertenteam auf einer gut besuchten Standfläche in den Hamburger Messehallen mit rund 13.000 Gästen vertreten.
11.10.-14.10.2021	Hamburg	Vorstellung des Projektes im Rahmen der Mobility Transition Demonstration Tour des ITS: »Hamburg sets the pace«
15.10.2021	Lauenburg/Elbe	Am letzten Veranstaltungstag des ITS wurde ein Technical Visit für die Messebesuchenden in Lauenburg/Elbe durchgeführt, bei dem die Bestandteile des Projektes (Shuttle, Transportroboter, Anwendungsfall) vorgestellt und diskutiert wurden. Filmzusammenfassung: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=t1AFu5LbClk">https://www.youtube.com/watch?v=t1AFu5LbClk</a>
16.10.2021	Lauenburg/Elbe	Am Samstag schloss sich ein Public Day an, bei dem sich an verschiedenen Stationen die Öffentlichkeit über das Projekt informieren konnte. 300 fachinteressierte Gäste nahmen das Angebot wahr.

Abbildung 58: TaBuLa-LOG-Messestand auf dem ITS World Congress



## 8 Fazit und Ausblick

Mit dem Projekt TaBuLa-LOG wurden in allen gesetzten Arbeitsfeldern Erkenntnisse gewonnen, die als Kurzüberblick in der Abbildung 59 dargestellt werden und auf die in den nachfolgenden Unterkapiteln – aufgliedert in erzielte Ergebnisse, Übertragbarkeit und abgeleitete Handlungsempfehlungen – zusammenfassend eingegangen wird. Dabei steht die Entwicklung von Transportrobotern sowie der im Rahmen des Projektes erprobte Anwendungsfall im Fokus, die Ergebnisse zur Realisierung eines automatisierten Shuttlebetriebes im ÖPNV sind dem Projektbericht des Vorgängerprojektes TaBuLa (Gertz et al. 2021) zu entnehmen.

Abbildung 59: Kurzübersicht über die Projektergebnisse und Handlungsbedarfe



## 8.1 Erzielte Ergebnisse und Zielerreichungsgrad

Als zentrales Ergebnis des Forschungsprojektes konnte ein kombinierter Personen- und Gütertransport mittels automatisierter Fahrzeuge erfolgreich in der Kleinstadt Lauenburg/Elbe realisiert und erlebbar gemacht werden. Mit dem Anwendungsfall der Beförderung von Behördenpost zwischen verschiedenen Verwaltungsstandorten im Stadtgebiet mittels eigens entwickelten Transportroboter konnte ein sinnvolles Einsatzszenario über mehrere Monate erprobt werden. Die erzielten Ergebnisse gliedern sich auf in die nachfolgenden Themenbereiche.

### Bau der Roboter

Die Entwicklung und der Aufbau von zwei mobilen Transportrobotern für den Gütertransport konnte vollständig abgeschlossen werden, obwohl auf dem Markt kaum kompakte, für die Nutzung im Straßenverkehr geeignete Bauteile und Sensoren verfügbar sind. Da die generelle Entwicklung einer funktions- und genehmigungsfähigen Roboterplattform für das Projekt im Fokus stand, war es für den Projekterfolg nicht entscheidend, dass die Forschungsplattform lediglich eine geringe Nutzlast aufweist. Neben den rein funktionalen Anforderungen für die Güterbeförderung wurde eine High-Level-Robotersteuerung mit Fokus auf Sicherheit entwickelt und integriert. Eine umfangreiche Gefahren- und Risikoanalyse wurde durchgeführt, die die Basis für einen sicheren Betrieb auf öffentlichen Straßen und Plätzen im Mischverkehr bildet. In diesem Zuge konnten zum einen umfangreiche Kenntnisse über die Genehmigungsprozesse einer experimentellen automatisierten Roboterplattform gewonnen werden und zum anderen eine umfassende Klärung des rechtlichen und normativen Rahmens für mobile Roboter im öffentlichen Raum herbeigeführt werden. Während der Projektlaufzeit konnte die automatisierte Fahrfunktion der Roboter in einzelnen Betriebsbereichen unter besonderer Aufsicht erprobt werden. Die Ausnahmegenehmigung für den automatisierten Regelbetrieb erfolgte erst nach Ende der Projektlaufzeit. Bei den momentan auf SAE-Level 2 entwickelten Robotern besteht der Bedarf, neben einer deutlichen Steigerung der autonomen Funktionsweise, weitere Verbesserungen zu erreichen, wie z. B. die Definition und Ausarbeitung der Kundenschnittstellen, sowie die anspruchsvolle Thematik der Mensch-Maschine-Interaktion weiter zu beforschen.

### Erprobung

Nach den Sicherheitsanalysen erfolgten ausführliche Tests der Roboter auf Straßen und Wegen. Trotz des fehlenden expliziten Rechtsrahmens für Transportroboter im öffentlichen Raum konnte ein Realbetrieb zur Erprobung eines Anwendungsfalls mit Menschen und Gütern in den automatisierten Shuttle

realisiert werden. Die für den Transportfall notwendigen Veränderungen der logistischen Prozesse wurden ermittelt und der Beweis erbracht, dass eine RoboterAuslieferung im automatisierten ÖPNV möglich ist. Auftretende Störungen im Betriebsablauf wurden klassifiziert und evaluiert. Die gesammelten Erfahrungen für den gesamten Prozess und Betrieb im konkreten Anwendungsfall können für Anschlussprojekte genutzt werden. Ein großer Nutzen entstand neben der eigentlichen Güterbeförderung auch dadurch, dass der Shuttlebetrieb als ÖPNV-Zusatzangebot der Stadt Lauenburg/Elbe für ein weiteres Jahr erhalten bleiben konnte.

## Infrastruktur

Im Projekt konnten fallbezogene Erkenntnisse über notwendige Infrastrukturanpassungen gewonnen werden, die über die bereits im Vorgängerprojekt installierten Maßnahmen hinausgingen. Es waren in begrenztem Umfang weitere Maßnahmen notwendig, die erfolgreich realisiert und betrieben wurden:

- ▶ Herrichten von Unterstand und Ladeinfrastruktur
- ▶ Barrierefreier Wege- und Haltestellenausbau
- ▶ Verkehrszeichen zur Beachtung des Probebetriebes
- ▶ WLAN- und Bluetooth-Vernetzung zur Kommunikation zwischen Mensch, Fahrzeug und Infrastruktur

Neben den vorgenannten Komponenten ist der automatisierte Betrieb angewiesen auf eine gute Mobilfunkkommunikation und genaue Satellitenortung, welche nicht immer gegeben ist und die Möglichkeiten eines autarken und stabilen autonomen Betriebes begrenzt.

## Interaktionen

Im Realbetrieb konnten viele Prozesse beobachtet werden. Die Interaktionen mit und zwischen dem Shuttle und den Robotern sowie den Menschen im Umfeld benötigen in der Kommunikation noch menschliche Unterstützung. Dies erscheint für den aktuellen Stand der Forschung und den Erprobungsbetrieb hinnehmbar, muss allerdings dringend weiter beforscht und vorangebracht werden, wenn ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden soll. Aktuell ist zur Überwachung und Kommunikation in besonderen Situationen immer noch eine Begleitperson für den Roboter (und das Shuttle) erforderlich, wodurch sich die potentiellen positiven Effekte, die durch autonome Betriebe insbesondere im ökonomischen Bereich erwartet werden, (noch) nicht erzielen lassen.

Die digitale Vernetzung, die unter Infrastruktur und Roboterentwicklung beschrieben ist, erwies sich als technisch möglich, zeigte sich aber im Falle von Störungen als Herausforderung. Es wurde im Verlauf des Projektes nachträglich eine zusätzlich erreichbare Person als organisatorische »Leitstelle« implementiert, um eine schnelle Kommunikation zwischen den verschiedenen Beteiligten und effiziente Problemlösung herbeiführen zu können.

