

Ganzheitlicher Planungsprozess und Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse

Der Fakultät Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

am 26.02.2025 vorgelegte Dissertation
von M.Sc. Sönke Beckmann

Kurzfassung

Automatisierte Fahrzeuge ermöglichen eine grundlegende Veränderung des Mobilitätssektors. Insbesondere wenn automatisierte Busse eingesetzt und als Angebot des öffentlichen Verkehrs von der Allgemeinheit genutzt werden, können Treibhausgasemissionen reduziert, die Sicherheit erhöht und der Fachkräftemangel ausgeglichen werden. Darüber hinaus ist es möglich, neue Mobilitätsangebote am Markt zu etablieren und insbesondere den ländlichen Raum zu erschließen. Derzeit findet im öffentlichen Raum in Europa kein Einsatz von hochautomatisierten Fahrzeugen ohne die Anwesenheit eines Sicherheitsfahrers statt. Um dies zu verändern, ist die Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnologie ein entscheidender Baustein. Da die Umsetzbarkeit von Betrieben mit hochautomatisierten Fahrzeugen von der Komplexität der Strecke abhängig ist, wird in der Einsatzplanung und Streckenauswahl ein wichtiger Baustein gesehen, um hochautomatisiertes Fahren zu ermöglichen. Aus diesem Grund fokussiert sich diese Arbeit auf die Entwicklung eines ganzheitlichen Planungsprozesses inklusive Bewertungsverfahren für die Einführung automatisierter Busse.

Eine Analyse der aktuellen Entwicklungen im Bereich von Mobilität und Verkehr verdeutlicht, dass die Verkehrsleistung und die Mobilitätskosten steigen. Weiterhin ist der Pkw das dominante Verkehrsmittel. Diese Faktoren sind u. a. dafür verantwortlich, dass die THG-Emissionen stagnieren. Die Auseinandersetzung mit den zukünftigen Lösungsansätzen verdeutlicht, dass das automatisierte Fahren neue Geschäftsmodelle im Bereich der Elektromobilität und des Bedarfsverkehrs ermöglicht. Aus diesem Grund erweist sich das automatisierte Fahren als eine Schlüsseltechnologie für die Mobilität der Zukunft. Bei einer Untersuchung der unterschiedlichen Technologieansätze im Bereich des automatisierten Fahrens bestätigt sich die Abhängigkeit dieser Technologie von den Streckengegebenheiten. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass auch die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Streckenauswahl berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich verändern sich die Tätigkeiten in Leitstellen von Verkehrsunternehmen, deren Mitarbeiter beim Einsatz hochautomatisierter Fahrzeuge die Fernüberwachung sowie die Fahrmanöverfreigabe übernehmen müssen.

Im Bereich der Verkehrs- und Angebotsplanung im ÖPNV sowie in angrenzenden Forschungsbereichen existieren unterschiedliche Planungsprozesse, die jedoch entweder nicht standardisiert oder nur allgemeingültig für die Verkehrsplanung ausgelegt sind. Ein strukturierter Planungsprozess, der sich auf den Einsatz automatisierter Busse fokussiert, existiert nicht. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wird ein ganzheitlicher Planungsprozess entwickelt, welcher den Verkehrsplanungsprozess und die fünf Schritte der Angebotsplanung (Netzplanung, Kapazitätsplanung, Fahrlagenplanung, Fahrzeugeinsatzplanung und Personaleinsatzplanung) als Rahmen nimmt. In jedem Schritt der Angebotsplanung werden auf Basis einer Literaturrecherche und eigener Projekterfahrung die spezifischen Anforderungen der automatisierten Busse berücksichtigt. Dadurch verändern sich das Vorgehen, die eingesetzten Methoden und die Ergebnisse der Angebotsplanung signifikant. Der zentrale Bestandteil dieses

Planungsprozesses ist ein Bewertungsverfahren, das die Eignung und die Kosten der Straßen für automatisierte Busse bewertet.

Auf Basis des ganzheitlichen Planungsprozesses wird ein dreistufiges Bewertungsverfahren entwickelt, welches verschiedene Bewertungsmethoden (Wirkungsanalyse, Nutzwertanalyse, Kosten-Wirksamkeits-Analyse und Kosten-Nutzen-Analyse) einsetzt. Zuerst wird die Eignung auf Basis von verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien bewertet. Innerhalb der zweiten Bewertungsstufe werden Infrastrukturmaßnahmen realisiert, um die Eignung der Strecken in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse zu verbessern. Dabei werden die Kosten und die Eignung der Strecke zueinander in Beziehung gesetzt. Abschließend erfolgt ein Vergleich der Kosten mit monetären Nutzenkriterien. Für die Ausgestaltung der einzelnen Bewertungsstufen werden eine Literaturrecherche, eine Best-Practice-Analyse und mehrere Experteninterviews durchgeführt.

Der ganzheitliche Planungsprozess und das Bewertungsverfahren werden am Beispiel der Stadt Köthen getestet. Dabei werden Straßen für den Einsatz automatisierter Busse hinsichtlich Eignung, Kosten und Nutzen bewertet und zukünftige Strecken priorisiert.

Abstract

Automated vehicles enable a fundamental change in the transport sector. In particular, when automated buses are used and utilised by the general public as a public transport service, greenhouse gas emissions can be reduced, safety increased and the shortage of skilled workers compensated for. Furthermore, it is possible to establish new mobility services on the market and, in particular, to open up rural areas. Currently, highly automated vehicles are not used in public spaces in Europe without the presence of a safety driver. Further development of vehicle technology is a crucial step in changing this. Since the feasibility of operations with highly automated vehicles depends on the complexity of the route, operational planning and route selection are seen as an important element in enabling highly automated driving. For this reason, this work focuses on the development of a holistic planning process including an evaluation procedure for the introduction of automated buses.

An analysis of current developments in the field of mobility and transport shows that traffic volume and mobility costs are increasing. Furthermore, the car is still the dominant means of transport. These factors are partly responsible for the stagnation of greenhouse gas emissions. An examination of future solutions shows that automated driving enables new business models in the field of electric mobility and on-demand transport. For this reason, automated driving is proving to be a key technology for the mobility of the future. An investigation of the various technological approaches in the field of automated driving confirms the dependency of this technology on route conditions. It also shows that the legal framework must be taken into account when selecting routes. In addition, the activities in operation control centers of transport companies change, as their employees have to take over remote monitoring and manoeuvre approval when highly automated vehicles are used.

In the area of transport and public transport planning, as well as in related research areas, there are different planning processes that are either not standardised or only designed to be generally valid for transport planning. A structured planning process that focuses on the use of automated buses does not exist. Based on this finding, a holistic planning process is being developed that takes the transport planning process and the five steps of public transport planning (network planning, capacity planning, timetable planning, vehicle deployment planning and personnel deployment planning) as a framework. In each step of the public transport planning process, the specific requirements of automated buses are taken into account on the basis of a literature review and own project experience. This significantly changes the approach, the methods used and the results of the public transport planning. The central component of this planning process is an evaluation procedure that assesses the suitability and costs of the roads for automated buses.

On the basis of the holistic planning process, a three-stage evaluation procedure is developed that uses various evaluation methods (impact analysis, utility analysis, cost-effectiveness analysis and cost-benefit analysis). First, the suitability is evaluated on the basis of traffic-organisational and infrastructural criteria. In the second stage, infrastructure measures are implemented to improve the suitability of the routes for the use of automated buses. The costs and the suitability of the route are

compared. Finally, the costs are compared with monetary benefit criteria. For the design of the individual evaluation stages, a literature review, a best-practice analysis and several expert interviews are carried out.

The holistic planning process and the evaluation procedure are being tested using the city of Köthen as an example. This involves evaluating streets for the use of automated buses in terms of suitability, costs and benefits, and prioritising future routes.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Sönke Beckmann,

- dass ich die vorgelegte Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe,
- dass ich keine über die im Vorfeld explizit zugelassenen und von mir angegebenen Hilfsmittel hinausgehenden Mittel benutzt habe,
- dass ich Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Dokumenten (dazu zählen auch Internetquellen und KI-basierte Tools) entnommen sind, unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht habe und
- dass ich die vorliegende Arbeit bisher nicht in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe.

Ich willige ein,

- dass meine Arbeit mittels Software auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Studien- und Prüfungsordnung geahndet werden.

Mir ist bewusst,

- dass im Falle eines Täuschungsversuchs die Arbeit nicht anerkannt wird,
- dass ich im Fall der Verwendung von KI-basierten Tools in der Arbeit die vollumfängliche Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate trage.

Meine eigene geistige Leistung stand immer im Vordergrund und ich habe jederzeit den Prozess steuernd gearbeitet.

(Sönke Beckmann)
Magdeburg, 26.02.2025

Gender-Erklärung

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit für personenbezogene Bezeichnungen, die sich auf alle Geschlechter beziehen, das generische Maskulinum verwendet. Dies soll jedoch in keiner Weise eine Geschlechterdiskriminierung oder eine Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes zum Ausdruck bringen.

(Sönke Beckmann)

Magdeburg, 26.02.2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Selbstständigkeitserklärung	v
Gender-Erklärung	vi
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvi
Formelverzeichnis.....	xxii
Liste der Abkürzungen.....	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	2
1.2 Zielstellung und Forschungsfragen.....	6
1.3 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen im Bereich Mobilität und Verkehr	11
2.1 Definition und Formen von Mobilität und Verkehr	11
2.1.1 Mobilität und Verkehr	11
2.1.2 Verkehrsangebot des Personenverkehrs	13
2.2 Status Quo von Mobilität und Verkehr	17
2.2.1 Mobilität und Verkehr in Deutschland.....	17
2.2.2 Mobilität und Verkehr in Europa und weltweit	23
2.3 Herausforderungen im Bereich Mobilität und Verkehr	26
2.3.1 Ökonomische Herausforderungen	27
2.3.2 Ökologische Herausforderungen.....	28
2.3.3 Soziale Herausforderungen.....	30
2.3.4 Zusammenfassende Gegenüberstellung	31
2.4 Zukünftige Lösungsansätze im Bereich Mobilität und Verkehr	32
2.4.1 Technologische Dimension	33
2.4.2 Ökonomische Dimension	35
2.4.3 Institutionelle Dimension	36
2.4.4 Kulturelle Dimension	38
2.5 Zusammenfassung und Anforderungen aus dem Forschungsbereich von Mobilität und Verkehr.....	40
3 Grundlagen des automatisierten Fahrens	42
3.1 Definition des automatisierten Fahrens	42
3.2 Funktionsweise des automatisierten Fahrens.....	46
3.2.1 Maschinelle Wahrnehmung.....	47
3.2.2 Situationsverstehen.....	53

3.2.3	Bahnführung (Aktorik)	54
3.2.4	Fernüberwachung und -steuerung (Leitstelle).....	55
3.3	Status Quo des automatisierten Fahrens	57
3.3.1	Vorstellung der Technologieansätze im Bereich MIV und ÖPNV	58
3.3.2	Einordnung der Technologieansätze.....	65
3.4	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	68
3.4.1	Gesetzgebung in Deutschland	69
3.4.2	Gesetzgebung in Europa und weltweit.....	71
3.5	Zukünftige Entwicklungen des automatisierten Fahrens.....	73
3.6	Zusammenfassung und Anforderungen aus dem Forschungs-bereich des automatisierten Fahrens.....	76
4	Analyse von Planungsprozessen der Verkehrsplanung	79
4.1	Grundlagen der Verkehrsplanung.....	79
4.1.1	Definition, Handlungsfelder und Maßnahmen der Verkehrsplanung ...	79
4.1.2	Planungsebenen der Verkehrsplanung	81
4.2	Existierende Planungsprozesse zur Einführung einer Buslinie	85
4.2.1	Planungsprozesse der Verkehrsplanung	85
4.2.2	Planungsprozesse der Angebotsplanung.....	89
4.2.3	Planungsprozesse aus angrenzenden Forschungsbereichen.....	92
4.2.4	Anforderungen aus dem Forschungsbereich der Verkehrsplanung ...	98
4.3	Überprüfung der Anwendbarkeit bestehender Planungsprozesse für die Einführung automatisierter Busse.....	99
4.3.1	Ausgewählte Planungsprozesse	99
4.3.2	Übersicht der Anforderungen an den Planungsprozess für automatisierte Busse.....	100
4.3.3	Gegenüberstellung der Planungsprozesse und Anforderungen.....	101
4.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit zur Forschungslücke.....	105
5	Ganzheitlicher Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse	106
5.1	Orientierung.....	108
5.2	Problemanalyse.....	109
5.3	Maßnahmenuntersuchung.....	112
5.3.1	Netzplanung.....	113
5.3.2	Kapazitätsplanung.....	121
5.3.3	Fahrlagenplanung	123
5.3.4	Fahrzeugeinsatzplanung.....	127
5.3.5	Personaleinsatzplanung.....	131
5.3.6	Abschätzung der Auswirkungen und Variantenbewertung.....	135
5.4	Abwägung und Entscheidung	137
5.5	Umsetzung der Konzepte	138

5.6	Aufgaben über alle Phasen	139
5.7	Zusammenfassung und Zwischenfazit zum Planungsprozess	140
6	Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse	143
6.1	Anforderungen an das Bewertungsverfahren	143
6.2	Stand der Forschung	145
6.3	Entwicklung des Bewertungsverfahrens zur Einführung automatisierter Busse	152
6.3.1	Bewertungsmethoden im Überblick.....	152
6.3.2	Bewertung der Eignung.....	156
6.3.3	Bewertung von Kosten und Eignung	159
6.3.4	Bewertung von Kosten und Nutzen.....	161
6.3.5	Gesamthafte Darstellung des Bewertungsverfahrens	162
6.4	Inhaltliche Ausgestaltung des Bewertungsverfahrens	164
6.4.1	Ausgestaltung der Bewertung der Eignung	165
6.4.2	Ausgestaltung der Bewertung von Kosten und Eignung	169
6.4.3	Ausgestaltung der Bewertung von Kosten und Nutzen	171
6.5	Zusammenfassung und Zwischenfazit zum Bewertungsverfahren	172
7	Validierung von Planungsprozess und Bewertungsverfahren	174
7.1	Validierung des ganzheitlichen Planungsprozesses	175
7.1.1	Orientierung	175
7.1.2	Problemanalyse	176
7.1.3	Maßnahmenuntersuchung	180
7.2	Validierung des Bewertungsverfahrens	180
7.2.1	Bewertungsverfahren Eignung	182
7.2.2	Bewertungsverfahren Kosten und Eignung	185
7.2.3	Bewertungsverfahren Kosten und Nutzen.....	188
7.2.4	Zusammenfassung der Bewertung und abschließendes Fazit.....	190
7.3	Kritische Reflexion des Forschungsvorgehens	192
7.4	Allgemeingültigkeit, Übertragbarkeit und praktischer Einsatz	193
8	Schlussbetrachtung.....	197
8.1	Zusammenfassung und Diskussion	197
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	199
	Literatur.....	201
	Anhang	254
A.1	Status Quo von Mobilität und Verkehr in Deutschland.....	254
A.2	Automatisiertes Fahren bei BMW	261
A.3	Sensoren von EasyMile und GAMA.....	262
A.4	Ziele, Strategien und Maßnahmen der Verkehrsplanung	263
A.5	Aufgabenorganisation bei der Entwicklung des Verkehrsangebots	265

A.6	Zielgrößen der Angebotsplanung für automatisierte Busse	268
A.7	Beschreibung der begleitenden Prozesse der Verkehrsplanung	269
A.8	Übersicht der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien	272
A.9	Skalierung der Kriterien	287
A.10	Übersicht der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Maßnahmen	301
A.11	Ergebnis der Verkehrszählung in Köthen	307
A.12	Datenerhebung am Beispiel der Stadt Köthen	308
A.13	Neuer Kriterienkatalog inklusive Gewichtung	312
A.14	Ergebnisse Infrastrukturanalyse	316
A.15	Ergebnis der SWOT-Analyse	318
A.16	Teilnutzen der Kriterien	320
A.17	Nutzwerte von EasyMile	322
A.18	Ergebnisse Nutzwertanalyse	324
A.19	Teilnutzen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	327
A.20	Kostenübersicht der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	329
A.21	Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	332
A.22	Berechnung der Nutzenkriterien für die Kosten-Nutzen-Analyse	335
A.23	Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse.....	338

