



Aufbau eines Testzentrums für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg („TaBuLa“)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Kosten autonom fahrender Minibusse

Literaturanalyse ergänzt um Erfahrungen aus dem Betrieb eines Testprojektes und den Ergebnissen einer Expert:innenbefragung

Matthias Grote, Ole Röntgen



<https://doi.org/10.15480/882.3621>

urn:nbn:de:gbv:830-882.0139112

Lizenzart: CC BY 4.0 (Attribution)



BIBLIOGRAFISCHE INFORMATION

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

Von der Homepage des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik ist diese Publikation auch als PDF-Datei abrufbar unter:
<http://www.tuhh.de/vpl>.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER DER SCHRIFTENREIHE
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
Institut für Verkehrsplanung und Logistik – W8

TITELBILD
Dominik Pietzko

DRUCK
auf umweltfreundlichem Recyclingpapier
Auflage: 20

ECTL WORKING PAPER, Band 54, 2021

Kosten autonom fahrender Minibusse

*Literaturanalyse ergänzt um Erfahrungen
aus dem Betrieb eines Testprojektes und
den Ergebnissen einer Expert:innenbefragung*

Matthias Grote, Ole Röntgen

2021

PROJEKT

Aufbau eines Testzentrums für automatisiert verkehrende Busse
im Kreis Herzogtum Lauenburg („TaBuLa“)



PROJEKTPARTNER:INNEN

Technische Universität Hamburg (TUHH), Kreis Herzogtum Lauenburg



FÖRDERUNG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde anteilig mit
Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
(BMVI) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Gefördert durch:



FÖRDERKENNZIFFER

16AVF2152

PROJEKTVOLUMEN

2,25 Mio. € (davon 1,92 Mio. € Förderanteil durch BMVI)

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PROJEKTLAUFZEIT

01/2018 – 03/2021

AUTOREN

Dipl.-Ing. Matthias Grote (TUHH) und Ole Röntgen M.Sc. (TUHH)

UNTER MITARBEIT VON

Maike Loose (TUHH)

FOTOS

Dominik Pietzko, Matthias Grote

Abbildung 1: Die TaBuLaShuttle am ZOB Lauenburg/Elbe



Quelle: Matthias Grote

KURZFASSUNG

Im ländlichen Raum ist das Angebot des Öffentlichen Personennahverkehrs nicht selten unbefriedigend. Mit der langsam voranschreitenden Entwicklung des autonomen Fahrens stellt sich die Frage, welches Einsparpotential Busse ohne Fahrer:innen für die Schaffung neuer attraktiver Angebotsformen bieten. Mittels einer Literaturanalyse und einer zweistufigen Delphi-Umfrage, an der sich 36 Expert:innen aus Verkehrsunternehmen, Fahrzeugindustrie, Verwaltung und Forschung beteiligten, konnten neue Erkenntnisse und Einschätzungen zu den Kosten autonomer Minibusse gewonnen werden. Hinzu kommen Erfahrungen aus dem Reallabor TaBuLa in Lauenburg/Elbe, in dem zwei automatisiert fahrende Busse als Ergänzung bestehender Buslinien eingesetzt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass an die Fahrzeuge des ÖPNV zugunsten der barrierefreien Nutzbarkeit und der besonderen Nutzungsintensität spezielle Anforderungen zu stellen sind, die gegenüber Taxis und privaten Pkw zu erhöhten Investitionskosten führen. Während für den Zeitpunkt der Marktreife – laut Expert:innen zwischen 2025 und 2040 – konkrete Investitionskosten für autonom fahrende kleine Minibusse ermittelt werden können, bleibt es bei den unzähligen Betriebskostenparametern in den Umfragen bei Trends für die individuelle Kostenprognose. Deutlich wird jedoch, dass neben einer großen Ersparnis durch den Wegfall des Fahrpersonals viele Betriebskosten ansteigen könnten. Gemäß Expert:innenbefragung werden in der Literatur die Kosten für IT-Systeme, Technische Leitstelle, Sicherheit von System und Fahrgästen bisher unterschätzt. Dennoch kann im Öffentlichen Personennahverkehr in einem größeren Flottenbetrieb autonomer Fahrzeuge mit einem um ein Drittel niedrigeren Fahrplankilometerpreis gerechnet werden. Weiterhin zeigt sich, dass mit der Automatisierung eine neue Rollenverteilung zwischen Fahrzeugherstellenden, Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern entstehen wird.

ABSTRACT

In rural areas, local public transport services are often unsatisfactory. With the slowly advancing development of autonomous driving, the question arises as to what savings potential buses without drivers offer for the creation of new attractive forms of service. By means of a literature analysis and a two-stage Delphi survey, involving 36 experts from transport companies, the vehicle industry, administration and research, new findings and estimates on the costs of autonomous minibuses were obtained. In addition, experience was gained from the TaBuLa real laboratory in Lauenburg/Elbe, where two automated buses were used to supplement existing bus services. The results show that special requirements must be placed on public transport vehicles in favour of barrier-free usability and special intensity of use, which lead to increased investment costs compared to taxis and private cars. While concrete investment costs for autonomously driving small minibuses can be determined for the time of market maturity - according to experts between 2025 and 2040 - the countless operating cost parameters in the surveys remain trends for individual cost forecasting. However, it is clear that in addition to a large saving due to the reduction in the number of drivers, many operating costs could increase. According to the expert survey, the costs for IT systems, technical control centre, system security and passengers have been underestimated in the literature so far. Nevertheless, in a larger fleet operation of autonomous vehicles, a one-third lower price per timetable kilometre can be expected in local public transport. It is also apparent that automation will lead to a new division of roles between vehicle manufacturers, transport companies and public transport authorities.

INHALT

1	EINLEITUNG	13
2	DEFINITIONEN	15
3	LITERATURANALYSE	16
3.1	Beschaffungskosten und Nutzungsdauer	17
3.1.1	Beschaffungskosten und Nutzungsdauer von Standardlinienbussen	17
3.1.2	Beschaffungskosten und Nutzungsdauer von Minibussen	17
3.1.3	Investitionskosten für die Automatisierung	19
3.2	Betriebskosten	20
3.2.1	Zusammensetzung der Kosten klassischer Bus- und Taxibetrieb	20
3.2.2	Anteilige Zusammensetzung der Betriebskosten im autonomen Taxibetrieb	23
3.2.3	Einzelpositionen im autonomen Betrieb von Kleinbussen im ÖPNV	25
3.3	Zwischenfazit	29
4	EXKURS AM PROJEKTBEISPIEL TABULA IN LAUENBURG/ELBE	31
4.1	Prognostizierte Kosten für Fortsetzung des TaBuLa-Betriebes um drei Jahre.	33
4.1.1	TaBuLa-Szenario 0: Betrieb der Strecke 3 mit einem klassischem Diesel-Minibus mit Fahrer:in	33
4.1.2	TaBuLa-Szenario 1: Weiterbetrieb durch zwei automatisierte Fahrzeuge mit Fahrzeugbegleiter:innen	34
4.1.3	TaBuLa-Szenario 2a: Ganztagesbetrieb durch ein Fahrzeug mit Fahrzeugbegleiter:innen	38
4.1.4	TaBuLa-Szenario 2b: Ganztagesbetrieb durch ein Fahrzeug ohne Fahrzeugbegleiter:innen	38
4.1.5	TaBuLa-Szenario 3: Ganztagesbetrieb durch zwei Fahrzeuge ohne Fahrzeugbegleiter:innen mit höherer Geschwindigkeit	38
4.2	Zwischenfazit	40
5	EXPERT:INNENBEFRAGUNG	42
5.1	Methodik	42
5.1.1	Hintergrund der Methodik Delphi	42
5.1.2	Operationalisierung der Fragestellung	43
5.2	Zusammensetzung der Expert:innen und Durchführung der Befragung	48
5.3	Ergebnisse	51
5.4	Zwischenfazit	65
6	ZUSAMMENFASSUNG	67
7	FAZIT UND AUSBLICK	70
8	LITERATURVERZEICHNIS	72

ABBILDUNGEN

Abbildung 1:	Die TaBuLaShuttle am ZOB Lauenburg/Elbe	4
Abbildung 2:	Kostenaufteilung für regionalen Busverkehr nach (Patrick Frank, Markus Friedrich, Johannes Schlaich 2008)	21
Abbildung 3:	Kostenaufteilung für Regionalverkehr Bus nach (Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann 2018)	21
Abbildung 4:	Allgemeine Kostenaufteilung aus den Jahren 2017/2018 bei Mitgliedern des VDV (ohne SPNV der DB-Gruppe) nach (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2019)	21
Abbildung 5:	Kostenaufteilung für elektrisch betriebenen städtischen Busverkehr nach (Tirachini und Antoniou 2020)	22
Abbildung 6:	Kostenaufteilung für Minibus – eigene Berechnung auf Grundlage (Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann 2018)	22
Abbildung 7:	Kostenaufteilung für Taxi – eigene Berechnung auf Grundlage (Wadud 2017)	22
Abbildung 8:	Kostenaufteilung für Taxi – eigene Berechnung auf Grundlage (Gerhard Willhalm 2021)	23
Abbildung 9:	Kostenaufteilung für autonom fahrendes Taxi – eigene Berechnung auf Grundlage (Wadud 2017)	24
Abbildung 10:	Kostenaufteilung für autonom fahrendes Fahrzeug für sechs Personen – eigene Berechnung auf Grundlage (Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich und Maximilian Hartl 2016)	24
Abbildung 11:	Kostenaufteilung für autonom elektrisch fahrenden Minibus nach (Ongel et al. 2019)	24
Abbildung 12:	Das TaBuLaShuttle auf den historisch gewachsenen Straßen in der Altstadt von Lauenburg/Elbe	32
Abbildung 13:	Linienverlauf der dritten Umsetzungsstufe des TaBuLa-Projektes in Lauenburg/Elbe	35
Abbildung 14:	Das TaBuLaShuttle an der Haltestelle Lauenburg/ZOB mit ausgefahrener Rampe	37
Abbildung 15:	Übersicht der Kosten der untersuchten Szenarien in TaBuLa	40
Abbildung 16:	Grafik aus der Umfrage zu Situation 1	44
Abbildung 17:	Grafik aus der Umfrage zu Situation 2	45
Abbildung 18:	Grafik aus der Umfrage bei Kostenblöcken und Kilometerkosten zu autonom fahrenden Kleinbussen	46
Abbildung 19:	Grafik aus der Umfrage zu Gesamtkosten eines Kleinbusses bei Marktreife	46
Abbildung 20:	Tätigkeitsprofil der Befragten in der ersten und zweiten Runde der Delphi-Umfrage (Mehrfachnennungen möglich)	50
Abbildung 21:	Einschätzung der Befragten zum Zeitpunkt der Marktreife autonom fahrender Busse, erste Runde	51
Abbildung 22:	Einschätzung der Befragten zur eigenen Sicherheit bei der Beantwortung der Frage zum Kaufpreis für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife in der ersten Runde	52

Abbildung 23: Mittelwert und Standardabweichungen der Kaufpreisabschätzungen der ersten und zweiten Befragungsrunde für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife	53
Abbildung 24: Einschätzung der Befragten in der ersten Befragungsrunde zur eigenen Sicherheit bei der Beantwortung der Frage für die übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife	54
Abbildung 25: Mittelwert und Standardabweichung der Einschätzungen für die übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife	54
Abbildung 26: Einschätzung von Kaufpreis und wirtschaftlicher Nutzungsdauer nach Tätigkeitsgebieten bei Marktreife in der ersten Befragungsrunde	55
Abbildung 27: Sicherheit der Befragten bei der Einschätzung zu autonom verkehrenden Fahrzeugen und Busbetrieb nach Tätigkeitsgebieten, erste Runde	56
Abbildung 28: Abschreibungskosten pro Jahr – eigene Berechnung aus Kaufpreis geteilt durch Nutzungsdauer je Tätigkeitsgebieten der Befragten in der ersten Runde	56
Abbildung 29: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung der Einzelfaktoren eines autonom fahrenden Standardbusses gegenüber eines von Busfahrer:innen gefahrenen Standardbusses (Situation 1), erste Runde	59
Abbildung 30: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung der Einzel-Kostenparameter eines Kleinbusses im Vergleich zu einem 12-Meter-Bus (Szenario 2), erste Runde	60
Abbildung 31: Antworten auf die Frage, was den größten Anteil an den Betriebskosten im autonomen Betrieb bei Marktreife einnehmen wird, erste Runde	62
Abbildung 32: Sortierung durch die Befragten von „größten Blöcken der Betriebskosten“ für autonome Kleinbusse, zweite Runde	62
Abbildung 33: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung eines autonom fahrenden Busses im Vergleich zu einem von Menschen gefahrenen Busses nach Marktreife, erste Runde	63
Abbildung 34: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung eines autonom fahrenden Busses im Vergleich zu einem von Menschen gefahrenen Busses nach Marktreife, zweite Runde	64
Abbildung 35: Einschätzung der Teilnehmenden zur Frage: „Ich gehe davon aus, dass autonom fahrende Busse künftig von Verkehrsunternehmen...“ (Mehrfachnennungen möglich)	64

TABELLEN

Tabelle 1: Betriebskosten mit umfangreicher Diskussion	26
Tabelle 2: Betriebskosten mit allgemeiner Diskussion	26
Tabelle 3: Betriebskosten mit wenig Diskussionen	27
Tabelle 4: Betriebskosten ohne relevante Diskussion	28
Tabelle 5: Kosten für den Weiterbetrieb der beiden TaBuLaShuttles um drei Jahre	36

GLOSSAR

DACH	Kunstwort für die Region Deutschland – Österreich – Schweiz
DB	Deutsche Bahn
LSA	Lichtsignalanlage
Pkw	Personenkraftwagen
SAE	Organisation SAE International, die Normen wie SAE J3016 für die Klassifizierung und Definition von Begriffen für straßengebundene Kfz mit automatisierten Fahrfunktionen herausgibt
sic	sic erat scriptum: ‚so stand es geschrieben‘
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
TaBuLa	Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im temporär
temp.	temporär
TUHH	Technische Universität Hamburg
TÜV®	Technischer Überwachungsverein (frühere Bezeichnung für Technische Prüfstelle für den Kraftfahrzeugverkehr)
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VHH	Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH
VIN	Fahrzeugidentifikationsnummer (engl. <i>Vehicle Identification Number</i>)
VwV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
V2X	engl. <i>Vehicle to everything</i>
ZOB	Zentraler Omnibus-Bahnhof
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr

1 EINLEITUNG

In vielen ländlichen Bereichen ist die Versorgung mit Öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV) auf unbefriedigendem Niveau: Lange Fußwege zu Haltestellen und ein geringes Fahrtenangebot machen die Nutzung des ÖPNV wenig attraktiv. Nicht selten fehlt es abseits des klassischen Schulverkehrs sogar völlig an einem Angebot, so dass beispielsweise an Wochenenden kein Betrieb stattfindet. Ohne einen (eigenen) Pkw sind in diesen Gebieten viele Aktivitäten nicht durchführbar. Gleichwohl bedarf bereits dieses überschaubare ÖPNV-Angebot oft öffentlicher Zuschüsse, da ein eigenwirtschaftlicher Betrieb angesichts der festgeschriebenen Tarife und des häufig überschaubaren Fahrgastaufkommens die entstehenden Kosten bei Weitem nicht deckt.

Automatisiert fahrende Kleinbusse, wie sie im Rahmen des von den Autoren begleiteten und vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten TaBuLa-Projektes in Lauenburg/Elbe¹ erprobt wurden, könnten insbesondere in diesen Gebieten zu einer deutlichen Verbesserung der ÖPNV-Bedienungsqualität führen. Hohe Erwartungen werden an den Wegfall der Kosten für das Fahrpersonal verknüpft, durch die sich ohne weitere **lohntarifliche** Aufschläge zusätzliche Angebote auch in den Abend- und Nachtstunden oder an Wochenenden realisieren ließen. Auch gibt es Ideen, mit den kleineren Gefäßen geringere Nachfragen zumindest an Hauptachsen heranzuführen, um derzeit schlecht erreichbare Orte an einen leistungsfähigen ÖPNV anzubinden. Jedoch werden mit dem autonomen Betrieb auch neue Aufwendungen entstehen, die über die nahe liegende zusätzliche Ausstattung der Fahrzeuge hinausgeht.

¹ Das „Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg“ (TaBuLa) wurde durch die Projektpartner Technische Universität Hamburg und Kreis Herzogtum Lauenburg unter Mitwirkung der assoziierten Partner, u.a. die Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH und die Stadt Lauenburg, getragen und durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen der Förderrichtlinie „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ mit 1,9 Millionen Euro gefördert.

Die Kosten für Anschaffung und Betrieb autonomer Kleinbusse werden für die künftige Integration in ÖPNV-Angebote eine hohe Bedeutung haben. Daher besteht besonderer Bedarf, die Investitions- und Betriebskosten für ein System autonom fahrender Kleinbusse nach deren Marktreife einschätzen zu können.

Vor diesem Hintergrund stellen sich folgende Forschungsfragen:

1. Wie hoch werden die Beschaffungskosten für einen autonom fahrenden kleinen Minibus sein?
2. Wie hoch sind die beim Betrieb entstehenden Kosten und die Aufwendungen für Infrastruktur?
3. Welche Kosten für zusätzlich nötige Tätigkeiten, über die Beschaffung der Technik hinaus, sind bei autonom fahrenden Kleinbussen im Vergleich zu heutigen Bussen zu erwarten?
4. Über welchen Zeitraum werden die Fahrzeuge wirtschaftlich nutzbar sein?
5. Wann werden autonom fahrende Busse marktreif sein?
6. Werden autonom fahrende Busse weiterhin vornehmlich von Verkehrsunternehmen erworben und betrieben werden, oder werden sich andere Modelle wie Leasing oder „Full Service“ etablieren?

Um die Beantwortung dieser Fragestellungen zu ermöglichen, werden drei Arbeitsschritte durchgeführt, die sich in den anschließenden Kapiteln wie folgt aufgliedern und erläutert werden:

- ▶ Literaturanalyse zum aktuellen Wissensstand,
- ▶ Zusammenstellung der Erfahrungswerte aus dem automatisierten Shuttlebetrieb im Projekt TaBuLa und
- ▶ Durchführung und Ergebnisse einer Expert:innenbefragung nach der Delphi-Methodik für einen künftigen Einsatz marktreifer autonomer Minibusse.

Abschließend folgt eine Zusammenfassung des vorliegenden Forschungsstands, der Einordnung der Ergebnisse und einer Analyse des weiteren Forschungsbedarfs für einen nachhaltigen und attraktiven ÖPNV im ländlichen Raum.

2 DEFINITIONEN

Das besondere Forschungsinteresse gilt den Kosten zu dem Zeitpunkt, an dem autonom fahrende Kleinbusse **marktreif** sind. Damit ist gemeint, dass die autonomen Kleinbusse von mehreren Herstellern angeboten und für realen Fahrgastbetrieb in einem Netz beschafft und betrieben werden können. Die Fahrzeuge sind technisch ausgereift und können den alltäglichen Verkehr bewältigen (mehr als 50 km/h, selbstständiges Ausweichen, im Fahrzeug kein Begleiter,...). Es ist davon auszugehen, dass dieser Kostenstand nicht ein auf lange Sicht vielleicht endgültig eintretendes Niveau widerspiegelt. Mit fortschreitender technischer Entwicklung, aus dem Massenbetrieb gewonnenen Erfahrungen und sich niederschlagenden Skaleneffekten können die Kosten sinken. Die Szenarien in der Expert:innenbefragung basieren auf der Marktreife.

Vor Marktreife wiederum ist der Markt von Test- und Versuchsangeboten geprägt, deren Kostenstruktur nicht repräsentativ für den späteren Einsatz ist. Es sind noch unzählige Herausforderungen des autonomen Fahrens ungelöst und die autonome Marktreife und der Massenbetrieb in weiter Ferne, wodurch Prognosen darüber stärker mit Unsicherheiten belastet sind. Angesichts der ohnehin komplexen Prognoseaufgabe fiel die Wahl entsprechend auf die Marktreife als den frühestmöglichen, sinnvollen Zeitpunkt. Alle Kostenangaben sind auf den Preisstand 2021 berechnet. Im Kapitel zum Projekt TaBuLa werden auch Szenarien betrachtet, in denen noch keine Marktreife vorliegt.

Autonomer Bus steht im Folgenden für einen Bus, bei dem zur Fahrgastbeförderungen im täglichen Betrieb kein Personal zur Steuerung des Fahrzeugs anwesend sein muss (Level 5 gem. SAE²).

Ein **Kleinbus** ist ein Straßenfahrzeug für den Öffentlichen Personenverkehr entsprechend eines **kleinen Minibusses** mit einer Kapazität von etwa 10 bis 15 Fahrgästen.

2 Die Norm SAE J3016 wurde von SAE International herausgegeben und beschreibt die Klassifizierung und Definition von Begriffen für straßengebundene Kfz mit automatisierten Fahrfunktionen

3 LITERATURANALYSE

Bevor in der Delphi-Befragung Expert:innen aus der DACH-Region zu konkreten Werten befragt werden, kann mittels englisch- und deutschsprachiger Literaturanalyse der übergreifende und möglichst unabhängige Stand der Wissenschaft ermittelt werden.

Die Literaturanalyse erscheint an dieser Stelle wichtig, da hinsichtlich einer alternativen Befragung von Einzelpersonen aus Unternehmen oder anderen Akteuren die Schwierigkeit häufiger Verschwiegenheitsverpflichtungen aus wettbewerblichen Gründen besteht und es sich bei Einzelpersonen um subjektive Teileinschätzungen handelt, die teils nicht das Gesamtsystem des ÖPNV mit seinen Herausforderungen betrachten können.