## Kosten

Die Kosten für Aufbau und Betrieb wurden für den Anwendungsfall im Projekt vollständig evaluiert. Sie sind durch den Experimentalcharakter und die erfolgten notwendigen Eigenentwicklungen noch entsprechend hoch, so dass kein wirtschaftlicher Anwendungsfall zu Projektende im Dauerbetrieb realisierbar ist. Mit steigender Automatisierung und Serienfertigung ist eine deutliche Steigerung des Nutzen-Kosten-Faktors absehbar.

## Potenzial und Akzeptanz

Durch die Befragung von Fahrgästen und Passanten konnte die Akzeptanz hinsichtlich des kombinierten Transports, Shuttle und Roboter erforscht werden. Grundsätzlich zeigt sich eine positive Grundeinstellung bei gleichzeitigen Bedenken für den Fall, dass die Begleitperson entfallen würde. Die Grundgesamtheit der Befragten ist - den Umständen der COVID-19-Pandemie geschuldet - insgesamt geringer als geplant ausgefallen. Dennoch wurde deutlich, dass Reallabore auch für die Öffentlichkeit zum Erfahren der Technik hilfreich sind und die Akzeptanz steigern können. Über das Testzentrum konnte umfangreiches Wissen über den tatsächlichen Stand der Technik vermittelt werden.

Mit Potenzial zeigen sich die Möglichkeiten zur körperliche Entlastung des Personals und - insbesondere in Pandemie-Zeiten - die Möglichkeiten der kontaktlosen Übergabe von Gütern.

## Einsatz

Der spezifische Anwendungsfall zur Beförderung von Behördenpost zwischen verschiedenen Standorten im Stadtgebiet von Lauenburg/Elbe ergab sich aus verschiedenen Randbedingungen, die insbesondere aus dem bestehenden automatisierten Shuttlebetrieb und der Vereinfachung der Komplexität der Lieferketten und Projektbeteiligten heraus gewählt wurde. Er erwies sich allerdings insgesamt auf alle Belange bezogen als sehr gut geeignet, zweckmäßig und erfolgreich durchführbar. Aus Expertengesprächen zeigen sich neben der Hauspostlieferung als Anwendungsfall weitere sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten.

## 8.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse und Limitationen des Projektes

Verschiedene gewonnene Erkenntnisse lassen sich aus dem Projekt heraus verallgemeinern. Aufgrund verschiedener Randbedingungen sind allerdings einige Ergebnisse des Projektes als nicht übertragbar zu betrachten.

### Bau der Roboter

Die gewonnenen Erfahrungen für die Entwicklung, den Aufbau und die technische Ausstattung von Transportrobotern inkl. der Umsetzung von Teilfunktionen wie z. B. Lokalisierung oder Hinderniserkennung sind zusammen mit der entwickelten Robotersteuerung vollständig übertragbar. Eine Automatisierung über das SAE-Level 3 hinaus bleibt aufgrund vieler offener Forschungsfragen aus diversen Fachgebieten eine große Herausforderung. Übertragbar ist weiterhin das generelle Vorgehen im aktuellen Rechtsrahmen für mobile Roboter im öffentlichen Raum. Wie bereits im Projekt TaBuLa wurde auch hier ein Beispielablauf entwickelt, der von anderen Projekten und Akteuren als Vorlage genutzt werden kann, um einen genehmigungsfähigen, sicheren automatisierten Betrieb im Mischverkehr zu implementieren. Ein Unsicherheitsfaktor bei der Genehmigung ist die Nutzbarkeit von Gehwegen durch Transportroboter und die dafür angewandte individuelle Sicherheitseinschätzung von lokal verantwortlichen Personen aus den Genehmigungsbehörden.

### Erprobung

Die Fahrtwege der Shuttles und Transportroboter waren durch verkehrlich und technisch getroffene Randbedingungen auf verschiedene Linienwege bzw. -korridore begrenzt. Dadurch ergaben sich wenig flexible Ausweich- und Einsatzmöglichkeiten. Für vergleichbare Straßen, Wege und Plätze kann aus diesem Projekt abgeleitet werden, welche Strecken mit dem Stand der Technik als problemfrei automatisiert befahrbar angesehen werden können. Die Geschwindigkeit des Gütertransportes mittels Transportrobotern war vergleichsweise gering. Zudem bestanden viele Abhängigkeiten (z. B. Notwendigkeit freier Kapazitäten im Shuttle), weshalb der Anwendungsfall vorerst nur auf zeitunkritische Güter übertragbar scheint. Die in Ansätzen eingerichtete organisatorische Leitstelle inkl. des Notfallmanagements ist in anderen Projekten anwendbar.



## Infrastruktur

Die installierte Infrastruktur wie die barrierefreien Wege und Haltestellen können von der Allgemeinheit weiter genutzt werden. Gleiches gilt für die Road-Side Units und Bluetooth-Module an den Lichtsignalanlagen, die in den Dauerbetrieb übernommen wurden. Die hier verwendeten Komponenten haben sich im Einsatz bewährt und können identisch auch in anderen Anlagen neu verbaut werden.

## Interaktionen

Hinsichtlich der Interaktionen zwischen Mensch und Technik als auch zwischen Roboter und Shuttle entstanden im Projektverlauf viele offene Forschungsfragen. Aus den ungelösten Aufgaben lassen sich viele Ziele für weitere Projekte entwickeln.

## Kosten

Die veröffentlichten Erkenntnisse zu Kosten von Shuttle- und Roboterbetrieb bieten anderen Projekten erstmalig eine transparente Grundlage für die Kalkulation eines automatisierten Betriebes und zeigen auf, an welchen Stellen Einsparungen und Mehrkosten entstehen können.

## Potenzial und Akzeptanz

Die hohe Akzeptanz gegenüber den automatisierten Shuttles und der Transportroboter in Lauenburg/Elbe lässt sich vermutlich mit ähnlich anmutenden Fahrzeugen in anderen Projekten auch erzielen. Nicht explizit quantifizierbar ist, wie stark sich der Einfluss der umfangreichen Aufklärungs- und Informationskampagnen der Projektpartner auf die Akzeptanz von TaBuLa-LOG ausgewirkt hat. Hier profitierte das Projekt auch vom Vorgänger TaBuLa. So konnte die positive Resonanz bei den Anwohnenden erhalten werden und diese waren mit dem Shuttle bereits vertraut. In jedem Falle wird sich die gewählte Strategie der Öffentlichkeits- und Kommunikationsarbeit im TaBuLa-Projekt bei Anwendung in anderen Projekten günstig auf den Projekterfolg auswirken und lässt sich übertragen.

## Einsatz

Der Anwendungsfall war speziell auf Lauenburg/Elbe ausgerichtet, könnte aber bezogen auf die Dienstleistung auch auf andere Zusammenhänge und Orte übertragen werden. Wirtschaftlich und prozessabhängig bleibt die Initialisierung eines solchen Betriebes allerdings weiterhin eine große Herausforderung. Denkbar sind kleine Sendungen auf möglichst kurzen Distanzen unter Nutzung eines kombinierten Verkehrs. Auch wenn sich befragte Experten anhand des Beispiels von TaBuLa-LOG den Einsatz in KEP-Dienstleistungen gut vorstellen können, ist eine solche Übertragbarkeit aufgrund des in dem Sektor üblichen Sendungsgewichtes, -volumens und -aufkommens unter begrenzten Kapazitäten im ÖPNV mit den entwickelten kleinen Robotern auszuschließen. Die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle wie z. B. B2B- / B2C-Bereich (Apotheke, Regionalwarenlieferung, Kantine, etc.) scheint dagegen möglich. Der entwickelte Anwendungsfall ist übertragbar auf zeitunkritische Kurierdienstleistungen außerhalb des Paketbereiches. Es bleiben viele Unsicherheiten in einer breiten Marktanwendung. Unter Randbedingungen ist es denkbar, das bisherige Einsatzgebiet in oder aus Lauenburg/Elbe heraus zu bestimmten Zielen und Quellen zu vergrößern. Damit bietet sich eine attraktive Perspektive für Kleinstädte und eine bessere Auslastung des ÖPNVs im ländlichen Raum. Zu bedenken ist allerdings, dass sich die Intralogistik auf Privatgelände mit deutlich weniger Aufwand automatisieren lässt und in diesem Bereich bei Verfügbarkeit von geeigneten Outdoor-Transportrobotern als erstes eine Marktdurchdringung zu erwarten ist.