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zukünftige Forschungsbereiche des automatisierten Fahrens, eigene Darstellung i. A. a. [Ainsalu et al. 2018, S. 12–28; Azad et al. 2019, S. 3; ERTRAC 2019, S. 45–52; Beckmann et al. 2020, S. 4; PTV Group et al. 2019c, S. 3f.; ERTRAC 2021, S. 19–30].....	4
Abbildung 2:	Zielgruppen für die angestrebte Verwendung der Ergebnisse.....	7
Abbildung 3:	Gewählte Forschungsmethodik dieser Arbeit, eigene Darstellung i. A. a. [Blessing und Chakrabarti 2009, 15-17]	8
Abbildung 4:	Vorgehen und Aufbau der Arbeit	9
Abbildung 5:	Einordnung der Zielstellung dieser Arbeit in die Forschungslandschaft	10
Abbildung 6:	Einteilung des Mobilitätsbegriffs, eigene Darstellung i. A. a. [Tully und Baier 2006, S. 31].....	12
Abbildung 7:	Übersicht des Verkehrsangebots, eigene Darstellung i. A. a. [Wolking 2021, S. 120–124; Oexler 2001, S. 2; Agora Verkehrswende 2017, S. 27; VCÖ 2018, S. 19; Holz-Rau 2018a, S. 1578; Schiefelbusch 2018, S. 1634; Helms et al. 2022, S. 70; eVehicle for you GmbH 2024; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34; Gather et al. 2008, S. 27f.; WSW mobil GmbH 2025].....	15
Abbildung 8:	Kenngößen der Alltagsmobilität einzelner Personen, eigene Darstellung i. A. a. [Ecke et al. 2023, S. 28–32]	19
Abbildung 9:	Kenngößen der Alltagsmobilität der Gesamtbevölkerung, eigene Darstellung i. A. a. [Statistisches Bundesamt 2024c; Ecke et al. 2023, S. 28–31]	19
Abbildung 10:	Kenngößen einzelner Verkehrsmittel, eigene Darstellung i. A. a. [Krafftahrt Bundesamt 2024a; DLR et al. 2023, S. 53–79; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39; Bundesverband CarSharing e.V. 2024]	20
Abbildung 11:	Einschätzung der Kosten für MIV und ÖV, eigene Darstellung i. A. a. [Ecke et al. 2023, S. 73]	21
Abbildung 12:	THG-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel, eigene Darstellung i. A. a. [Umweltbundesamt 2024b].....	22
Abbildung 13:	Anzahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland, eigene Darstellung i. A. a. [Statistisches Bundesamt 2024b]	23
Abbildung 14:	Verkehrstote je eine Million Einwohner in Europa, eigene Darstellung i. A. a. [Europäische Kommission 2024]	25
Abbildung 15:	Flächenverbrauch in Quadratmeter pro beförderter Person nach Verkehrsmitteln, eigene Darstellung i. A. a. [Allianz pro Schiene e. V. 2020]	29
Abbildung 16:	Vier Dimensionen der Zukunftskunst, eigene Darstellung i. A. a. [Schneidewind 2013, S. 82–86].....	33

Abbildung 17:	Kostenvergleich verschiedener Verkehrsträger mit und ohne Automatisierung, eigene Darstellung i. A. a. [Bösch et al. 2018, S. 82].....	36
Abbildung 18:	Beschreibung der zukünftigen Mobilität, eigene Darstellung i. A. a. [Agora Verkehrswende 2017, S. 22–60; Knie et al. 2019, S. 11–20; Kagermann 2017, S. 359–366; Sustainable Mobility for All 2019, S. 16–21].....	41
Abbildung 19:	Funktionsweise des hochautomatisierten Fahrens, eigene Darstellung i. A. a. [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Khan et al. 2023, S. 1–6; Wahlster 2017b, S. 414; Liu et al. 2020, S. 324–327; Lücke 2022; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50; Clausen und Klingner 2018, S. 388].....	47
Abbildung 20:	Schematische Darstellung des Aufbaus eines gitterbasierten Fahrzeugumfeldmodells [Dietmeyer 2015, S. 425].....	48
Abbildung 21:	Sensoren für das automatisierte Fahren, eigene Darstellung i. A. a. [Eymann 2019]	51
Abbildung 22:	Einteilung V2X-Kommunikation, eigene Darstellung i. A. a. [Thales Group 2021]	52
Abbildung 23:	Umgebung ohne digitale Karte (links), Umgebung mit digitaler Karte (Mitte) und separierte digitale Karte (rechts) [Lücke 2022].....	53
Abbildung 24:	Einbindung der Leitstelle in das Verkehrsmanagement, eigene Darstellung i. A. a. [Biletska et al. 2021, S. 64].....	57
Abbildung 25:	Übersicht der Sensoren im automatisierten Fahrzeug von Waymo, eigene Darstellung i. A. a. [Waymo LLC 2020].....	59
Abbildung 26:	EasyMile EZ10 Gen 3 (© EasyMile) [Neißendorfer 2021; EasyMile 2021]	62
Abbildung 27:	Automatisierter Bus der IAV im Projekt Flash [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024].....	64
Abbildung 28:	Arbeitsplatz zum teleoperierten Fahren [Fernride GmbH 2024b] ..	65
Abbildung 29:	Einordnung der Technologieansätze des automatisierten Fahrens, eigene Darstellung i. A. a. [SAE International 2021, S. 24–26]	66
Abbildung 30:	Rechtliche Rahmenbedingungen zum automatisierten Fahren in Europa, eigene Darstellung i. A. a. [MOIA GmbH 2024].....	72
Abbildung 31:	Anwendungsfälle für das automatisierte Fahren, eigene Darstellung i. A. a. [Huber 2020; ERTRAC 2021, S. 9–16; ERTRAC 2024, S. 4–18; van Driel et al. 2024, S. 21–23]	75
Abbildung 32:	Elemente der Verkehrsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Gertz 2021, S. 5]	80
Abbildung 33:	Räumliche Planungsebenen der Stadt- und Verkehrsplanung in Deutschland, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2013, S. 6–12; Gertz 2021, S. 36; Engel 2021, S. 67].....	82
Abbildung 34:	Verkehrsplanungsprozess nach FGSV, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2018a, S. 13]	88

Abbildung 35:	Vorgehensweise der Angebotsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Hartl 2020, S. 31].....	91
Abbildung 36:	Grobkonzept zur Einführung flexibler Bedienungsformen, eigene Darstellung i. A. a. [Böhler et al. 2009, S. 44].....	93
Abbildung 37:	Vorgehen zur Umsetzung eines Projekts mit automatisierten Bussen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 55].....	96
Abbildung 38:	Struktur des ganzheitlichen Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse (auf Basis von [FGSV 2018a, S. 13]).....	107
Abbildung 39:	Änderung der Angebotsplanung durch automatisierte Busse.....	141
Abbildung 40:	Walkability-Index am Beispiel der Niederlanden [Lam et al. 2022, S. 6].....	146
Abbildung 41:	Vorgehensweise der Wirkungsanalyse, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 17].....	157
Abbildung 42:	Vorgehensweise der Nutzwertanalyse, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 28; Adams 2008, S. 8–10; Scheiner 2003, S. 6f.; Liedtke et al. 2020, S. 42–44; Westermann 2012, S. 38–49; Rinza und Schmitz 1992, S. 38–40].....	158
Abbildung 43:	Vorgehensweise der Kosten-Wirksamkeits-Analyse, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 30; Adams 2008, S. 10; Liedtke et al. 2020, S. 47].....	160
Abbildung 44:	Vorgehensweise der Kosten-Nutzen-Analyse eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 26; Adams 2008, S. 6–8; Scheiner 2003, S. 2f.; Westermann 2012, S. 10–15].....	162
Abbildung 45:	Aufbau des Bewertungsverfahrens zur Einführung automatisierter Busse.....	163
Abbildung 46:	Kartenausschnitt der Stadt Köthen [Google Maps 2025].....	174
Abbildung 47:	Leitlinien und Zielvorstellungen der Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt 2019, S. 20–27; Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt und NASA GmbH 2019, S. 41–54; Stadt Köthen 2024a, S. 10–12; ISUP Ingenieurbüro für Systemberatung und Planung GmbH 2016, S. 45–63].....	176
Abbildung 48:	Einzugsbereiche der Haltestellen in der Innenstadt von Köthen [Google Maps 2025].....	177
Abbildung 49:	Ergebnis der Nutzwertanalyse als Kartendarstellung.....	184
Abbildung 50:	Ergebnis der Kosten-Wirksamkeits-Analyse als Kartendarstellung.....	187
Abbildung 51:	Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse als Kartendarstellung.....	190
Abbildung 52:	Auswertung über alle Bewertungsstufen (Ausschnitt der Stadtmitte in Köthen).....	191
Abbildung 53:	Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse.....	194

Abbildung 54:	Aufgabenorganisation in der ÖPNV-Planung, eigene Darstellung i. A. a. [Böhler et al. 2009, S. 58].....	265
Abbildung 55:	Vergleich vom Zwei-Ebenen- und Drei-Ebenen-Modell, eigene Darstellung i. A. a. [Wagner 2009, S. 22]	267
Abbildung 56:	Gesamtheitliche Übersicht der Zielgrößen der Angebotsplanung, eigene Darstellung i. A. a. Abschnitt 5.3.....	268
Abbildung 57:	Beteiligungsebenen im Verkehrsplanungsprozess, eigene Darstellung i. A. a. [Schäfer 2024, S. 7; FGSV 2013, S. 28].....	270
Abbildung 58:	Ergebnis der Verkehrszählung der Stadt Köthen (Kartenausschnitt) [Stadt Köthen 2011].....	307
Abbildung 59:	Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse	316
Abbildung 60:	Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse	316
Abbildung 61:	Dritter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse	317
Abbildung 62:	Ergebnis der SWOT-Analyse am Beispiel der Stadt Köthen (Teil 1)	318
Abbildung 63:	Ergebnis der SWOT-Analyse am Beispiel der Stadt Köthen (Teil 2)	319
Abbildung 64:	Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Teilnutzen	320
Abbildung 65:	Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Teilnutzen	320
Abbildung 66:	Dritter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Teilnutzen	321
Abbildung 67:	Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Nutzwertanalyse	324
Abbildung 68:	Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Nutzwertanalyse	325
Abbildung 69:	Ergebnis der Nutzwertanalyse bezogen auf den EZ10 Gen 3 von EasyMile	326
Abbildung 70:	Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens	327
Abbildung 71:	Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens	327
Abbildung 72:	Dritter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens	328
Abbildung 73:	Erster Ausschnitt aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	329
Abbildung 74:	Zweiter Ausschnitt aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	330
Abbildung 75:	Dritter Ausschnitt aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	331
Abbildung 76:	Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	332
Abbildung 77:	Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	333

Abbildung 78:	Ergebnis der Kosten-Wirksamkeits-Analyse bezogen auf einen Wirkungsindex von 30 Euro pro Eignungspunkt.....	334
Abbildung 79:	Berechnung der Fahrgeldeinnahmen (Teil 1).....	335
Abbildung 80:	Berechnung der Fahrgeldeinnahmen (Teil 2).....	335
Abbildung 81:	Berechnung der Kraftstoffeinsparungen.....	336
Abbildung 82:	Berechnung des Einsparpotenzials der THG-Emissionen.....	336
Abbildung 83:	Berechnung der Gesamteinnahmen pro Jahr.....	337
Abbildung 84:	Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse.....	338
Abbildung 85:	Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse.....	338
Abbildung 86:	Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse bezogen auf ein positives oder negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis.....	339

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gesamtgesellschaftliche Entwicklungen mit Einfluss auf Mobilität und Verkehr, eigene Darstellung i. A. a. [Roland Berger 2017c, S. 7–27; Krys et al. 2023, S. 10; Linthorst und de Waal 2020, S. 5–9; Zukunftsinstitut GmbH 2023a; Zukunftsinstitut GmbH 2023e; Roland Berger 2017a, S. 8–15; Zukunftsinstitut GmbH 2023d; Zukunftsinstitut GmbH 2023b; Roland Berger 2017b, S. 23].....	26
Tabelle 2:	Zusammenfassung der Herausforderungen im Bereich Mobilität und Verkehr, eigene Darstellung i. A. a. [Statistisches Bundesamt 2021; Sustainable Mobility for All 2019, S. 17–19; Jürgens 2020, S. 39f.; Marner 2006, S. 199f.; Umweltbundesamt 2024a; Roland Berger 2017a, S. 7–15; Agora Verkehrswende 2017, S. 44–54; Umweltbundesamt 2022b; Umweltbundesamt 2024d; Schwedes und Ringwald 2021, S. 44; VDV 2024b; Krcmar et al. 2017, S. 36–46; Zukunftsinstitut GmbH 2023e]	31
Tabelle 3:	Übersicht der Automatisierungsstufen, eigene Darstellung i. A. a. [SAE International 2021, S. 25f.; Weißenborn 2020]	43
Tabelle 4:	Automatisierungsstufen des VDV, eigene Darstellung i. A. a. [Leonetti et al. 2020, S. 4].....	45
Tabelle 5:	Eignung von Sensoren für unterschiedliche Anwendungsfälle eines automatisierten Fahrzeugs, eigene Darstellung i. A. a. [Khan et al. 2023, S. 6; Eymann 2019; Wang 2021, S. 3–5; Ignatious et al. 2022, S. 739f.; Sparbert 2024, S. 1825f.; Condurache und Treptow 2024, S. 1860]	50
Tabelle 6:	Übersicht verschiedener Hersteller von automatisierten Bussen, eigene Darstellung i. A. a. [Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH 2021; Holst 2022, S. 37; Greifenstein et al. 2024, S. 61f.; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024; Sustainable Bus 2023]	58
Tabelle 7:	Basisdaten der automatisierten Busse von EasyMile und GAMA, eigene Darstellung i. A. a. [Kolb et al. 2020, 68; Navya SAS 2024a; EasyMile 2024a; Navya SAS 2022a, S. 8–21; Reichel 2020; EasyMile 2023, S. 8–22; Navya SAS 2022b; Butcher 2022].....	62
Tabelle 8:	Handlungsfelder und Maßnahmen der Verkehrsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Gertz 2021, S. 27f.; FGSV 2018a, S. 10f.]	81
Tabelle 9:	Übersicht der Verkehrsplanungsprozesse, eigene Darstellung i. A. a. [U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3; Pas 1995, S. 59–73; Meyer 2016, S. 3–6; Ognjenović et al. 2015, S. 575–577; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 2f.; FGSV 2018a, S. 11–15].....	86

Tabelle 10:	Übersicht der Planungsprozesse der Angebotsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332; Desaulniers und Hickman 2007, S. 70–94; Liebchen und Möhring 2007, S. 3–5; Häll 2011, S. 3–5; Schöbel 2012, S. 491f.; Schnieder 2018, S. 16f.; Liu et al. 2021, S. 1–3].....	89
Tabelle 11:	Bewertung der allgemeinen Anforderungen an den ganzheitlichen Planungsprozess	102
Tabelle 12:	Bewertung der für die Einführung automatisierter Busse spezifischen Anforderungen.....	104
Tabelle 13:	Notwendige Daten für den Einsatz konventioneller Busse	110
Tabelle 14:	Zusätzliche Daten speziell für den Einsatz automatisierter Busse...	111
Tabelle 15:	Verknüpfung von Handlungskonzepten und Strukturszenarien, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2018a, S. 28]	112
Tabelle 16:	Arbeitsschritte und Methoden der Verkehrswegeplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Schöbel 2012, S. 491–493; Schnieder 2018, S. 21–38; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1254; Kirchhoff 2002, S. 98–113; Gerike und Vallée 2021, S. 101–114; FGSV 2008, S. 8–18]	113
Tabelle 17:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Verkehrswegeplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Schöbel 2012, S. 491–493; Schnieder 2018, S. 21–38; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1254; Kirchhoff 2002, S. 98–113; Gerike und Vallée 2021, S. 101–114; FGSV 2008, S. 8–18]	114
Tabelle 18:	Arbeitsschritte und Methoden der Haltestellenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–337; Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–85; Schnieder 2018, S. 21–31; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 34–38].....	116
Tabelle 19:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Haltestellenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–337; Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–85; Schnieder 2018, S. 21–31; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 34–38].....	117
Tabelle 20:	Arbeitsschritte und Methoden der Liniennetzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 72–86; Schöbel 2012, S. 491–499; Schnieder 2018, S. 32–49; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 38–50; Kirchhoff 2002, S. 113–123; Friedrich 1994, S. 151–157]	119
Tabelle 21:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Liniennetzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 72–86; Schöbel 2012, S. 491–499; Schnieder 2018, S. 32–49; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 38–50; Kirchhoff 2002, S. 113–123; Friedrich 1994, S. 151–157]	121