Die Ergebnisse der Recherche werden in zwei weiter untergliederten Schritten erläutert:

1. Beschaffungskosten und Nutzungsdauer
 - a. Standardlinienbus (Länge 12 m),
 - b. Kleiner Minibus alias „Kleinbus“ (Länge 6 m),
 - c. Automatisierung sowie
2. Auswirkung auf die Betriebskosten.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die in der Literatur vorgefundenen Angaben zu absoluten Investitionskosten auf den Preisstand 2021 gebracht. Zur Umrechnung diente der deutsche Verbraucherpreisindex.

Die Literaturrecherche bietet vielfältige Ergebnisse hinsichtlich der ermittelten Kosten eines Busbetriebes, insbesondere, was einen späteren autonomen Betrieb betrifft. Eine besondere Herausforderung besteht in der Übertragung des Wissens auf autonome kleine Minibusse. Viele Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Automatisierung von Personenkraftwagen oder Taxis. Sie haben ihr Augenmerk nicht auf der Einsatzmöglichkeit der Fahrzeuge für öffentlichen Personennahverkehr, was sich im Folgenden zeigt.

3.1 Beschaffungskosten und Nutzungsdauer

Wesentliche Parameter für die Lebenszykluskosten sind die Investitionskosten und die angenommene Nutzungsdauer eines Fahrzeuges. Verschiedene Quellen liefern für die drei nachfolgenden Themenblöcke sehr differenzierte Ergebnisse, die sich wie folgt darstellen.

3.1.1 Beschaffungskosten und Nutzungsdauer von Standardlinienbussen

Die Beschaffungskosten für einen Standardlinienbusses mit einer Länge von 12 m mit Niederflurtechnik und Verbrennungsmotor wird je nach Ausstattung (inflationbereinigt auf das Jahr 2021) in der Literatur mit 254.000 bis 311.000 Euro angegeben (Aldin Bibic 2018; Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2007; Andrea Herfert et al. 2012). Hat das Fahrzeug einen rein elektrischen Antrieb und Akkus, steigt der Preis auf 418.000 bis 628.000 Euro (Tirachini und Antoniou 2020; Dr. Thoralf Knotte et al. 2017; Fraunhofer-Gesellschaft 2017). Die Nutzungsdauer von Standardlinienbussen wird vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen mit 12 Jahren angegeben (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2007; Patrick Frank, Markus Friedrich, Johannes Schlaich 2008). Die vorgenannten Quellen geben die Jahresfahrleistung mit 75.000 km pro Fahrzeug und Jahr im Regionalverkehr an, dies entspricht 900.000 km Gesamtfahrleistung eines Fahrzeuges. In anderen Industriestaaten, beispielsweise Singapur, werden unter Berücksichtigung eines „Refreshment“ auch Nutzungsdauern von 17 Jahren mit entsprechend größerer Kilometerleistung erreicht (Ongel et al. 2019).

3.1.2 Beschaffungskosten und Nutzungsdauer von Minibussen

Die Literaturrecherche nach den Kosten explizit für Minibusse (Länge von 6-8 m, 12-24 Sitzplätze) gestaltet sich schwieriger. Häufig verschwimmt die Definition, Standardisierung und Abgrenzung zwischen Großraumtaxi und barrierefreiem Midibus. Auch die zugrunde gelegte Sitzplatzanzahl schwankt stark. Dabei liegt zwischen Pkw und Bus in diesem Bereich eine signifikante Kostenschwelle, die sich in den Beschaffungskosten und in Abschreibungsdauer in Verbindung mit Nutzungsart und -intensität unterscheidet.

Bei der Recherche über die Kosten aus Sicht der ÖPNV-Branche gibt der Verband deutscher Verkehrsunternehmen in seiner VDV-Schrift 2318 die Preise (inflationbereinigt auf das Jahr 2021) eines Minibusses mit Verbrennungsmotor mit 174.000 Euro an. Dies entspricht gut 60 Prozent des angegebenen Referenzwertes für den Standardlinienbus (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2007). Gespräche mit einem führenden deutschen Hersteller im Sektor der Linienbusse bestätigten den Stückpreis. Für einen besonders *kleinen barrierefreien* Minibus mit ca. 13 Sitzplätzen würde demnach der Einstiegspreis bei sehr großen Flotten bereits bei 110.000 Euro pro Fahrzeug beginnen, bei Einzelbeschaffung ab 130.000 Euro. Als Serienfahrzeug sind diese Minibusse nicht mit elektrischem Antrieb erhältlich, nachträglich auf elektrischen Betrieb umgebaut liegen die Kosten bei 220.000 Euro pro Fahrzeug. Neuentwicklungen projektieren derzeit eher 300.000 Euro pro ÖPNV-Fahrzeug. Dr. Thoralf Knotte et al. (2017) benennt die Kosten für einen „Elektro-Kleinbus“ passend dazu (inflationbereinigt) mit mindestens 293.000 Euro, was wiederum rund 60 Prozent der von Knotte et al. angesetzten Kosten eines Standardelektrolinienbuses sind. Zhang et al. 2019 aus Schweden hingegen setzen die Kapitalkosten eines Minibusses (19 Plätze) mit etwa 43 % der Kosten eines Standardbusses an. Sie gehen wie Jan Owen Jansson (1980) von einem linearen Zusammenhang zwischen Busgröße und Buskapitalkosten pro Betriebsstunde aus, wobei die Untersuchung nur Fahrzeuge mit mehr als 20 Sitzplätzen betrachtet.

Die Nutzungsdauer für Minibusse (6-8 m Länge) fällt mit 10 Jahren im Vergleich zu einem Standardlinienbus geringer aus (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2007). Die vom VDV angegebene übliche Jahresfahrleistung liegt mit 40.000 km pro Fahrzeug und Jahr deutlich unter dem eines Standardbusses im Regionalverkehr. So kommt ein Minibus den Angaben zufolge auf nur 400.000 km Gesamtfahrleistung.

Bei der Betrachtung der Kosten aus dem Taxigewerbe ergeben sich andere Kostenansätze: Preislisten der Pkw-Hersteller:innen geben 30.000 bis 50.000 Euro als Beschaffungskosten je Taxi an. Nicht enthalten ist darin die notwendige Ausstattung für den Einsatz im öffentlichen Personennahverkehr. Die Jahresfahrleistung wird in den USA und Deutschland identisch mit 75.000 km pro Fahrzeug angegeben (T. Donna Chen et al. 2016; Kai Nagel, Joschka Bischoff, Gregor Leich, Michał Maciejewski 2018). Die übliche Nutzungsdauer eines Taxis liegt bei fünf Jahren, bei geringerer Fahrleistung auch länger (Wadud 2017; T. Donna Chen et al. 2016).

3.1.3 Investitionskosten für die Automatisierung

Zu den Zusatzkosten der Automatisierung gibt es für taxiähnliche autonome Fahrzeuge verschiedene Annahmen. Sie zeigen jedoch aufgrund unterschiedlicher Ansätze und Methoden noch eine große Varianz oder werden als „unsicherste Komponente“ in der Ermittlung der künftigen Betriebskosten beschrieben (Winter et al. 2018; T. Donna Chen et al. 2016). Zhang et al. (2019) erläutern nachvollziehbar, dass ein teilautomatisierter Betrieb (bei dem Fahrzeugbegleiter:innen benötigt würden) absolut unwirtschaftlich ist. Dies lässt sich sehr konkret am nachfolgenden Kapitel zum Projekt TaBuLa näher darstellen.

Für autonome Standardlinienbusse sind die Erkenntnisse in der Literatur wenig umfangreich, der Fokus dieser Ausarbeitung liegt jedoch ohnehin auf autonomen Minibussen. Bei Marktreife für SAE-Level 5 (als Zielhorizont wird häufig 2030 genannt) werden die Zusatzkosten für Pkw in einigen älteren Studien auf weniger als 5.000 Euro pro Fahrzeug geschätzt (KPMG 2015; Transport Systems Catapult 2015; Reuters 04.12.2017), die Automobilwoche bewertet die Kosten zu der gleichen Zeit als vierstellig (Automobilwoche (swi) 2015). Stephens et al. (2016) ermitteln eine mögliche Spanne von 2.700 bis 10.000 US-Dollar (2.200 bis 8.300 Euro) pro Fahrzeug, während Wadud (2017) in seiner Sensitivitätsanalyse Kosten in einer Spanne mit optimistisch 9.400 bis pessimistisch 15.000 Pfund Sterling (10.700 bis 17.100 Euro) pro Taxi oder Pkw als notwendig erachtet. T. Donna Chen et al. (2016) benennen 10.000 US-Dollar (8.250 Euro). Eine vergleichsweise junge Einschätzung von Ongel et al. (2019) gibt die Mehrkosten der Automatisierung für einen Kleinbus mit 9.000 US-Dollar (7.400 Euro) an. Wadud (2017) geht ferner von einem Zuschlag von ca. 30 % für größere Fahrzeuge wie Lkw auf die vorgenannten absoluten Pkw-Automatisierungskosten aus. Bei allen genannten Kosten handelt es sich um Beschaffungskosten ohne mögliche Folgekosten. Ein Preisverfall für den Erwerb der Technik für autonomes Fahren von 5 Prozent pro Jahr wird prognostiziert, wobei in den ersten Jahren insgesamt eine Preisstabilität bei dem Aufpreis zu erwarten ist, da vermutlich bis zur völligen Reife der Technik immer noch wieder bessere und auch in der Summe mehr neue Sensoren etc. eingebaut werden (Ongel et al. 2019). Umgerechnet in Prozent scheinen sich T. Donna Chen et al. (2016) mit ca. 25 % und Ongel et al. (2019) mit 22 % Preisaufschlag auf die Standardfahrzeugkosten im Prognosejahr 2030 in den Beschaffungskosten einig. Die zitierten Werke beziehen sich dabei häufig auf die Kosten von Sensortechnik. Die Unsicherheit wird größer, wenn in der Recherche Softwareentwicklung und Lizenzen einbe-

zogen werden. Keine der Quellen scheint Kosten der Automatisierung für einen öffentlichen Fahrgastbetrieb zu berücksichtigen (zusätzliche Sensorik für Fahrgastzu- / -ausstieg, Objekterkennung und Leitstellenüberwachung). Dieser Bereich scheint noch nicht hinreichend erforscht und erprobt zu werden.

3.2 Betriebskosten

Für die Lebenszykluskosten eines ÖPNV-Betriebes sind neben den Investitionskosten die laufenden Kosten von großer Bedeutung. Zudem haben die laufenden Kosten eine erhebliche Relevanz für autonome Betriebsszenarien.

3.2.1 Zusammensetzung der Kosten klassischer Bus- und Taxibetrieb

Die größten Kosten in einem klassischen ÖPNV-System in Industriestaaten ist das Personal. Verschiedene Quellen sehen den Anteil des Personals in Europa bzw. Deutschland an den Gesamtkosten bereits seit Jahrzehnten bei 41 bis 48 Prozent (Abbildung 2 und Abbildung 3) (Jan Owen Jansson 1980; Patrick Frank, Markus Friedrich, Johannes Schlaich 2008; Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann 2018). Die Statistik des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) bewertet den Anteil der Personalkosten auf rund 40 % für den Betrachtungszeitraum in 2018 (allerdings inkl. Schienenverkehr) (Abbildung 4) (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2019). Beim Vergleich ergeben sich Schwierigkeiten aufgrund unterschiedlicher Definition der Personalkosten (nur Fahrpersonal oder Personal des gesamten Betriebes) und der regional sehr unterschiedlich ausgestalteten Betriebe in Stadt und Land. Je nach Gehaltsniveau sind die Anteile auch international mit Werten zwischen 30 % in Niedriglohnländern und bis zu 70 % in anderen Industriestaaten sehr unterschiedlich (Ongel et al. 2019; Becker et al. 2020; Tirachini und Antoniou 2020).

Die zweitgrößte Position ist in allen vorgenannten Quellen das Fahrzeug. Ihm werden 21 bis 40 Prozent der Kosten zugeordnet (je nach Umfang). Vergrößert wird diese Position durch den Megatrend zu Elektrobussen, wodurch aber der Energiekostenanteil dauerhaft sinken dürfte (Abbildung 5). Der Personalkostenanteil verändert sich vermutlich aber nur unwesentlich. (Tirachini und Antoniou 2020)

Abbildung 2: Kostenaufteilung für *regionalen Busverkehr* nach Patrick Frank, Markus Friedrich, Johannes Schlaich (2008)

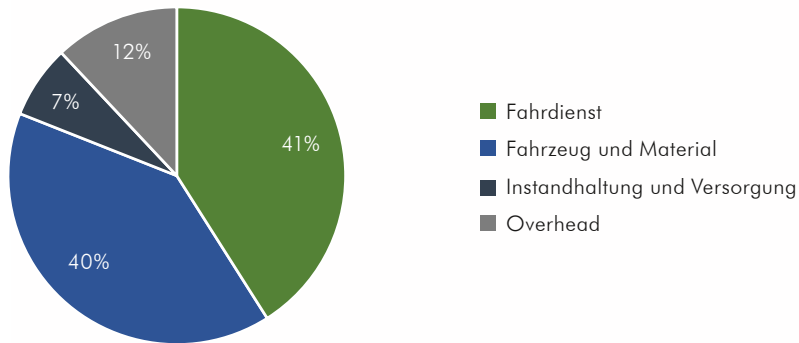


Abbildung 3: Kostenaufteilung für *Regionalverkehr Bus* nach Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann (2018)

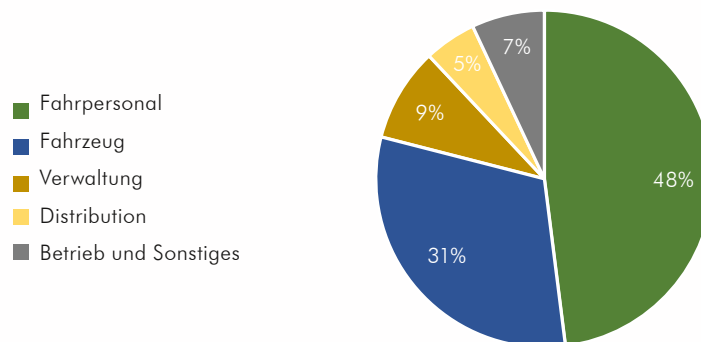


Abbildung 4: Allgemeine Kostenaufteilung aus den Jahren 2017/2018 bei Mitgliedern des VDV (ohne SPNV der DB-Gruppe) nach Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2019)

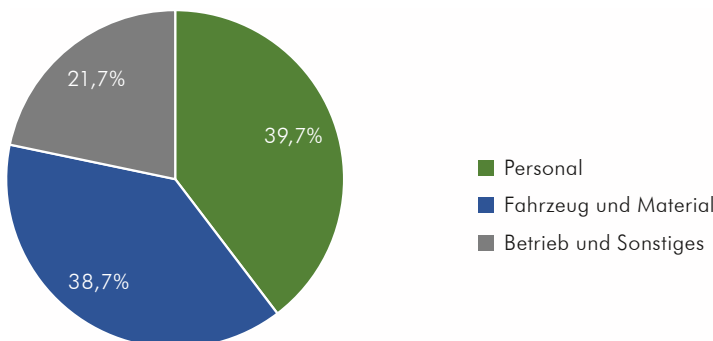


Abbildung 5: Kostenaufteilung für *elektrisch betriebenen städtischen Busverkehr* nach Tirachini und Antoniou (2020)

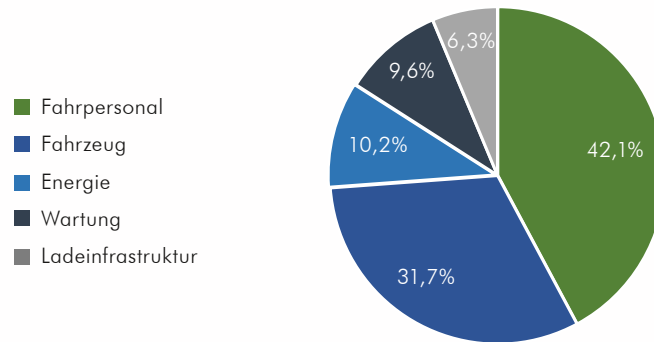


Abbildung 6: Kostenaufteilung für *Minibus* – eigene Berechnung auf Grundlage Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann (2018)

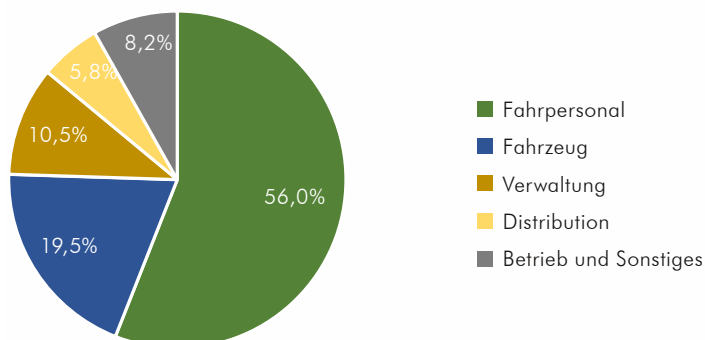
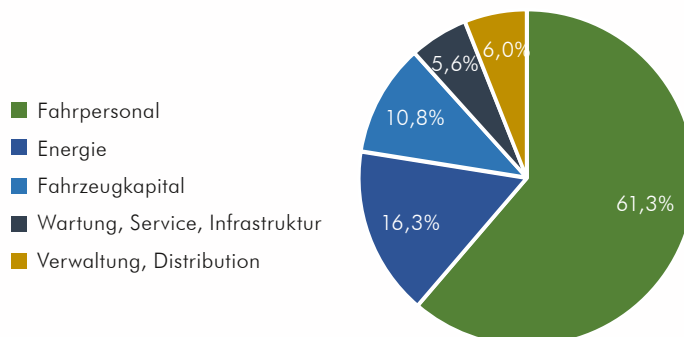


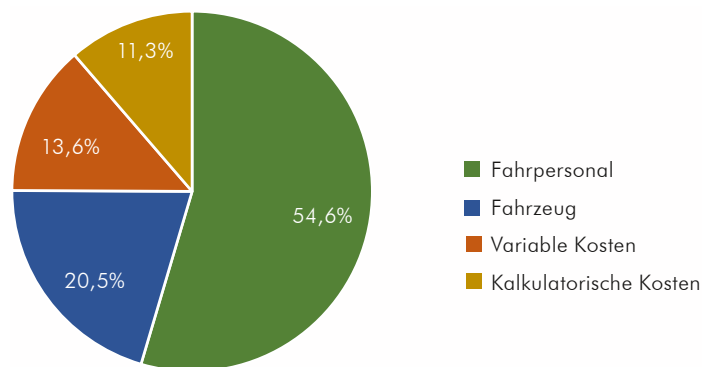
Abbildung 7: Kostenaufteilung für *Taxi* – eigene Berechnung auf Grundlage Wadud (2017)



Lediglich Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann (2018) aus der Schweiz berechnen in einer Studie die abweichende Kostenaufteilung für einen Betrieb mit einem Minibus (Abbildung 6), wobei sie die Beschaffungskosten eines Minibusses im Vergleich zu zuvor beschriebenen Ansätzen sehr optimistisch einschätzen. Deutlich wird der steigende Anteil des Fahrpersonals an den Gesamtkosten.

Die Kostenverteilung bei kleineren Fahrzeugen scheint sich hierbei Aufschlüsselungen aus der Taxibranche gemäß Abbildung 7 (Wadud 2017) und Abbildung 8 (Gerhard Willhalm) anzunähern.

Abbildung 8: Kostenaufteilung *für Taxi* – eigene Berechnung auf Grundlage Gerhard Willhalm



3.2.2 Anteilige Zusammensetzung der Betriebskosten im autonomen Taxibetrieb

Hinsichtlich der Automatisierung der öffentlichen Verkehre wird häufig von autonomen Taxis oder Robocabs gesprochen. Hier scheinen der größte Druck und die größten Chancen zur Automatisierung zu bestehen. Wadud (2017) und Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich und Maximilian Hartl (2016) machen vergleichsweise ähnliche Prognosen (Abbildung 9 und Abbildung 10). Für autonom betriebene Kfz im geteilten Betrieb wird bei den vorgenannten Autoren von jeweils ca. 50 % für das Fahrzeugkapital, 20 % für Energie und die verbleibenden Anteile für Verwaltung und Wartung ausgegangen.