### 8.3 Anforderungen und Handlungsempfehlungen

Aus den zuvor herausgearbeiteten Ergebnissen des Betriebes von Transportrobotern sowie weiteren Erfahrungen aus dem Projekt TaBuLa-LOG ergeben sich Handlungsempfehlungen für weitere Anwendungen oder Folgeprojekte, um automatisierte, kombinierte Personen- und Gütertransporte langfristig in einen Regelbetrieb überführen zu können.

Für die erfolgreiche Einbindung von Transportrobotern in einen logistischen Prozess gilt es, sowohl das zulässige Transportgewicht als auch das zulässige Transportvolumen des Roboters zu erhöhen. Zudem hat sich im Testbetrieb gezeigt, dass der Betriebsradius der Roboter erhöht werden muss, damit z. B. im Falle eines Ausfalls eines Haltes des Shuttles oder einer den Regelweg behindernden Baustelle, der Gütertransport trotzdem flexibel ermöglicht werden kann. Die Erhöhung der Robustheit der Roboterbasis bzw. des Fahrgestells ist ein weiteres Optimierungspotenzial inkl. der dafür notwendigen Langzeittests. Neben der Erhöhung der Wetterfestigkeit des Fahrzeugs sollten außerdem Maßnahmen getroffen werden, um die Fahrstabilität weiter zu verbessern, insbesondere auf unebenen Untergründen oder Streckenseg-

menten mit hohen Kanten. Dies kann z. B. über eine angepasste Anordnung der verbauten Komponenten erreicht werden, die gleichzeitig zur Reduktion des Fahrzeugschwerpunktes führen sollte. Außerdem ist auch die Reduktion des Leergewichts durch Einsatz anderer Materialien wünschenswert. Die Einführung eines modularen Transportaufbaus ist eine weitere Handlungsempfehlung. Diese vereinfacht die Anpassung des Roboters an verschiedene Anwendungsfälle und Transportgüter. Auch die Anpassung der Integration der unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten (z. B. Motortreiber, Motorsteuerung und Not-Stopp-Mechanismus) ist ein zu berücksichtigender Aspekt. Der vollständige Zugriff auf die genannten Komponenten, beispielsweise durch eine komplette Eigen- bzw. Neuentwicklung einer Roboterbasis, würde eine vereinfachte bzw. verbesserte Umsetzung des Sicherheitskonzeptes zur Folge haben. Auch die zuvor angeführten Punkte sollten bei der Entwicklung einer Roboterbasis berücksichtigt werden. Inwieweit diese mit der aktuell verwendeten Roboterbasis umsetzbar wären, ist zu prüfen. Sobald eine (Klein-)Serienfertigung realisierbar ist, kann von einer deutlichen Kostenreduktion pro Fahrzeug ausgegangen werden.

Weiterhin ergeben sich auch Handlungsempfehlungen in Bezug auf eine weitere Automatisierung. Es gilt eine personenlose, autonome Fahrt durch den Transportroboter zu erreichen, da andernfalls der Einsatz nicht wirtschaftlich realisierbar ist. Entscheidend hierfür ist auch die Erweiterung der Intelligenz und der Robustheit der automatisierten Fahrfunktion, zum Beispiel in Form von erweiterten Selbstdiagnosefähigkeiten des Systems, die eine externe Überwachung vereinfachen. Zur Gewährleistung der Sicherheit und des Ausbaus der automatisierten Fahrfunktion ist auch die Weiterentwicklung einer intelligenten Umwelt- und Umfelderkennung notwendig. Zusätzlich sollte das automatisierte Ein- und Ausfahren des Transportroboters in/aus dem Shuttle bzw. dem ÖPNV derart weiterentwickelt werden, dass auf manuelle Bedienschritte, wie das Ausfahren der Rampe, verzichtet werden kann.

Zur Verkehrsinfrastruktur ist die Empfehlung abzugeben, diese richtlinienkonform, sicher und barrierefrei neu- und auszubauen. Damit wird diese für Menschen und automatisierte Fahrzeuge leichter nutzbar. Ferner ist eine flächendeckende Mobilfunkabdeckung in automatisierten Betriebsbereichen notwendig. Die weitere Entwicklung der Vernetzung auf Basis von WLAN und Bluetooth erscheint vielversprechend. Dabei ist auf bewährte Standardschnittstellen zu setzen.

Die anzustrebende Standardisierung ist auf viele Entwicklungsbereiche anzuwenden. Es betrifft Hardwarekomponenten und Softwareschnittstellen ebenso wie Genehmigungsverfahren. Zielgerichtete Regelabläufe für Genehmigungsprozesse ermöglichen es, in Projekten wie diesem den Fokus auf die eigentliche Technikentwicklung zu legen und Bürokratieaufwände entsprechend zu reduzieren.

Nicht zu vernachlässigen ist dabei die Kommunikation von Robotern mit den Menschen, der Infrastruktur und anderen Fahrzeugen. Sobald auf eine Begleitperson verzichtet werden soll, muss gewährleistet sein, dass ein automati-

siertes Fahrzeug auf unvorhergesehene Situationen reagieren können kann, wie z. B. auf Fahrzeuge mit Sonder- und Wegerechten oder falsch fahrende Radfahrende. Besondere Beachtung bedarf auch die Entwicklung einer funktionierenden Interaktion mit Menschen mit Behinderung.

Nach der Umsetzung der Verbesserungen des bestehenden Systems wäre eine weitere Handlungsempfehlung der Aufbau einer Technischen Aufsicht. Die Überwachung der Transportroboter durch eine Technische Aufsicht an Stelle einer Begleitperson vor Ort führt im Idealfall zu einer Kosten- und Arbeitsaufwandsreduktion. Die Funktion und der Status mehrerer Transportroboter könnten von einer einzelnen Person überwacht werden.

Aus dem durchgeführten Realbetrieb heraus lässt sich ableiten, dass der Einsatz eines Transportroboters in einer anspruchsvollen Transportkette im kombinierten ÖPNV vielen Störfaktoren unterliegt und dies zu einer Erhöhung der Transportzeiten führen kann. Die Anzahl der Störungen muss reduziert bzw. handhabbarer werden. Daher bleibt die weitere Erprobung im Realbetrieb in diesem Sektor weiterhin äußerst relevant. Dazu gehört auch die eingehende Analyse von potentiellen Gefahren und Risiken für Menschen beim Einsatz von mobilen Robotern in Fahrzeugen mit Fahrgästen und auf Gehwegen im Mischverkehr.

Es wurden spezifische Anwendungsfelder für den Einsatz von Transportrobotern identifiziert, die im Rahmen des Projektes nicht erprobt werden konnten. Es ist ausgehend von einem dieser Anwendungsfälle sinnvoll, eine reale Überprüfung der Machbarkeit durchzuführen. Dabei sind nur nachhaltige Anwendungsfälle zu fördern, die insgesamt das Potenzial haben, Verkehr und Emissionen insgesamt zu reduzieren.