Tabelle 22:	Arbeitsschritte und Methoden der Kapazitätsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–91; Schöbel 2012, S. 493–499; Schnieder 2018, S. 45–73; Guihaire und Hao 2008, S. 1254; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 121–123]	122
Tabelle 23:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Kapazitätsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–91; Schöbel 2012, S. 493–499; Schnieder 2018, S. 45–73; Guihaire und Hao 2008, S. 1254; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 121–123]	123
Tabelle 24:	Arbeitsschritte und Methoden der Fahrlagenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 77–104; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 139–151].....	125
Tabelle 25:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Fahrlagenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 77–104; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 139–151].....	126
Tabelle 26:	Arbeitsschritte und Methoden der Fahrzeugeinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–336; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 107–126; Farina 2018, S. 15–18; Hartl 2020, S. 60–62; Chen et al. 2021, S. 11–19; Kirchhoff 2002, S. 151–153]	128
Tabelle 27:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Fahrzeugeinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–336; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 107–126; Farina 2018, S. 15–18; Hartl 2020, S. 60–62; Chen et al. 2021, S. 11–19; Kirchhoff 2002, S. 151–153]	130
Tabelle 28:	Arbeitsschritte und Methoden der Personaleinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 129–152; Farina 2018, S. 19; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1255; Hartl 2020, S. 62f.; Kirchhoff 2002, S. 151–156]	132
Tabelle 29:	Eingangsdaten und Ergebnisse der Personaleinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 129–152; Farina 2018, S. 19; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1255; Hartl 2020, S. 62f.; Kirchhoff 2002, S. 151–156]	134
Tabelle 30:	Übersicht der Zielgrößen des Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse	136
Tabelle 31	Anforderungen an das Bewertungsverfahren	145

Tabelle 32:	Gegenüberstellung der Anforderungen eines Bewertungsverfahrens und den existierenden Ansätzen.....	151
Tabelle 33:	Übersicht von Bewertungsmethoden nach Illés et al., eigene Darstellung i. A. a. [Illés et al. 2007, S. 193f.]	153
Tabelle 34:	Übersicht der nicht-formalisierten Verfahren, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 15; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5; Kirchhoff 2002, S. 67]	154
Tabelle 35:	Übersicht der teil-formalisierten Verfahren, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 16–23; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5f.; Kirchhoff 2002, S. 67f.]	155
Tabelle 36:	Übersicht der formalisierten Verfahren, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 24–30; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 6–10]	156
Tabelle 37:	Übersicht der Kriterien für die Nutzwertanalyse, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 10].....	166
Tabelle 38:	Exemplarische Darstellung der Skalierung von Fahrbahnbreite und Steigung	167
Tabelle 39:	Anpassung der Skalierung am Beispiel der Steigung	168
Tabelle 40:	Auszug der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen für den Einsatz automatisierter Busse, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–71; Beckmann et al. 2020, S. 8–12; Holst 2022, S. 147–161; Bundesanstalt für Straßenwesen 2021, S. 63–71; Völzow et al. 2018, S. 3f.].....	170
Tabelle 41:	Ausschnitt aus der Infrastrukturanalyse der Stadt Köthen	179
Tabelle 42:	Übergeordnete Bewertung der Stadt Köthen	181
Tabelle 43:	Skalierung der einzelnen Kriterien zur Straßenbewertung (Auszug)	182
Tabelle 44:	Teilnutzen für die Kriterien der Infrastrukturanalyse der Stadt Köthen (Auszug)	183
Tabelle 45:	Top 10 Straßen nach der Nutzwertanalyse	183
Tabelle 46:	Veränderung des Teilnutzens im Rahmen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse (Auszug).....	185
Tabelle 47:	Infrastrukturkosten je Straßenabschnitt in der Stadt Köthen (Auszug)	186
Tabelle 48:	Top 10 Straßen nach der Kosten-Wirksamkeits-Analyse	187
Tabelle 49:	Monetarisierete Nutzenkriterien für die Kosten-Nutzen-Analyse (Auszug)	188
Tabelle 50:	Top 10 Straßen nach der Kosten-Nutzen-Analyse	189
Tabelle 51:	Beantwortung der Forschungsfragen aus Abschnitt 1.2	199

Tabelle 52:	Allgemeine Kenngrößen der Mobilität, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 46; Ecke et al. 2020a, S. 43; Ecke et al. 2020b, S. 44; Ecke et al. 2021, S. 42; Vallée et al. 2022, S. 39; Ecke et al. 2023, S. 28–32]	255
Tabelle 53:	Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31; Statistisches Bundesamt 2024c]	256
Tabelle 54:	Modal Split Verkehrsaufkommen, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31].....	257
Tabelle 55:	Modal Split Verkehrsleistung, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31]	258
Tabelle 56:	Kenngrößen zum Verkehrsmittel Pkw, eigene Darstellung i. A. a. [Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 33f.; Ecke et al. 2023, 56-26].	259
Tabelle 57:	Kenngrößen zum ÖV, eigene Darstellung i. A. a. [DLR et al. 2023, S. 53–79; Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Zeit Online GmbH 2022; Statistisches Bundesamt 2024d; Ecke et al. 2023, S. 24f.; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 42].....	259
Tabelle 58:	Kenngrößen zum Fahrrad, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39f.; Ecke et al. 2023, S. 23]	260
Tabelle 59:	Kenngrößen zum Carsharing, eigene Darstellung i. A. a. [Bundesverband CarSharing e.V. 2024; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 36f.]	260
Tabelle 60:	Sensoren und Funktionen der Shuttlebusse von EasyMile und GAMA, eigene Darstellung i. A. a. [Kolb et al. 2020, 68-69; Navya SAS 2024a; EasyMile 2024a; Navya SAS 2022a, S. 8–21].....	262
Tabelle 61:	Strategien in der komplexen Verkehrsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Gertz 2021, S. 26; FGSV 2018a, S. 10].....	264
Tabelle 62:	Übersicht des Kriterienkatalogs der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 21–28]	272
Tabelle 63:	Gewichtung der Kriterien auf der Grundlage von Experteninterviews, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 11f.].....	285
Tabelle 64:	Skalierung der Kriterien	287

Tabelle 65:	Übersicht der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen für den Einsatz automatisierter Busse, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–71; Beckmann et al. 2020, S. 8–12; Holst 2022, S. 147–161; Bundesanstalt für Straßenwesen 2021, S. 63–71; Völzow et al. 2018, S. 3f.].....	301
Tabelle 66:	Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen.....	303
Tabelle 67:	Kriterien und Datenquellen für die Fallstudie zur Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 13f.].....	308
Tabelle 68:	Datenqualität der Kriterien für die Fallstudie zur Stadt Köthen	310
Tabelle 69:	Übergeordnete Kriterien, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 14f.]	312
Tabelle 70:	Übersicht der Kriterien für die Nutzwertanalyse der Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 15].....	313
Tabelle 71:	Gewichtung der Kriterien für die Nutzwertanalyse der Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 15f.].....	315
Tabelle 72:	Nutzwerte des EZ10 Gen 3 von EasyMile, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 53–93; Holst 2022, S. 147–199] ...	322

Formelverzeichnis

Formel 1:	Kostenminimierung im Rahmen der Haltestellenplanung [Furth und Rahbee 2000, S. 19].....	118
Formel 2:	Berechnung der Kosten für die Liniennetzplanung [Gattermann et al. 2017, S. 19]	120
Formel 3:	Berechnung der Gesamtfahrzeit mit der Methode PESP [Schmidt und Schöbel 2015, S. 79f.]	127
Formel 4:	Optimierung der Fahrzeugeinsatzplanung [Bunte und Kliewer 2009, S. 303]	130
Formel 5:	Set-Partitioning-Problem der Dienstplanung [Borndörfer et al. 2008b, S. 137]	133

Liste der Abkürzungen

AFGBV	Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und Betriebsverordnung
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BCS	Bundesverband Carsharing e.V.
BEaF	Betriebserlaubnis für das Kraftfahrzeug mit autonomen Fahr- funktionen
C-V2X	Cellular-V2X
DGPS	differential GPS
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ERTRAC	European Road Transport Research Advisory Council
FAR	formalisiertes Abwägungs- und Rangordnungsverfahren
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FTS	fahrerloses Transportsystem
FZV	Fahrzeugzulassungsverordnung
GIS-Software	Geoinformationssystem-Software
GPS	Global Positioning System
IV	Individualverkehr
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KI	Künstliche Intelligenz
LIDAR	Light detection and ranging
MaaS	Mobility as a Service
MiD	Mobilität in Deutschland
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
nMIV	nicht-motorisierten Individualverkehr
OCC	Operation Control Center
ODD	Operational Design Domain
ÖPFV	Öffentlicher Personenfernverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PBEfG	Personenbeförderungsgesetz
PESP	Periodic Event Scheduling Problem
PF	Primäre Forschungsfrage(n)
Pkm	Personenkilometer
Radar	Radio detection and ranging
ReG	Regionalisierungsgesetz
RSU	Road-Side-Unit
SAE	Society of Automotive Engineers
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SF	Sekundäre Forschungsfrage(n)
SPNV	Öffentlicher Schienenpersonennahverkehr
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrsordnung

StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SWOT-Analyse	Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse (engl. Analysis of strength, weaknesses, opportunities, threats)
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2N	Vehicle-to-Network
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
TA	Technische Aufsicht
THG-Emissionen	Treibhausgasemissionen

1 Einleitung

Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts dar [Die Bundesregierung 2019, S. 7]. Aufgrund steigender Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) sind die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels bereits heute weltweit allgegenwärtig [IPCC 2023, S. 4; IPCC 2021, S. 4–7; Melillo et al. 2014, S. 9–11]. Berechnungen zeigen, dass die CO₂-Emissionen in der Vergangenheit mit Ausnahme des Jahres 2020 kontinuierlich angestiegen sind [EDGAR/JRC 2024; IEA 2023a]. Im Jahr 2023 wurden weltweit 39 Gt CO₂ emittiert, die auf fünf Sektoren (Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Land- und Forstwirtschaft sowie sonstige Landnutzung) verteilt werden können [EDGAR/JRC 2024; Shukla et al. 2022, S. 38; Lamb et al. 2021, S. 2–6]. Der Verkehrssektor ist mit 8,24 Gt CO₂ (21,1 %) nach dem Energiesektor der zweitgrößte Emittent [EDGAR/JRC 2024; IEA 2023a]. Mit einem Anteil von 74,5 % entfällt der größte Teil des CO₂-Verbrauchs im Verkehrssektor auf den Straßenverkehr [Ritchie 2023; Wang und Ge 2019; Avotra und Nawaz 2023]. Der Straßenverkehr wiederum teilt sich in den Personen- (60 % der CO₂-Emissionen) und Güterverkehr (40 % der CO₂-Emissionen) auf [Ritchie 2023]. Während im Jahr 2023 die CO₂-Emissionen in Deutschland, aber auch bspw. in den USA, insgesamt gesunken sind, zeigt der Verkehrssektor einen gegenläufigen Trend und stagniert [Agora Verkehrswende 2024a; Reyer 2023; EIA 2023]. Da der Personenstraßenverkehr den größten Anteil an den CO₂-Emissionen des Verkehrssektors verursacht, wird in der vorliegenden Arbeit ausschließlich dieser betrachtet.

Neben der Reduzierung der CO₂-Emissionen wird der Verkehrssektor mit steigenden Kosten konfrontiert [ADAC e.V. 2023a; Berschin et al. 2023, S. 7f.]. Zu den maßgeblichen Faktoren zählen hierbei nicht nur gestiegene Anschaffungs- und Betriebskosten, sondern auch höhere Entlohnungen im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) [ADAC e.V. 2023a; DAT 2024, S. 15; Statistisches Bundesamt 2021; Berschin et al. 2023, S. 7f.]. Eine weitere Herausforderung des Verkehrssektors besteht darin, ein erhöhtes Maß an Sicherheit zu gewährleisten und die Anzahl der Verkehrsunfälle sowie der getöteten Personen zu reduzieren [Sustainable Mobility for All 2019, S. 18; Zukunftsinstitut GmbH 2023e]. Der Fachkräftemangel stellt im Bereich des öffentlichen Verkehrs (ÖV) eine signifikante Herausforderung dar, die eine substantielle Bedrohung für die Aufrechterhaltung des ÖPNV-Angebots darstellt [VDV 2024b]. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die aktuelle Nachfrage im ÖV einen Anstieg verzeichnet (5,6 Milliarden Fahrgäste im 1. Halbjahr 2024) [VDV 2024b; Statistisches Bundesamt 2024a].

Potenzielle Maßnahmen im Verkehrssektor sind der Einsatz alternativer Antriebe (z. B. Batterie oder Wasserstoff) sowie die Effizienzsteigerung der Antriebe [Shukla et al. 2022, S. 38; Ritchie 2023; Europäisches Parlament 2023; Agora Verkehrswende 2017, S. 23f.]. Die Effizienzsteigerung führt jedoch in der Regel zu einer höheren Nutzungsfrequenz der Verkehrsmittel (Reboundeffekt) [Shah et al. 2021, S. 5; Gertz 2021, S. 25f.; Schneidewind 2019, S. 225f.; FGSV 2018a, S. 10]. Des Weiteren beziehen sich die Maßnahmen einzig auf die Reduzierung der CO₂-Emissionen.

Die Bewältigung der verschiedenen Herausforderungen des Verkehrssektors erfordert daher eine Revolution des gesamten Verkehrssystems, bei der automatisierte Fahrzeuge eine Schlüsselrolle einnehmen [Agora Verkehrswende 2017, S. 44f.; Agora Verkehrswende 2020a, S. 15–17; Ritz 2018, S. 28].

Infolge der Entwicklung und Implementierung automatisierter Fahrzeuge, die zukünftig keinen menschlichen Fahrer im Fahrzeug benötigen, ist eine Senkung der Mobilitätskosten zu erwarten [Agora Verkehrswende 2017, S. 42–45; Pitzen und Schippl 2024, S. 87; Bösch et al. 2018, S. 81–83]. Weiterhin führt die Automatisierung der Fahrzeuge zu einer Reduzierung der Verkehrsunfälle und zu einer Erhöhung der Sicherheit [Agora Verkehrswende 2017, S. 42; Deublein et al. 2024, S. 104–112]. Durch eine gleichmäßige und vorausschauende Fahrweise können automatisierte Fahrzeuge per se einen Beitrag zur Reduzierung des Kraftstoff- und Energieverbrauchs leisten [Agora Verkehrswende 2017, S. 42–45; BMVI 2015a, S. 10; Hammerich 2025; Hartwig 2020, S. 40–47]. Eine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen wird jedoch nur erreicht, wenn der Fahrzeugbestand reduziert und der Verkehr vom Pkw auf nachhaltige Verkehrsmittel verlagert wird [Agora Verkehrswende 2017, S. 44–47; Fleischer und Schippl 2024, S. 132; Hartwig 2020, S. 44–47]. Dies setzt voraus, dass automatisierte Fahrzeuge gemeinschaftlich von der Allgemeinheit genutzt werden und sich nicht im Privatbesitz der Bevölkerung befinden [Agora Verkehrswende 2017, S. 42–46; Pitzen und Schippl 2024, S. 83–85]. Ein Beispiel hierfür sind automatisierte Busse, welche die Kostenvorteile des ÖV mit der Flexibilität des Individualverkehrs (IV) verbinden, sodass die Fahrzeuge preisgünstig eingesetzt werden können [Rudschies und Kroher 2024; Bösch et al. 2018, S. 82–84; Barrillère-Scholz et al. 2020, S. 16f.]. Durch den Einsatz automatisierter Busse können zudem neue Mobilitätsdienstleistungen wie bspw. On-Demand-Angebote, Last-Mile-Bedienung und eine 24/7-Nutzung am Markt etabliert werden [Agora Verkehrswende 2017, S. 44f.; Agora Verkehrswende 2020a, S. 15–17; Ritz 2018, S. 103–115]. Dies bietet u. a. der im ländlichen Raum wohnenden Bevölkerung einen Mehrwert [Agora Verkehrswende 2017, S. 44; Leonetti 2024, S. 117].