Abbildung 9: Kostenaufteilung für *autonom fahrendes Taxi* – eigene Berechnung auf Grundlage Wadud (2017)

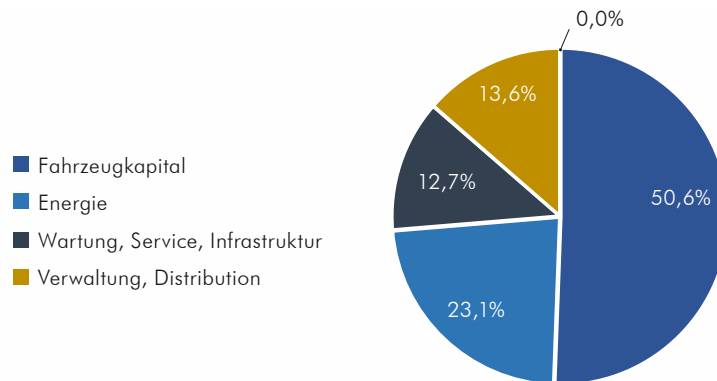


Abbildung 10: Kostenaufteilung für *autonom fahrendes Fahrzeug für sechs Personen* – eigene Berechnung auf Grundlage Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich und Maximilian Hartl (2016)

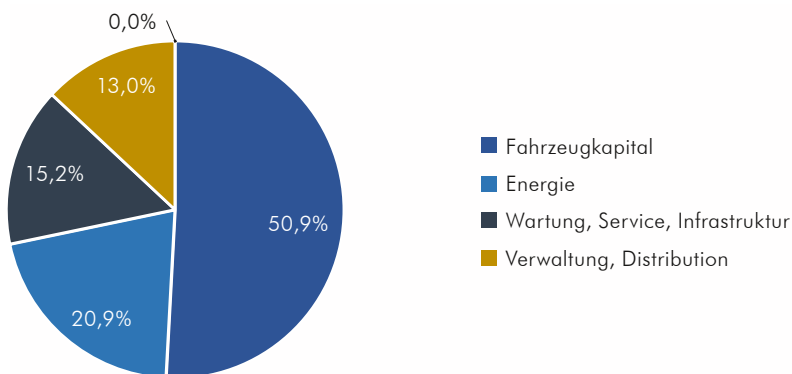
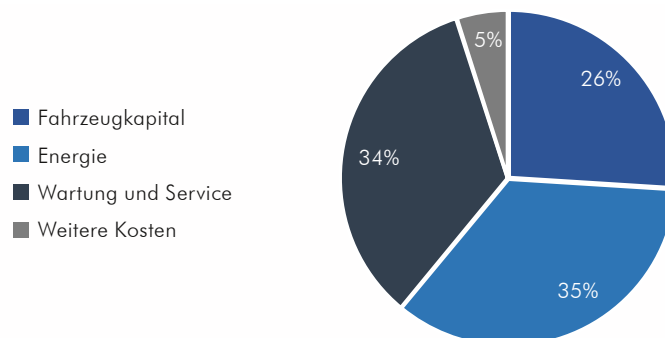


Abbildung 11: Kostenaufteilung für *autonom elektrisch fahrenden Minibus* nach Ongel et al. (2019)



Ongel et al. (2019) berücksichtigen bei ihrer Prognose explizit den elektrischen Antrieb und den ÖPNV in Form eines Minibusses. Gemäß Abbildung 11 nehmen die Investitionskosten dadurch einen geringeren Anteil von weniger als 30 % und die Energiekosten einen höheren Anteil mit 35 % ein. Ongel et al. (2019) weisen für den Minibus im Gegensatz zu den anderen Autoren einen Anteil von ungefähr einem Drittel für Wartung und Service aus.

3.2.3 Einzelpositionen im autonomen Betrieb von Kleinbussen im ÖPNV

In den Kapiteln zuvor wurden Betriebskosten auf Basis der vorliegenden Literatur grob anteilig an den Gesamtkosten dargestellt. Dabei konnten bereits viele Einzelkostenparameter identifiziert werden. In diesem Kapitel werden elf für das Thema als aussagekräftig bewertete Quellen auf Aussagen zu dezidierten Parametern des autonomen Betriebes analysiert. Im Rahmen der späteren Expert:innenbefragung werden die Kosten analog dazu dezidiert in 35 Einzelpositionen in den Kategorien Personal, Fahrzeug, Infrastruktur und Weiteres aufgegliedert. Sämtliche elf Literaturquellen wurden auf alle Einzelparameter untersucht und jede aufgefundene Aussage einem Trend zugeordnet:

- ▶ Pfeil senkrecht = sehr stark verändernd
(nach oben teurer, nach unten günstiger)
- ▶ Pfeil diagonal = Tendenz ändernd
(nach oben teurer, nach unten günstiger)
- ▶ Pfeil waagrecht = gleichbleibend
- ▶ Fragezeichen = laut Autor nicht definierbar
- ▶ leeres Feld = keine Angaben
- ▶ Ausrufezeichen = entscheidender Parameter

Die folgende Tabelle stellt die 35 betrachteten Einzelposten an Betriebskosten sowie die Aussage zu deren Entwicklung in den elf Literaturquellen dar. Jede „Kästchenspalte“ steht für die Aussage in einem Aufsatz. Zur Legende der Reihenfolge dient die unter der Tabelle zu findende Auflistung.

Eine These wäre, davon auszugehen, dass den zuerst genannten (umfangreich diskutierten) Positionen in Tabelle 1 in Bezug auf eine Veränderung der Kostenstrukturen zum autonomen Fahren allgemein die größte Relevanz zugemessen wird. Gleichzeitig lassen sich diese mit

den aktuell vorhandenen Erkenntnissen bereits am besten erfassen und bewerten. Alternativ ist davon auszugehen, dass besondere Interessen hinter der Forschung in bestimmten häufig genannten Bereichen liegen (z. B. seitens Fahrzeugherstellenden oder Versicherungen).

Tabelle 1: Betriebskosten mit umfangreicher Diskussion

Kategorie	Parameter	Tendenzen der Literatur (Quelle*)										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Personal	Fahrer:in: Den Bus steuern	↓	↓			↓	↓	↓		↓	↓	↓
Fahrzeug	Beschaffungskosten: Der Kaufpreis für ein Fahrzeug	↗	↘	↗		↗	↗	↗	↗	?		
Fahrzeug	Energie: Die Kosten für die vom Fahrzeug benötigte Energie	↘	↘	!				↘	↘	↘		↘
Weiteres	Versicherung p.a.		↓							?	→	↓

(viele Quellen, absolute Prognosewerte auffindbar)

Tabelle 2: Betriebskosten mit allgemeiner Diskussion

Kategorie	Parameter	Tendenzen der Literatur										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Personal	Werkstatt: Das Fahrzeug reparieren und instandhalten	→		↗		?				↘	↗	→
Personal	Programmierer: Für eine fehlerfreie Software für Fahrzeug und Betrieb sorgen					↗				↗	↗	
Fahrzeug	Verschleißteile: Die laufenden Materialkosten für einen störungsfreien Betrieb	→		↗		↘					↗	→

* (1) T. Donna Chen et al. 2016; (2) Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich und Maximilian Hartl 2016; (3) Stephens et al. 2016; (4) Tobias Haider und Roman Klementschtz 2017, überarbeitete Fassung vom 2017; (5) Wadud 2017; (6) Winter et al. 2018; (7) Ongel et al. 2019; (8) Roman Klementschtz, Maria Angerer, Alfons Bauernfeind, Tobias Haider, Philipp Haydn (2019); (9) Inga Luchmann, Christian Reuter, Daniel Karthaus, Petra Strauß, Eva-Maria Knoch, Nadine Kostorz, Dr. Tim Hilgert, Jörg Niemann, Dr. Christian Baumann 2019; (10) Becker et al. 2020; (11) Tirachini und Antoniou 2020.

Kategorie	Parameter	Tendenzen der Literatur										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Fahrzeug	Reifen: Die laufenden Materialkosten für den Verschleiß von Reifen	→			↘						↗	→
Fahrzeug	Leerfahrten: Der Anteil der Leerkilometer	↗			↗							
Weiteres	Software und -updates für Fahrzeug					↗	↗			↗		
Weiteres	Software und -updates für Leitstelle und Betriebsorganisation			↗		↗	↑		↗	↗	↗	
Weiteres	Software und -updates für Fahrplanauskunft/-verkauf			↑						↗		
Weiteres	Telekommunikation		↗	↗					↗	↗		↗

(viele Quellen, sehr wenige absolute Einschätzungen)

Tabelle 3: Betriebskosten mit wenig Diskussionen

Kategorie	Parameter	Tendenzen der Literatur										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Personal	Security: Für Sicherheit der Fahrgäste sorgen					↗					↗	
Personal	Sicherheitsüberprüfungen: Wiederkehrende Prüfungen und Inspektionen am Fahrzeug					↗				↗	↗	
Personal	Reinigung: Für die Sauberkeit des Fahrzeugs sorgen	→										↗
Personal	Leitstelle: Einen zuverlässigen und sicheren Betriebsablauf gewährleisten					↗	↑			↗	↗	
Personal	Streckenkontrolle und-wartung: Sichere und freie Verkehrswege gewährleisten										↗	↗
Fahrzeug	Unfallkosten: Die Kosten zur Behebung von Unfallschäden und -folgen			↓								
Infrastruktur	Betriebshöfe	→	→									
Infrastruktur	Ladestationen									↗		
Weiteres	Beseitigung Vandalismusschäden										→	
Infrastruktur	Warte- und Abstellflächen im Verkehrsnetz					↓				↗		

(kaum Quellen, keine absoluten Werte)

Bei verschiedenen in Tabelle 3 und Tabelle 4 (insgesamt weniger genannten Positionen schreibt Wadud (2017), dass die Nettoänderungen dieser einzelnen Kostenelemente wahrscheinlich gering sein werden und die Unsicherheiten zu groß sind, um sie zu quantifizieren. Zhang et al. (2019) geht davon aus, dass der von Jan Owen Jansson (1980) herausgearbeitete lineare Zusammenhang zwischen Busgröße und Betreiberkosten auch bei automatisierten Fahrzeugen gilt.

Tabelle 4: Betriebskosten ohne relevante Diskussion

Kategorie	Parameter
Personal	Haltestellenunterhaltung: Funktionsfähigkeit und Sauberkeit von allen Haltestellen gewährleisten
Personal	Fahrkartenkontrolle vor Ort: Buchungen und Ticketkäufe überwachen
Personal	Telefonhotline: Serviceanfragen von Fahrgästen bearbeiten
Personal	Presse: Anfragen bearbeiten und bei Vorfällen kommunikativ unterstützen
Personal	Marketing: Das Angebot vermarkten
Fahrzeug	Abschlepp- und Pannenservice: Aufwendungen für Störungsbeseitigungen im Betrieb
Infrastr.	Haltestellen
Infrastr.	Zuwegungen/Querungsstellen für zu Fuß gehende zu Haltestellen
Infrastr.	Busfahrstreifen
Infrastr.	Lichtsignalanlagen
Infrastr.	Fahrkartenautomaten
Weiteres	Zulassung: Die Zulassung für das Fahrzeug erlangen

(keine aussagekräftigen Quellen)

3.3 Zwischenfazit

Aus der Auswertung der Literatur geht hervor, dass die Beschaffung eines Standardlinienbusses (Solobus) derzeit zwischen 250.000 und 310.000 Euro kostet. Im Regionalverkehr werden diese Busse mit traditionellem Antrieb über 900.000 km und 12 Jahre genutzt. In manchen Flotten zeigen sich auch höhere Nutzungskilometer und längere Nutzungsdauern. Mit Elektroantrieb betragen die Beschaffungskosten bei solch einem Fahrzeug zwischen 420.000 und 630.000 Euro. Zur Nutzungsdauer und umfassenden Unterhaltungskosten gibt es noch nicht hinreichend umfassende Erfahrungswerte.

Für einen **barrierefreien** Minibus, der für den Einsatz im ÖPNV geeignet ist, sind aktuell 110.000 bis 175.000 Euro Beschaffungskosten zu kalkulieren. Ein solches Fahrzeug erreicht allerdings nur 400.000 km Gesamtfahrleistung in rund zehn Jahren Nutzungsdauer. In manchen Flotten liegen die Werte noch darunter. Für das gleiche Fahrzeug mit Elektroantrieb werden die Beschaffungskosten auf bis zu 300.000 Euro geschätzt. Grundlage für die Einschätzung ist, dass für Minibusse (mit der Ausstattung für einen ÖPNV) ungefähr 60 % des Kaufpreises von einem Solobus zu veranschlagen sind. Während für klassische Busse umfassende Erfahrungswerte zu den Kosten vorliegen, ergibt sich in der Nische der Klein- und Minibusse eine größere Spanne für die Beschaffungskosten in der Literatur. Sie lässt ohne weitere Analyse und Bewertung keine eindeutige Aussage zu. In den Bewertungen ist erkennbar, dass je nach Blickrichtung die prognostizierten Grundkosten (ohne Berücksichtigung einer Inflation) für Kleinbusse eher optimistisch niedrig mit zwischen 50.000 Euro (aus Blickrichtung Pkw / Taxi) oder pessimistisch hoch mit 300.000 Euro (aus Blickrichtung ÖPNV) abgeschätzt werden. Ausstattung und potentielle Elektrifizierung werden als relevante Einflussfaktoren genannt. Auch die Einschätzungen zur Nutzungsdauer variiert mit fünf bzw. zehn Jahren. Die noch nicht über einen vollen regulären Lebenszyklus vorliegenden Auswirkungen der Elektrifizierung im Massenmarkt bergen weitere Unsicherheiten.

Für den Aspekt Automatisierung werden die zusätzlichen Investitionskosten im Bereich von ca. 5.000 bis 10.000 Euro einmalig je Pkw (bei Marktreife) angenommen. Für größere Fahrzeuge sind höhere Kosten zu erwarten. Nach Erreichen der Marktreife und einer Steigerung der Produktionszahlen bei verschiedenen Herstellenden kann davon ausgegangen werden, dass die Investitionskosten grundsätzlich wieder sinken können. Für Teilaspekte in den Investitionskosten für Fahrzeugsoftware, Zusatzkosten für Automatisierungstechnik u. a. zur Kommunikation mit

Fahrgästen im ÖPNV (Zu-/Abgang und besondere Bedürfnisse wie Barrierefreiheit) und Einrichtung von Leitstellen o. ä. gibt es keine Abschätzungen, obwohl hier im ÖPNV relevante Kostenanteile zu erwarten sind. Im klassischen Busverkehr im Regionalverkehr besitzen die Betriebskosten für das Fahrpersonal einen Anteil von 40 bis 50 Prozent (in Industriestaaten). Im Taxiverkehr liegen die Ausgaben für das Fahrpersonal bei 50 bis 60 Prozent. Für die Aufteilung der Betriebskosten im autonomen Betrieb gibt es sehr unterschiedliche Aussagen, die keine fundierten allgemeingültigen Aussagen zulassen. Anhand verschiedener Quellen ist jedoch erkennbar, dass im autonomen SAE-Level 5 die Fahrzeug- und Energiekosten zusammen zwei Drittel der Gesamtkosten ausmachen könnten. Bei einer vertieften Betrachtung in der Literatur hinsichtlich der unzähligen Detailkostenparameter des autonomen Fahrens (z. B. Software, Leitstelle, Sicherheit, Telekommunikation) deuten sich durchweg steigende Kosten an, die aber nicht absolut beziffert werden und damit hinsichtlich der Gesamtkosten nicht einschätzbar erscheinen.

4 EXKURS AM PROJEKTBEISPIEL TABULA IN LAUENBURG/ELBE

Das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der Richtlinie „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ mit 1,9 Mio. Euro geförderte Verbundprojekt TaBuLa (Aufbau eines Testzentrums für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg) wurde von den zwei Projektpartner:innen Kreis Herzogtum Lauenburg und Technischer Universität Hamburg (TUHH) von Januar 2018 bis März 2021 durchgeführt. Als assoziierte Partner:innen wirkten außerdem mit: Stadt Lauenburg/Elbe, Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH), Interlink GmbH (Büro autoBus), Siemens Mobility GmbH und die Versorgungsbetriebe Elbe GmbH. Im Anschlussprojekt TaBuLa-LOG⁴ wird mithilfe eines Transportroboters der Güterverkehr in den bestehenden, automatisierten Busbetrieb integriert.

Gegenstand von TaBuLa war die Untersuchung der Akzeptanz und der Einsatzmöglichkeiten automatisierter Busse im ÖPNV unter realen Bedingungen mit Fahrgästen und im Mischverkehr mit anderen Verkehrsteilnehmenden. Dazu wurden zwei automatisierte Kleinbusse in der technisch höchst anspruchsvollen Testumgebung der schleswig-holsteinischen Kleinstadt Lauenburg/Elbe betrieben.

Die 2,45 km lange öffentliche Strecke verbindet im Realverkehr mit Fahrgastbeförderung die Alt- mit der Oberstadt und inkludiert neben Großsteinpflastern, Waldabschnitten, sehr engen Gassen und Steigungen und Gefälle bis zu 17 % auch die Kommunikation mit zwei Lichtsignal- und zwei Polleranlagen und ergänzt den bestehenden ÖPNV um eine zusätzliche Linie. Im Sommer 2019 führte die VHH als Betreiberin mit der TUHH nicht-öffentliche Testfahrten durch. Seit Oktober 2019 können Fahrgäste befördert werden. Es wurden insgesamt zwei Fahrzeuge des Modells Autonom Shuttle DL4-4WD der Firma NAVYA von der TUHH gemietet und der VHH für die Fahrgastbeförderung zur Verfügung gestellt.

4 Das Projekt wird vom BMVI mit 1,79 Mio. Euro gefördert und hat eine Laufzeit von Januar 2020 bis Dezember 2021.

Abbildung 12: Das TaBuLaShuttle auf den historisch gewachsenen Straßen in der Altstadt von Lauenburg/Elbe



Quelle: Dominik Pretzko

4.1 Prognostizierte Kosten für Fortsetzung des TaBuLa-Betriebes um drei Jahre.

Aus dem Projekt TaBuLa heraus können anhand der Erfahrungen⁵ die Kosten geschätzt werden, die für einen dreijährigen Weiterbetrieb der automatisierten Shuttle mit Fahrzeugbegleitung in **Lauenburg/Elbe** notwendig würden. Im Rahmen des Projektes erschien der Zeitraum von drei weiteren Jahren ein sinnvoller Betrachtungszeitraum um zu prüfen, ob der Betrieb sinnvoll und wirtschaftlich weiter betrieben werden kann. In diesem Zeitraum wird mit der eingesetzten Technik kein autonomer Betrieb möglich sein, **denn weiterhin bleiben Fahrzeugbegleiter:innen im Fahrzeug unverzichtbar**. Die angegebenen Kosten sind nicht auf ein Jahr umrechenbar, da diverse Kostenparameter (wie z. B. die Investitionskosten für die Fahrzeuge) einmalige Kosten sind. Die Berechnungen liefern plausible Kosten für diesen speziellen einzigartigen Anwendungsfall. Natürlich ist zu berücksichtigen, dass die hohen Aufwendungen in den Jahren 2017 bis 2019, dieses neuartige Forschungsprojekt TaBuLa aufzusetzen und das notwendige Wissen zu erarbeiten, bereits erbracht und abgeschlossen sind. Die nachfolgende Kalkulation berücksichtigt diese Initialkosten nicht mehr sondern nur den Weiterbetrieb unter den gegebenen Randbedingungen.

4.1.1 TaBuLa-Szenario 0: Betrieb der Strecke 3 mit einem klassischem Diesel-Minibus mit Fahrer:in

Nach internen Berechnungen würde der Fahrgastbetrieb der Strecke 3 mit manuell gefahrenen klassischen Minibussen mit Dieselantrieb (z. B. Sprinter City 75 L der Fa. Mercedes Benz) bei einer durchschnittlichen Beförderungsgeschwindigkeit von

- a) 4,9 km/h (TaBuLaShuttle) Kosten von **10,25 Euro pro Fahrplankilometer** verursachen. Bei einer Erhöhung der Beförderungsgeschwindigkeit auf
- b) 19,6 km/h (Durchschnittswert im klassischen ÖPNV) lägen die Kosten bei **3,21 Euro pro Fahrplankilometer**.

5 Die Eingangswerte für verschiedene Detailberechnungen können mit Rücksicht auf den Wettbewerb gemäß Vereinbarungen mit den Unternehmen nicht vollständig veröffentlicht werden.

Die konkrete Strecke von TaBuLa ist wegen der Enge der Straßen und verkehrsberuhigter Bereiche gar nicht mit dem genannten Fahrzeugtyp und letztgenannter Geschwindigkeit des Szenario 0b befahrbar, was aber nicht relevant für die Berechnungen und eine Kostengegenüberstellung ist.

4.1.2 TaBuLa-Szenario 1: Weiterbetrieb durch zwei automatisierte Fahrzeuge mit Fahrzeugbegleiter:innen

Dieses Szenario 1 ist in 2021f auf der Hauptstrecke von TaBuLa realistisch umsetzbar und basiert auf einer tatsächlichen Projektkalkulation, die aufgrund von wettbewerbsrechtlichen Gründen der beteiligten Unternehmen nicht dezidiert hergeleitet werden kann. Die Eingangsparameter für das Szenario 1 sind:

- ▶ Einsatz von zwei automatisierten kleinen Minibussen DL4-4WD der Fa. NAVYA (Level 2-3 gemäß SAE) mit Elektroantrieb und mit jeweils max. 10 Sitzplätzen (vgl. Abbildung 14). Die theoretisch angesetzte Nutzungsdauer eines Fahrzeuges beträgt sechs Jahre.
- ▶ Betrieb mit Fahrzeugbegleiter:in (ausgebildete Busfahrer:innen) an 365 Tagen pro Jahr mit jeweils drei Personalschichten (je Tag ca. 18 Stunden Betrieb).
- ▶ Weiterbetrieb auf dem Rundkurs der Strecke 3 in Lauenburg/Elbe auf 2,45 km Streckenlänge im Einrichtungslinienverkehr bei 6 - 18 km/h Höchstgeschwindigkeit, ggf. mit kleinen Streckenergänzungen. Es ergibt sich auf der Strecke eine durchschnittliche Beförderungsgeschwindigkeit von 4,9 km/h. Von wiederkehrenden Streckenanpassungen und -optimierungen wird bei der eingesetzten Technik zudem ausgegangen. Dies erfordert Anpassungen von Software und Zulassung/Genehmigung.
- ▶ Die beiden automatisierten Minibusse sind im Wechsel im Dauereinsatz (wegen notwendiger Lade- und Wartungszyklen). Es ist kein automatisiertes Ersatzfahrzeug eingeplant. Ein Reservefahrzeug ist allerdings zwingend erforderlich, deshalb wird im Szenario ein manuell gefahrener Minibus mit 30 % seiner Zeit (Grundkosten) vorgehalten.