Aus den Ergebnissen der Befragungen kann zudem abgeleitet werden, dass eine Erprobung im Realbetrieb auch zur Aufklärung und Steigerung der Akzeptanz wichtig ist und weiter gefördert werden sollte. Dabei wirken Anwendungsfälle in Kombination mit einem innovativen ÖPNV als besonders nachhaltig und sinnstiftend, auch wenn diese bei Prozessabläufen und mehreren Verantwortlichkeiten im kombinierten Verkehr anspruchsvoll wirken. Um Leerfahrten zu vermeiden, sollte darüber hinaus ein On-Demand Service mit einer Steigerung der Auslastung durch die Überlagerung von Transportanfragen angestrebt werden. Welche Streckenanteile durch den Roboter selbst und welche an Bord eines anderen Fahrzeuges erfolgen sollten, bleibt individuelle Optimierungsaufgabe. Eine weitere Befragung von potentiellen Nutzern scheint sinnvoll, weil ein Teil der Befragten die eigene Nutzung eines Transportroboters noch als sehr unsicher bewertet.

Für die Umsetzung von Reallaboren braucht es neben weiteren finanziellen Förderanreizen vor allem mutige und motivierte Projektbeteiligte und Entscheider\*innen. Zudem braucht es unterstützende Genehmigungsbehörden zur Realisierung, Logistikdienstleister zur sinnvollen Einordnung und eine zielgerichtete Weiterentwicklung des Anwendungsfalls sowie die Involvierung von außenstehenden Personen und ihren Bedürfnissen für die weiteren Entwicklungen.

## 8.4 Ausblick

Einen Teil der im Fazit bereits angesprochenen Punkte, wie z. B. die Einrichtung einer gemeinsamen technischen Aufsicht, werden aktuell in einem weiteren Projekt TaBuLa-LOGplus - Smarte Leitstelle für automatisierte Transportroboter und Busse in der Stadt Lauenburg/Elbe seit April 2022 untersucht. Zugleich soll in dem neuen Projekt mittels KI für die Transportroboter ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden.

Die Projektidee dient einer Erhöhung des Automatisierungsgrads der bereits im Vorläuferprojekt TaBuLa-LOG verwendeten Vehikel und deren optimierten Einsatz und Überwachung durch eine Leitstelle. In der Leitstelle werden die hier weiterentwickelten Transportroboterplattformen überwacht und in die technische Aufsicht integriert. Für die Überwachung der Vehikel und die Steuerung der Flotte an Transportrobotern sollen im Rahmen der bis dahin entwickelten gesetzlichen und technischen Möglichkeiten KI-basierte Algorithmen zur Situationserkennung und Entscheidungsgenerierung genutzt werden. Auf Grundlage der aus den Vorgängerprojekten TaBuLa und Tabula-LOG vorliegenden Fahrbetriebsdaten wird in der Leitstelle eine Simulationsumgebung geschaffen, die als »digitaler Zwilling« eine Skalierung und Simulation von größeren Flotten bzw. mehr Agenten möglich macht. Es sollen Kapazitäten des Nahverkehrs und des Warentransports ermittelt und Potenziale über die KI identifiziert werden. Das kann einerseits die Ermittlung von Kapazitäten in den Fahrzeugen sowie deren Auslastung selbst sein, zum anderen aber auch die Auslastung auf den Verkehrswegen. Die Evaluation und Optimierung der eingesetzten Fahrzeuge unter wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Gesichtspunkten sowie die kontinuierliche Anpassung von Angebot und Nachfrage in Richtung On-Demand soll den kombinierten Personen- und Warentransport von automatisierten Vehikeln weiterentwickeln.

Die Leitstellenimplementierung zur Überwachung und Optimierung des Fahrzeugeinsatzes von automatisierten Fahrzeugen wird begleitend evaluiert und zu drei Zeitpunkten reflektiert, mit dem Ziel den Umsetzungsprozess begleitend zu optimieren, indem Maßnahmen- und Handlungswirkungsanalysen durchgeführt werden, die Abschätzungen der Nutzungseffekte für die Gesellschaft, Sicherheit, THG-Emissionen und Flächenversiegelung und das Verkehrssystem ermöglichen und Handlungsempfehlungen in den Umsetzungsprozess (z. B. zum KI-Optimierungsalgorithmus) einsteuern zu können.

Ziel ist es insgesamt, zu einer verkehrsträgerübergreifenden optimalen Nutzung der Ressourcen zu kommen über den Ausbau der autonomen Funktionen und die Verbesserung der interoperablen Vernetzung der Verkehrs- und Transportmittel.

## Projektbezogenes Literaturverzeichnis

- Arksey, Hilary; O'Malley, Lisa (2005): Scoping studies: towards a methodological framework. In: *International Journal of Social Research Methodology*, vol. 8 (1), S. 19–32.
- Baum, Leonard; Assmann, Tom; Strubelt, Henning (2019): State of the art – Automated micro-vehicles for urban logistics. *IFAC PapersOnLine*, vol. 52 (13), S. 2455–2462.
- Bender, Beate und Gericke, Kilian (2021): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Deutschland: Springer.
- Blumtritt, Christoph (2021): Prognose der Umsätze für Online Food Delivery in Deutschland für die Jahre 2017 bis 2024. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/prognosen/642308/online-food-delivery-umsatz-in-deutschland>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.
- Böckler, Liss; Grote, Matthias; Wolf, Julia (2021): Genehmigungsprozesse beim Einsatz von automatisierten Shuttle-Bussen im ÖPNV am Beispiel des Projektes TaBuLa in Lauenburg/Elbe. In: *ECTL working paper*, Band 53. TUHH Universitätsbibliothek. DOI: 10.15480/882.3498.
- Boysen, Nils; Schwerdfeger, Stefan; Weidinger, Felix (2018): Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots. In: *European Journal of Operational Research*, vol. 271 (3), S. 1085–1099.
- Boysen, Nils; Fedtke, Stefan; Schwerdfeger, Stefan (2020): Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective. Jena: Springer.
- Brandt, Jan Christopher; Böker, Björn; Bullinger, Alexander; Conrads, Martin; Duisberg, Alexander; Stahl-Rolf, Silke (2019): Fallstudie: Delivery Robot Hamburg für KEP-Zustellung. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/delivery-robot-hamburg.pdf>, last accessed 11.12.2020.
- Brown, Juanita; Isaacs, David (2007): Das World Café: Kreative Zukunftsgestaltung in Organisationen und Gesellschaft, 1st ed., Heidelberg: Carl-Auer.
- Chen, Cheng; Demir, Emrah; Huang, Yuan; Qiu, Rongzu (2021): The adoption of self-driving delivery robots in last mile logistics. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 146, 102214.
- Clausen, Uwe; Stütz, Sebastian; Bernsmann, Arnd; Heinrichmeyer, Hilmar (2016): ZF-ZUKUNFTSTUDIE 2016, Friedrichshafen: ZF Friedrichshafen AG.
- Condliff, James (2018): Why sidewalk delivery robots still need safety drivers. Online verfügbar unter <https://www.technologyreview.com/2018/01/30/145935/why-sidewalk-delivery-robots-still-need-safety-drivers-too/>, zuletzt geprüft am 29.03.2022.