Neben dem allgemeinen Bezug zum automatisierten Fahren wird daher in dieser Arbeit ein besonderer Fokus auf den Einsatz automatisierter Busse gelegt.

1.1 Motivation und Problemstellung

Der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen startete 1997, als die Firma 2getthere einen automatisierten Kleinbus im halböffentlichen Raum am Flughafen Amsterdam-Schiphol implementierte [2getthere 2024b; PTV Group et al. 2019a, S. 67f.]. Seit dem Jahr 2013 ist ein umfassender Fortschritt im Bereich automatisierter Fahrzeuge zu verzeichnen. Diese Entwicklung ist auf die Initiierung zahlreicher Projekte mit automatisierten Bussen im öffentlichen Raum in Deutschland, Europa und weltweit zurückzuführen [PTV Group et al. 2019a, S. 2; PTV Group et al. 2019b, S. 2; Bloomberg IP Holdings LLC und The Aspen Institute 2017]. Jedoch befindet sich bei diesen Projekten während der Fahrt ein Operator im Fahrzeug, der den Bus überwacht und bei Bedarf eingreift [Kolb et al. 2020, 62-63]. Entsprechend werden die dort eingesetzten Busse nach den von der Society of Automotive Engineers (SAE) definierten

Automatisierungsstufen zwischen teilautomatisiert (Stufe 2) und bedingt automatisiert (Stufe 3) eingeordnet [SAE International 2021; Kostorz et al. 2019, S. 24; Kolb et al. 2020, 63; Gertz et al. 2021, S. 55]. Zudem handelt es sich bei diesen Pilotbetrieben häufig um temporäre Projekte, bei denen ein automatisierter Bus kurzzeitig getestet und nicht dauerhaft betrieben wird [VDV 2024a; Bloomberg IP Holdings LLC und The Aspen Institute 2017; PTV Group et al. 2019b, S. 3–73; PTV Group et al. 2019a, S. 3–148].

Die USA verfügen in diesem Bereich über einen Vorsprung, da das Unternehmen Waymo bereits mit einer Flotte von automatisierten Fahrzeugen ohne Sicherheitsfahrer im öffentlichen Raum operiert und somit das hochautomatisierte Fahren (Stufe 4) erreicht hat [Waymo LLC 2024d; Ackerman 2021; Waymo LLC 2021; Waymo LLC 2024f]. Obwohl die rechtlichen Rahmenbedingungen für das hochautomatisierte Fahren in Deutschland und teilweise in Europa bereits geschaffen wurden, befindet sich der Einsatz automatisierter Busse ohne Sicherheitsfahrer im Fahrzeug nach wie vor in der Entwicklungsphase (z. B. in Berlin, München und Hamburg) [BMDV 2021; MOIA GmbH 2024; Nordenbeck 2023; BMDV 2023a; Volkswagen AG 2024]. Die Firma EasyMile ist derzeit der einzige Hersteller, der einen hochautomatisierten Bus (Stufe 4) mit geringen Geschwindigkeiten auf einem privaten Krankenhausbereich in Toulouse einsetzt [EasyMile 2024b].

Gemäß den vorliegenden Prognosen ist die Markteinführung hochautomatisierter Fahrzeuge ohne Sicherheitsfahrer (Stufe 4) in Europa erst zwischen 2025 und 2030, möglicherweise auch später, zu erwarten [ERTRAC 2019, S. 12–14; Azad et al. 2019, S. 2; ERTRAC 2021, S. 9–16]. Derzeit ist es nicht möglich, den Zeitpunkt für das Erreichen des vollautomatisierten Fahrens (Stufe 5) in komplexen Verkehrssituationen und auf jeder Straße abzuschätzen [Azad et al. 2019, S. 2; SAE International 2021, S. 32–34; ERTRAC 2021, S. 5; ERTRAC 2019, S. 12–14]. In Anbetracht der zuvor dargelegten Herausforderungen, insbesondere unter Berücksichtigung des Klimawandels, ist jedoch eine zeitnahe Umgestaltung des Verkehrssystems erforderlich. *Dementsprechend liegt die Motivation dieser Arbeit darin, einen Beitrag zur beschleunigten Einführung automatisierter Busse zu leisten.*

In der Literatur werden Fahrzeugtechnologie, Validierung der Systeme, Infrastruktur, rechtliche Rahmenbedingungen, Nutzer(-akzeptanz), sozioökonomische Aspekte, Einsatzplanung und Geschäftsmodelle sowie Feldeinsatz als wichtige Forschungsschwerpunkte für die zukünftige Entwicklung automatisierter Fahrzeuge genannt (siehe Abbildung 1) [Ainsalu et al. 2018, S. 12–28; Azad et al. 2019, S. 3; ERTRAC 2019, S. 45–52; Beckmann et al. 2020, S. 4; PTV Group et al. 2019c, S. 3f.; ERTRAC 2021, S. 19–30].

Damit die Fahraufgabe ganz oder zeitweise an die Maschine übergeben werden kann, muss das automatisierte Fahrsystem höchsten Sicherheits- und Leistungsstandards genügen [ERTRAC 2021, S. 19]. Hierfür ist die Weiterentwicklung der Basistechnologien im Fahrzeug (u. a. Rechner, Datenverarbeitung und Sensorik) unerlässlich, um eine zuverlässige Erkennung und Lokalisierung zu ermöglichen [Tesla Inc. 2024b; Mercedes-Benz Group AG 2024a; ERTRAC 2021, S. 19; Ainsalu et al. 2018, S. 15–18; Robert Bosch GmbH 2024; ERTRAC 2019, S. 51]. Zusätzlich

werden Hardwarekonzepte zur Erkennung komplexer Fahrsituationen und zum Schutz vor Cyberangriffen benötigt [ERTRAC 2019, S. 51].

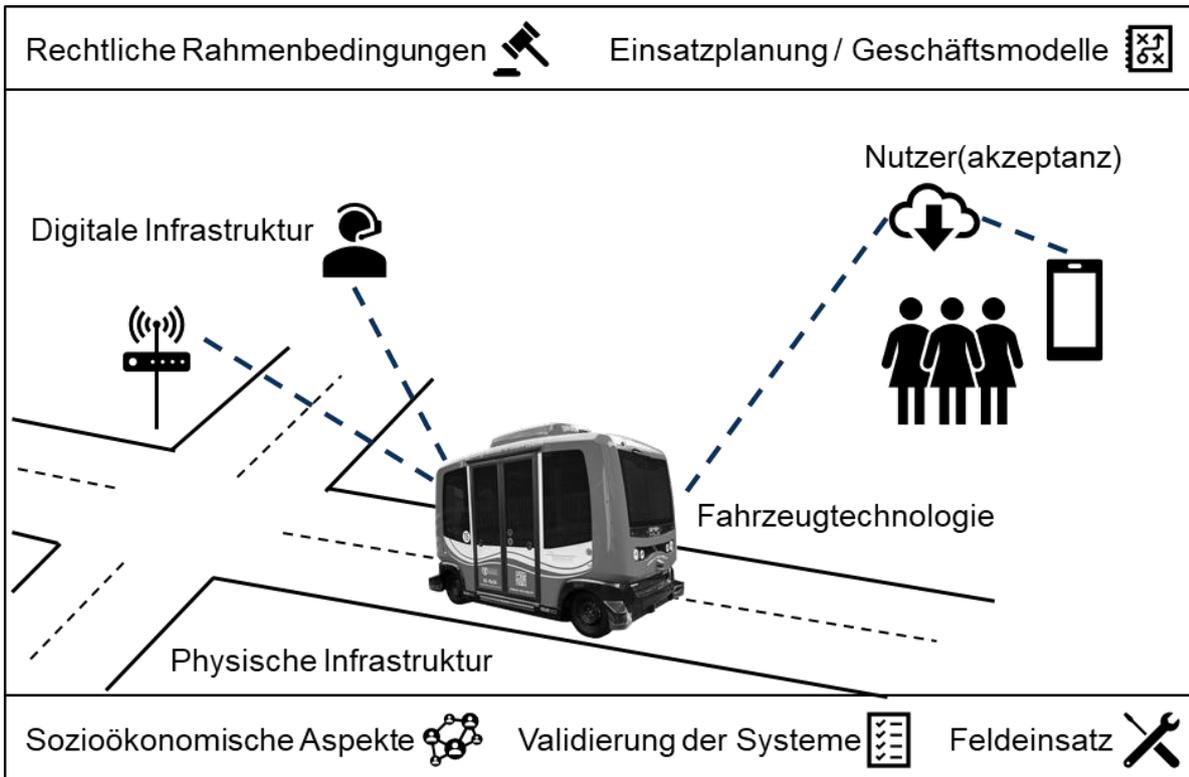


Abbildung 1: Zukünftige Forschungsbereiche des automatisierten Fahrens, eigene Darstellung i. A. a. [Ainsalu et al. 2018, S. 12–28; Azad et al. 2019, S. 3; ERTRAC 2019, S. 45–52; Beckmann et al. 2020, S. 4; PTV Group et al. 2019c, S. 3f.; ERTRAC 2021, S. 19–30]

Solange automatisierte Fahrzeuge jedoch nicht den höchsten Automatisierungsgrad (Stufe 5) erreicht haben, ist ihr Einsatz im öffentlichen Raum vom Betriebsbereich (auch als Operational Design Domain (ODD) bezeichnet) und von der Infrastruktur der Straße abhängig [SAE International 2021, S. 26–33; Rosenkranz und Rudloff 2024, S. 204f.]. Jaquet und Korte verweisen in diesem Zusammenhang ebenfalls auf den Einfluss der Streckenführung auf den Einsatz automatisierter Fahrzeuge, da nicht alle Straßen für sämtliche Verkehrsteilnehmer konzipiert sind [Jaquet und Korte 2024a, S. 214]. Monheim und Pitzen präzisieren dies: „Die Straßen beeinflussen die technische Machbarkeit und die Regeln für den Einsatz automatisierter fahrerloser Fahrzeuge“ [Monheim und Pitzen 2024, S. 278]. Gemäß der aktuellen Forschung kommen die Vorteile des automatisierten Fahrens dabei nur dann zum Tragen, wenn die Anforderungen an die ODD erfüllt sind [ERTRAC 2021, S. 20]. Dementsprechend ist es von essenzieller Bedeutung, die Infrastruktur der Straßen auf den Einsatz automatisierter Fahrzeuge vorzubereiten [ERTRAC 2019, S. 19f.]. In Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse stellen Rosenkranz und Rudloff fest, dass die physische und digitale Infrastruktur eines Bedienegebiets die Angebotsplanung im ÖPNV beeinflusst [Rosenkranz und Rudloff 2024, S. 204f.]. Zusätzlich wird untersucht, mit welcher Bedienungsform (u. a. Linien- und Flächenbetrieb) automatisierte Busse an verschiedenen Standorten (Großstadt, Mittelstadt, Kleinstadt, ländlicher Raum) wirtschaftlich eingesetzt werden können [PTV Group et al. 2019c, S. 34–62; ERTRAC 2019, S. 49].

Die vorangegangenen Ausführungen demonstrieren, dass die Einsatzplanung, die Identifikation potenziell geeigneter Strecken sowie die Ausgestaltung der Infrastruktur für die aktuelle und zukünftige Entwicklung automatisierter Fahrzeuge von essenzieller Bedeutung sind [Ainsalu et al. 2018, S. 20f.; ERTRAC 2019, S. 6–8; PTV Group et al. 2019c, S. 34–63; ERTRAC 2021, S. 19–24]. Jaquet und Korte beschreiben, dass für die Integration automatisierter ÖPNV-Fahrzeuge in einem Bedienungsgebiet ein ganzheitlicher interdisziplinärer Planungsprozess erforderlich ist [Jaquet und Korte 2024b, S. 202]. Aus eigenen Interviews mit Verkehrsplanern geht ergänzend hervor, dass bei der Einführung automatisierter Busse das gesamte Liniennetz zu betrachten ist, womit die obigen Ausführungen bestätigt werden [Jensch und Wagner 08.03.2022; Fischer 21.03.2023].

Gemäß Azad et al. existieren in der Literatur wenige Forschungsbeiträge zur Planung des ÖV mit automatisierten Fahrzeugen [Azad et al. 2019, S. 14]. In einer systematischen Literaturrecherche über Scopus werden insgesamt sieben relevante Beiträge bzgl. dieser Fragestellung identifiziert¹. Dakic et al. haben ein flexibles Dispositionssystem für automatisierte Busse entwickelt, bei dem die Anzahl und die Taktfrequenz modelliert und optimiert werden [Dakic et al. 2021, S. 38]. Hatzenbühler et al. untersuchen Optimierungsmethoden zur Netzgestaltung für automatisierte Busse [Hatzenbühler et al. 2022, S. 473–485]. Die Zuweisung exklusiver Fahrspuren für automatisierte Busse wird von Liu und Xie mathematisch modelliert [Liu und Xie 2022, S. 310]. Mahmud et al. verwenden wiederum Methoden des bestärkenden Lernens, um Linien und Haltestellen für automatisierte Busse zu planen [Mahmud et al. 2022, S. 668–673]. Eine Optimierung der Fahrlagenplanung hinsichtlich eines Ladeplans und der Ladeinfrastruktur wird von Chang et al. untersucht [Chang et al. 2024, S. 1]. Des Weiteren haben Liu et al. eine Strategie zur Bündelung modularer automatisierter Fahrzeuge mathematisch modelliert [Liu et al. 2024, S. 1]. Abschließend entwickeln Xia et al. einen Optimierungsansatz für die Fahr- und Umlaufplanung modularer automatisierter Fahrzeuge [Xia et al. 2024, S. 1]. Im deutschsprachigen Raum existieren darüber hinaus verschiedene Veröffentlichungen zur ÖPNV-Planung. Monheim und Pitzen beschreiben z. B., welche strategischen Aspekte bei der Verkehrsplanung automatisierter Busse zu beachten sind [Monheim und Pitzen 2024, S. 275–285]. Luchmann et al. erwähnen einige Aspekte der Betriebsplanung (u. a. Auswahl des Betriebsbereichs), ohne eine strukturierte und vollständige Vorgehensweise zu präsentieren [Luchmann et al. 2024, S. 36–71].

Die vorangegangene Auflistung demonstriert, dass sich die Forschung bislang überwiegend auf mathematische Betrachtungen oder einzelne Teilaspekte der ÖPNV-Planung mit automatisierten Bussen konzentriert. Daher liegt dieser Arbeit die Hypothese zugrunde, dass derzeit kein ganzheitlicher Planungsprozess für den Einsatz automatisierter Busse inklusive der Identifikation geeigneter Strecken existiert.

¹ Folgende Begriffe wurden in der systematischen Literaturrecherche verwendet:

Begriff „Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse“: keine passenden Ergebnisse.