- ▶ Die Angaben sind gültig für den spezifischen Anwendungsfall unter den besonderen (anspruchsvollen) Randbedingungen und Vorleistungen in Lauenburg/Elbe und damit nicht grundsätzlich übertragbar.
- ▶ Es werden keine Fahrgeldeinnahmen berücksichtigt.

Abbildung 13: Linienverlauf der dritten Umsetzungsstufe des TaBuLa-Projektes in Lauenburg/Elbe



Legende:

- 01 Ausweichstrecke
- 03 Regelverlauf

Haltestellen:

- 01 ZOB
- 02 Kleiner Sandberg
- 03 Lösch- und Ladeplatz
- 04 Heinrich-Osterwold-Halle
- 05 Fährtreppe
- 06 Kirchplatz
- 07 Friedrichsbrücke (Schloss)

Nach Bedarf:

- 08 Markt
- 09 Amtsplatz

Die Kosten für den Betrieb mit Fahrzeugbegleiter:innen und zwei automatisiert fahrenden kleinen Minibussen werden demnach kalkuliert für den **dreijährigen** Zeitraum von 2022 bis 2024 gemäß Tabelle 5.

Tabelle 5: Kosten für den Weiterbetrieb der beiden TaBuLaShuttles um drei Jahre

Kategorie	Parameter	Kostenschätzung (für 3 Jahre)	
Personal	Fahrzeugbegleiter:innen	540.000,00 €	35,6 %
Personal	Verwaltung / Projektbetreuung / Marketing / Reinigung / Dienstplanung	210.000,00 €	13,9 %
Personal	Notfallleitstelle des Herstellers (anteilig)	50.000,00 €	3,3 %
Personal	Schulungen	15.000,00 €	1,0 %
Fahrzeug	Verschleiß- / Werkstatt- und Reparaturaufwendungen (Full-Service)	180.000,00 €	11,9 %
Fahrzeug	Beschaffungskosten ⁶ (anteilig für 3 Jahre)	150.000,00 €	9,9 %
Fahrzeug	Reservefahrzeug (anteilige Vorhaltung)	30.000,00 €	2,0 %
Fahrzeug	Energie	45.000,00 €	3,0 %
Infrastruktur	Strecken- / Haltestellenkontrolle / -wartung	75.000,00 €	5,0 %
Infrastruktur	Infrastrukturumbauten und-ergänzungen	30.000,00 €	2,0 %
Infrastruktur	Betriebshof	25.000,00 €	1,7 %
Weiteres	Softwarelizenzen und -updates	100.000,00 €	6,6 %
Weiteres	Versicherungen	35.000,00 €	2,3 %
Weiteres	Zulassungen erhalten / anpassen	20.000,00 €	1,3 %
Weiteres	Telekommunikation	10.000,00 €	0,7 %
Summe	für 3 Jahre	1.515.000,00 €	100,0 %
	umgerechnet pro Jahr	505.000 €	

⁶ Dies sind die Kosten für die verbleibende Abschreibung/Restwert für zwei Fahrzeuge nach drei Jahren Nutzung für drei weitere Jahre im Projekt TaBuLa. Im Falle einer kürzeren Laufzeit mit zwei Neufahrzeugen im Wert von zusammen ca. 600.000 Euro muss hier ggf. ein anderer Ansatz erfolgen.

Die Prognoserechnung erfolgt für den Einsatz von zwei automatisierten Kleinbussen im Wechselbetrieb (wegen der aktuellen Kapazität je nach Witterung von ca. 6-10 Stunden und den notwendigen Ladezyklen). Bei einer größeren Flotte, größerer Akkukapazität bei gleichzeitiger Marktreife ist von sinkenden Kosten auszugehen. Bezogen auf den Fahrplan 2021 für die Strecke 3 ergeben sich bei den obigen Angaben Kosten von rund 15,69 Euro pro Fahrplankilometer. Sofern die Anpassungen in der öffentlichen Infrastruktur nicht einberechnet werden (da diese im Busverkehr üblicherweise nicht auf Seiten des ÖPNV-Betriebes angerechnet werden), ergeben sich

14,55 Euro pro Fahrplankilometer

in diesem aktuell realisierbaren Szenario.

Mittels einer Sensitivitätsanalyse lassen sich die Auswirkungen durch Änderung einzelner Parameter untersuchen. Beispielhaft werden nachfolgend damit theoretische Szenarien gebildet.

Abbildung 14: Das TaBuLaShuttle an der Haltestelle Lauenburg/ZOB mit ausgefahrener Rampe



Quelle: Dominik Pietzko

4.1.3 TaBuLa-Szenario 2a: Ganztagesbetrieb durch ein Fahrzeug mit Fahrzeugbegleiter:innen

Optimiert man den automatisierten Betrieb aus Szenario 1 mit der (aktuell mit dem Fahrzeugtyp nicht realisierbaren) Annahme, dass ein Fahrzeug allein 18 Stunden Betrieb pro Tag gewährleisten kann (mit ständigen Zwischenladungen oder dreifacher Akkukapazität), ergibt sich bei drei Personalschichten der Fahrzeugbegleiter pro Tag die Kostenverteilung gemäß Szenario 2a in Abbildung 15. Die Kosten reduzieren sich damit auf

12,87 Euro pro Fahrplankilometer.

4.1.4 TaBuLa-Szenario 2b: Ganztagesbetrieb durch ein Fahrzeug ohne Fahrzeugbegleiter:innen

Werden die Personalkosten für Fahrzeugbegleiter:innen im Szenario 2a weggelassen, ergibt sich die theoretische Aufteilung wie in der Abbildung 15 für Szenario 2b dargestellt. Die absoluten Kosten belaufen sich dann auf

7,28 Euro pro Fahrplankilometer.

Das ist allerdings ebenfalls ein rein hypothetischer Ansatz, da die Auswirkungen auf die anderen Kostenkategorien nicht grundsätzlich vernachlässigbar sind.

4.1.5 TaBuLa-Szenario 3: Ganztagesbetrieb durch zwei Fahrzeuge ohne Fahrzeugbegleiter:innen mit höherer Geschwindigkeit

In diesem Szenario 3 werden die Ansätze aus Szenario 1 übernommen, allerdings mit folgenden Anpassungen:

- ▶ Die Kosten der Fahrzeugbegleiter:innen entfallen. Die Kosten für die Leitstelle erhöhen sich nicht.

- ▶ Die Geschwindigkeit wird von durchschnittlich 4,9 km/h auf 19,6 km/h angehoben. Diese Vervierfachung führt zu einer Durchschnittsgeschwindigkeit, wie sie im Stadtverkehr für Busse des ÖPNV üblich ist. Da sich der gemessene Energiebedarf eines Shuttle NAVYA 4WD nicht ohne weiteres auf höhere Geschwindigkeiten übertragen lässt, wird bei ansonsten unveränderten Parametern der Stromverbrauch mit 1,5 kWh pro km (vergleichbar zum eCitaro Solobus der Fa. Daimler) angesetzt. Es existieren auch deutlich niedrigere Herstellerangaben zum Stromverbrauch. Jedoch sollte der Verbrauchswert gerade bei heißen und kalten Außentemperaturen aufgrund der Klimatisierung nicht zu optimistisch angesetzt werden und folgt hier der Einschätzung von Verkehrsbetrieben (ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe Aktiengesellschaft 2020).
- ▶ Es wird eine zusätzliche Akkukapazität benötigt, die mit 90 Euro pro kWh (Horváth & Partners 2020) mit der Abschreibung über die drei Betriebsjahre für beide Fahrzeuge in den Investitionskosten voll angesetzt werden muss.

Bei einer Vervierfachung der Streckenlänge (durch vierfach höhere Durchschnittsgeschwindigkeit) legen die beiden Fahrzeuge in 18 Stunden pro Tag ca. 350 km zurück. Dies erscheint bei aktuell üblichen Akkukapazitäten mit zwei Fahrzeugen (3mal 150 km) realistisch, wenn eines der beiden Fahrzeuge zwischenzeitig sechs Stunden lang aufladen würde.

In diesem Szenario ohne Fahrzeugbegleiter:innen reduzieren sich die Kosten auf

2,51 Euro pro Fahrplankilometer

im autonomen Betrieb.

Wenn es im Jahr 2022 möglich wäre, in dem aktuellen Fahrzeugmodell der Firma NAVYA auf Fahrzeugbegleiter:innen vollständig zu verzichten und zudem mit vierfacher Durchschnittsgeschwindigkeit zu fahren, läge die Kostenersparnis bei ca. 28 % gegenüber einem klassischen Dieselmotorkraftstoffbetriebenen Minibus mit Fahrer:in.

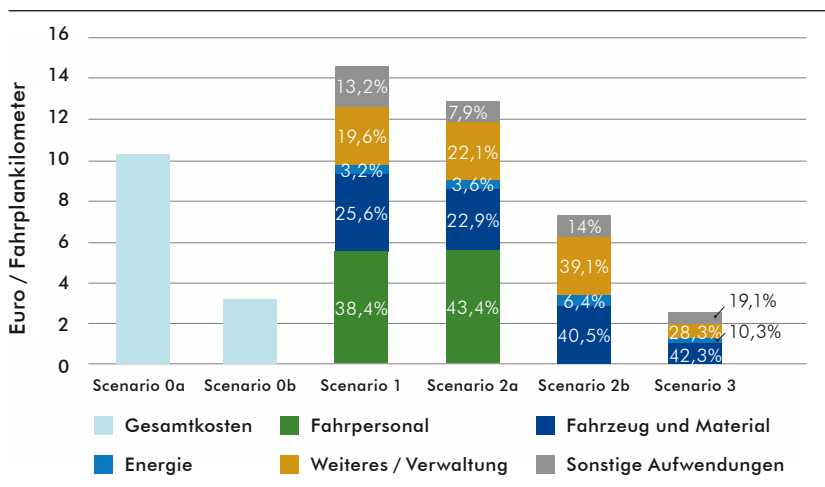
4.2 Zwischenfazit

Die Betriebskosten für die auf dem Markt erhältlichen automatisierten Minibusse lassen sich hinreichend genau für den Anwendungsfall von TaBuLa ermitteln. Weil diese Fahrzeuge aus Kleinserien besonderen Betreuungs- und Genehmigungsaufwand hervorrufen, sowie trotz automatisierter Fahrfunktionen durchweg Fahrzeugbegleiter:innen erfordern, befinden sich die Gesamtkosten im Zuge der fortschreitenden Automatisierung auf einem Höchststand. Der aktuell realisierbare Anwendungsfall unterscheidet sich erheblich vom klassischen ÖPNV:

- ▶ Es handelt sich um Kleinserienfahrzeuge, die noch nicht alle Anforderungen eines barrierefreien ÖPNV erfüllen.
- ▶ Es wird aktuell in Lauenburg lediglich eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 4,9 km/h erreicht, was deutlichen Einfluss auf die Energiekosten nimmt. Die installierte Akkukapazität genügt nicht für einen Ganztagesbetrieb ohne Nachladung.
- ▶ Die gewählte Gefäßgröße für zehn Fahrgäste ist geringer als bei üblichen Minibussen der Verkehrsbetriebe.

Für den spezifischen Anwendungsfall in Szenario 1 liegen die Kosten eines ÖPNV-Betriebes mit den elektrischen TaBuLaShuttles ungefähr 42 Prozent höher als bei einem Einsatz mit klassischen Minibussen mit Dieselantrieb im Szenario 0a.

Abbildung 15: Übersicht der Kosten der untersuchten Szenarien in TaBuLa



Könnten die Fahrzeugbegleiter:innen in ihrer Tätigkeit durch autonome Fahrfunktionen (Level 5 gemäß SAE) ersetzt werden und die aktuelle Durchschnittsgeschwindigkeit vervierfacht werden (Szenario 3), lägen die Kosten der elektrischen TaBuLaShuttles ungefähr 28 Prozent niedriger als bei einem Einsatz mit klassischen Minibussen mit Dieselantrieb im Szenario Ob. Die Kosten teilen sich zur Hälfte in Fahrzeug inkl. Energie und zur anderen Hälfte in die weiteren Kosten inkl. Personal auf.

5 EXPERT:INNENBEFRAGUNG

Folgend wird auf die durchgeführte Befragung von Expert:innen eingegangen. Der Abschnitt gliedert sich in Methodik, Ergebnisse und ein Zwischenfazit.

5.1 Methodik

5.1.1 Hintergrund der Methodik Delphi

Zur Generierung weiterer Erkenntnisse im Rahmen der Fragestellung und zum Füllen identifizierter Lücken im Forschungsstand wurde eine Expert:innenbefragung nach der Delphi-Methodik durchgeführt. Ziel der Befragung war es, konkrete Aussagen über die zum Zeitpunkt ihrer Marktreife zu erwartenden Kosten von Beschaffung und Betrieb autonomer Kleinbusse zu erhalten. Dieser Zeitpunkt liegt in noch nicht genau bestimmbarer Zukunft. Beschaffung und Zusammensetzung und Höhe der dann anfallenden Betriebskosten hängen von einer Vielzahl an Variablen ab. Es handelt sich mithin um eine ausgesprochen komplexe Prognoseaufgabe.

Ein häufig gewählter Weg zur Generierung von Informationen in solchen Kontexten ist die sogenannte Delphi-Methode (vgl. Häder (2009: 65)). Delphi ist eine strukturierte Befragung von Expert:innen nach ihren Einschätzungen zu einem Thema. Als Besonderheit findet die Befragung in mehreren Runden statt: Nach jeder Runde wird den Expert:innen zu gleichen Fragen eine Zusammenfassung der zuvor von den Befragten abgegebenen Antworten als Unterstützung zur Verfügung gestellt. Delphi soll durch die Kombination der Kenntnisse verschiedener Expert:innen mit unterschiedlichen Hintergründen möglichst genaue Aussagen über einen zu erforschenden Sachverhalt geben. Die mehrere Runden beinhaltende Befragung soll feststellen, ob zwischen den Expert:innen zur Fragestellung ein „Konsens“ erreicht werden kann, der als kollektive Antwort der Befragtengruppe angenommen werden könnte.

Delphi ist dabei keine Methodik, zu der es einen allgemein anerkannten oder auch nur vornehmlich genutzten, besonders engen Rahmen gäbe, beispielsweise in Form von „Best-Practice“-Schemata. Vielmehr handelt es sich um einen Begriff, der für eine größere Anzahl unter-

schiedlicher methodischer Ausgestaltungen und Einsatzbereiche Verwendung findet, was bei der Gestaltung von Befragungen einen gewissen Spielraum eröffnet. Die Kehrseite bilden unter anderem fehlende Erfahrungswerte zu bestimmten Optionen, was entsprechende Abwägungen erfordert.

Die gesuchten Angaben, besonders die Betriebskosten, setzen sich aus einer großen Zahl an Einzelparametern zusammen. Hierzu wurde angenommen, dass neben den in der Literatur häufig als ausschlaggebend genannten Kostenparameter weitere Parameter eine signifikante Rolle spielen können. Zudem könnten durch die Umstellung auf autonomen Betrieb neue Aufgaben entstehen könnten, deren Bewältigung Kosten in signifikanter Höhe hervorrufen wird. Als Beispiel sei genannt, dass das heute anwesende Fahrpersonal jedenfalls implizit auch Funktionen beim Schutz der Fahrgäste vor gewalttätigen Angriffen oder zu Auskünften erfüllt.

5.1.2 Operationalisierung der Fragestellung

Die Konkretisierung der Fragestellung ist wesentlicher Teil einer strukturierten Befragung. Bei Delphi-Umfragen kann sie nach Häder (2009: 77) entweder mithilfe einer vorgeschalteten qualitativen Befragungsrunde realisiert werden oder sie wird von der Befragungsgruppe selbst vorgenommen. Vorliegend wurde die zweite Form gewählt, da davon ausgegangen wurde, dass zur Operationalisierung sowohl ein gewisses Querschnittsverständnis von der Fragestellung als auch die Kenntnis der zugrundeliegenden Methodik nötig ist. Beide Voraussetzungen konnte die Befragungsgruppe erfüllen.

Es sollten folgende Fragen konkret geklärt werden:

- ▶ Zu welchem Zeitpunkt werden autonome Kleinbusse marktreif sein?
- ▶ Welche Kosten sind dann für die Beschaffung eines Fahrzeuges in größerer Stückzahl anzunehmen?
- ▶ Welche wirtschaftliche Nutzungsdauer ist zu erwarten?
- ▶ Wie hoch werden die Betriebskosten sein?
- ▶ Welche Einzelparameter werden einen relevanten Einfluss auf die Betriebskosten haben? Wie hoch werden sie absolut ausfallen?

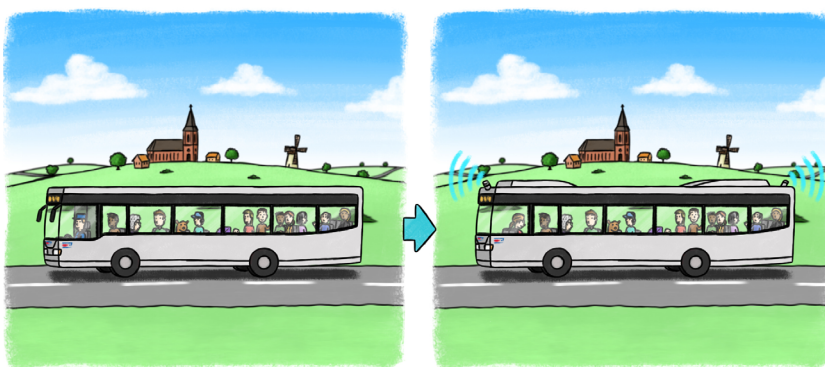
Die Frage nach dem Zeitpunkt der Marktreife wurde direkt gestellt und konnte in Form einer Auswahl in Fünf-Jahres-Schritten beantwortet werden. Die direkten Fragen nach Kaufpreis und wirtschaftliche Nutzungsdauer waren als Wert in Euro bzw. Jahren zu beantworten. Zum Beschaffungsmodell wurden verschiedene, in der Diskussion befindliche bzw. übliche Spielarten vorgegeben.

Die Operationalisierung der Fragen nach Höhe der Betriebskosten und ihrer Zusammensetzung in einzelne Parameter stellte sich als besonders herausfordernd dar. Aufgrund der absehbaren hohen Komplexität wurde angestrebt, diese Punkte in möglichst einfach erfassbaren Fragen abzubilden. Insbesondere absolute Werte der Aufwendungen einzelner Betriebskostenparameter erschienen nach ersten Tests im Vorfeld als schwierig einzuschätzen.

Die Befragung wurde daher für den Bereich der Betriebskostenparameter auf mehreren Ebenen durchgeführt:

- 1 Zunächst wurde die Methode des Vergleichs der Kosten zu einer bekannten Referenz gewählt: einem von Menschen gesteuerten Standardbus. Die Befragten sollten in dieser ersten Situation angeben, wie sich die Kostenparameter entwickeln würden, wenn in diesem Setting allein die Steuerung von „durch einen Menschen“ auf „autonomer Betrieb“ geändert wird. Illustrationen visualisierten die Veränderung:

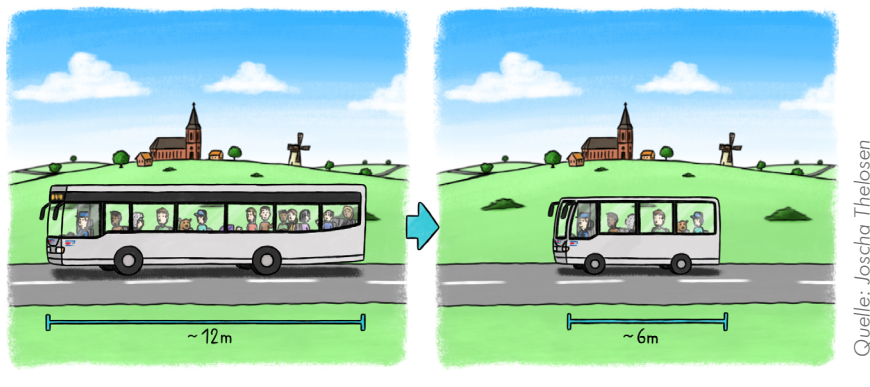
Abbildung 16: Grafik aus der Umfrage zu Situation 1



Quelle: Joscha Thelosen

Anschließend wurde die Bezugsgröße „Standardbus“ gewählt und allein die Größe des abzuschätzenden Fahrzeugs verändert: von einem Standardbus zu einem Kleinbus (manuell fahrend).

Abbildung 17: Grafik aus der Umfrage zu Situation 2

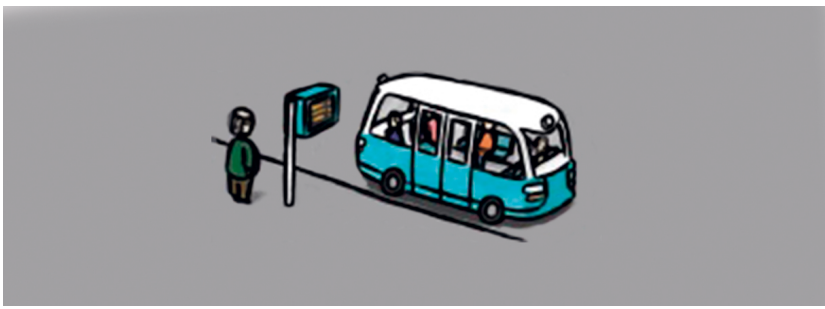


Die Fragen bezogen sich jeweils nicht auf die Summe der Aufwendungen für den Bus, sondern auf einzelne Kostenparameter. Dazu wurden den Befragten eine Liste aus jeweils etwa 35 verschiedenen Parametern vorgegeben, die Aufgaben im Zusammenhang mit dem Betrieb eines Busses darstellten. Die Befragten konnten ihre Antwort („Die Kosten für diese Position werden nach meiner Einschätzung“) auf einer fünfstufigen Likert-Skala (nach Rensis Likert 1932) zwischen „deutlich sinken“ und „deutlich steigen“ angeben. Es bestand zu jeder Frage die Möglichkeit der Antwort „Mir ist keine Einschätzung möglich“. So sollten bei einzelnen Punkten unsichere Befragte dazu verleitet werden, im Zweifel auf eine inhaltliche Angabe zu verzichten. Alle Einschätzungen konnten in einem Freitextfeld begründet werden. Dadurch sollte auch Anlass zur Reflektion während der Bearbeitung und spätere Einordnung gegeben werden. Weiterhin wurde von den Autoren erhofft, potentiell unberücksichtigte Überlegungen zu erhalten, die auch für weitere Forschung Anstöße geben können.