- DB Schenker (2017): Automatisierung: Roboter in der Intralogistik.  
Online verfügbar unter <https://logistik-aktuell.com/2017/03/16/automatisierung-in-der-intralogistik/>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.
- Deng, Puyuan; Amirjamshidi, Glareh; Roorda, Matthew J. (2020):  
A vehicle routing problem with movement synchronization of drones, sidewalk robots, or foot-walkers. In: *Transportation Research Procedia*, vol. 46, S. 29–36.
- DHL (2021): Kontaktloser Empfang und Versand. Online verfügbar unter <https://www.dhl.de/de/privatkunden/kampagnenseiten/kontaktlos-pakete-empfangen-und-versenden.html>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.
- Ellram, Lisa (1993): A Framework of Total Cost of Ownership.  
In: *International Journal of Logistics Management*, vol. 4, No. 2., S. 49–60.
- Engholm, Albin; Pernestål, Anna; Kristoffersson, Ida (2020): Cost Analysis of Driverless Truck Operations. In: *Transportation Research Record* 2674 (9), S. 511–524. DOI: 10.1177/0361198120930228.
- Figliozi, Miguel Andres (2020): Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing air and ground autonomous vehicles.  
In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 85, 102443.
- Figliozi, Miguel Andres; Jennings, Dylan (2020): Autonomous delivery robots and their potential impacts on urban freight energy consumption and emissions. In: *Transportation Research Procedia*, vol. 46, S. 21–28.
- Flämig, Heike (2015): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara und Winner, Hermann (Hrsg.): *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. s.l.: Springer, S. 377–398.
- Fraunhofer IML und LNC (2020): Die Veränderungen des gewerblichen Lieferverkehrs und dessen Auswirkungen auf die städtische Logistik, Berlin/Dortmund: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Grote, Matthias; Röntgen, Ole (2021): Kosten autonom fahrender Minibusse: Literaturanalyse ergänzt um Erfahrungen aus dem Betrieb eines Testprojektes und den Ergebnissen einer Expert:innenbefragung.  
In: *ECTL working paper*, Band 54. TUHH Universitätsbibliothek.  
DOI: 10.15480/882.3621.
- Häder, Michael (2015): Empirische Sozialforschung: Eine Einführung. 3rd ed. Wiesbaden: Springer VS.
- HDE (2021): Umsatz durch E-Commerce (B2C) in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2020. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3979/umfrage/e-commerce-umsatz-in-deutschland-seit-1999/>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.
- Hoffmann, Thomas; Prause, Gunnar (2018): On the Regulatory Framework for Last-Mile Delivery Robots. In: *MDPI machines*, Jg. 6, Nr. 33, S. 1–16.

- Jennings, Dylan; Figliozi, Miguel (2019): Study of Sidewalk Autonomous Delivery Robots and Their Potential Impacts on Freight Efficiency and Travel. In: *Transportation Research Record*, Jg. 6, Nr. 2673, S. 317–326.
- Krail, Michael; Hellekes, Jens; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth; Schellert, Maximilian; Rüdiger, David; Steindl, Alina; Luchmann, Inga; Waßmuth, Volker; Flämig, Heike; Schade, Wolfgang; Mader, Simon (2019): Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Online verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2019/energie-treibhausgaswirkungen-vernetztes-fahren.pdf>, zuletzt geprüft am 29.03.2022.
- Krokowski, Wilfried (1993): Total Cost of Ownership (TCO) – ein unterstützendes Instrument zur Lieferantenauswahl im Bereich der Beschaffungslogistik. In: Baumgarten, H.; Holzinger, D.; Rühle, H.; Schäfer, H.; Stabenau, H.; Witten, P. (Hrsg.): *RKW-Handbuch*, Band 2, Artikel 5070, 1993 (18. Lfg.), Berlin 1993.
- Kruse, Jan (2015): *Qualitative Interviewforschung – Ein integrativer Ansatz* (2. Auflage). Weinheim und Basel: Beltz Juventa
- Mantel, Rebekka (2021): Akzeptanz eines automatisierten Shuttles in einer Kleinstadt. In: *Journal für Mobilität und Verkehr*, Ausgabe 8 (2021), S. 25–35.
- Monheim, Heiner; Muschwitz, Christian; Reimann, Johannes; Pitzen, Constantin; Sylvester, A.; Michelmann, H. (2013): Ein Innovationsschub für ländliche ÖPNV-Systeme. In: *Zeitschrift für Ökologie, Politik und Bewegung*, Heft 3/2013.
- Pani, Agnivesh; Mishra, Sabya; Golias, Mihalis; Figliozi, Miguel (2020): Evaluating public acceptance of autonomous delivery robots during COVID-19 pandemic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 89, 102600.
- Poeting, Moritz; Schaudt, Stefan; Clausen, Uwe (2019a): A comprehensive case study in last-mile delivery concepts for parcel robots. In: Mustafee, Navonil; Bae, Ki-Hwan; Lazarova-Molnar, Sanja; Rabe, Markus; Szabo, Claudia (Hrsg.), *Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference*, Dortmund: TU Dortmund, S. 1779–1788.
- Poeting, Moritz; Schaudt, Stefan; Clausen, Uwe (2019b): Simulation of an Optimized Last-Mile Parcel Delivery Network Involving Delivery Robots. In: Clausen, Uwe, Langkau, Sven, Kreuz, Felix (Hrsg.), *Advances in Production, Logistics and Traffic*, Dortmund: Springer, S. 1–19.
- raumkom (2016): *Innovation mit Tradition – So funktioniert kombiBUS*. Online verfügbar unter <http://kombibus.de/prinzip>, zuletzt geprüft am 16.03.2022.
- Rubio, Francisco; Valero, Francisco; Llopis-Albert, Carlos (2019): A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol.16 (2).



- Schocke, Kai-Oliver; Schäfer, Petra; Höhl, Silke; Gilbert, Andreas; Kwast, F; Lacoste, S.; Marhan, S.; Wenz, K.-P. (2020): Bericht zum Forschungsvorhaben »LastMileTram – Empirische Forschung zum Einsatz einer Güterstraßenbahn am Beispiel Frankfurt am Main«. Frankfurt University of Applied Sciences.
- Simoni, Michele D.; Kutanoglu, Erhan; Claudel, Christian G. (2020): Optimization and analysis of a robot-assisted last mile delivery system. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 142, 102049.
- Sonneberg, Marc-Oliver; Leyerer, Max; Klein-Schmidt, Agathe Knigge, Florian; Breitner, Michael (2019): Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations. In: *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*, Hannover: Leibniz Universität Hannover, S. 1538–1547.
- STARSHIP (2021): Autonome Roboter für die Industrie 4.0. Online verfügbar unter <https://www.starship.xyz/b2b-de/>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.
- Thiel, Marko; Tjaden, Sandra; Schrick, Manuel; Rosenberger, Kerstin; Grote, Matthias (2021): Requirements for robots in combined passenger/freight transport. Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Hamburg, 22.-24. September 2021. Epubli. DOI: 10.15480/882.4000.
- University of Toronto Robotics Institute (2020). Making Sense of the Robotized Pandemic Response: A Comparison of Global and Canadian Robot Deployments and Success Factors. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/abs/2009.08577>.
- Vahrenkamp, Richard (2011): Die logistische Revolution. Der Aufstieg der Logistik in der Massenkonsumentengesellschaft. Beiträge zur Historischen Verkehrsforschung des Deutschen Museums 12. Campus Verlag: Frankfurt am Main 2011.
- Wadud, Zia (2017): Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption. In: *Transportation Research Part A* (101), S. 163–176.
- Zukunftsinstitut GmbH (2021): Megatrends. Online verfügbar unter <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrends/>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.