Begriff „Planning process for the introduction of automated buses“: keine passenden Ergebnisse

Begriff „Automated bus network design“: vier passende Ergebnisse

Begriff: „Planning autonomous bus transit systems“: drei passende Ergebnisse

1.2 Zielstellung und Forschungsfragen

Der vorangegangene Abschnitt zeigt, dass die Einsatzplanung und die Identifikation von Strecken als wesentliche Forschungsfelder für die zukünftige Entwicklung automatisierter Fahrzeuge und insbesondere automatisierter Busse angesehen werden. Dennoch zeigt sich, dass bislang lediglich Teilprobleme bei der Planung von Betrieben mit automatisierten Bussen untersucht werden. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit *ein ganzheitlicher Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse entwickelt und darin ein Bewertungsverfahren zur Identifikation geeigneter Strecken implementiert*. Die Ganzheitlichkeit des Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse manifestiert sich in der Berücksichtigung sämtlicher Planungsphasen, von der Zieldefinition bis zur Realisierung des Betriebs. Des Weiteren ist der Planungsprozess auf das gesamte Liniennetz eines ausgewählten Bedienungsgebiets, wie beispielsweise eines Landkreises oder einer Stadt, zu beziehen. Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit, ergeben sich die beiden aufeinander aufbauenden primären Forschungsfragen (PF):

- PF1: Welche Gestaltungsmerkmale sind in einem ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse zu berücksichtigen und wie sind diese zu konzipieren?
- PF2: Welche Gestaltungsmerkmale sind in einem Bewertungsverfahren zur Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse zu berücksichtigen und welche Einflussparameter müssen einbezogen werden?

Als Vorarbeit werden für die Beantwortung der PF folgende sekundäre Forschungsfragen (SF) untersucht:

- SF1: Welche Anforderungen werden an einen ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse gestellt? (für PF1)
- SF2: Welche Planungsprozesse existieren bereits und können diese für den Einsatz automatisierter Busse genutzt werden? (für PF1)
- SF3: Welche Anforderungen ergeben sich aus dem Planungsprozess an ein Bewertungsverfahren zur Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse? (für PF2)
- SF4: Welche Bewertungsfahren zur Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse existieren bereits und erfüllen diese die Anforderungen des Planungsprozesses? (für PF2)

Der ganzheitliche Planungsprozess und das Bewertungsverfahren werden allgemeingültig für den Einsatz automatisierter Busse in Deutschland entwickelt. Grund dafür sind die weltweit unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen, weshalb sich in dieser Arbeit an der Rechtsauslegung in Deutschland orientiert wird. Bei der Bearbeitung des Forschungsthemas wird jedoch der Ansatz verfolgt, die Erkenntnisse aus anderen Ländern zu berücksichtigen. Zur Gewährleistung der Allgemeingültigkeit werden ergänzend zur Literaturrecherche die eigenen Projekterfahrungen eingebracht und eine Best-Practice-Analyse von Projekten mit automatisierten Bussen in Deutschland, Europa und weltweit durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchung werden zudem Experteninterviews durchgeführt. Um die Praxistauglichkeit zu

gewährleisten, werden der ganzheitliche Planungsprozess und das Bewertungsverfahren anhand einer Fallstudie validiert.

Der ganzheitliche Planungsprozess und das Bewertungsverfahren ermöglichen eine strukturierte Analyse der Machbarkeit einer Strecke in einem bestimmten Bedienungsgebiet (bspw. Landkreis oder Stadt) für den Einsatz automatisierter Busse. Dies soll zu einer zuverlässigen und zielgerichteten Auswahl geeigneter Strecken für den Einsatz dieser Fahrzeuge beitragen. Eine solche Auswahl ist unerlässlich, um zu vermeiden, dass der Betrieb eines automatisierten Busses während der Umsetzung scheitert und die Busse nur temporär eingesetzt werden (siehe Abschnitt 1.1). Vor diesem Hintergrund sind Kommunen und Verkehrsunternehmen zwei Zielgruppen, die von einem ganzheitlichen Planungsprozess und einem Bewertungsverfahren im Rahmen der ÖPNV-Planung profitieren (siehe Abbildung 2). Darüber hinaus sind politische Entscheidungsträger eine Zielgruppe, da auf Basis der Ergebnisse Entscheidungen zur Anpassung des ÖPNV-Angebots getroffen werden können. Schließlich bieten die Ergebnisse auch den Herstellern von automatisierten Bussen (vierte Zielgruppe) einen Mehrwert, da die Anforderungen an die Fahrzeuge und deren Einsatzmöglichkeiten erkennbar werden. Nicht zuletzt ist auch die Wissenschaft eine Zielgruppe dieser Arbeit, da sowohl die grundsätzliche Auseinandersetzung mit der Thematik als auch die Ergebnisse einen Beitrag zur wissenschaftlichen Diskussion leisten.

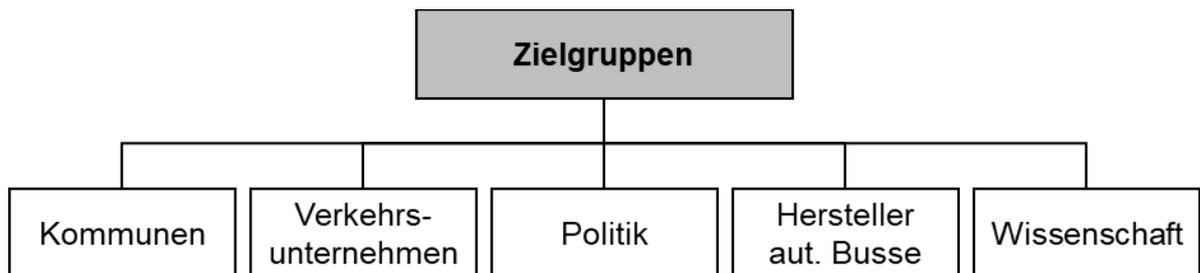


Abbildung 2: Zielgruppen für die angestrebte Verwendung der Ergebnisse

1.3 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zur Sicherstellung einer hohen Qualität der Forschungsergebnisse orientiert sich die Bearbeitung an folgenden Qualitätskriterien:

- Relevanz (Lösung eines wichtigen Problems),
- Stichhaltigkeit (Systematisches Vorgehen auf fundierter Wissenbasis),
- Objektivität / Nachvollziehbarkeit (Untersuchungen sind replizierbar),
- Reliabilität / Verlässlichkeit (Vorgehen muss unabhängig von der Methode und vom Forscher konsistent und stabil sein),
- Interne Validität / Glaubhaftigkeit (Ergebnisse zeigen authentisches und sinnvolles Bild des Betrachtungsgegenstandes),
- Externe Validität / Übertragbarkeit (Ergebnisse sind verallgemeinbar und übertragbar) und
- Nutzen (Ergebnisse müssen für eine Anwendung nutzbar sein) [Biedermann et al. 2013, S. 15–18; Trojahn et al. 2024, S. 25].

Für das Vorgehen einer wissenschaftlichen Arbeit ist die Auswahl einer geeigneten Forschungsmethodik, die im Hinblick auf Validität, Nachvollziehbarkeit und Reliabilität zu interpretieren ist, von zentraler Bedeutung [Biedermann et al. 2013, S. 15–18; Warth 2012, S. 124]. Die Forschungsmethodik ist das verbindende Element zwischen Fragestellung, Datenerhebung und Schlussfolgerung [Yin 2003, S. 19]. Blessing und Chakrabarti haben einen Forschungsansatz für den ingenieurwissenschaftlichen Bereich entwickelt [Blessing und Chakrabarti 2009, S. 2]. Der Forschungsprozess gliedert sich in vier Schritte, die iterativ durchlaufen werden (siehe Abbildung 3) [Blessing und Chakrabarti 2009, S. 15].

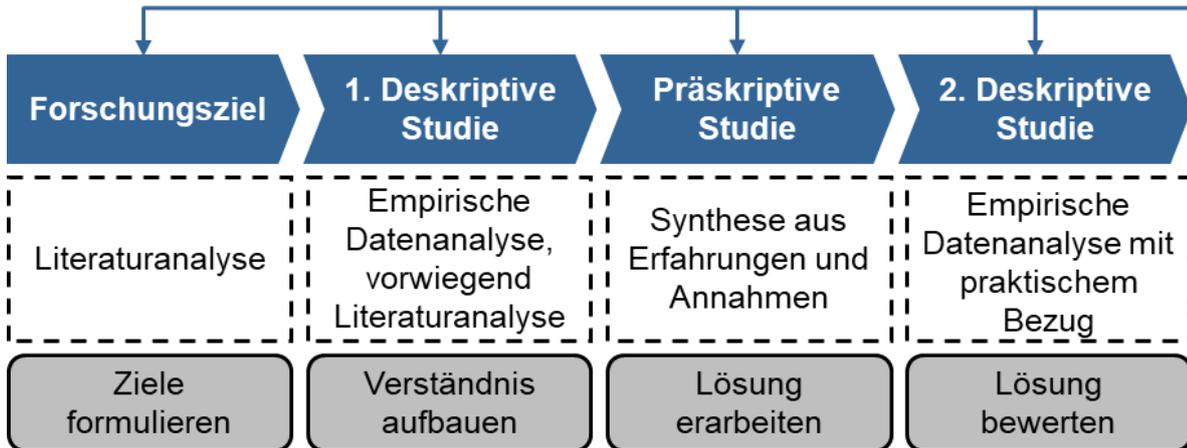


Abbildung 3: Gewählte Forschungsmethodik dieser Arbeit, eigene Darstellung i. A. a. [Blessing und Chakrabarti 2009, 15-17]

Im ersten Schritt werden die Forschungsziele formuliert. Dazu wird die Literatur analysiert und Forschungslücken identifiziert (Ist-Zustand). Aus der Problemstellung wird der Soll-Zustand (das gewünschte Ergebnis) formuliert. Dieser beinhaltet Forschungsfragen, Hypothesen und Erfolgskriterien. Abschließend wird die Vorgehensweise inkl. Forschungstyp und Methoden festgelegt. [Blessing und Chakrabarti 2009, S. 43–45]

Innerhalb der ersten deskriptiven Studie wird der Stand der Technik analysiert, um ein Verständnis für das Forschungsgebiet zu entwickeln. Darauf aufbauend werden die Forschungsfragen und -hypothesen verfeinert. Anschließend wird ein Forschungsdesign für die empirische Studie erstellt und diese durchgeführt. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse werden erste Lösungsvorschläge formuliert. [Blessing und Chakrabarti 2009, S. 80f.]

Innerhalb der präskriptiven Studie wird die Lösung erarbeitet. Ausgehend von den Forschungszielen werden die Ziele des Lösungsansatzes definiert. Anschließend wird ein Konzept für den Lösungsansatz entwickelt, das u. a. Technologien für die Umsetzung enthält. Die Realisierung des Lösungsansatzes beinhaltet zusätzlich einen Umsetzungsplan sowie mögliche Restriktionen. Darüber hinaus erfolgt in dieser Phase eine erste Bewertung hinsichtlich Vollständigkeit und Konsistenz. [Blessing und Chakrabarti 2009, S. 144–148]

Abschließend wird in der zweiten deskriptiven Studie die Lösung bewertet. Zu diesem Zweck wird die Evaluierung vorbereitet, ein Evaluierungsschwerpunkt festgelegt und ein Evaluierungsplan erstellt. Daraufhin wird die Evaluation

durchgeführt, indem die Daten analysiert, interpretiert und aufbereitet werden. Zum Abschluss werden das Vorgehen und die Ergebnisse kritisch reflektiert sowie Handlungsempfehlungen und weiterer Forschungsbedarf abgeleitet. [Blessing und Chakrabarti 2009, S. 196f.]

Analog zu dieser Forschungsmethodik ist die vorliegende Arbeit in acht Kapitel gegliedert (siehe Abbildung 4).

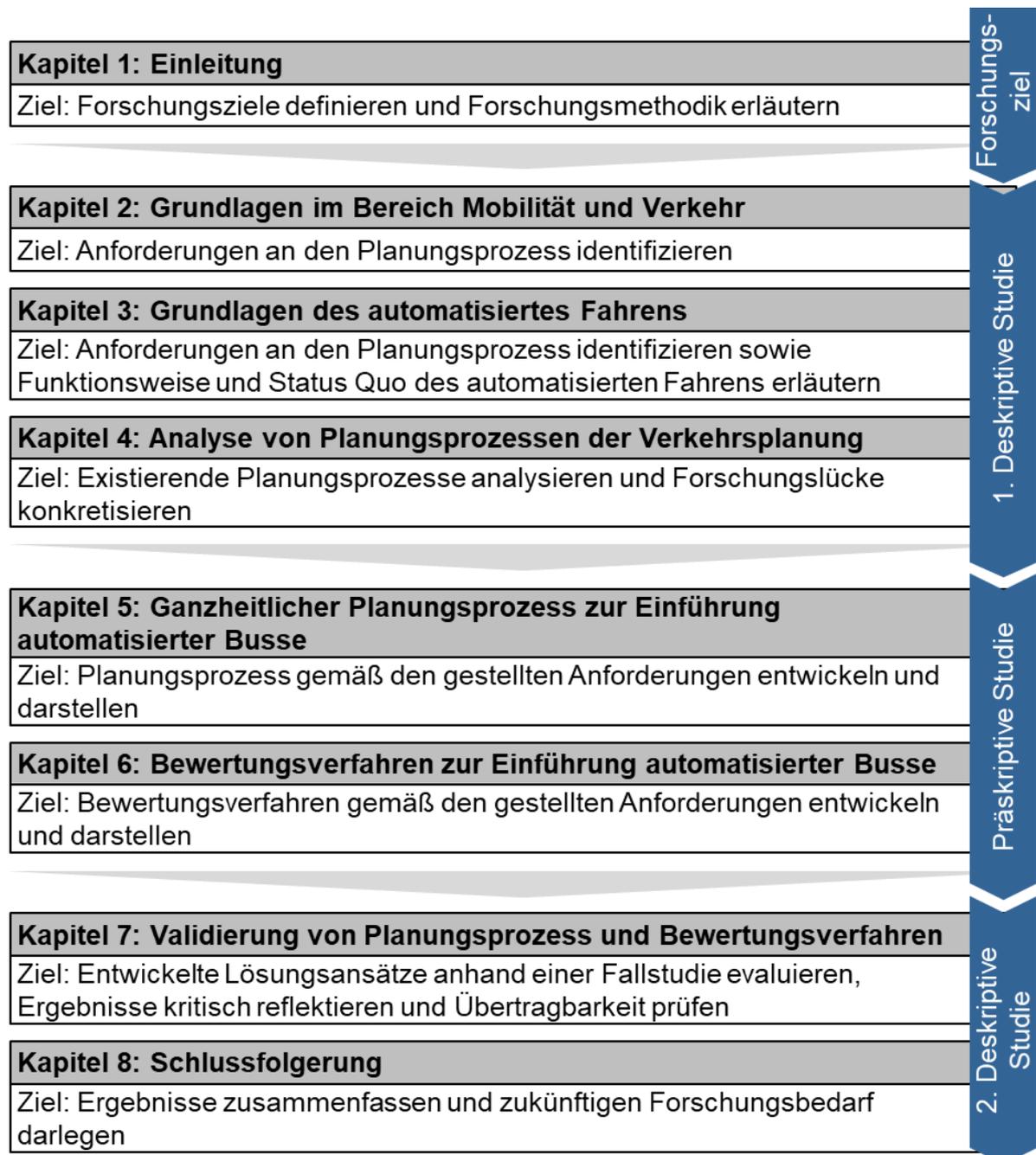


Abbildung 4: Vorgehen und Aufbau der Arbeit

In den Abschnitten 1.1 und 1.2 wurden die Problemstellung, die Hypothese, die Ziele sowie die Forschungsfragen formuliert. Mit der hier vorgestellten Vorgehensweise werden alle Elemente des Schrittes „Forschungsziel“ berücksichtigt. Das Ziel dieser Arbeit, einen ganzheitlichen Planungsprozess inkl. eines Bewertungsverfahrens für die Einführung automatisierter Busse zu entwickeln, berührt die Forschungsbereiche

Mobilität und Verkehr, automatisiertes Fahren und Verkehrsplanung (siehe Abbildung 5). Dementsprechend werden diese drei Forschungsfelder im Rahmen der ersten deskriptiven Studie vertiefend analysiert und der Forschungsfokus geschärft. Dafür wird die Sekundärerhebung auf Basis einer Literaturrecherche als Methodik zur Datenerhebung ausgewählt [Brosius et al. 2016, S. 6; Hömberg et al. 2005, S. 6].