Die Auswahl der in der Liste genannten Betriebskostenparameter wurde wie folgt getroffen: Zunächst wurden im menschengesteuerten Betrieb relevante Kostenarten mithilfe einer Literaturanalyse identifiziert. Ein Brainstorming innerhalb der Projektgruppe erweiterte die Liste um durch autonomen Betrieb neu entstehende Positionen. Schließlich wurden von Teilnehmenden der durchgeführten Umfrage-Pretests einzelne weitere Positionen genannt. Die Befragten konnten schließlich in der erste Befragungsrunde aus ihrer Sicht relevante, fehlende Positionen in einem Freitextfeld ergänzen.

- II Auf der zweiten Ebene wurden die Expert:innen nach ihrer Ansicht zu den wichtigsten Kostenparametern für den Betrieb autonomer Kleinbusse befragt. Zu diesen selbst gewählten Parametern sollten anschließend die jeweils anfallenden, absoluten Kosten (in EUR) je Fahrplan-Kilometer angegeben werden.

Abbildung 18: Grafik aus der Umfrage bei Kostenblöcken und Kilometerkosten zu autonom fahrenden Kleinbussen



Quelle: Joscha Thelosen

- III Schließlich erfolgte die Frage nach der prognostizierten tendenziellen Entwicklung von Anschaffungs-, laufenden Betriebs- sowie Gesamtkosten von autonomen Kleinbussen im Vergleich zu einem von einem Menschen gesteuerten Standardlinienbus. Diese Prognosen wurden auf einer fünfstufigen Likertskala von „deutlich sinken“ bis „deutlich steigen“ aufgenommen.

Abbildung 19: Grafik aus der Umfrage zu Gesamtkosten eines Kleinbusses bei Marktreife



Quelle: Joscha Thelosen

IV In der vierten Ebene wurden die Expert:innen direkt nach der Summe der Betriebskosten je Fahrplankilometer in Euro befragt.

In der Regel wurde die Möglichkeit zur Auswahl „Keine Prognose“ gegeben, um unsichere Antworten zu vermeiden. Die Expert:innen wurden nach nahezu jedem Block außerdem nach ihrer Sicherheit bei der Beantwortung befragt.

Die Befragung wird abgeschlossen mit Angaben zum beruflichen Hintergrund der Expert:innen als offene Mehrfachauswahl, einer Selbsteinschätzung der Kenntnisse zu autonom verkehrenden Fahrzeugen generell sowie zum Busbetrieb. Mit den Antworten hierzu wird der selbst eingeschätzte, spezifische Kenntnisstand der Befragten erkennbar und mit anderen Fragen überlagerbar.

In der zweiten Delphi-Befragungs-Runde wurden Fragen und Anordnung des Fragebogens grundsätzlich beibehalten. Die auf einer Likert-Skala zu beantwortenden Abschnitte wurden mit dem arithmetischen Mittelwert der ersten Runde ergänzt. Die Mediane wichen davon kaum ab und wurden daher zugunsten einer größeren Übersichtlichkeit weggelassen. Anstelle einer Wiederholung der Abfrage der wichtigsten Kostenblöcke beim Betrieb autonomer Kleinbusse wurden die häufigsten Antworten aus der ersten Runde vom Umfrageteam in fünf Kategorien zusammengefasst und die Befragten mit der Bitte um deren Reihung nach Anteil an den Betriebskosten zurückgespielt.

Zu den absolut skalierten Fragen nach Anschaffungskosten und wirtschaftlicher Nutzungsdauer wurden den Befragten der arithmetische Mittelwert und Median der ersten Runde zur Verfügung gestellt. Zur Frage nach den zukünftigen Erwerbs-/Betriebsformen autonomer Busse sowie dem voraussichtlichen Zeitpunkt der Marktreife solcher Fahrzeuge konnten in der ersten Runde mehrere Optionen gewählt werden. Nach in der Umfrage fehlenden Betriebskosten-Arten wurden die Teilnehmenden nicht erneut befragt, da hiervon keine zusätzlichen Erkenntnisse erwartet wurden. Auch die Prognose der genauen Kosten je Fahrplan-Kilometer für einzelne Kostenarten entfiel. Die Antworten der ersten Runde zeigten bereits, dass nur einzelne Teilnehmende sich eine Einschätzung zutrauten, ihre Angaben wichen weiterhin so stark voneinander ab, dass eine Wiederholung der Frage in die zweite Runde nicht sinnvoll erschien.

5.2 Zusammensetzung der Expert:innen und Durchführung der Befragung

Als Zielgruppe der Expert:innenbefragung wurden im Vorfeld Personen definiert, die berufsbedingt besondere Erfahrungen und Kenntnisse zu Kosten und Kostenstrukturen im ÖPNV-Busbetrieb sowie zu der Entwicklung autonomer Fahrzeuge für solche Einsatzzwecke besitzen. Insbesondere wurden folgende Tätigkeiten identifiziert:

- ▶ Tätigkeit bei ÖPNV-Aufgabenträgern, beispielsweise bei einem Landkreis
- ▶ Tätigkeit im Bereich der Angebotsplanung bei einem Busbetrieb des ÖPNV
- ▶ Tätigkeit im Bereich der Betriebsdurchführung im ÖPNV
- ▶ Tätigkeit im Zusammenhang mit Automatisierung bei Automobilherstellern
- ▶ Tätigkeit in Zusammenhang mit einem Projekt zu einem real laufenden automatisierten Busbetrieb im ÖPNV
- ▶ Tätigkeit im Zusammenhang mit der Forschung zu automatisiertem Fahren

Die Vielfalt der angesprochenen vorgenannten Tätigkeitsfelder gewährleistet unterschiedliche Blickwinkel und Teilerfahrungen von Personen. Über den gewählten Aufbau der Befragung wird gewährleistet, dass keine:r der Expert:innen zu Aspekten Aussagen tätigen muss, in denen die eigene Kompetenz als nicht ausreichend bewertet wird. Zudem wird zur Selbstreflektion in den Fragenblöcken aufgerufen.

Häufig ist eine Schwierigkeit von Expert:innenbefragungen der Zugang zu den entsprechenden Personengruppen. In dem externen Netzwerk des TaBuLa-Projektes gab es allerdings Kontakte zu einer großen Anzahl ausgewiesener Expert:innen aus verschiedenen Teilbereichen, die die identifizierten Zielgruppen gut abdeckten. Die Umfrage wurde als Online-Befragung durchgeführt. Alle Personen wurden mit persönlicher individueller Anrede (Vor-/Nachname siezend oder dutzend) angeschrieben. Als Benefit wurde lediglich auf Wunsch die direkte Zustellung der Ergebnisse angeboten.

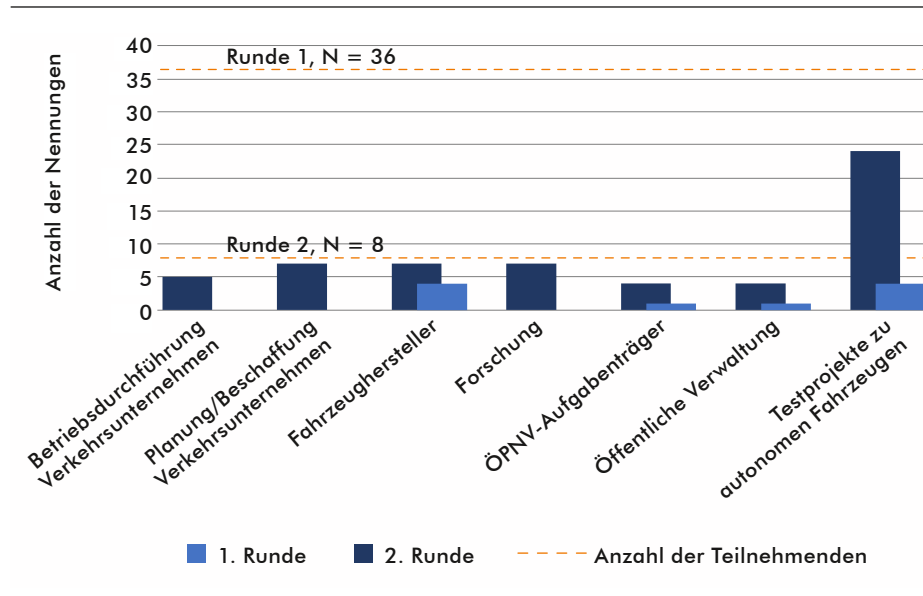
Eine Verzerrung ergibt sich durch den aus dem TaBuLa-Projekt angesprochenen überwiegend deutschsprachigen Expert:innenkreis, der zudem (abgesehen von einigen Mitarbeitenden von Automobilherstellern) im ÖPNV-Sektor tätig ist. Die Angeschriebenen mit Tätigkeit in Verkehrsunternehmen kommen zum Großteil aus Norddeutschland. Da der jeweils dem/der Empfänger:in zugeteilte Link nicht einzigartig ist, bestand die Möglichkeit, den Link an andere weiterzureichen. Dadurch bestünde die Möglichkeit, dass auch andere als die explizit Angeschriebenen an der Umfrage teilnahmen. Diese Möglichkeit war grundsätzlich erwünscht, solange weitere Befragte in die Zielgruppe passten. Es wurde daher explizit darauf hingewiesen, dass sich die Umfrage an Expert:innen richtet. Weiterhin schien bei der nicht unerheblichen Dauer⁷ und dem evidenten thematischen Fokus der Befragung unwahrscheinlich, dass Nicht-Expert:innen die Zeit hierzu aufwenden, wenn sie überhaupt an den temporär gültigen Link gelangen konnten.

55 Personen wurden persönlich zur Teilnahme an der ersten Runde der Umfrage eingeladen. Die erste Befragungsrunde startete am 12. Oktober 2020 und endete am 21. Oktober 2020. Die Teilnehmenden konnten freiwillig personenbezogene Daten und die Bereitschaft zur Partizipation an der zweiten Runde angeben. Diese Angabe machten 21 Personen. Sie wurden zur Teilnahme an der zweiten Runde vom 19. November 2020 bis 25. November 2020 aufgefordert.

Einen Überblick über die Expertisen der Teilnehmenden erlaubt die Selbsteinstufung ihrer Tätigkeiten. Es waren Mehrfachnennungen möglich. Unter den 36 teilnehmenden Expert:innen der ersten Runde gibt mit 24 ein Großteil an, Tätigkeiten im Zusammenhang mit Testprojekten zu autonomen Fahrzeugen auszuüben. Analysiert man diese Gruppe auf eventuelle Zweitnennungen, ergibt sich in dieser Gruppe zu den autonomen Testprojekten annähernd eine Gleichverteilung auf alle anderen Tätigkeitsfelder. An der zweiten Runde wirkten acht Teilnehmende aus den Tätigkeitsfeldern Verwaltung, Aufgabenträger, Fahrzeugherstellende sowie Testprojekte zu autonomen Fahrzeugen mit. Abbildung 20 zeigt die Zusammensetzung der Expert:innen.

7 Der Median für die tatsächliche Dauer der Befragung lag in der ersten Runde bei 16 Minuten, in der zweiten Runde bei 12 Minuten.

Abbildung 20: Tätigkeitsprofil der Befragten in der ersten und zweiten Runde der Delphi-Umfrage (Mehrfachnennungen möglich)



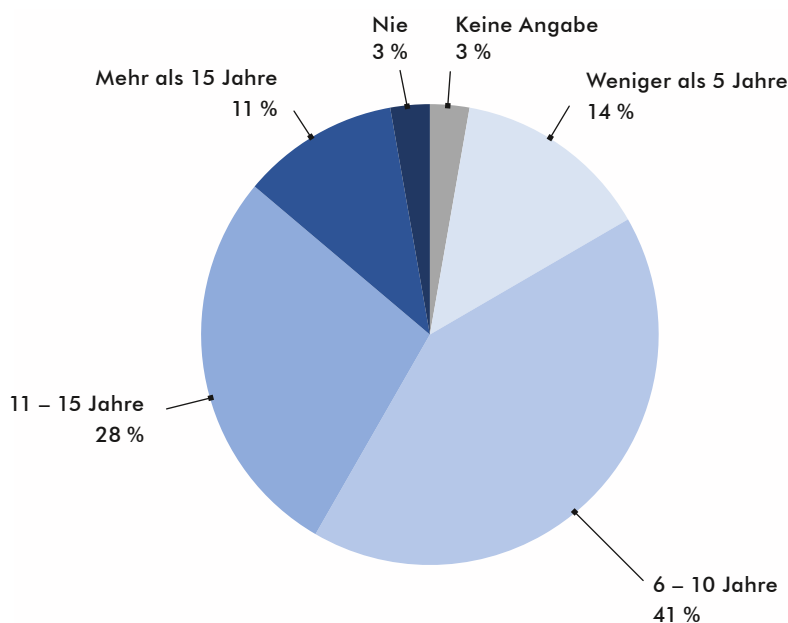
5.3 Ergebnisse

Der nachfolgende Abschnitt geht dezidiert auf die Ergebnisse der Expert:innenbefragung ein.

5.3.1.1 Zeitpunkt der Marktreife autonom fahrender Busse

Den Zeitpunkt der Marktreife (Abbildung 21) autonom fahrender Busse erwarteten in der ersten Runde die meisten Teilnehmenden in mehr als 5 Jahren, genauer: in den nächsten 6 bis 10 Jahren 15 der 36 Antwortenden, in den nächsten 11 bis 15 Jahren 10 Antwortende. Eine Marktreife bereits in den kommenden fünf Jahren prognostizierten 5 Teilnehmende, 4 andere sahen diesen Punkt erst in mehr als 15 Jahren. Ein:e Expert:in erwartete, dass autonome Busse "nie" marktreif würden. In der zweiten Runde ergab sich demgegenüber ein eindeutiges Bild. Sämtliche 8 Teilnehmende prognostizierten die Marktreife autonomer Busse in den nächsten 6 bis 10 Jahren.

Abbildung 21: Einschätzung der Befragten zum Zeitpunkt der Marktreife autonom fahrender Busse, erste Runde

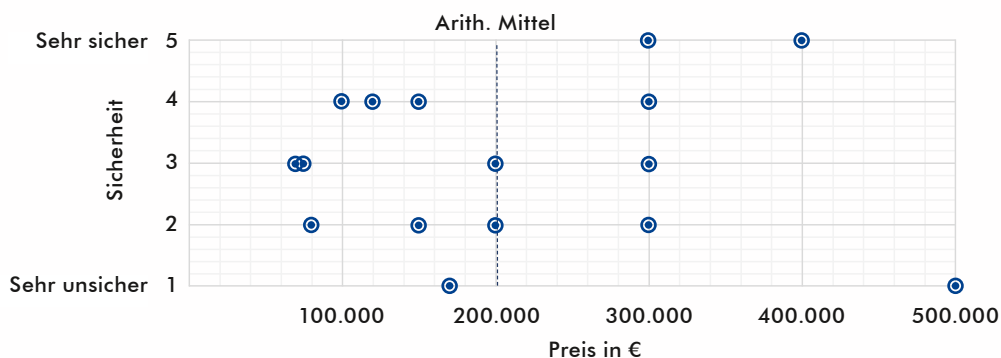


5.3.1.2 Anschaffungskosten

Zu den Anschaffungskosten autonom fahrender Kleinbusse bei Marktreife bildeten die Auffassungen der Expert:innen in der ersten Runde eine weite Spanne zwischen 70.000 und 500.000 Euro (vgl. Abbildung 22). Der arithmetische Mittelwert lag bei 200.750 Euro, die Standardabweichung bei 116.800 Euro. 16 der 36 Befragten trauten sich keine Einschätzung zu, sodass nur von 20 Teilnehmenden Antworten vorliegen. Einige der Antwortenden waren sich ihrer Einschätzung nicht besonders sicher. Auf die entsprechende Frage

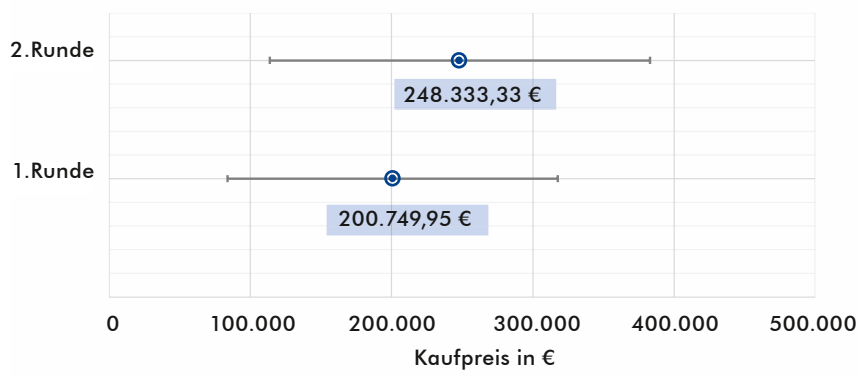
„Ich war mir [beim zu erwartenden Kaufpreis] ...“, die auf einer fünfstufigen Skala von 1 („sehr unsicher“) bis 5 („sehr sicher“) beantwortet werden konnte, ergab sich ein Mittelwert von 2,59 bei einer breiten Streuung (Standardabweichung 1,27).

Abbildung 22: Einschätzung der Befragten zur eigenen Sicherheit bei der Beantwortung der Frage zum Kaufpreis für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife in der ersten Runde



In der zweiten Runde stieg der im Durchschnitt erwartete Kaufpreis für einen autonom fahrenden Kleinbus deutlich an, dargestellt in Abbildung 23. Bei einer mit 6 deutlich kleineren Zahl an Teilnehmenden betrug der Wert nun etwa 248.000 Euro im arithmetischen Mittel. Er wurde allerdings deutlich von einem Ausreißer beeinflusst, so dass der Median mit 215.000 Euro deutlich niedriger ausfiel. Der niedrigste genannte Wert betrug 100.000 Euro, der höchste erwartete Preis hingegen blieb bei 500.000 Euro. Die Standardabweichung lag mit 112.800 Euro auf dem Niveau der ersten Runde. Die selbst eingeschätzte Sicherheit der Befragten war deutlich höher. Auf der Skala von 1 (sehr unsicher) bis 5 (sehr sicher) betrug das arithmetische Mittel der Antworten zu dieser Frage bei der zweiten Runde 3,5, verglichen mit einem Wert von 2,6 in der ersten Runde. Auch die Streubreite nahm ab, die Standardabweichung sank von 1,27 auf 1,00.

Abbildung 23: Mittelwert und Standardabweichungen der Kaufpreisabschätzungen der ersten und zweiten Befragungsrunde für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife



5.3.1.3 Wirtschaftliche Nutzungsdauer

Eine schmalere Spanne ergab sich bei der Frage nach der zu erwartenden wirtschaftlichen Nutzungsdauer (Abschreibung). Hier lagen in der ersten Runde 25 Antworten vor. Im arithmetischen Mittel erwarten die Expert:innen eine Nutzung über 8,56 Jahre für autonom fahrende Kleinbusse in Marktreife. Die Standardabweichung liegt bei 4,86 Jahren. Gleichwohl erwartet der oder die pessimistischste Expert:in eine Nutzung über nur zwei Jahre, wohingegen ein:e optimistischer:e Teilnehmer:in 25 Jahre Nutzungsdauer prognostiziert. Die durchschnittliche Sicherheit bei der Antwort lag mit einem Wert von 2,81 auf der fünfteiligen Skala etwas höher als beim Fahrzeugpreis, die Streuung mit einer Standardabweichung von 1,15 niedriger. Erkennbar sind die Einzelwerte und die Streuung in Abbildung 24.

In der zweiten Runde veränderte sich das Bild kaum (vgl. Abbildung 25). Die 7 Antwortenden folgten dem Mittelwert der ersten Runde, es stellte sich ein Konsens ein: Das arithmetische Mittel der Abschreibungsdauer sank minimal auf 8,14 Jahre (erste Runde: 8,46 Jahre) bei einer Spannweite der Antworten von 5 bis 10 Jahren. Die Standardabweichung sank damit einhergehend von 4,79 auf 2,27 Jahre.