## Dokumentbezogenes Literaturverzeichnis

- Böckler, Liss; Grote, Matthias; Wolf, Julia (2021): Genehmigungsprozesse beim Einsatz von automatisierten Shuttle-Bussen im ÖPNV am Beispiel des Projektes TaBuLa in Lauenburg/Elbe. *ECTL working paper*, Band 53. TUHH Universitätsbibliothek. DOI: 10.15480/882.3498.
- Bode, Wolfgang (2016): Neue City-Logistik-Konzepte und -Techniken für mehr Nachhaltigkeit per City-GVZ und eStore. In: Carsten Deckert (Hrsg.): *CSR und Logistik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 281–291.
- Bretzke WR. (2020): Netzwerke in Großstädten: Citylogistik, In: *Logistische Netzwerke*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 459–463.
- Canzler, Weert et al. (2008): ÖPNV ist nicht gleich ÖPNV: Funktionswandel des öffentlichen Verkehrs in dünn besiedelten ländlichen Räumen, InnoZ-Bausteine Nr. 3, Berlin.
- Difu – deutsches institut für urbanistik (Hrsg.) (2002): Herausforderungen der Mobilität für den ländlichen Raum. *Difu-Berichte 2/2002*, Berlin, S. 22–23.
- Dr. Brandt, Jan Christopher; Böker, Björn; Bullinger, Alexander; Conrads, Martin; Dr. Duisberg, Alexander; Dr. Stahl-Rolf, Silke (2017): Fallstudie: Delivery Robot Hamburg für KEP-Zustellung, BMWI, Berlin.
- Gertz, Carsten; Maaß, Jacqueline; Grote, Matthias; Diebold, Tyll; Mantel, Rebekka; Röntgen, Ole et al. (2021): Endbericht des Projektes TaBuLa. TUHH Universitätsbibliothek. DOI: 10.15480/882.3611.
- Grote, Matthias (2021): Infrastruktur für eine automatisierte Buslinie. Erfahrungen aus dem Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg (TaBuLa). In: *VSVI Information* (3), S. 14–18. Online verfügbar unter [https://www.vsvi-niedersachsen.de/files/material\\_zeitschrift/2021\\_03\\_vsvi-information.pdf](https://www.vsvi-niedersachsen.de/files/material_zeitschrift/2021_03_vsvi-information.pdf), zuletzt geprüft am 06.05.2022.
- Grote, Matthias; 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. DOI: 10.15480/882.3621.
- Grote, Matthias; Stargardt, Julia; Wolf, Julia (2021): Infrastruktur im Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg (TaBuLa). In: *Straße und Autobahn* 72 (12), S. 1025–1028.
- Nadler, Robert; Fina, Stefan (2021): Nachhaltige Mobilität als umweltpolitisches Handlungsfeld in Kleinstädten. In: *Kompendium Kleinstadtforschung*, Forschungsberichte der ARL (16), Hannover, S. 177–188.

- Ohne Autor\*in (2021a). Berlin lässt Gütertransport per S-Bahn prüfen. Beitrag des rbb|24 (Rundfunk Berlin-Brandenburg) vom 01.11.2021. Online-Verfügbar unter <https://www.rbb24.de/wirtschaft/beitrag/2021/11/s-bahn-berlin-machbarkeitsstudie-guetertransport.html>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Ohne Autor\*in (2021b). Frachtmitnahme im kombinierten Personen- und Güterverkehr im ländlichen Raum durch Echtzeit-Prognosen in mehrstufigen Transportketten – CargoSurfer. Projektsteckbrief auf der Website des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/cargosurfer.html>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Ohne Autor\*in (2020a). Entwicklung einer Güter-Tram: Projekt »regioKargo« nimmt Fahrt auf. Pressemitteilung der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH vom 31.07.2020. Online verfügbar unter <https://www.avg.info/unternehmen/presse/pressemitteilungen/meldungen/entwicklung-einer-gueter-tram-projekt-regiokargo-nimmt-fahrt-auf.html>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Ohne Autor\*in (2020b). Datenbasierte Automatisierung der Gütermithnahme im Schienenpersonenverkehr in Kooperation mit Logistikdienstleistern – kombiBAHN Nordhessen. Projektsteckbrief auf der Website des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/kombibahn.html>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Schocke, K. et. al. (2020). Bericht zum Forschungsvorhaben »LastMileTram – Empirische Forschung zum Einsatz einer Güterstraßenbahn am Beispiel Frankfurt am Main«. Online abrufbar unter [https://www.frankfurt-university.de/fileadmin/standard/Hochschule/Fachbereich\\_1/FFin/Neue\\_Mobilitaet/Veroeffentlichungen/2020/Abschlussbericht\\_LastMileTram.pdf](https://www.frankfurt-university.de/fileadmin/standard/Hochschule/Fachbereich_1/FFin/Neue_Mobilitaet/Veroeffentlichungen/2020/Abschlussbericht_LastMileTram.pdf), zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Sylvester, A. (2017). kombiBUS weitergedacht: LandLogistik. Ein Modellvorhaben im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft des Landes Brandenburg. Online verfügbar unter <https://mil.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/KombiBus%20weitergedacht.pdf>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Vastag, Alex (2014): Urbane Logistik –neue Lösungsansätze für die Stadt der Zukunft, Fraunhofer IML.
- Zilkens, Stephan (2020): Volles Risiko? – Versicherungsaspekte logistischer Zukunftstechnologien, In: *Logistik – die unterschätzte Zukunftsindustrie*, Peter H. Voß (Hrsg.), Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 189–200.

## Anlagen

- ▶ Begleitbogen Buddies
- ▶ Begleitbogen Verwaltung
- ▶ TaBuLa Flyer
- ▶ TaBuLa Fahrplan
- ▶ Aktive Standortanzeige der Shuttle auf der Homepage [www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de)



## Begleitbogen Buddies

Vor- und Nachname: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

Szenario:  Szenario 1 (Manuell)  Szenario 2 (Güterübergabe)  Szenario 3 (Laura)

Akkustand Laura: Start: \_\_\_\_\_ Ende: \_\_\_\_\_

Kilometerstand Laura: Start: \_\_\_\_\_ Ende: \_\_\_\_\_

Wetter:  Regen  Bewölkt  Sonne-Wolken-Mix  Sonne  Schnee

Temperatur:  -5 bis 0 °C  1 bis 10 °C  11 bis 20 °C  21 bis 30 °C  > 30 °C

Anzahl Briefe: \_\_\_\_\_ Anzahl Pakete: \_\_\_\_\_

Gewicht Briefe: \_\_\_\_\_ Gewicht Pakete: \_\_\_\_\_

### Prozesszeiten

Ort	Zeit	Anzahl Briefe/ Pakete pro Station	Grund für Verspätung/Störung
Inbetriebnahme Laura			
Abholung Schlüssel			
Ankunft HS Fürstengarten			
Ankunft HS PEZ			
Ankunft HS Fürstengarten			
Übergabe Post Rathaus			
Übergabe Post Bauamt			
Ankunft Rathaus			
Übergabe Post Haus der Begegnung			
Ankunft Rathaus			
Ankunft HS Fürstengarten			
Übergabe Post Elbschiffahrtmuseum			
Ankunft HS Fürstengarten			
Übergabe Post Rathaus			
Ende Laura			

Stand: 25.03.2021



### Grund für Verspätung/Störung

AL	Ausfall Lokalisierung	KP	Keine Post
AS	Ausfall Steuerung	LP	Laura nicht pünktlich
AT	Ausfall Teilsysteme (spezifizieren)	PP	Personal nicht pünktlich an Haltestelle
AV	Auffälliges Verhalten (spezifizieren)	SP	Shuttle nicht pünktlich
AW	Ausfall aufgrund des Wetters	VP	Zu viel Post/Pakete
KA	Kein Personal vor Ort		