Abbildung 5: Einordnung der Zielstellung dieser Arbeit in die Forschungslandschaft

Der Forschungsbereich von Mobilität und Verkehr ist der Themenstellung übergeordnet. Deshalb ist es das Ziel des zweiten Kapitels, die Anforderungen aus diesem Bereich an den Planungsprozess zu identifizieren. In diesem Zusammenhang wird auch die aktuelle Situation im Bereich von Mobilität und Verkehr beschrieben und vertiefend erläutert, warum das automatisierte Fahren eine zukünftige Schlüsseltechnologie darstellt. Das Kapitel 3 hat zum Ziel, die spezifischen Anforderungen an den Planungsprozess, die durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge bzw. automatisierter Busse entstehen, zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird die Technologie des automatisierten Fahrens erörtert und eine Auswahl unterschiedlicher technologischer Ansätze präsentiert. Das Forschungsfeld der Verkehrsplanung fokussiert sich u. a. auf die Planung von Buslinien. In Kapitel 4 wird daher überprüft, inwieweit ein ganzheitlicher Planungsprozess für den Einsatz automatisierter Busse existiert (Abschluss der ersten deskriptiven Untersuchung). Dafür werden verschiedene Planungsansätze der Verkehrsplanung vorgestellt und diese in Bezug auf die in Kapitel 2 und Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen bewertet.

Anschließend wird im fünften Kapitel ein eigener Lösungsansatz für den ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse entwickelt und vorgestellt (präskriptive Studie). Bei der Konzeption werden die Anforderungen aus den vorangegangenen Kapiteln aufgegriffen und entsprechend integriert. Darüber hinaus fließen eigene Erfahrungen, Erkenntnisse aus Best-Practice-Beispielen mit automatisierten Bussen sowie Sichtweisen aus der Literatur ein. Das Bewertungsverfahren als Bestandteil des Planungsprozesses wird anschließend in Kapitel 6 erarbeitet. Das in diesem Kapitel beschriebene Bewertungsverfahren stützt sich neben den in Kapitel 5 angeführten Datenquellen auf ein Experteninterview, das die Einflussparameter für die Streckenbewertung von automatisierten Bussen liefert.

Anhand einer Fallstudie zur Stadt Köthen erfolgt in Kapitel 7 die Evaluation des ganzheitlichen Planungsprozesses und des Bewertungsverfahrens (zweite deskriptive Studie). Anschließend werden die entwickelten Elemente und Ergebnisse kritisch reflektiert und auf ihre Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit hin überprüft. Zuletzt wird die Arbeit zusammengefasst und im Ausblick zukünftiger Forschungsbedarf formuliert (Kapitel 8).

2 Grundlagen im Bereich Mobilität und Verkehr

Um die Anforderungen aus dem Bereich Mobilität und Verkehr für den ganzheitlichen Planungsprozess abzuleiten, ist es zunächst notwendig, die aktuelle Mobilitätssituation, die zukünftigen Herausforderungen sowie mögliche Lösungsansätze aufzuzeigen. In Abschnitt 2.1 werden Mobilität und Verkehr definiert und die verschiedenen Verkehrsträger des Personenverkehrs vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 der Status quo der Mobilität vor allem in Deutschland, aber auch in Europa und weltweit dargestellt. Darauf aufbauend werden die aktuellen Herausforderungen im Bereich Mobilität und Verkehr erläutert (Abschnitt 2.3). Schließlich werden Lösungsansätze für die zukünftige Entwicklung von Mobilität und Verkehr aufgezeigt (Abschnitt 2.4). Dabei wird auf die Anforderungen der Nutzer und Betreiber eingegangen. Zusammenfassend werden daraus Anforderungen an den Planungsprozess abgeleitet (Abschnitt 2.5). In den einzelnen Unterkapiteln und insbesondere in den Abbildungen und Tabellen wird im Sinne der Aufgabenstellung der ÖPNV bzw. der Bus hervorgehoben.

2.1 Definition und Formen von Mobilität und Verkehr

Im Folgenden werden die Begriffe „Mobilität“ und „Verkehr“ definiert und voneinander abgegrenzt (Abschnitt 2.1.1) Danach wird das Verkehrsangebot des Personenverkehrs erläutert (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Mobilität und Verkehr

Der Einsatz automatisierter Busse im ÖPNV bewegt sich im Themenbereich von Mobilität und Verkehr. Da diese Begriffe in wissenschaftlichen und politischen Debatten häufig als Synonym verwendet werden, werden nacheinander beide Begriffe erläutert und voneinander abgegrenzt [Herget 2016, S. 25; Becker 2018, S. 76].

Der Begriff „Mobilität“ stammt ursprünglich von dem lateinischen Wort „mobilitas“ ab und kann mit „Bewegung“ oder „Beweglichkeit“ übersetzt werden [Schopf 2001, S. 4; Zierer und Zierer 2010, S. 19; Hillmann 2007, S. 578; Gerike 2005, S. 22]. In der beobachtenden Forschung wird der Mobilitätsbegriff in räumliche, soziale und informationelle Mobilität aufgeteilt [Tully und Baier 2006, S. 31]. Zusätzlich existiert die geistige Mobilität (bspw. Ideen zu produzieren), die jedoch in dieser Arbeit nicht weiter vertieft wird [Tully und Baier 2006, S. 31]. Anhand der Dimensionen Raum und Zeit können die drei unterschiedlichen Arten der Mobilität eingeteilt werden (siehe Abbildung 6) [Tully und Baier 2006, S. 31]. Soziale Mobilität bezieht sich auf den gesellschaftlichen Auf- und Abstieg, wobei zwischen vertikaler (Wechsel einer gesellschaftlichen Schicht) und horizontaler sozialer Mobilität (Veränderung des Berufs ohne Wechsel der gesellschaftlichen Schicht) unterschieden wird [Tully und Baier 2006, S. 32]. Der Austausch von Informationen zwischen Sender und Empfänger, der ohne räumliche und zeitliche Bewegung durchgeführt werden kann, wird als informationelle Mobilität bezeichnet [Tully und Baier 2006, S. 33f.]. Die räumliche Mobilität wird als zeitlich-räumliche Ortsveränderung von Individuen definiert [Tully und Baier 2006, S. 34; Bertram und Bongard 2014, S. 5]. Dazu zählen alle Arten der räumlichen Veränderung zwischen zwei Standorten, wie bspw. Alltagswege,

Tourismus, Umzug oder Migration [Tully und Baier 2006, S. 34; Funke 2018, S. 7; Gerike 2005, S. 22].

		Bewegung im Raum			
		Ja		Nein	
Bewegung in der Zeit	Ja	<i>Räumliche Mobilität</i>		<i>Soziale Mobilität</i>	
			Kurz		Lang
		Kurz	Alltagswege		Tourismus
	Lang	Umzug	Migration		
	Nein	„Beamten zur Enterprise“		<i>Informationelle Mobilität</i>	

Abbildung 6: Einteilung des Mobilitätsbegriffs, eigene Darstellung i. A. a. [Tully und Baier 2006, S. 31]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird für den Begriff „Mobilität“ immer die Definition der räumlichen Mobilität verwendet.

Mobilität zielt nach Schneidewind „[...] darauf, durch die Überwindung von räumlicher Distanz Bedürfnisse zu befriedigen, d. h. zu arbeiten, einzukaufen, sich zu erholen, sich zu engagieren, sich mit anderen Menschen austauschen zu können“ [Schneidewind 2019, S. 224]. Nach Becker bezeichnet Mobilität im engeren Sinne „[...] alle Aspekte, die mit den Bedürfnissen der Bewegungen zusammenhängen [...]“ [Becker 2018, S. 75]. Nach der Theorie des Psychologen Abraham Maslow werden Bedürfnisse in fünf Stufen eingeteilt [Maslow 1954, S. 35–46]. Beginnend mit den Grundbedürfnissen (Essen, Trinken, Schlafen), über Sicherheitsbedürfnisse (Schutz vor Gefahren, festes Einkommen), soziale Bedürfnisse (soziale Kontakte, Zugehörigkeit), Individualbedürfnisse (Erfolg, Anerkennung) bis hin zum Bedürfnis nach Selbstverwirklichung [Maslow 1954, S. 35–46]. Zusammenfassend beschreibt Mobilität die Bedürfnisse der Menschen, die in zeitlich-räumlichen Bewegungen resultieren (u. a. Wege zum Einkaufen, zu Ärzten, zu sozialen Kontakten, zum Arbeitsplatz sowie zu Freizeit- und Kultureinrichtungen) [Tully und Baier 2006, S. 34–38; Hannon et al. 2016, S. 11; Becker 2001, S. 3]. Dies zeigt, dass Mobilität die Voraussetzung für die Partizipation am sozialen Leben darstellt und einen signifikanten Einfluss auf die Lebensqualität der Menschen besitzt [Agora Verkehrswende 2017, S. 8; Becker 2018, S. 75; Derer und Geis 2020, S. 4].

„Verkehr“ wird als Menge aller Instrumente angesehen, mit denen Mobilität umgesetzt und die Ortsveränderung von Personen, Informationen oder Gütern durchgeführt wird [Ammoser und Hoppe 2006, S. 21f.; Nuhn und Hesse 2006, S. 18; Becker 2018, S. 75; Becker 2001, S. 3]. Dementsprechend kann Verkehr einerseits als Instrument zur Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse angesehen werden [Becker 2018, S. 75]. Andererseits wird Verkehr auch als das Ergebnis aller physischen Bewegungen in einem Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt interpretiert [Witzke 2016, S. 5; Tully und Baier 2006, S. 39; Herget 2016, S. 26; Nuhn und Hesse 2006, S. 18].

Dementsprechend sind Verkehrsmittel, Verkehrsregeln und Verkehrsinfrastrukturen Elemente, um Mobilität zu ermöglichen [Becker 2001, S. 3; Wolking 2021, S. 114]. Aus diesem Grund kann Verkehr als eine Teilmenge der Mobilität verstanden werden [Tully und Baier 2006, S. 39; Zierer und Zierer 2010, S. 25]. Diesen Ausführungen folgend, wird in dieser Arbeit zwischen Mobilität (Bedürfnis) und Verkehr (Instrument) unterschieden [Witzke 2016, S. 5; Becker 2018, S. 76; Wolking 2021, S. 114].

Weiterhin werden die Begriffe „Mobilität“ und „Verkehr“ in der Öffentlichkeit unterschiedlich wahrgenommen [Witzke 2016, S. 5; Freudendal-Pedersen et al. 2019, S. 2]. Mobilität, in Bezug auf die Bedürfnisse eines Individuums, ist positiv behaftet und ein Ausdruck von Lebensqualität, Erfolg und Dynamik [Witzke 2016, S. 5; Flade 2013, S. 22–24; Becker 2018, S. 75]. Zusätzlich werden positive wirtschaftliche und soziale Auswirkungen, wie Wohlstand oder internationale Zusammenarbeit, mit der Mobilität verknüpft [Freudendal-Pedersen et al. 2019, S. 2; Agora Verkehrswende 2017, S. 8]. Mit dem Begriff „Verkehr“ werden nationale und internationale Transporte von Gütern assoziiert, weshalb Verkehr als ein bedeutender Wachstumsmotor für eine Vielzahl von Branchen betrachtet werden kann [Agora Verkehrswende 2017, S. 8; Hannon et al. 2016, S. 11; Link 2018, S. 89f.]. Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen Verkehr und dem ökonomischen Wohlstand eines Landes [Agora Verkehrswende 2017, S. 8; Hannon et al. 2016, S. 11]. Diese positiven Aspekte existieren weiterhin, jedoch hat sich im Laufe der Zeit die öffentliche Wahrnehmung des Verkehrsbegriffs gewandelt [Witzke 2016, S. 5; Wolking 2021, S. 114]. Dies resultiert vor allem aus dem Klimawandel und einem gesteigerten Umweltbewusstsein in der Gesellschaft [Wolking 2021, S. 114]. Verkehr wird heutzutage mit einer Vielzahl von negativen Begleiterscheinungen assoziiert, zu denen Stauproblematiken, Parkraumnot, Unfälle, Umweltbelastungen, Lärm und Schadstoffe zählen [Witzke 2016, S. 5; Agora Verkehrswende 2017, S. 8; Hannon et al. 2016, S. 11; Link 2018, S. 90]. Demzufolge beeinträchtigt Verkehr die Gesundheit und Lebensqualität, weshalb es in der Öffentlichkeit mittlerweile negative Assoziationen auslöst [Witzke 2016, S. 5; Agora Verkehrswende 2017, S. 8; Wolking 2021, S. 114].

Vor allem im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung und die planetare Grenze ist es die Zielsetzung, den notwendigen Verkehr zur Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse möglichst minimal zu halten und Verkehrsmittel effizient einzusetzen [Becker 2018, S. 76; Witzke 2016, S. 6; Becker 2001, S. 3f.; Schneidewind 2019, S. 224]. Die Verkehrsbelastung zu reduzieren und gleichzeitig das Mobilitätsniveau zu erhalten, wird durch den Begriff „nachhaltige Mobilität“ ausgedrückt [Witzke 2016, S. 5f.; Schneidewind 2019, S. 224; Bertram und Bongard 2014, S. 6; Becker 2001, S. 3f.].

2.1.2 Verkehrsangebot des Personenverkehrs

In Abschnitt 2.1.1 wurde dargelegt, dass Verkehrsmittel als Instrumente zur Erfüllung von Mobilitätsbedürfnissen fungieren [Bertram und Bongard 2014, S. 6]. Verkehrsmittel sind technische Einheiten, vorwiegend Fahrzeuge, die zur Beförderung von Personen, Gütern und Nachrichten eingesetzt werden [Nuhn und Hesse 2006, S. 18; Wolking 2021, S. 123]. Der Begriff „Verkehrsangebot“ beinhaltet neben Verkehrsmitteln auch Verkehrsdienstleistungen und stellt damit einen

Oberbegriff dar [Gertz 2021, S. 9]. Im Folgenden wird gemäß der Aufgabenstellung auf die Unterteilung des Verkehrsangebots im Personenverkehr eingegangen.

Die Einteilung des Personenverkehrs umfasst nicht nur die Unterscheidung zwischen IV und öffentlichem Personenverkehr (ÖPV), sondern weitere Kategorien [Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34; Gather et al. 2008, S. 27]. Bereits seit den 1970er Jahren existiert die Entwicklung, dass der ÖPV individualisiert (u. a. Rufbusse) und der private IV veröffentlicht wird (u. a. Mitfahrgelegenheiten) [Wolking 2021, S. 121f.; Rees 2018, S. 108f.; Schwedes 2014, S. 243]. Durch die zunehmende Digitalisierung wird diese Entwicklung beschleunigt, sodass neue Angebote als Alternative zum klassischen ÖPV unter den Sammelbegriffen „Fahrdienste“ und „Sharing-Angebote“ entstanden sind und das Angebot der Verkehrsdienstleistungen erweitern [Wolking 2021, S. 121f.; Weber 2020, S. 5; BMVI 2016b, S. 16]. Demzufolge stellt Abbildung 7 das Verkehrsangebot des Personenverkehrs bestehend aus ÖPV, Fahrdienste, Sharing-Angebote und IV dar. Diese vier Kategorien werden im Folgenden erläutert. Der Bus ist dabei dem ÖPNV zugeordnet.