Abbildung 24: Einschätzung der Befragten in der ersten Befragungsrunde zur eigenen Sicherheit bei der Beantwortung der Frage für die übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife

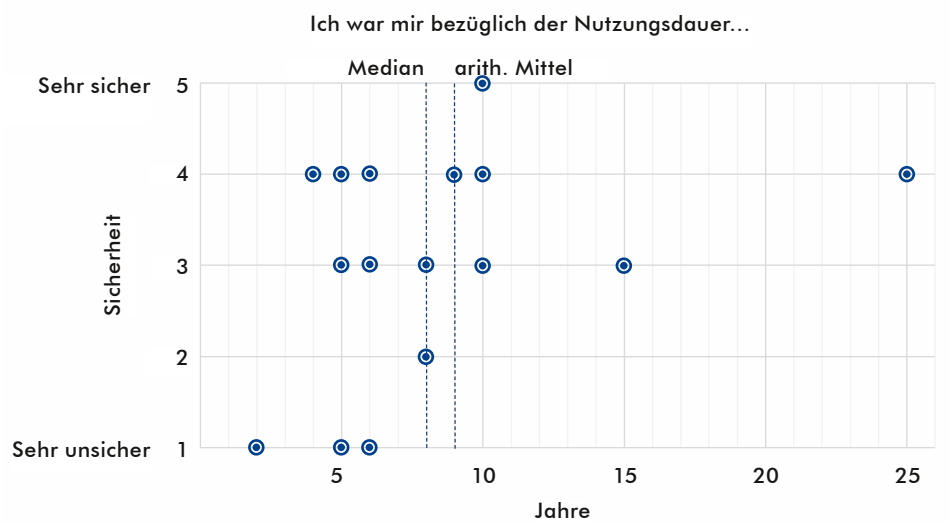
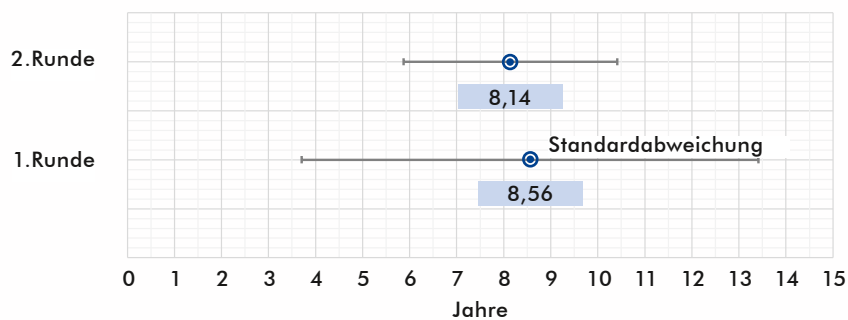


Abbildung 25: Mittelwert und Standardabweichung der Einschätzungen für die übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer für einen autonom fahrenden Kleinbus nach Marktreife



5.3.1.4 Anschaffungskosten in Verbindung mit wirtschaftlicher Nutzungsdauer

Interessante Ergebnisse zeigen sich bei einer Auswertung der eben allgemein dargestellten Einschätzungen zu Kaufpreis und Nutzungsdauer in Abhängigkeit vom Tätigkeitsfeld der Expert:innen, wie in Abbildung 26 visualisiert:

Abbildung 26: Einschätzung von Kaufpreis und wirtschaftlicher Nutzungsdauer nach Tätigkeitsgebieten bei Marktreife in der ersten Befragungsrunde

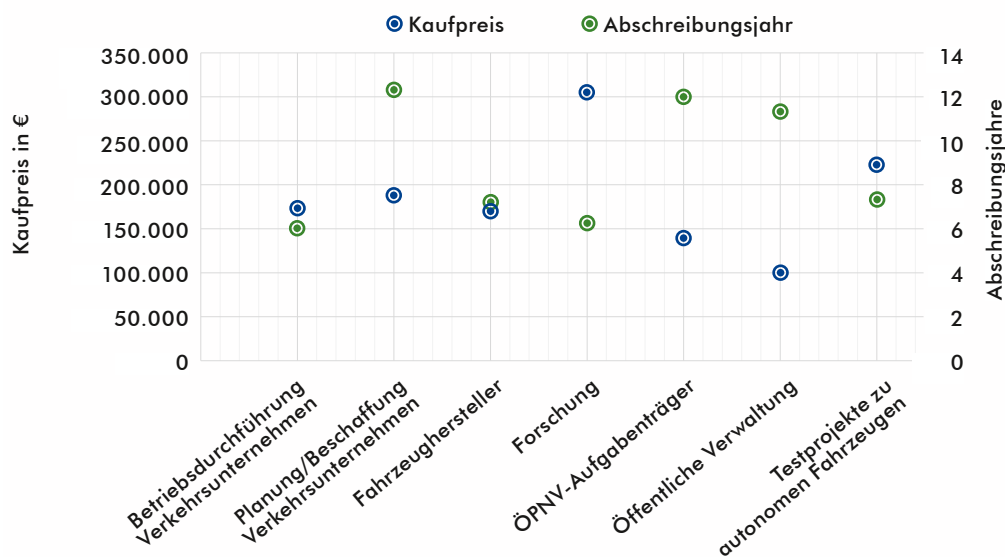
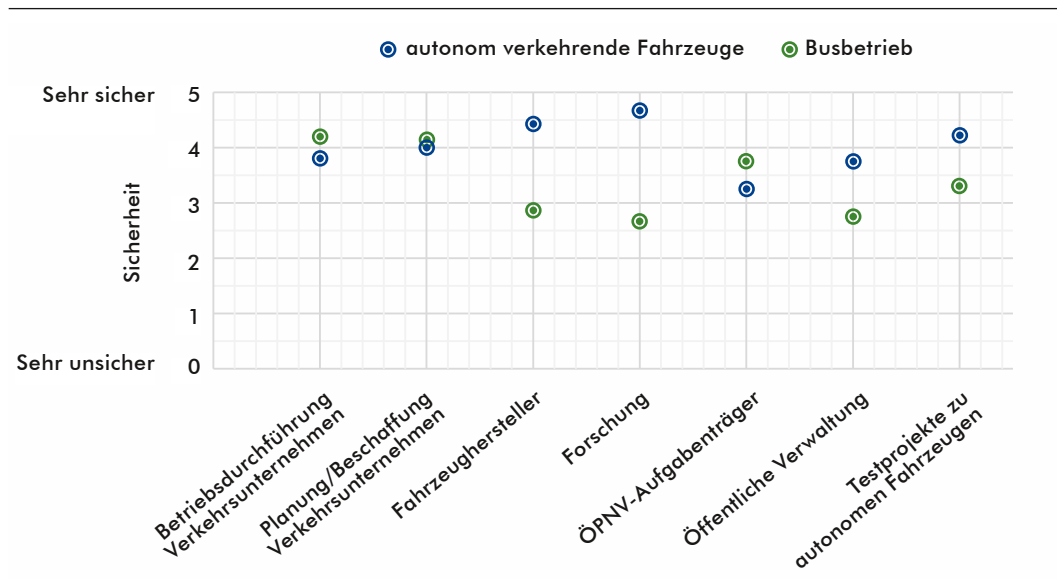


Abbildung 27 stellt die selbst eingeschätzte Sicherheit bei der Beantwortung der Fragen nach Tätigkeitsgruppen getrennt dar, ebenfalls auf Basis der Antworten der ersten Runde. In der zweiten Runde mit deutlich weniger Rückläufern ist eine solche Auswertung nicht sinnvoll möglich, da nicht alle Felder belegt sind.

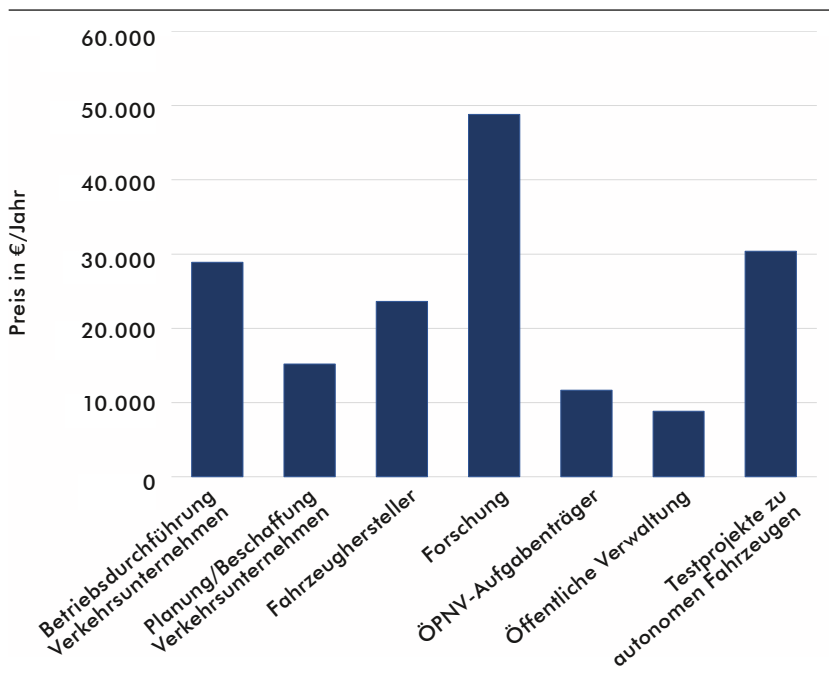
Aus Abbildung 27 zeigt sich, dass sowohl Beschäftigte bei Fahrzeugherstellenden als auch Forschende eine hohe Sicherheit bei ihrer Einschätzung des Kaufpreises annehmen. Dabei liegt ihre Sicherheit bei der Bewertung der Betriebsthemen unterdurchschnittlich, obschon diese auch die wirtschaftliche Nutzungsdauer im ÖPNV einschließen können.

Abbildung 27: Sicherheit der Befragten bei der Einschätzung zu autonom verkehrenden Fahrzeugen und Busbetrieb nach Tätigkeitsgebieten, erste Runde



Werden ohne Berücksichtigung der subjektiven Sicherheit zur Aussage die Abschreibungsdauer ins Verhältnis zum Kaufpreis gesetzt, zeigt sich, dass Forschende die Kosten für das Fahrzeug besonders hoch ansetzen. Besteller:innen von ÖPNV-Leistungen (bei Aufgabenträgern tätige) und Tätige in der Verwaltung setzen diese Kosten hingegen sehr niedrig an (vgl. Abbildung 28). Diese drei Gruppen von Befragten sehen allerdings auch die höchste eigene Unsicherheit, was ihre eigene Kompetenz hinsichtlich Betriebsthemen und Nutzungsdauer betrifft.

Abbildung 28: Abschreibungskosten pro Jahr – eigene Berechnung aus Kaufpreis geteilt durch Nutzungsdauer je Tätigkeitsgebieten der Befragten in der ersten Runde



5.3.1.5 Betriebskosten autonomer Bus gegenüber einem Standardbus (Ebene 1, Situation 1)

Bei der Prognose der Veränderung der Betriebskostenparameterhöhe zwischen einem Standardbus und einem autonomen Bus erwarten die Teilnehmenden bei einigen Parametern deutlich höhere Kosten. Dazu gehören beispielsweise Parameter, die von heutigen Bussen nicht benötigt werden oder die für ihren Fahrbetrieb eine unterstützende Rolle einnehmen, deren Vorhandensein nicht permanent zwingend nötig ist. Beispiele sind Programmierende (Mittelwert 4,25), extern eingekaufte Softwareupdates für das Fahrzeug (4,31) bzw. Leitstelle und Betriebsorganisation (4,27). Auch für die Leitstelle selbst, die einen „zuverlässigen und sicheren Betriebsablauf“ gewährleisten soll, werden bei autonomen Bussen überwiegend deutlich steigende Kosten erwartet (4,21). Deutlich sinkende Kosten erwarten die Expert:innen hingegen mehrheitlich nur bei sehr wenigen Parametern. Am deutlichsten ist die Prognose bei den Aufwendungen für Fahrer:innen. Der Mittelwert von 1,56 deutet jedoch darauf hin, dass zumindest von einigen Teilnehmenden kein völliges Entfallen angenommen wird. Etwa gleichbleibend mit einem Mittelwert zwischen 2,00 und 3,00 erwarten die Teilnehmenden die Kosten für Leerfahrten (2,43), Ticketing („Fahrkartenkontrolle vor Ort“ 2,88, „Fahrkartenautomaten“ 2,59), Verschleißteile an den Fahrzeugen („Laufende Materialkosten für einen störungsfreien Betrieb“ 3,00, „davon Reifen“ 2,56), einige Teile der streckenseitigen Infrastruktur („Warte- und Abstellflächen im Verkehrsnetz“ 2,91 und „Zuwegungen/Querungsstellen für zu Fuß gehende zu Haltestellen“ 3,00), die Behebung von Unfallschäden (2,81) und auch die vom Fahrzeug benötigte Energie (2,75). Die Expert:innen waren sich bei diesen Einschätzungen vergleichsweise sicher mit einem Mittelwert von 3,46 (Standardabweichung 0,95).

Viele Befragte ergänzten ihre Antworten in den Freitextfeldern. Mehrfach wurden die Angaben konkretisiert oder Schwierigkeiten bei der Beantwortung aufgrund mehrerer denkbarer Szenarien skizziert:

- ▶ „Ich bin nun davon ausgegangen, dass das Fahrzeug im Mischverkehr mit personengeführten Pkw fährt“
- ▶ „Haltestellen – haben wir uns zu dem Zeitpunkt nicht schon längst an virtuelle Haltestellen gewöhnt?“
- ▶ „Dadurch, dass ich zwar davon ausgehe, dass autonome Busse alternativ angetrieben werden, aber nicht weiß ob rein elektrisch oder auch z.B. mit Wasserstoff, ist die Einschätzung zu den Ladestationen schwer.“

- ▶ *„Zum Punkt Energie: Gleichbleibend, denn wenn die Verknüpfung mit anderen Fahrzeugen und LSA [Ergänzung der Autoren: LSA = Lichtsignalanlage] vorhanden ist, wird der Bedarf sinken, weil Fahrt besser planbar, wenn nicht, wird er steigen, weil der vorausschauend fahrende Fahrer fehlt.“*
- ▶ *„Unter Security verstehe ich nicht die Überwachung in der Leitstelle, sondern Personal im Feld. Da es eine verstärkte Überwachung aus der Leitstelle gibt, bleiben die Security-Kosten gleich“*

Daneben äußerten Expert:innen normative oder implizite Annahmen:

- ▶ *„Ein gutes System muss mit minimaler Infrastrukturänderung auskommen.“*
- ▶ *„Fahrkartenautomaten: Brauchen wir nicht mehr [...]“*

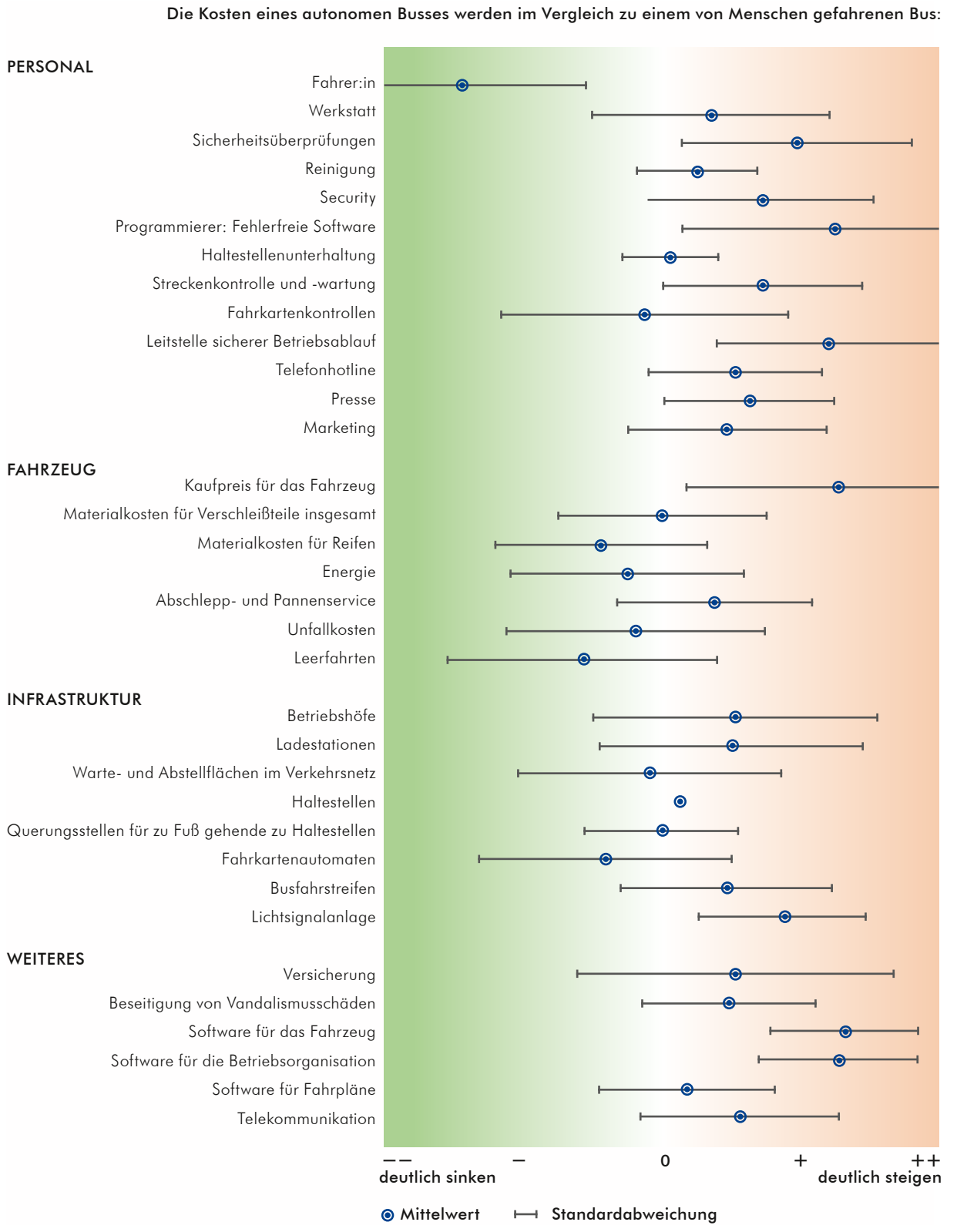
Zur tendenziellen Entwicklung der Kosten für einzelne Parameter im Vergleich zwischen autonomen Bussen zu menschlich gesteuerten Bussen lagen die Mittelwerte der Antworten in der zweiten Runde auf der fünfteiligen Skala überwiegend im Bereich von +/- 0,25 zu den Ergebnissen der ersten Runde, also einer viertel Antwortstufe. Diese Abweichung lässt sich insgesamt als Konsens interpretieren. Auch die Streubreite der Antworten, festgestellt anhand der Standardabweichung, fiel fast durchgängig geringer aus.

Einige Parameterergebnisse wichen gleichwohl in der zweiten Runde von diesem Gesamttrend ab. So erwarteten die Teilnehmenden der zweiten Runde überwiegend weniger stark steigende Kosten für die Werkstatt (2,89 statt 3,35) und Security (3,33 statt 3,72). Bei den Aufwendungen für Fahrkartenkontrolle veränderte sich der Wert von 2,88 auf 2,11, im Durchschnitt werden nun also leicht niedrigere Kosten erwartet. Gleiches gilt für die Erwartungen zu den Energiekosten (2,33 statt 2,75). Deutlich weniger starke Anstiege erwarten die Expert:innen der zweiten Runde durchschnittlich auch bei den Kosten der Leitstelle (3,67 statt 4,21), der dort und in der Betriebsorganisation eingesetzten Software inklusive Updates (3,88 statt 4,27), der Betriebshöfe (3,00 statt 3,53), der Haltestellen (2,86 statt 3,12) und der Versicherung (3,13 statt 3,54).

Die Sicherheit der Antworten gaben die Expert:innen in der zweiten Runde im Schnitt mit 3,88 an. Sie waren sich damit nochmals deutlich sicherer als die Teilnehmenden in der ersten Runde (3,46).

Im Detail finden sich die Ergebnisse in Abbildung 29.

Abbildung 29: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung der Einzelfaktoren eines autonom fahrenden Standardbusses gegenüber eines von Busfahrer:innen gefahrenen Standardbusses (Situation 1), erste Runde

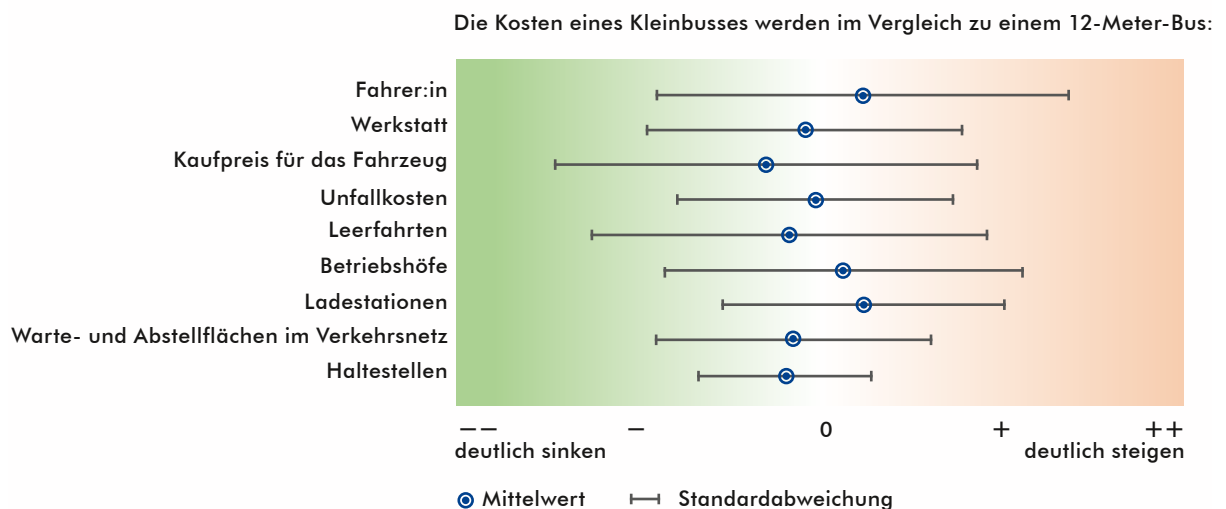


5.3.1.6 Betriebskosten Kleinbus gegenüber einem Standardbus (Ebene 1, Situation 2)

Bei Kleinbussen gingen die Expert:innen in der ersten Runde überwiegend von im Vergleich zu einem Standardbus etwa gleichbleibenden Betriebskosten aus (vgl. Abbildung 30). Nahezu alle Betriebskosten-Parameter wurden im Mittel mit Werten zwischen 2,00 und 3,00 eingeschätzt, wenngleich fast ausschließlich in der oberen Hälfte des Bereichs. Nur die Kosten für Fahrer:in (3,24) und Betriebshöfe (3,12) stechen heraus. Dies könnte in der Kleinteiligkeit der Abläufe begründet sein oder an einer möglichen Fehlbewertung der Kosten-Bezugsgröße (pro Fahrzeug oder pro Sitzplatz) der Expert:innen. Die Antwortenden waren sich bei ihren Angaben mit einem Mittelwert von 3,46 im Vergleich Standardbus ↔ Kleinbus insgesamt ähnlich sicher wie beim Vergleich manuell gesteuerter Bus ↔ Autonome Bus. Die Standardabweichung fiel beim Kleinbus mit 1,04 etwas höher aus.