### Anmerkungen:

---



---



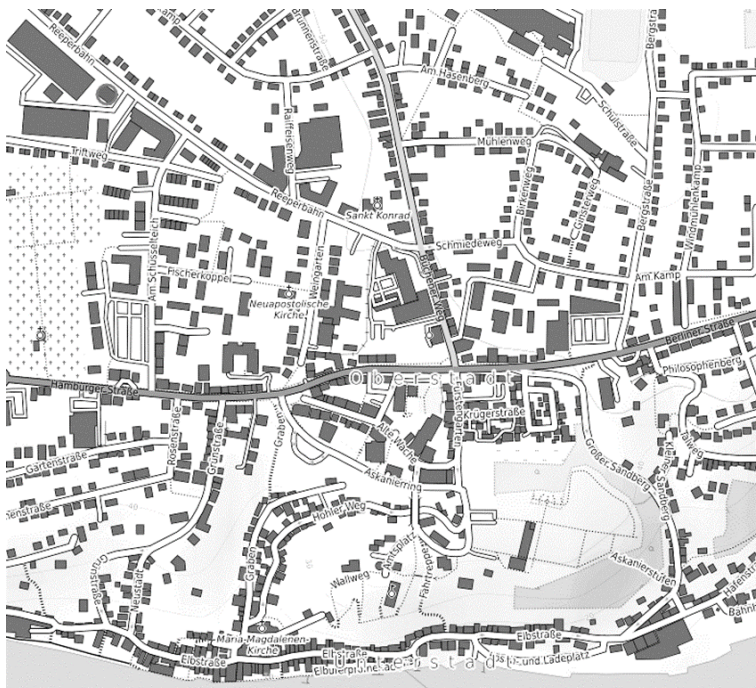
---



---



---



Datum, Unterschrift

Stand: 25.03.2021

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Begleitbogen Verwaltung

Vor- und Nachname: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

Abteilung: \_\_\_\_\_

Szenario:  Szenario 1  Szenario 2  Szenario 3

Schlüsselübergabe erfolgreich? (nur Rathaus)  Ja  Nein

Ablauf pünktlich?  Ja  Nein

Verspätung um (in min): \_\_\_\_\_

Qualität der Post  einwandfrei  beschädigt

Anzahl Briefe: \_\_\_\_\_ Anzahl Pakete: \_\_\_\_\_

Hat der Ablauf ihren Erwartungen entsprochen?  Ja  Nein

Gründe für Unzufriedenheit

---

---

---

Verbesserungsvorschläge

---

---

---

Weitere Anmerkungen

---

---

---

Datum, Unterschrift

Stand: 07.04.2021

Geördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



### Erläuterungen

Szenario 1: Die Lieferung der Behördenpost erfolgt manuelle mithilfe eines Buddies (Begleitperson).

Szenario 2: Die Lieferung der Behördenpost erfolgt kontaktlos. Die Übergabe erfolgt am Shuttle. Der Buddy begleitet die Post allerdings und übernimmt die Lieferung am Arbeitsplatz.

Szenario 3: Die Lieferung der Behördenpost erfolgt mithilfe des Transportroboters „Laura“.



TaBuLa Flyer



Aufbau eines Testzentrums für  
automatisiert verkehrende Busse  
im Kreis Herzogtum Lauenburg



TESTZENTRUM  
AUTONOME BUSSE  
LAUENBURG / ELBE

### Wofür steht der Name TaBuLa?

TaBuLa steht als Abkürzung für „Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg“.

### Was ist TaBuLa?

TaBuLa ist ein Forschungsprojekt mit dem Ziel, Einsatzmöglichkeiten von automatisiert verkehrenden Bussen im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zu erforschen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Akzeptanz eines solchen Angebots durch die Nutzerinnen und Nutzer.

### Was passiert im Projekt TaBuLa?

Erste Testfahrten mit dem Shuttle fanden im Sommer 2019 statt. Seit Oktober 2019 können Fahrgäste mitfahren und seit März 2020 ist die Altstadtrunde (Strecke 3) in Betrieb. Währenddessen werden seitens der Technischen Universität Hamburg laufend Fahrzeugdaten erhoben sowie Befragungen und Verkehrssituationsanalysen durchgeführt.

### Wie geht es mit dem Projekt weiter?

Nach Ende des Projekts TaBuLa im Dezember 2020 fährt das Shuttle im Projekt TaBuLa-LOG weiter. Ende 2021 endet das Projekt TaBuLa-LOG. Ein anschließender Weiterbetrieb ist aktuell nicht geplant.

### Was ist TaBuLa-LOG?

Das „LOG“ in TaBuLa-LOG steht für „Logistik“. TaBuLa-LOG ist ein Forschungsprojekt, das auf den Ergebnissen des TaBuLa-Projekts aufbaut. Ziel ist es, zu untersuchen, wie sich ein automatisierter Transport von Waren in den ÖPNV integrieren lässt.



Gelangen Sie direkt zum TaBuLa-Erklärfilm oder über den Link [www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de).

### Wie werden die Waren transportiert?

Im Rahmen von TaBuLa-LOG werden Roboter entwickelt, die im Jahr 2021 automatisiert Waren innerhalb Lauenburgs ausliefern sollen. Sie werden für Teile ihrer Fahrtstrecke das TaBuLa Shuttle nutzen. Das bedeutet, die Roboter werden an einer Haltestelle auf das Shuttle warten, es über die Rampe befahren und es später an einer anderen Haltestelle wieder verlassen. Der Fahrgastbetrieb wird hierdurch nicht beeinträchtigt. Die Roboter können das Shuttle gleichzeitig mit anderen Fahrgästen nutzen. Ähnlich wie das TaBuLa Shuttle werden auch die Roboter während der Fahrt von einer Begleitperson überwacht.



### Was wird transportiert?

Aktuell ist es geplant, die behördeninterne Post der Lauenburger Verwaltung zwischen den einzelnen Standorten zu transportieren.

Weitere  
Informationen und  
Antworten auf  
viele Fragen (FAQ)  
gibt es im Internet unter  
[www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de)

### Die Betriebszeiten

Der Fahrgastbetrieb läuft planmäßig von Dienstag bis Freitag jeweils von 10 bis 17 Uhr und Samstag von 10 bis 16 Uhr. Aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen kann es hierbei jedoch vorkommen, dass der Testbetrieb außerplanmäßig unterbrochen werden muss. Informieren Sie sich deshalb über den aktuellen Betriebszustand unter [www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de).

	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Montag	kein Fahrgastbetrieb							
Dienstag bis Freitag	Fahrgastbetrieb							
Samstag	Fahrgastbetrieb							
Sonntag	kein Fahrgastbetrieb							

Der Bus bietet zehn Fahrgästen und einem Fahrzeugbegleiter oder einer Fahrzeugbegleiterin Platz. Das Fahrzeug ist barrierefrei und ermöglicht Rollstuhlfahrerinnen und -fahrern einen Einstieg über eine automatische Rampe. Auch die Mitnahme von Kinderwagen ist möglich. Fahrräder und E-Scooter können nicht transportiert werden. Die Mitfahrt ist generell kostenfrei.

### Das Fahrzeug

Im Rahmen des Forschungsprojekts TaBuLa kommt ein automatisierter, elektrischer Kleinbus des Herstellers NAVYA mit einem Allradantrieb zum Einsatz. Damit das Fahrzeug auf dem geplanten Rundkurs seinen Betrieb aufnehmen kann, werden die Strecken im Vorwege digital kartiert. Im Anschluss kann der Bus entlang einer virtuellen Schiene mit bis zu 18 Stundenkilometern fahren.



### Betriebsinformationen: [www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de)

Aktuelle Betriebsmeldungen beachten  
Kostenfreie Beförderung  
Vollelektrisch batteriebetrieben

**Hinweis:** Bei schlechten Witterungsverhältnissen oder technischen Tests kann der Shuttlebetrieb oder eine Mitnahme nicht gewährleistet werden.



### Die Fahrwege

- 03** Altstadtrunde: Ringlinie ZOB – Altstadt – ZOB
- 01** Amtsplatzrunde: ZOB – Amtsplatz – ZOB

Die Fahrtdauer für eine vollständige Altstadtrunde beträgt etwa 30 Minuten. Die Amtsplatzrunde wird nur als Ausweichstrecke bedient zum Beispiel im Falle von Veranstaltungen oder Baustellen.