Der ÖPV wird hinsichtlich der Entfernung in den ÖPNV mit Strecken bis zu 50 km und in den öffentlichen Personenfernverkehr (ÖPFV) für weiter entfernte Strecken eingeteilt [Gather et al. 2008, S. 27f.; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34]. Bezüglich des ÖPNV erfolgt eine weitere Differenzierung in den öffentlichen Straßenpersonennahverkehr (ÖSPV) und in den öffentlichen Schienenpersonennahverkehr (SPNV) [Gather et al. 2008, S. 27f.; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34]. Zum ÖSPV zählen die Verkehrsmittel Bus, Taxi und Straßenbahn, während Regionalzüge, S-Bahn und U-Bahn dem SPNV zugeordnet werden [Gather et al. 2008, S. 27f.; Agora Verkehrswende 2017, S. 27; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34]. Seilbahnen, Fähren oder Rikschas werden in bestimmten Szenarien als Teil des ÖPNV eingesetzt [VCÖ 2018, S. 19; Schiefelbusch 2018, S. 1634; Helms et al. 2022, S. 70]. Weiterhin kann der ÖPNV hinsichtlich der Ausgestaltung in den klassischen Linienverkehr mit festen Haltestellen, Linienwegen und Abfahrtszeiten sowie in flexible Angebotsformen mit unterschiedlichen Fahrtverläufen und Bedarfs-haltestellen eingeteilt werden [BMVI 2016b, S. 16–23]. Im ÖPFV werden zur Überwindung großer Distanzen Fernzüge, Reisebusse, Schiffe und Flugzeuge eingesetzt [Gather et al. 2008, S. 27f.; Schiefelbusch 2018, S. 1634; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34]. Die Verkehrsangebote des ÖPV zeichnen sich dadurch aus, dass die Verkehrsmittel kollektiv genutzt werden und allgemein zugänglich sind [Wolking 2021, S. 124]. Jedoch sind die Nutzer abhängig von Haltestellen und Abfahrtszeiten [Oexler 2001, S. 2].

Fahrdienste sind eine Art der Beförderung, bei welcher der Nutzer nicht selbst fährt [Wolking 2021, S. 121]. Bei diesem Verkehrsangebot erfolgen die Buchungen flexibel (On-Demand) und die Fahrten werden möglichst zusammengelegt, um wirtschaftliche Vorteile durch höhere Auslastungen zu erreichen [Wolking 2021, S. 121f.; Sommer und Saighani 2019, S. 25]. Unterschieden wird hierbei, ob die Fahrzeuge von einem professionellen Fahrer mit Personenbeförderungsschein oder von privaten Personen geführt werden [Wolking 2021, S. 122]. Ridepooling (Sammelbeförderung) ist ein Beispiel für Angebote, die einem kommerziellen Anbieter unterliegen und mit einem professionellen Fahrer durchgeführt werden [Wolking

2021, S. 122; Sommer und Saighani 2019, S. 25]. Dabei bucht der Kunde das Fahrzeug, indem Start und Ziel der Reise angegeben werden [Bernhart 2021, S. 20]. Je nachdem inwieweit andere Kunden mit ähnlichen Zielen und identischen Teilstrecken unterwegs sind, wird das Fahrzeug von mehreren Personen genutzt [Bernhart 2021, S. 20]. Anbieter dieser Dienste sind u. a. Moia und Free Now in Hamburg [Wolking 2021, S. 122; Aberle 2019, S. 19f.]. Wird eine Fahrt nicht geteilt und das Fahrzeug nur von einem Fahrgast genutzt (taxiähnlich), wird dieses Angebot als Ridehailing bezeichnet [Wolking 2021, S. 122; Sommer und Saighani 2019, S. 25; Mehlert 2018, S. 5]. Ridepooling und Ridehailing werden unter dem Oberbegriff „Rideselling“ zusammengefasst [Mehlert 2018, S. 5].

Verkehrsangebot des Personenverkehrs			
ÖPV	Fahrdienste	Sharing-Angebote	IV
<u>ÖPNV:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Bus • Taxi • Straßenbahn • Regionalzug • S-Bahn • U-Bahn • Seilbahn • Schwebebahn • Fähre/Schiff • Rikscha 	<u>Professionell:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Rideselling <ul style="list-style-type: none"> • Ridepooling • Ridehailing 	<u>Motorisiert:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Pkw • E-Bike • Pedelec • E-Lastenrad • Elektrokleinstfahrzeuge 	<u>Motorisiert:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Pkw • Motorrad • Privatflugzeug • Privates Schiff • E-Bike • E-Lastenrad • Elektrokleinstfahrzeuge • Pedelec
<u>ÖPFV:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Fernzug • Flugzeug • Reisebus • Schiff 	<u>Privat:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Ridesharing • Ridesourcing 	<u>Nicht-motorisiert:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrrad • Lastenrad 	<u>Nicht-motorisiert:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Zu Fuß • Fahrrad • Lastenrad • Tretroller • Skating
Verkehrsdienstleistungen			
Kollektiv		Individual	
Nutzen		Eigentum	
Allgemein zugänglich		Privat	
Abhängigkeit		Unabhängigkeit	

Abbildung 7: Übersicht des Verkehrsangebots, eigene Darstellung i. A. a. [Wolking 2021, S. 120–124; Oexler 2001, S. 2; Agora Verkehrswende 2017, S. 27; VCÖ 2018, S. 19; Holz-Rau 2018a, S. 1578; Schiefelbusch 2018, S. 1634; Helms et al. 2022, S. 70; eVehicle for you GmbH 2024; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34; Gather et al. 2008, S. 27f.; WSW mobil GmbH 2025]

Die klassische Mitfahrgelegenheit, das Ridesharing, ist im Gegensatz dazu ein Angebot, bei dem die Fahrzeuge von Privatpersonen geführt werden [Wolking 2021, S. 122; BMVI 2016b, S. 29]. Meist dient dabei eine Internetplattform (bspw. Blablacar) als Dienstleistung, um die gemeinsame Fahrt zwischen den Privatpersonen zu vermitteln [Wolking 2021, S. 122; BMVI 2016b, S. 29; Bernhart 2021, S. 20]. Beim Ridesourcing werden taxiähnliche Dienste mit privaten Fahrern durchgeführt [Zha et al. 2016, S. 249f.]. Im Unterschied zum Ridesharing werden die Fahrzeuge eingesetzt, um Profit zu generieren, wobei der Fahrdienst durch einen kommerziellen Anbieter geleitet wird [Wolking 2021, S. 122; Zha et al. 2016, S. 249f.]. Ein Beispiel hierfür ist das Angebot der Firma Uber [Wolking 2021, S. 122]. Da gemäß Personenbeförderungsgesetz (PBefG) in Deutschland für eine entgeltliche Beförderung von Fahrgästen ein Personenbeförderungsschein vorliegen muss, werden hierzulande von Uber nur Fahrer mit Personenbeförderungsschein eingesetzt [Wolking 2021, S. 122; Uber Eats Germany GmbH 2022]. In Bezug zu Abbildung 7 zeichnen sich Fahrdienste darin aus, dass diese kollektiv genutzt werden können und allgemein zugänglich sind, jedoch ein höheres Maß an Individualität und Unabhängigkeit hinsichtlich Fortbewegungszeit und Strecke gegenüber dem ÖPV anbieten [Wolking 2021, S. 121–124; Oexler 2001, S. 2]. Diese Dienste stellen demnach eine Alternative zum klassischen ÖPV und vor allem zu Taxiunternehmen dar [Wolking 2021, S. 122; BMVI 2016b, S. 16]. Durch die Entwicklungen im ÖPV hin zu flexiblen Angebotsformen, nähern sich ÖPV und Fahrdienste allerdings einander an [BMVI 2016b, S. 23].

Sharing-Dienste sind aus der Entwicklung entstanden, den privaten IV der Öffentlichkeit zugänglich zu machen [Wolking 2021, S. 122]. Bei Sharing-Angeboten wird das Fortbewegungsmittel über eine Plattform gebucht, bezahlt und dem Nutzenden für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung gestellt [Wolking 2021, S. 122; Rees 2018, S. 107; Witzke 2016, S. 7]. Es handelt sich bei diesem Angebot daher um eine eigentumslose Nutzung [Wolking 2021, S. 122; BMVI 2016b, S. 31]. Am Markt existieren Sharing-Angebote mit motorisierten Fahrzeugen, wie bspw. Pkw, E-Bike, Pedelec, E-Lastenrad und Elektrokleinstfahrzeuge (z. B. E-Roller) und mit nicht-motorisierten Fahrzeugen, wie bspw. Bikesharing oder Lastenradsharing [Wolking 2021, S. 123; Holz-Rau 2018a, S. 1578; Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg 2024; BMDV 2023b; eVehicle for you GmbH 2024]. Sharing-Angebote werden in stationsgebundene oder free-floating Dienste unterteilt [Wolking 2021, S. 122f.]. Beispiele für Carsharing sind u. a. teilAuto, Flinkster, Free2move oder Miles Mobility [Mobility Center GmbH 2024; Witzke 2016, S. 10; Deutsche Bahn Connect GmbH 2024; MILES Mobility GmbH 2024; Free2move Deutschland GmbH 2024]. Firmen wie StadtRAD, MVGmeinRad Mainz und Konrad sind hingegen Bikesharing-Anbieter [Reesas et al. 2015, S. 52–58]. Sharing-Angebote grenzen sich vom IV dahingehend ab, dass sich die Fahrzeuge nicht im Eigentum der Nutzer befinden und von mehreren Personen genutzt werden können, wodurch die Auslastung erhöht wird [Wolking 2021, S. 124; Witzke 2016, S. 7]. Hinsichtlich der Fahrdienste unterscheiden sich Sharing-Angebote dahingehend, dass der Nutzer die Fahraktivität selbst übernimmt und eine Fahrzeugerlaubnis benötigt [Wolking 2021, S. 123]. Weiterhin wird eine Teilung der Fahrzeuge während der Nutzung vermieden, sodass Eindrücke von Privatsphäre und Unabhängigkeit entstehen [Wolking 2021,

S. 123f.; Oexler 2001, S. 2]. ÖPV, Fahrdienste und Sharing-Angebote zählen zum Sammelbegriff „Verkehrsdienstleistungen“ (Abbildung 7) [Wolking 2021, S. 121].

Der IV unterscheidet sich grundlegend von den Verkehrsdienstleistungen, da der Nutzer den Weg mit einem Verkehrsmittel zurücklegt, welches sich Eigentum des Nutzers befindet [Wolking 2021, S. 124; Holz-Rau 2018a, S. 1578f.]. Dadurch können Verkehrsteilnehmer jederzeit frei über Fahrzeiten und Fahrstrecken entscheiden, weshalb sich dieses Verkehrsangebot für alle Start-Ziel-Beziehungen eignet [Gather et al. 2008, S. 28; Oexler 2001, S. 2; Holz-Rau 2018a, S. 1579]. Individualfahrzeuge bieten zudem ein hohes Maß an Privatsphäre und Komfort [Wolking 2021, S. 124; Nuhn und Hesse 2006, S. 36]. Der IV wird hinsichtlich des Motorisierungsgrades in den motorisierten Individualverkehr (MIV) und in den nicht-motorisierten Individualverkehr (nMIV) unterteilt [Oexler 2001, S. 28]. Pkw, Motorrad, Flugzeuge, Schiffe, Elektrokleinstfahrzeuge, E-Bikes, E-Lastenräder und Pedelecs, die sich im privaten Eigentum der Nutzer befinden, zählen zum MIV [Gather et al. 2008, S. 27f.; Holz-Rau 2018a, S. 1578; BMDV 2023b; Wolking 2021, S. 123; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34]. Im Gegensatz dazu werden Fuß- und Radverkehr, Inline-Skates und Tretroller dem nMIV zugeordnet [Gather et al. 2008, S. 27f.; Holz-Rau 2018a, S. 1578; Wolking 2021, S. 123; Schnabel und Lohse 1997, S. 30–34].

2.2 Status Quo von Mobilität und Verkehr

Die Entscheidungen bezüglich der Maßnahmen zur Förderung nachhaltiger Mobilität im Sektor Verkehr und Mobilität sind vielschichtig und komplex [BMDV 2024b]. Daher ist ein hoher und präziser Informationsbedarf erforderlich, um den aktuellen Zustand sowohl auf lokaler als auch auf regionaler und auf Bundesebene zu bestimmen [BMDV 2024b; nexus Institut 2024]. Nur mit zuverlässigen und aktuellen Daten können verkehrspolitische Diskussionen geführt und geeignete zukünftige Maßnahmen abgeleitet werden [BMDV 2024b; nexus Institut 2024]. Zur Beschreibung von Mobilität und Verkehr werden verschiedene Kenngrößen verwendet. In diesem Abschnitt wird der Status Quo im Bereich von Mobilität und Verkehr anhand ausgewählter Kenngrößen des Personenverkehrs erläutert. Da sich im Rahmen der Aufgabenstellung vorwiegend auf eine Anwendung in Deutschland fokussiert wird und dort die Datenlage sehr umfangreich ist, wird zuerst der Status Quo in Deutschland präsentiert (Abschnitt 2.2.1). Der zweite Unterabschnitt thematisiert anschließend die Situation in Europa und weltweit.

2.2.1 Mobilität und Verkehr in Deutschland

In Deutschland werden vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr verschiedene Bausteine genutzt, um das Mobilitäts- und Verkehrsverhalten der Bevölkerung sowie des Wirtschaftsverkehrs zu erheben [BMDV 2024b]. Im Bereich des Personenverkehrs ist die Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland (MiD)“ zu nennen [BMDV 2024b; BMDV 2023c]. „Die MiD ist die größte bundesweite Erhebung und auch weltweit eine der größten Erhebungen zur Alltagsmobilität“ [BMDV 2023c]. Zuletzt wurden die Erhebungen in den Jahren 2002, 2008 und 2017 durchgeführt [BMDV 2023c]. Derzeit werden die Ergebnisse zur MiD 2023 ausgewertet [BMDV

2023c]. Diese groß angelegten Studien werden durch das „Deutsche Mobilitätspanel (MOP)“ ergänzt, das als Längsstudie zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung konzipiert ist [BMDV 2024b]. Die Erhebungen werden jährlich durchgeführt, sodass Trends im Verkehrsverhalten frühzeitig zwischen den MiD-Studien identifiziert werden [BMDV 2022b]. Die aktuellste Erhebung des MOP resultiert aus den Jahren 2022 und 2023 [KIT 2024]. Als dritter Baustein werden auch Erhebungen auf Basis von Mobilfunkdaten eingesetzt [Follmer 2020, S. 4]. Ein letzter Baustein sind die jährlich erscheinenden Veröffentlichungen „Verkehr in Zahlen“, die umfassende verkehrsstatistische Informationen darstellen [DLR et al. 2023, S. 5]. Anhand der Daten des Statistischen Bundesamtes (u. a. zu Wohnbevölkerung, Erwerbstätigkeit, Haushaltseinkommen) werden dabei die Ergebnisse der Studie MiD 2017 auf das jeweilige Jahr hochgerechnet [DLR et al. 2023, S. 212].

In den Erhebungen werden eine Vielzahl von Kenngrößen im Bereich Mobilität und Verkehr ermittelt. Hinsichtlich der Themenstellung dieser Arbeit werden nachfolgend Kenngrößen aus sechs unterschiedlichen Kategorien dargestellt:

1. Alltagsmobilität einzelner Personen
2. Kenngrößen der Gesamtbevölkerung
3. Kenngrößen einzelner Verkehrsmittel
4. Mobilitätskosten im Personenverkehr
5. THG-Emissionen des Personenverkehrs
6. Unfallstatistiken

Mithilfe der ersten beiden Kategorien wird die allgemeine Verkehrsentwicklung in Deutschland dargestellt. Um die Wichtigkeit der einzelnen Verkehrsmittel zueinander in Beziehung zu stellen, werden unterschiedliche Kenngrößen der Verkehrsmittel präsentiert. Die letzten drei Kategorien bilden die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch und sozial) ab.

Als Datengrundlage für die sechs Kategorien wird vorwiegend die Studie MiD 2017 verwendet. Ergänzend werden das MOP 2022/2023, Verkehr in Zahlen 2023/2024 und weitere Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) sowie des Statistischen Bundesamtes genutzt. Die Ergebnisse werden in diesem Abschnitt auszugsweise präsentiert. Eine vertiefende Übersicht, die insbesondere die Entwicklung der Kenngrößen behandelt, befindet sich in Anhang A.1. Im Folgenden werden in jeder Kategorie die aktuellsten Daten gezeigt.