In der zweiten Runde wichen die arithmetischen Mittelwerte der Einschätzungen zu den Parametern überwiegend um weniger als 0,25 vom Ergebnis der ersten Runde ab, die Standardabweichungen waren deutlich geringer. Ausnahmen bildeten die Investitionskosten zur Anschaffung des Fahrzeuges (MW 2,29, zuvor: 2,70) und Abstellflächen im Verkehrsraum (MW 2,57, zuvor: 2,85), bei denen die Expert:innen in der zweiten Runde durchschnittlich einen niedrigeren Preis erwarten als die Teilnehmenden der ersten Runde.

Abbildung 30: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung der Einzel-Kostenparameter eines Kleinbusses im Vergleich zu einem 12-Meter-Bus (Szenario 2), erste Runde



5.3.1.7 Weitere Betriebskostenparameter

In der ersten Runde konnten die Expert:innen aus ihrer Sicht in der ihnen vorgegebenen Auflistung (vgl. Ergebnisse oben) noch fehlende, relevante Kostenparameter angeben. Kategorisieren lassen sich die Antworten in

- ▶ einmalige Aufwendungen vor dem Start („Inbetriebnahme“, „Zulassungskosten“, „Projektkosten der Umsetzung“),
- ▶ Kosten der Fortentwicklung während des Betriebs („Softwarelizenz ? [sic] Weiterentwicklung des Produkts“, „Kontinuierliche Optimierung des Betriebs ? [sic]“) und
- ▶ Hinweise auf weitere Funktionen, für die Personal erforderlich sei („Steward oder Stewardess im Verkehrsraum“, „Vorhaltekosten für Fahrer:innen bei Bedarfsverkehren“, „Zum Personalbedienten Betrieb werden im autonomen Betrieb sog. Notfallmanager“).

5.3.1.8 Bedeutung der einzelnen Kostenkategorien (Ebene 2)

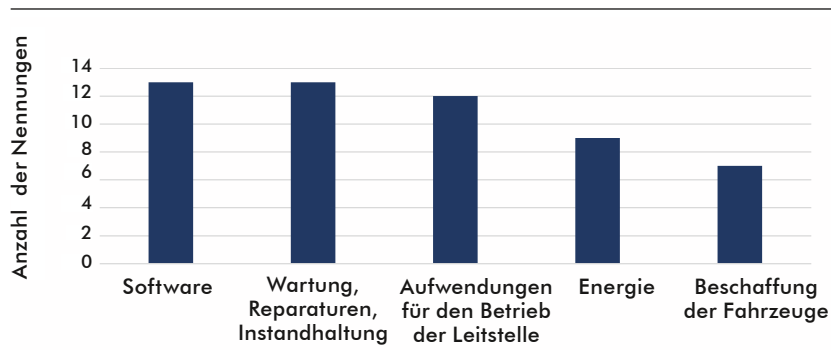
In der ersten Runde wurden konkrete EUR-Betriebskosten je Fahrplankilometer erfragt. Als Vorlauf diente die Frage, welche Parameter aus Sicht der Befragten den größten Anteil haben würden an den Betriebskosten eines autonom fahrenden Kleinbusses. 7 der 36 Befragten machten dazu keine Angaben. Die Antworten der übrigen 29 Teilnehmenden fielen sehr heterogen aus. Werden die Einzelantworten gruppiert, ergibt sich Abbildung 31.

Erstaunlich häufig wurden Aufwendungen zur Beschaffung der Fahrzeuge genannt, obschon die Frage in der ersten Runde ausdrücklich Betriebskosten galt.

Die darauf aufbauende Frage nach konkreten Kilometerpreisen konnte oder mochte nahezu kein:e Expert:in beantworten. Es machten nur 3 der 36 Befragten Angaben. Die Summe der Betrieb-Aufwendungen je Kilometer für die jeweils identifizierten „wichtigsten“ Kostenblöcke streuten extrem. Sie lagen bei diesen Befragten bei 10 Cent, 1,31 Euro respektive 6,20 Euro.

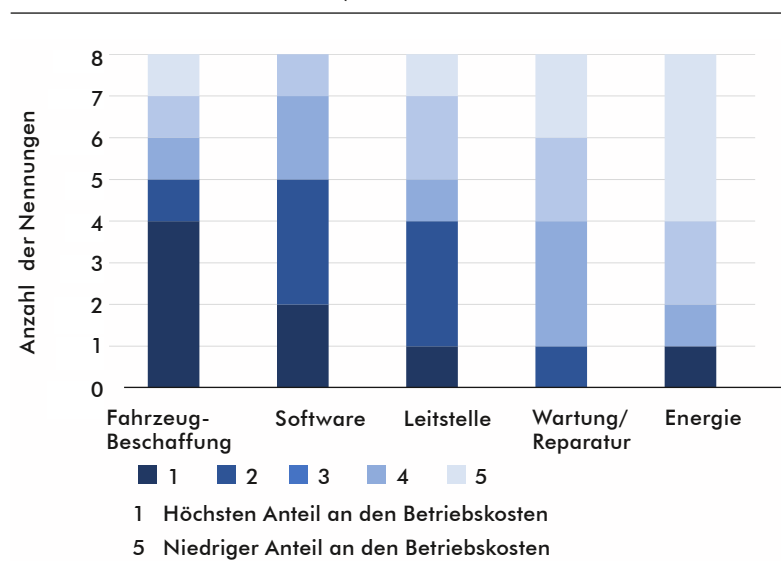
In der zweiten Runde konnten die Befragten grobe Kategorien von Kosten nach ihrem Anteil an den Gesamtkosten reihen. Die vorgegebenen Kategorien wurden auf Basis der Antworten zu den größten Anteilen der Betriebskosten aus der ersten Runde (vgl. Abbildung 31) gebildet.

Abbildung 31: Antworten auf die Frage, was den größten Anteil an den Betriebskosten im autonomen Betrieb bei Marktreife einnehmen wird, erste Runde



Es ergab sich ein sehr heterogenes Bild, wie es aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Nennungen in der ersten Runde auch zu erwarten war. Verhältnismäßig großen Konsens hat die Einschätzung, dass die Fahrzeugbeschaffung mehr Mittel erfordern würde als die weiteren Blöcke Energie, Software, Leitstelle und Wartung/Reparatur. Vier der acht Teilnehmenden halten die Anschaffung für am Kostspieligsten. Den geringsten Anteil an den Gesamtkosten machen ebenso vier Expert:innen für die Energie aus. Software und Leitstelle sehen viele Expert:innen im Mittelfeld, jeweils drei der acht Teilnehmenden setzten diese Positionen auf Platz 2 der Reihenfolge, bei der Software zwei weitere auf Platz 3, bei der Leitstelle war ein weiterer Experte dieser Auffassung. (vgl. Abb. 32)

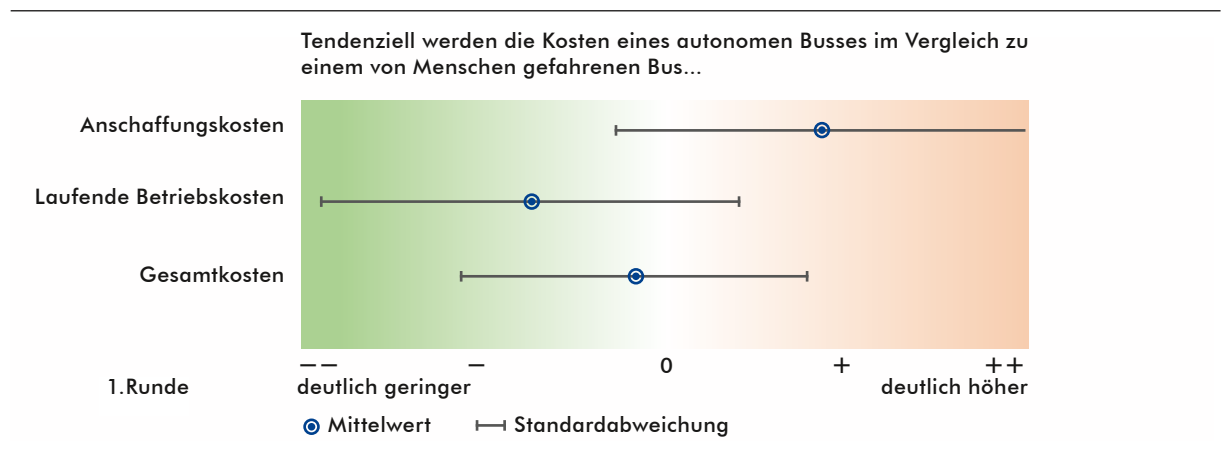
Abbildung 32: Sortierung durch die Befragten von „größten Blöcken der Betriebskosten“ für autonome Kleinbusse, zweite Runde



5.3.1.9 Gesamtbewertung autonom fahrender Kleinbusse (Ebene 3)

Die Expert:innen wurden um die Einschätzung geben, wie sich "Anschaffungskosten", "Laufende Betriebskosten" und "Gesamtkosten" autonomer Kleinbusse in Relation zu einem menschlich gesteuerten Standardbus darstellen würden (Abbildung 33).

Abbildung 33: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung eines autonom fahrenden Busses im Vergleich zu einem von Menschen gefahrenen Busses nach Marktreife, erste Runde

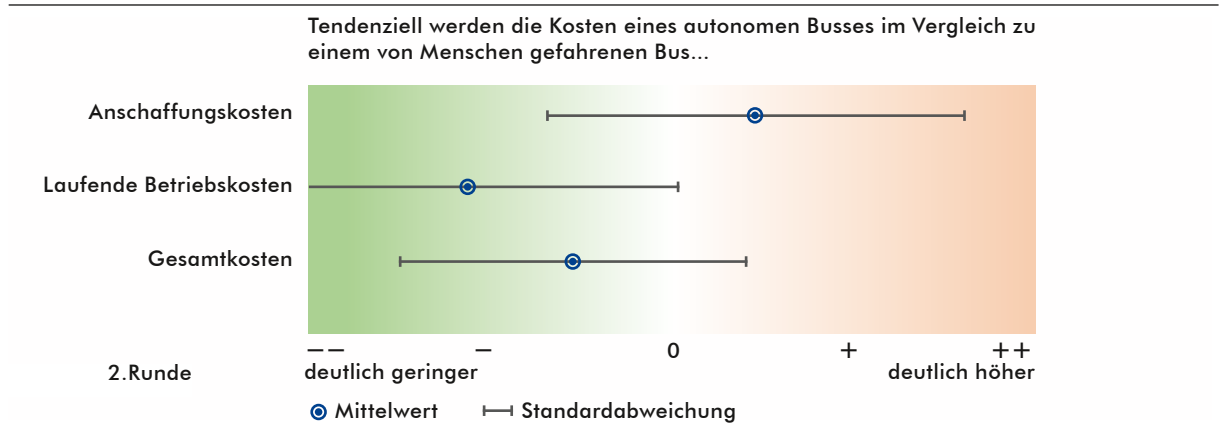


Die Anschaffungskosten würden den Ergebnissen der ersten Runde zufolge stark ansteigen (3,88), die laufenden Betriebskosten hingegen etwas absinken (2,27). Die Streubreite ist im Bereich von 1 (0,95 bis 1,15). Dabei sind sich die Expert:innen sehr sicher mit einem Wert zwischen 3,91 und 3,78 bei einer Standardabweichung zwischen 0,72 und 0,83.

Insgesamt (Gesamtkosten) nehmen sie etwa gleichbleibende bis leicht sinkende Kosten mit einem Mittelwert von 2,84 bei einer Sicherheit von 3,75 an (Standardabweichung 0,76) an.

In der zweiten Runde wurden durchweg leicht geringere Kosten prognostiziert (Abbildung 34). Die Anschaffungskosten werden mit 3,43 immer noch über den Kosten eines von einem Menschen gesteuerten Standardbusses liegen, jedoch weniger stark steigend als den Ergebnissen der ersten Runde (3,88) zufolge. Für die laufenden Betriebskosten prognostizieren die Expert:innen in der zweiten Runde ein etwas stärkeres Absinken (1,86 verglichen mit 2,27). Bei den Gesamtkosten erwarten die Teilnehmenden der zweiten Runde konsequenterweise ebenso mit 2,42 einen stärkeren Abfall als die Expert:innen in der ersten Runde (2,84). Die Standardabweichung in der zweiten Runde lag in jeder Kategorie niedriger als in der ersten Runde.

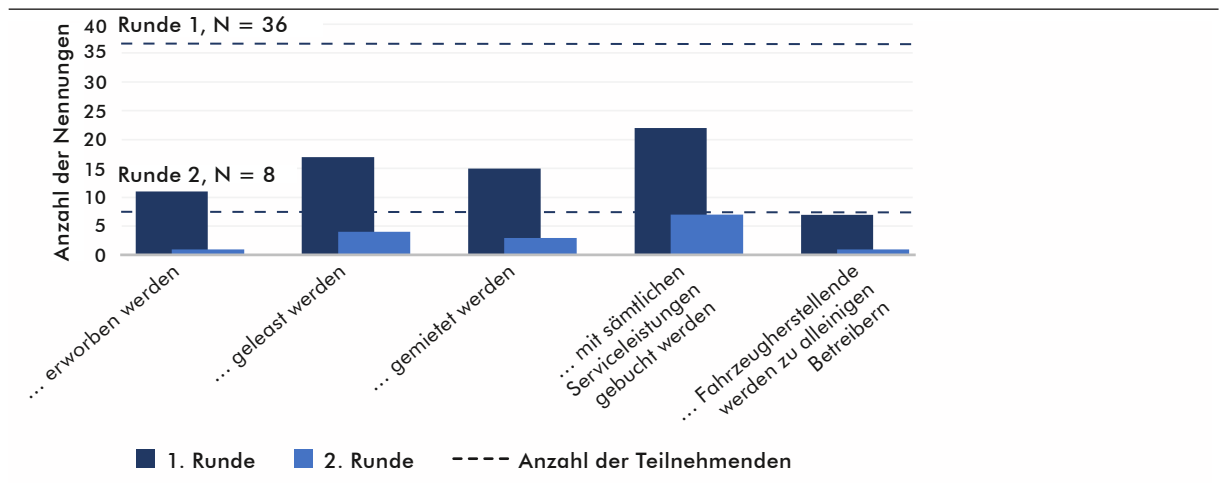
Abbildung 34: Mittelwerte und Standardabweichungen zur Kostenentwicklung eines autonom fahrenden Busses im Vergleich zu einem von Menschen gefahrenen Busses nach Marktreife, zweite Runde



5.3.1.10 Beschaffungsweise autonomer Kleinbusse

Ergänzend zu den Kernfragen wurden die Expert:innen noch befragt, welche Beschaffungsweise sie für autonome Kleinbusse erwarten. In beiden Runden ging die absolute Mehrheit der Befragten davon aus, dass autonome Busse künftig von Verkehrsunternehmen mit sämtlichen Serviceleistungen gebucht werden (siehe Abbildung 35). Eine weitere sehr große Gruppe der Befragten stimmte den Aussagen zu, dass die autonomen Fahrzeuge geleast oder gemietet werden würden. Weniger als ein Drittel der Befragten geht in beiden Runden davon aus, dass die autonomen Fahrzeuge gekauft werden. Wenige Expert:innen sind der Auffassung, dass Verkehrsunternehmen mit der Automatisierung gar nicht mehr gebraucht werden und Fahrzeughersteller auch den Betrieb übernehmen.

Abbildung 35: Einschätzung der Teilnehmenden zur Frage: „Ich gehe davon aus, dass autonom fahrende Busse künftig von Verkehrsunternehmen...“ (Mehrfachnennungen möglich)



5.4 Zwischenfazit

Die Delphi-Expert:innenbefragung hatte zum Ziel, möglichst detaillierte Einschätzungen der Betriebs- und Beschaffungskosten sowie die voraussichtliche Nutzungsdauer autonomer Kleinbusse zum Zeitpunkt ihrer Marktreife zu erhalten. Es gelang, eine erfreulich große Anzahl an Expert:innen aus relevanten Tätigkeitsfeldern als Teilnehmende zu gewinnen. Besonders in der ersten Runde konnten mit dieser guten Teilnehmendenbasis Aussagen gewonnen werden. In der zweiten Runde fiel die Teilnehmendenzahl überschaubar aus, jedoch konnten weiterhin relevante Einzelaussagen und Vergleiche zu den Aussagen der ersten Runde erzielt werden. Um die Delphi-Methodik mit ihrer Konsensfindung über mehrere Runden in vollem Umfang einzusetzen, können noch höhere Teilnehmendenzahlen in der ersten Runde nötig sein, um trotz der vermutlich inhärenten "Absprunquote" nach der ersten Runde eine befriedigende Zahl an Teilnehmenden in späteren Runden zu erhalten. Die gewählte Methodik mit mehreren Ebenen der Kostenabfrage war eine gute Wahl; insbesondere der Vergleich einzelner Kostenarten zwischen einem autonomen- oder Kleinbus zu einem Standardbus wurde gut akzeptiert, wie hohe Rückläuferzahl und "Sicherheiten" bei der Beantwortung indizieren. Es fällt auf, dass an einigen Stellen der Interpretationsspielraum bezüglich Einsatzszenarien eventuell zu groß war; jedoch war andererseits eine in Bezug auf Szenarien möglichst offene Befragung ausdrücklich gewünscht.

Zu den Anschaffungskosten eines autonomen Kleinbusses lässt sich, trotz einzelner deutlich abweichender Rückmeldungen von Expert:innen, ein Konsens der Mehrheit der Teilnehmenden im Bereich um 200.000 Euro in der ersten Runde erkennen. Die Nutzungsdauer wird im Durchschnitt mit etwa acht Jahren beziffert. Auch hierzu gibt es, erkennbar an der geringen Standardabweichung, einen Konsens bei der Mehrheit der Teilnehmenden; ebenfalls jedoch auch deutliche Abweichungen einzelner.

Bei den Betriebskosten sahen sich die Teilnehmenden überwiegend nicht imstande, konkrete Kilometerkosten zu prognostizieren; die sehr wenigen Rückmeldungen waren extrem heterogen und einer sinnvollen Auswertung nicht zugänglich. Es erwies sich von Vorteil, darüber hinaus weitere Frageebenen mit geringerer Komplexität vorgesehen zu haben. Insbesondere bei der Entwicklung einzelner Kostenarten war eine hohe Rückmeldungsquote und ein überwiegend hoher Konsens mit geringen Standardabweichungen und hohen Sicherheiten bei der Antwort festzustellen. Von Interesse sind hierzu besonders steigende Kosten in

Bereichen, die in der Literatur weniger Beachtung erhielten: Auffällig sind so die Kosten von IT-Systemen sowie die Aufwendungen für eine Leitstelle, bei denen im Schnitt deutlich steigende Kosten prognostiziert wurden. Auch für Sicherheit von System und Fahrgästen erwarten die Expert:innen höhere Aufwendungen. Diese Kostengruppen halten sie überwiegend auch für relevant in Hinblick auf die Gesamtkosten. Insgesamt erwarten die Teilnehmenden leicht geringere Gesamtkosten für autonome Kleinbusse im Vergleich zu einem von Menschen gefahrenen Standardbus nach Marktreife; dabei gleichen niedrigere Betriebskosten höhere Anschaffungspreise aus.

Über die Frage, wann genau die Fahrzeuge „marktreif“ sein werden, besteht nur grobe Einigkeit. Etwa 70 % der Befragten prognostizieren diesen Zeitpunkt für die nächsten 5 bis 15 Jahre. Interessant ist eine Extremmeinung: 1 der 36 Expert:innen hält autonome Kleinbusse offenbar für unrealistisch, ihre Antwort nach dem Zeitpunkt der Marktreife lautete „nie“.

Die lediglich am Rande angerissene Frage nach der zu erwartenden Beschaffungsart wirft mit sehr hohen Anteilen für andere Formen als den klassischen Kauf interessante Fragestellungen zur zukünftigen Organisationsform von Verkehrsbetrieben auf. Sollten Fahrzeuge als „Full Service“ vertrieben werden, fielen eventuell einige Funktionen, die heute in diesen Unternehmen erledigt werden, weg.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Kosten für Anschaffung und Betrieb von autonomen Bussen werden einen entscheidenden Einfluss haben auf das Ausmaß der zu erwartenden Einsatzfelder dieser Fahrzeuge. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war, eine bessere Einschätzung zu gewinnen, wie hoch die Kosten aussehen und wie sie sich zusammensetzen werden.