### Die Haltestellen

- 01** ZOB
- 02** Kleiner Sandberg
- 03** Lösch- und Ladeplatz
- 04** Heinrich-Osterwold-Halle
- 05** Fährtrappe
- 06** Kirchplatz
- 08** Friedrichsbrücke (Schloss)
- 11** Markt (Bedarfshalt, kein Regelbetrieb)
- 12** Amtsplatz (Bedarfshalt, kein Regelbetrieb)



Projektpartner



Assoziierte Projektpartner



## Projektpartner

### Kreis Herzogtum Lauenburg

Der Kreis Herzogtum Lauenburg ist als Aufgabenträger des öffentlichen Nahverkehrs in das Projekt eingebunden.

### Technische Universität Hamburg

Die wissenschaftlichen Partner an der Technischen Universität Hamburg sind das Institut für Verkehrsplanung und Logistik (VPL) sowie das Institut für Technische Logistik (ITL). Das VPL ist verantwortlich für die Projektkoordination, den Shuttlebetrieb und die Durchführung von Begleitstudien. Das ITL leitet die Entwicklung und den Betrieb der Lieferroboter.

### Assoziierte Projektpartner

Stadt Lauenburg/Elbe · Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH) · Versorgungsbetriebe Elbe GmbH (VBE) · Siemens Mobility GmbH · Büro autoBus · LaLoG LandLogistik GmbH · E&K Automation GmbH

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz und Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig (VPL)  
 Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreuzfeldt (ITL)  
 Dipl.-Ing. Matthias Grote (Projektkoordinator) (VPL)  
 E-Mail: tabula@tuhh.de  
 Technische Universität Hamburg (TUHH)  
 Institut für Verkehrsplanung und Logistik (W8)  
 Am Schwarzenberg-Campus 3 (Gebäude E)  
 21073 Hamburg

Stand: Juli 2020

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

#### Fördergrundlagen:

Förderrichtlinien „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ und „Ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Mobilitätssystem durch automatisiertes Fahren und Vernetzung“

#### Fördersumme:

3,7 Millionen Euro

#### Förderkennziffern:

16AVF2152 (TaBuLa) und  
01MM19013 (TaBuLa-LOG)

#### Projektlaufzeit:

01.01.2018 bis 31.12.2021

# TaBuLa Fahrplan



TESTZENTRUM  
AUTONOME BUSSE  
LAUENBURG / ELBE



KREIS HERZOGTUM LAUENBURG



TUHH  
Technische Universität Hamburg



Hamburger Straße, ZOB, Elbstraße, Elbschiffahrtsmuseum, Schlossturm, Fürstengarten, Heinrich-Osterwold-Halle, Großer Sandberg, Elbe

**Hinweis:** Bei schlechten Witterungsverhältnissen oder technischen Tests kann der Shuttle-Betrieb nicht gewährleistet werden.



### Haltestellen (bus stops)

<b>01</b> ZOB	<b>06</b> Kirchplatz
<b>02</b> Kleiner Sandberg	<b>07</b> Hohler Weg (Mitte)
<b>03</b> Lösch- und Ladeplatz	<b>08</b> Friedrichsbrücke (Schloss)
<b>04</b> Heinrich Osterwold-Halle	<b>09</b> Fürstengarten <i>(Bedarfhalt, kein Regelbetrieb)</i>
<b>05</b> Fahrtrepe	



**Aktuelle Betriebsinformationen:**  
[www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de)  
 Kostenfreie Beförderung  
 (free transportation)  
 Vollelektrisch batteriebetrieben  
 (electric vehicle)

Gefördert durch:



Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

**Fördergrundlagen:** Förderrichtlinien „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ und „Ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Mobilitätssystem durch automatisiertes Fahren und Vernetzung“  
**Fördersumme:** 3,7 Millionen Euro  
**Förderkennziffern:** 16AVF2152 (TaBuLa) und 01MM19013 (TaBuLa-LOG)  
**Projektlaufzeit:** 01.01.2018 bis 31.12.2021

Assoziierte Projektpartner:











TESTZENTRUM  
AUTONOME BUSSE  
LAUENBURG / ELBE



TUHH  
Technische Universität Hamburg

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Fahrplan gültig ab 16. August 2021

## Haltestelle: Lauenburg ZOB

### DIENSTAG bis FREITAG

Lauenburg ZOB	AB	9:30	10:00	10:40	12:30	13:00	13:30	14:00	14:40	15:20	16:00
Kleiner Sandberg		9:35	10:05	10:45	12:35	13:05	13:35	14:05	14:45	15:25	16:05
Lösch- und Ladeplatz		9:37	10:07	10:47	12:37	13:07	13:37	14:07	14:47	15:27	16:07
Heinrich Osterwold-Halle		9:38	10:08	10:48	12:38	13:08	13:38	14:08	14:48	15:28	16:08
Fährtreppe		9:40	10:10	10:50	12:40	13:10	13:40	14:10	14:50	15:30	16:10
Kirchplatz	AN	9:45	10:15	10:55	12:45	13:15	13:45	14:15	14:55	15:35	16:15
Kirchplatz	AB	9:50	10:20	11:10	12:50	13:20	13:50	14:20	15:00	15:40	16:20
Im Graben		9:52	10:22	11:12	12:52	13:22	13:52	14:22	15:02	15:42	16:22
Friedrichsbrücke		9:54	10:24	11:14	12:54	13:24	13:54	14:24	15:04	15:44	16:24
Fürstengarten			10:31	11:21							
ZOB	AN	10:00	10:35	11:25	13:00	13:30	14:00	14:30	15:10	15:50	16:30

### SAMSTAG

Lauenburg ZOB	AB	10:00	10:30	11:00	11:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:30	16:00	16:30
Kleiner Sandberg		10:05	10:35	11:05	11:35	13:05	13:35	14:05	14:35	15:35	16:05	16:35
Lösch- und Ladeplatz		10:07	10:37	11:07	11:37	13:07	13:37	14:07	14:37	15:37	16:07	16:37
Heinrich Osterwold-Halle		10:08	10:38	11:08	11:38	13:08	13:38	14:08	14:38	15:38	16:08	16:38
Fährtreppe		10:10	10:40	11:10	11:40	13:10	13:40	14:10	14:40	15:40	16:10	16:40
Kirchplatz	AN	10:15	10:45	11:15	11:45	13:15	13:45	14:15	14:45	15:45	16:15	16:45
Kirchplatz	AB	10:20	10:50	11:20	11:50	13:20	13:50	14:20	14:50	15:50	16:20	16:50
Im Graben		10:22	10:52	11:22	11:52	13:22	13:52	14:22	14:52	15:52	16:22	16:52
Friedrichsbrücke		10:24	10:54	11:24	11:54	13:24	13:54	14:24	14:54	15:54	16:24	16:54
Fürstengarten												
ZOB	AN	10:30	11:00	11:30	12:00	13:30	14:00	14:30	15:00	16:00	16:30	17:00

Tagesaktuelle Betriebsinformationen und Standortanzeige auf  
[www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de)



Aktive Standortanzeige der Shuttle auf der  
Homepage [www.tabulashuttle.de](http://www.tabulashuttle.de)



## TaBuLa

Aufbau eines Testzentrums für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg

[Home](#) [Fahrplan](#) [Projekthistorie](#) [TaBuLa-LOG](#) [Projektteam](#) [Ergebnisse](#) [FAQ](#) [Kontakt](#)



Standort TabulaShuttle #1  
location TabulaShuttle #1

Standort TabulaShuttle #2  
location TabulaShuttle #2

**AKTUELLE BETRIEBSINFORMATION:**

+++ Normaler Betrieb zu unseren Betriebszeiten +++ Am Freitag fahren wir bis 19 Uhr +++ Freitag und Samstag ist Laura mit an Bord - gerne an Umfrage im Fahrzeug teilnehmen +++ max. 3 Fahrgäste mit medizinischer Maske +++



Technische Universität Hamburg,  
Institut für Verkehrsplanung und Logistik  
2022