Es wurde deutsch- und englischsprachige Literatur zum Forschungsstand gesichtet und ausgewertet. Weiterhin wurden 36 Expert:innen mit einem guten Querschnitt aus allen relevanten Bereichen von ÖPNV-Aufgabenträger über Verkehrsunternehmen und Forschung bis hin zu Fahrzeugherstellenden mittels Delphi-Methodik über Online-Fragebögen befragt. Die Informationen wurden ergänzt um die Erfahrungen aus dem Projekt TaBuLa.

In der kritischen Reflektion war die Delphi-Methodik grundsätzlich gut geeignet. Sie verlief gleichwohl in der zweiten Runde nicht optimal aufgrund reduzierter Motivation der Teilnehmenden aus der ersten Runde und damit niedriger Rücklaufquote. Eine weitere Runde hätte ggf. über Interviews und Workshops abgebildet werden müssen, was allerdings wegen des Aufwandes und der allgemeinen Begleitumstände nicht möglich war. Es konnten seitens der Expert:innen kaum absolute Kostenparameterangaben gemacht werden. Dadurch bleibt offen, welche Relevanz z. B. eine deutlich erwartete Kostensteigerung eines einzelnen Parameters auf die Gesamtkosten verursacht. Um dies zu lösen, könnten mehr konkrete Erfahrungswerte anderer automatisierter Shuttleprojekte und detaillierte Erfahrungen von Verkehrsunternehmen herangezogen werden. Dieses Vorgehen ist allerdings häufig aus wettbewerbsrechtlichen Gründen und üblicher Verschwiegenheitsklauseln schwierig. Weitere Aspekte – wie elektrische Antriebsart und Energiekosten – stellen in den Prognosen mit absoluten Werten eine Herausforderung dar. Zu den Kosten der künftigen Infrastruktur wurden ebenfalls kaum verwertbare Angaben geliefert. Die in der Befragung genutzte Überlagerung mehrerer großer Veränderungsaspekte (Elektrifizierung, Automatisierung und zusätzlich die Veränderung der Gefäßgröße) ist eine besondere Schwierigkeit, die das Zukunftsszenario schwerer vorstellbar machen für die Befragten. Dennoch erwiesen sich in Kombination die drei gewählten Säulen – Literatur, Projekterfahrung und Expert:innenbefragung – als gut geeignet, um ein neues Gesamtbild mit allen Unsicherheiten und neu betrachteten Parametern zu zeichnen.

In der Literaturanalyse zeigte sich: Es muss die jeweilige Definition und Betrachtungsweise der einzelnen Autoren verifiziert werden. Der Großteil der Autoren betrachtet das autonome Fahren aus Sicht von Pkws bzw. Taxis. Diese Ansätze sind kaum anwendbar auf einen automatisierten barrierefreien ÖPNV für Alle. Der Unterschied der Investitionskosten zwischen Pkw- und Bus-Fahrzeugen beläuft sich in den Annahmen auf sechsstelligen Summen. Ferner ist die Definition eines Minibusses variabel (was auf der hier nicht betrachteten Einnahmenseite besonders interessant wird). Grundsätzlich ist für einen öffentlich (geförderten) autonomen Verkehr ein barrierefreier ÖPNV-Standard anzustreben, der heutige Qualitätsstandards von Bussen nicht unterschreitet. Im ländlichen Raum geht es dabei auch um die Gewährleistung der Daseinsvorsorge.

Ein barrierefreier Minibus für den ÖPNV kostet derzeit 110.000 bis 300.000 Euro bei einer Nutzungsdauer von höchstens 10 Jahren. In Deutschland handelt es sich eher um ein Nischenprodukt, die Nachfrage ist deutlich geringer als bei den standardisierten 12 m langen Solobussen. Die Hardwarekomponenten für die Fahrfunktionen der Automatisierung werden in den Investitionskosten auf zusätzliche 10.000 Euro pro Fahrzeug angenommen. Eine Detaillierung, was zu welchen zusätzlichen Kosten für einen barrierefreien autonomen Busverkehr notwendig ist (z. B. für automatisierten Ein- und Ausstiegsprozess), gibt es bisher nicht. Die befragten Expert:innen schätzen die Kosten für einen elektrischen autonomen Minibus nach ÖPNV-Konzept bei Marktreife in einer Flotte im Mittel auf 200.000 bis 250.000 Euro bei einer Nutzungsdauer von acht Jahren. Die Nutzungsdauer liegt damit deutlich unter der üblichen Nutzungsdauer für einen Solobus.

Hinsichtlich der Betriebskosten nimmt das Fahrpersonal im klassischen Busverkehr grob 45 Prozent (je nach Einsatzprofil) der Betriebskosten ein, bei kleineren Gefäßgrößen mehr. Bei Taxis liegt der Personalkostenanteil bei 50 bis 60 Prozent. Das macht Automatisierung – insbesondere in Verbindung mit den erzielbaren Einnahmen – auf den ersten Blick für kleine Gefäßgrößen besonders interessant.

Für das Zukunftsszenario des autonomen Fahrens gehen verschiedene Literaturquellen davon aus, dass zwei Drittel der Kosten künftig auf Fahrzeug und Energie entfallen. Aus den Expert:innenbefragungen und den Erfahrungen aus TaBuLa zeigt sich allerdings, dass diverse der „weiteren Kosten“ in der vorliegenden Literatur unterschätzt oder unerwähnt bleiben. Viele – hier nicht verwendete – Literaturquellen vernachlässigen ganze Kostenblöcke und vereinfachen die Kostenprognosen zu autonomem Fahren so sehr, dass die Erwartungen an die künftige Kostenreduktion zu groß werden könnten. Mit dem Wegfall des Fahrpersonals erhöhen sich im autonomen Fahren viele Nebenkosten und der personelle Betreuungsaufwand für autonome Fahrzeuge im

Hintergrund. Als maßgeblich sind Software, Leitstelle und Sicherheit zu nennen. Bei den Kosten für Fahrkarten, Reifen, Energie und Unfälle werden hingegen Einsparungen erwartet. Den besten Überblick über die Entwicklung sämtlicher erhobener Kostenparameter auf Basis der Expertinnenbefragung liefert Abbildung 29 im Kapitel 5.3.1.5, in der für 35 Einzelparameter Kostentendenzen erkennbar werden, die teilweise in der Literatur keine Erwähnung fanden. Auf Basis der Erfahrungen von TaBuLa lässt sich eine 50:50-Verteilung begründet annehmen, d. h. Fahrzeug und Energie machen zusammen die Hälfte der Betriebskosten aus.

Auffallend sind die Prognosen der Expert:innen zu einem starken Anstieg der Softwarekosten und deren Support für Fahrzeug und Betriebsorganisation inkl. Leitstelle. Hier zeigt sich allerdings auch eine Schwäche der Befragung, da sich die Expert:innen nicht wagten, absolute Kostenangaben zu nennen. Die Literatur tätigt zu diesen Aufwendungen keine Aussagen.

Im Jahr 2021 liegen die Kosten für einen Betrieb mit den bekannten automatisierten Shuttles mit Fahrzeugbegleiter:innen 42 Prozent höher, als wenn man dasselbe Angebot mit klassischen Diesel-Minibussen betriebe (bei ebenfalls gleich niedriger Geschwindigkeit). Wenn ein autonomer störungsfreier Betrieb ohne Fahrzeugbegleiter:innen mit den beiden TaBuLaShuttles mit regulären Geschwindigkeiten bereits jetzt fahren könnte, wäre der Betrieb knapp 30 Prozent günstiger als bei dem Einsatz eines klassischen Minibusses mit Dieselantrieb. Dieses deutet auf das Potential für einen Flottenbetrieb in bestimmten Einsatzszenarien hin. Es wurden für dieses Szenario Kosten von rund 2,50 Euro pro Fahrplankilometer unter verschiedenen Annahmen ermittelt. Diese Höhe ist jedoch in Anbetracht der kleinen Gefäßgröße für einen eigenwirtschaftlichen Betrieb deutlich zu hoch. In einer größeren Flotte nach Marktreife ist allerdings eine andere Skalierung zu erwarten, so dass die Einsparungen bei 30 bis 40 Prozent pro Fahrplankilometer liegen könnten. Die Elektrifizierung als Megatrend bringt zusätzliche Unsicherheit in die Annahmen und Prognosen.

Mehr als 90 Prozent der Expert:innen gehen davon aus, dass autonome Busse in Zukunft zum Einsatz kommen werden. Insgesamt zwei Drittel der Expert:innen gehen davon aus, dass die Marktreife von autonom fahrenden Kleinbussen im Zeitraum 2025 und 2040 eintritt.

Die heute übliche Form des Erwerbs von Bussen wird laut Expert:innen durch neue Betriebsmodelle im ÖPNV abgelöst. Über 60 % der Befragten schätzen, dass Fahrzeuge künftig mit sämtlichen Serviceleistungen gebucht werden. Nur ein Drittel räumt dem Kaufmodell noch eine Zukunftsfähigkeit ein.

7 FAZIT UND AUSBLICK

Insgesamt zeigen sich nach umfangreicher Literaturanalyse und vielseitiger Expert:innenbefragung weiterhin große Unsicherheiten und Lücken in einer fundierten Aussage zu den Kostenparametern des autonomen Fahrens. Es ist davon auszugehen, dass bei vielen aktuell kleineren Kostenparametern gemäß Wadud (2017: 169) die Veränderungen durch das autonome Fahren wahrscheinlich gering sein werden und die Unsicherheiten derzeit zu groß sind, um sie jetzt zu quantifizieren. Allerdings entkräftet dies nicht den Bedarf der weiteren Forschung und Konkretisierung um die unsicheren Kostenparameter. Nur damit kann mehr Klarheit über die künftigen Einsatzfelder von autonom fahrenden Bussen und neuen Aufgaben im Betrieb gewonnen werden. Dieses Working Paper zeigt den aktuellen Stand auf und schärft mit Blick auf die Einflussfaktoren und die Herausforderungen des autonomen Fahrens eine ganzheitliche Betrachtung.

Der nächste große – zu erforschende – Aspekt ist die Leitstellen- und Servicekoordination von automatisierten Fahrzeugen. In Deutschland wurde dazu ein Gesetz zur Realisierung im Jahr 2021 vorbereitet, das die nächsten Schritte der Erprobung in diese Richtung ermöglicht. Bei einer möglichen Überwachung eines automatisierten Fahrzeuges durch eine Leitstelle wird mittelfristig das tatsächlich notwendige Betreuungsverhältnis von Disponent:innen zu Fahrzeugen interessant, was wiederum ganz maßgeblich von der (aktuell noch mangelhaften) Reife der automatisierten Technik abhängt. Zudem braucht es für den autonomen ÖPNV die Erkenntnisse, die für einen automatisierten und barrierefreien Ein- und Ausstiegsprozess inkl. der Kommunikation mit den Fahrgästen notwendig sind. Das heutige Niveau entspricht der Technik in einem Fahrstuhl, was für einen frei bewegenden autonomen Netzbetrieb ohne die aktuelle Krücke virtueller Schienen vollkommen unzulänglich ist. Auf die bisherige Entwicklung rückblickend wird deutlich, dass noch viel (Entwicklungs-)Arbeit, Forschung und Förderung notwendig ist, bis der Zenit der Kosten überstanden ist und das autonome Fahren lukrativ wird. Ein Drittel weniger Kosten pro Kilometer erscheinen im öffentlichen Flottenbetrieb gegenüber heute realistisch.

Bis zu diesem Zeitpunkt muss es der ÖPNV-Branche einschließlich den Aufgabenträgern gelingen, die Anforderungen an autonome barrierefreie Fahrzeuge aus Sicht der Allgemeinheit zu definieren, verbes-

serte Prototypen zu erproben und die nachhaltigen Einsatzformen und -gebiete festzulegen. In Herleitung aus der durchgeführten Befragung müsste dies zwischen 2025 und 2040 abgeschlossen sein, damit autonome Fahrzeuge (aufgrund anfangs hoher zu erwartender Stückkosten) im ÖPNV als erstes etabliert und akzeptiert werden. Die finanzielle Förderung der Forschung am autonomen Fahren muss sich auf den ÖPNV fokussieren. Das Eigeninteresse der Fahrzeugherstellenden hieran ist allerdings sehr zurückhaltend. Für ein nachhaltiges Verkehrssystem der Zukunft ist politischer Einfluss notwendig, damit die leistungsstarken und bewährten ÖPNV-Hauptachsen nicht von kommerziellen Individualinteressen (insbesondere in urbanen Räumen) karnibalisiert werden. Die nachhaltige Stärke scheint in der (zeitlichen und räumlichen) Ergänzung eines guten ÖPNV als nachfrageorientiertes Zusatzangebot zu liegen. Nutzer:innenbefragungen aus dem Projekt TaBuLa gemäß Mantel (2021) bestätigen großes Potential für den ÖPNV.

Die Erwartungshaltung der befragten Expert:innen zeigt deutlich, dass sich die bisherige Wertschöpfungskette für den Betrieb des ÖPNV mit dem autonomen Fahren wandeln wird. Nur ein Drittel der Befragten geht davon aus, dass autonome Busse von Verkehrsunternehmen erworben werden. Es können andere Geschäftsmodelle in Verbindung mit Leitstelle und Software mit autonomen Fahrzeugen in den Vordergrund treten. Die Rolle traditioneller Verkehrsunternehmen ist dabei noch nicht absehbar. Es ist von größeren gebündelten Flotten autonomer Fahrzeug- und Softwaretypen auszugehen, die aus einer Leitstelle inkl. Serviceleistungen betreut werden müssen. Mit den Erfahrungen aus dem Projekt TaBuLa zeigt sich allerdings auch deutlich, dass auf ein betreuendes und vermarktendes Team unmittelbar am Einsatzort der autonomen Fahrzeuge künftig nicht verzichtet werden kann. Dieses wird sich deutlich vielseitiger qualifiziert ausbilden. Fahren wird als Aufgabe dieser Teams eine nur untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt kann ein verlässliches und sicheres Transportangebot entstehen, das nicht unbedingt günstiger, aber durch das autonome Fahren flexibler, attraktiver und nachhaltiger die Fortbewegung für Alle gestaltet.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Aldin Bibic (2018): *Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf den Buslinienverkehr*. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Straßen- und Verkehrswesen.
- Andrea Herfert; Markus Rebstock; Matthias Gather (2012): *Einsatzgrenzen von Niederflurbussen im Regionalverkehr. Vertiefende Untersuchung finanzieller Aspekte der Busbeschaffung und -förderung*. Projektbericht. Fachhochschule Erfurt, Erfurt. Institut Verkehr und Raum.
- Becker, Henrik; Becker, Felix; Abe, Ryosuke; Bekhor, Shlomo; Belgiawan, Prawira F.; Compostella, Junia et al. (2020): *Impact of vehicle automation and electric propulsion on production costs for mobility services worldwide*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 138, S. 105 – 126. DOI: 10.1016/j.tra.2020.04.021.
- Dr. Thoralf Knotz; Beate Haufe; Lars Saroch (2017): *E-Bus Standard – Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse*. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Förderkennzeichen: 16EM3103-1. Abschlussbericht, Dresden. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/109188759-Ansaetze-zur-standardisierung-und-zielkosten-fuer-elektrobusse.html>, zuletzt geprüft am 30.01.2021.
- Fraunhofer-Gesellschaft (Hg.) (2017): *Partizipative Technologiegestaltung*. Anwendung der Vorgehensweise auf ein Projekt zum autonomen Fahren. München.
- Gerhard Willhalm (2021): *Kurz-Kalkulation eines Taxiunternehmens*. Hg. v. GEROTAX GmbH - Das Münchner Taxiportal. München. Online verfügbar unter https://www.gerotax.de/kalkulation/taxiunternehmen/kalkulation_kurz.php, zuletzt geprüft am 16.02.2021.
- Häder, Michael (2009): *Delphi-Befragungen*. Ein Arbeitsbuch. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

- Horváth & Partners (Hg.) (2020): *Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Akkus in ausgewählten Jahren von 2010 bis 2019 und eine Prognose bis 2025*. Status quo der E-Mobilität in Deutschland, Seite 15f. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2021.
- Inga Luchmann, Christian Reuter, Daniel Karthaus, Petra Strauß, Eva-Maria Knoch, Nadine Kostorz, Dr. Tim Hilgert, Jörg Niemann, Dr. Christian Baumann (2019): *Voraussetzungen & Einsatzmöglichkeiten von automatisiert und elektrisch fahrenden (Klein-) Bussen im ÖPNV*. Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben LEA (Klein-)Bus. Hg. v. PTV Planung Transport Verkehr AG. Berlin/Karlsruhe/Hamburg.
- Jan Owen Jansson (1980): *Transport system optimization and pricing*. Stockholm (10).
- KPMG, SMMT (2015): *Connected and Autonomous Vehicles – The UK Economic Opportunity*. Hg. v. KPMG. Online verfügbar unter <https://www.smmmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/CRT036586F-Connected-and-Autonomous-Vehicles-%E2%80%93-The-UK-Economic-Opportu...1.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2021.
- Mantel, Rebekka (2021): *Akzeptanz eines automatisierten Shuttles in einer Kleinstadt Analyse anhand einer Trendstudie und Fahrgastbefragung*. In: *jmv* (8), S. 25 – 35. DOI: 10.34647/jmv.nr8.id53.
- Marc Sinner, Prof Dr. Ulrich Weidmann (2018): *Kostenermittlung im Bus- und Bahnverkehr*. Entwicklung und Erprobung eines vereinfachten Kostenmodells, das drei Bedingungen erfüllt. In: DER NAHVERKEHR (07+08).
- Ongel, Aybike; Loewer, Erik; Roemer, Felix; Sethuraman, Ganesh; Chang, Fengqi; Lienkamp, Markus (2019): *Economic Assessment of Autonomous Electric Microtransit Vehicles*. In: *Sustainability* 11 (3), S. 648. DOI: 10.3390/su11030648.
- Patrick Frank, Markus Friedrich, Johannes Schlaich (2008): *Betriebskosten von Busverkehr schnell und genau ermitteln*. Vereinfachtes Kostenmodell liefert belastbare Ergebnisse. In: DER NAHVERKEHR, zuletzt geprüft am 21.05.2020.

Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich; Maximilian Hartl (2016): *MEGAFON – Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des oeffentlichen Nahverkehrs*. Schlussbericht. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Straßen-und Verkehrswesen.

Rensis Likert (1932): *A technique for the measurement of attitudes*. New York (Archives Of Psychology, 140). Online verfügbar unter https://legacy.voteview.com/pdf/Likert_1932.pdf, zuletzt geprüft am 20.05.2021.

Reuters (04.12.2017): *Self-driving costs could drop 90 percent by 2025, Delphi CEO says*. Detroit. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-autos-delphi/self-driving-costs-could-drop-90-percent-by-2025-delphi-ceo-says-idUSKBN1DY2AC>, zuletzt geprüft am 18.05.2021.

Roman Klementsitz, Maria Angerer, Alfons Bauernfeind, Tobias Haider, Philipp Haydn: *Potenziale für den Einsatz gemeinschaftlich genutzter autonomer Fahrzeuge im ländlichen Raum*. In: REAL CORP 2019 Tagungsband. ANDERS DRIN IN DATENBANK, S. 553-562. Online verfügbar unter https://archive.corp.at/cdrom2019/papers2019/CORP2019_19.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Stephens, T. S.; Gonder, Jeff; Chen, Yuche; Lin, Z.; Liu, C.; Gohlke, D. (2016): *Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of Connected and Automated Vehicles*.

T. Donna Chen; Kara M. Kockelman; Josiah P. Hanna (2016): *Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94, S. 243 – 254. DOI: 10.1016/j.tra.2016.08.020.

Tirachini, Alejandro; Antoniou, Constantinos (2020): *The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy*. In: *Economics of Transportation* 21, S. 100151. DOI: 10.1016/j.ecotra.2019.100151.

Tobias Haider; Roman Klementsitz (2017, überarbeitete Fassung vom 2017): *Wirkungspotentiale für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge im ländlichen Raum*. Ergebnisbericht erstellt im Rahmen des Projektes shared autonomy. Ergebnisbericht. Universität für Bodenkultur Wien; UbiGo KG, Wien. Institut für Verkehrswesen.

Transport Systems Catapult (Hg.) (2015): *Traveller Needs*. Supporting the realisation of Intelligent Mobility in the UK. Milton Keynes. Online verfügbar unter <https://ts.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2016/04/Traveller-Needs-Study-1.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe Aktiengesellschaft (Hg.) (2020): *Elektrobusse im Linieneinsatz bei der ÜSTRA*. Technische Daten. Online verfügbar unter <https://www.uestra.de/unternehmen/betrieb-technik/stadtbus/elektrobusse/>, zuletzt geprüft am 19.04.2021.

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (Hg.) (2007): *Wirtschaftlichkeit von Linienbussen 2318*. Gegenüberstellung etablierter und alternativer Fahrzeugkonzepte der VDV-Linienbusfamilie. VDV-Mitteilungen. Köln. Online verfügbar unter <https://knowhow.vdv.de/>, zuletzt geprüft am 30.01.2021.

Wadud, Zia (2017): *Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 101, S. 163 – 176. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.005.

Winter, Konstanze; Cats, Oded; Correia, Gonçalo; van Arem, Bart (2018): *Performance analysis and fleet requirements of automated demand-responsive transport systems as an urban public transport service*. In: *International Journal of Transportation Science and Technology* 7 (2), S. 151 – 167. DOI: 10.1016/j.ijtst.2018.04.004.

Zhang, Wei; Jenelius, Erik; Badia, Hugo (2019): *Efficiency of Semi-Autonomous and Fully Autonomous Bus Services in Trunk-and-Branches Networks*. In: *Journal of Advanced Transportation* 2019, S. 1 – 17. DOI: 10.1155/2019/7648735.