1. Alltagsmobilität einzelner Personen

Abbildung 8 zeigt die allgemeinen Kenngrößen Mobilitätsquote (Prozentanteil der Personen, die durchschnittlich an einem Tag mindestens einmal das Haus verlassen), Wegeanzahl (Anzahl der Wege pro Person pro Zeiteinheit), Wegelänge (durchschnittliche Wegelänge pro Person pro Zeiteinheit) und Unterwegszeit (die für die Wege benötigte Zeit pro Person pro Zeiteinheit) aus dem Jahr 2022 [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 3–133; Limbourg et al. 2000, S. 14; Ecke et al. 2023, S. 27–34].

Im Zeitverlauf seit 2002 hat die Mobilitätsquote ein konstantes Niveau beibehalten. Die Anzahl der Wege pro Tag sind geringfügig gesunken, während sich die Wegelänge und Unterwegszeit erhöht haben. Die vier Kennzahlen erfuhren durch

die Auswirkungen der Corona-Pandemie im Jahr 2020 einen Einbruch. Seitdem verzeichnen sie eine stetige Aufwärtsentwicklung. Dennoch konnte bislang nicht wieder das Niveau des Jahres 2019 erreicht werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Corona-Pandemie eine Vielzahl der folgenden Kenngrößen in gleichem Maße beeinflusst hat, erfolgt in den weiteren Ausführungen keine explizite Erwähnung der Corona-Pandemie. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 46; Ecke et al. 2020a, S. 43; Ecke et al. 2020b, S. 44; Ecke et al. 2021, S. 42; Vallée et al. 2022, S. 39; Ecke et al. 2023, S. 28–32]

Kenngrößen der Alltagsmobilität einzelner Personen (MOP2022)	
 Anteil mobiler Personen:	85,5 %
 Wege pro Person pro Tag:	3,0 Wege pro Person pro Tag
 Tagesstrecke pro Person pro Tag:	38,2 km pro Person pro Tag
 Unterwegszeit pro Person pro Tag:	01:17 Std. pro Person pro Tag

Abbildung 8: Kenngrößen der Alltagsmobilität einzelner Personen, eigene Darstellung i. A. a. [Ecke et al. 2023, S. 28–32]

Weiterhin zeigen die Ergebnisse der MiD-Studie aus dem Jahr 2017, dass sich die Ausprägungen dieser Kenngrößen in Bezug auf Wohnort, Alter, Berufstätigkeit und ökonomischen Status unterscheiden (siehe Anhang A.1).

2. Kenngrößen der Gesamtbevölkerung

Die Anzahl der Bevölkerung, das Verkehrsaufkommen (Summe der Wege pro Person pro Zeiteinheit), die Verkehrsleistung (Summe der Wegelängen pro Person pro Zeiteinheit) sowie der Modal Split (Prozentanteile der Verkehrsmittel bezogen auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung) sind in Abbildung 9 für das Jahr 2022 dargestellt [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 3–133; Limbourg et al. 2000, S. 14; Ecke et al. 2023, S. 27–34].

Kenngrößen der Alltagsmobilität der Gesamtbevölkerung (MOP2022)	
 Bevölkerung:	84,4 Mio.
 Verkehrsaufkommen pro Tag:	253 Mio. Wege pro Tag
 Verkehrsleistung pro Tag:	3 224 Mio. Pkm pro Tag
 Modal Split Verkehrsaufkommen:	MIV: 47 % ÖV: 10 % Rad: 17 % Fuß: 26 %
 Modal Split Verkehrsleistung:	MIV: 65 % ÖV: 27 % Rad: 5 % Fuß: 3%

Abbildung 9: Kenngrößen der Alltagsmobilität der Gesamtbevölkerung, eigene Darstellung i. A. a. [Statistisches Bundesamt 2024c; Ecke et al. 2023, S. 28–31]

Eine Analyse der Daten ergibt, dass das tägliche Verkehrsaufkommen im Vergleich zu 2002 einen leichten Rückgang verzeichnet, während die Verkehrsleistung einen signifikanten Anstieg aufweist. Gemäß den Prognosen wird das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung ab 2026 wieder über dem Niveau von 2019 liegen und bis

mindestens 2030 weiter steigen. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31; DLR et al. 2023, S. 348–350]

Der prozentuale Anteil des MIV am Verkehrsaufkommen sinkt seit 2002. Erhöht haben sich dagegen der Rad- und Fußverkehr sowie der Anteil des ÖV (jedoch nur geringfügig). Die Ausprägung des Modal Splits weist Unterschiede in Abhängigkeit des Wohnorts der Bevölkerung auf. In Großstädten beträgt der Anteil des öffentlichen Verkehrs am Verkehrsaufkommen bis zu 20 %, während er in kleinstädtischen und dörflichen Regionen mit bis zu 5 % deutlich niedriger liegt. In Bezug auf die Verkehrsleistung sinkt seit 2002 ebenfalls der Anteil des MIV. Während der Anteil vom Fuß- und Radverkehr an der Verkehrsleistung in diesem Zeitraum ein nahezu konstantes Niveau beibehält, steigt der Anteil des ÖV signifikant (von 14 % auf 27 %). Hinsichtlich der Verkehrsleistung zeigt sich, dass in Metropolen kürzere Wege zurückgelegt werden, wobei mit dem ÖV vergleichbar weite Strecken wie mit dem MIV bewältigt werden. In kleinstädtischen, dörflichen Räumen werden dagegen nur wenige und kurze Strecken mit dem ÖV zurückgelegt. Für längere Strecken wird im ländlichen Raum der MIV genutzt. Gemäß der Prognosen für das Jahr 2030 wird der Anteil des MIV nur geringfügig sinken. Dies zeigt, dass der Pkw weiterhin das mit Abstand wichtigste Verkehrsmittel bleibt. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31; DLR et al. 2023, S. 350]

3. Kenngrößen einzelner Verkehrsmittel

In diesem Abschnitt wird auf die Verkehrsmittel aus den Bereichen Pkw, ÖV, Fahrrad und Carsharing sowie auf die Multmodalität eingegangen. Die Anzahl der Fahrzeuge der verschiedenen Verkehrsmittel ist in Abbildung 10 visualisiert (Bezugsjahr in Klammern) [Krafftahrt Bundesamt 2024a; DLR et al. 2023, S. 53–79; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39; Bundesverband CarSharing e.V. 2024].

Kenngrößen einzelner Verkehrsmittel		
 Anzahl Pkw:	49,1 Mio. Pkw	(2023)
 Anzahl Fahrzeuge ÖV:	105 588 Fahrzeuge	(2019)
 Anzahl Fahrräder/Pedelecs:	77 Mio. Fahrräder/Pedelecs	(2017)
 Anzahl Carsharing Fahrzeuge:	43 110 Fahrzeuge	(2024)

Abbildung 10: Kenngrößen einzelner Verkehrsmittel, eigene Darstellung i. A. a. [Krafftahrt Bundesamt 2024a; DLR et al. 2023, S. 53–79; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39; Bundesverband CarSharing e.V. 2024]

Die Gesamtzahl der Pkw in Deutschland ist weiterhin steigend und hat die Marke von 49 Millionen Pkw zum 01.01.2024 überschritten [Biemann et al. 2024; Krafftahrt Bundesamt 2024a; Krafftahrt Bundesamt 2024b]. Des Weiteren ist ein Anstieg der

Anzahl der batterieelektrischen Pkw zu verzeichnen. Im Jahr 2023 wurde ein Zuwachs von 40 % bei den Neuzulassungen dieser Fahrzeuge registriert [Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Kraftfahrt Bundesamt 2024b]. Im Jahr 2019 wurden im Eisenbahnverkehr (Lokomotiven, Triebwagen, Personenwagen) sowie im ÖSPV (Stadtschnellbahnwagen, Straßenbahnwagen und Kraftomnibusse) insgesamt 105 588 Fahrzeuge eingesetzt [DLR et al. 2023, S. 53–79]. Mittlerweile ist die Anzahl der Kraftomnibusse von 73 800 Fahrzeugen in 2019 auf 84 628 Fahrzeuge in 2024 gestiegen [DLR et al. 2023, S. 79; Kraftfahrt Bundesamt 2024a].

In Deutschland verfügte die Bevölkerung im Jahr 2017 über 77 Millionen Fahrräder inklusive Pedelecs [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39]. Damit besitzen 76 % der Haushalte ein Fahrrad [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39f.]. Der Bundesverband Carsharing e.V. (BCS) vermeldete in 2024 eine steigende Anzahl von Nutzern und Carsharing-Fahrzeugen [Bundesverband CarSharing e.V. 2024]. Insgesamt wird Carsharing in 1 285 Städten und Gemeinden in Deutschland angeboten, wobei der Fokus auf Großstädte liegt [Bundesverband CarSharing e.V. 2024]. Die Kenngröße der Multimodalität offenbart, dass im Jahr 2017 36 % der Bevölkerung in Deutschland innerhalb einer Woche zwei oder mehr Verkehrsmittel nutzten, wobei in urbanen Zentren ein höherer Anteil verzeichnet wurde (42 %) [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 56–59].

4. Mobilitätskosten

Im MOP 2022/2023 wurden die Teilnehmenden nach den Kosten für die Nutzung des Pkw und des ÖV befragt. Die Kosten des ÖV und des Pkw werden jeweils von einer Mehrheit (59 % beim ÖV und 51 % beim MIV) als insgesamt zu hoch empfunden (siehe Abbildung 11). [Ecke et al. 2023, S. 72f.]

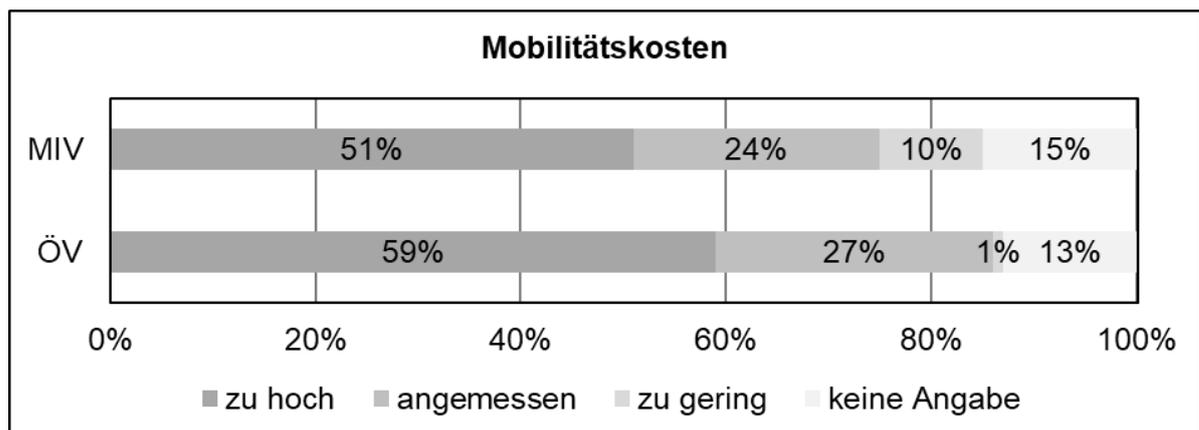


Abbildung 11: Einschätzung der Kosten für MIV und ÖV, eigene Darstellung i. A. a. [Ecke et al. 2023, S. 73]

Eine Umfrage des ADAC aus dem Jahr 2023 zeigt, dass große Teile der Bevölkerung seltener den Pkw und häufiger alternative Verkehrsmittel nutzen. Grund hierfür sind vor allem die hohen Kraftstoffpreise. [Zeit Online GmbH 2023]

5. THG-Emissionen der Mobilität

Die Emissionen im Verkehrssektor stagnieren im Vergleich zu 1990 bzw. sind in 2023 mit 145 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr leicht gesunken [Öko-Institut et

al. 2023, S. 73f.; Agora Verkehrswende 2024b, S. 15f.; Umweltbundesamt 2024a]. Dementsprechend werden die vorgegebenen Klimaschutzziele im Verkehrsbereich derzeit überschritten und aller Voraussicht nach auch bis 2030 nicht erreicht [Öko-Institut et al. 2023, S. 73f.; Agora Verkehrswende 2024b, S. 15f.; Umweltbundesamt 2024a]. Gesetzgebungen zu Abgasvorschriften drängen die Automobilhersteller zu einer Verbesserung der Motoren und Abgastechnik [Umweltbundesamt 2024a]. Aus diesem Grund verbrauchen neuere Pkw im Vergleich zu älteren Fahrzeugen weniger Kraftstoffe und stoßen pro gefahrenem Kilometer weniger Schadstoffe sowie Emissionen aus [Umweltbundesamt 2024a; Ecke et al. 2023, S. 56]. Obwohl dadurch die kilometerbezogenen CO₂-Emissionen sinken, sind bis 2019 die gesamten CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs gestiegen [Umweltbundesamt 2024a]. Grund hierfür ist die Zunahme der Fahrleistung sowie der Trend zu größeren Fahrzeugen [Umweltbundesamt 2024a]. Die Effizienzsteigerungen im MIV reichen daher nicht aus, um die Luftschadstoffe und CO₂-Emissionen zu reduzieren [Umweltbundesamt 2024a]. Gemäß der jährlichen Berechnung des Umweltbundesamtes zeigt sich jedoch, dass die Verkehrsmittel des ÖV weniger THG-Emissionen pro Personenkilometer (Pkm) produzieren als der Pkw (siehe Abbildung 12) [Umweltbundesamt 2024b]. Bei dieser Berechnung werden Annahmen bezüglich der Auslastung (bspw. beim Linienbus im Nahverkehr 16 % und beim Pkw 1,4 Personen pro Fahrzeug) getroffen [Umweltbundesamt 2024b]. Eine stärkere Nutzung des ÖV würde daher zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen führen.

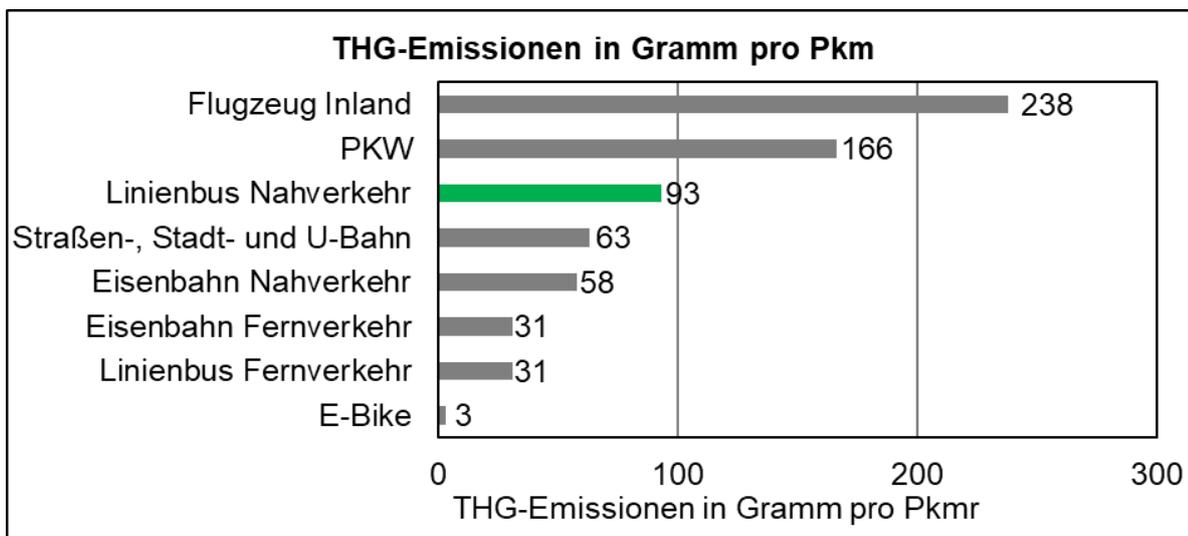


Abbildung 12: THG-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel, eigene Darstellung i. A. a. [Umweltbundesamt 2024b]

6. Unfallstatistiken

Während die Zahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland seit 1950 zunächst angestiegen ist, hat sich diese Kennzahl und damit auch die Zahl der Verletzten seit dem Jahr 2000 kontinuierlich verringert (siehe Abbildung 13) [DLR et al. 2023, S. 156f.; Statistisches Bundesamt 2024h; Statistisches Bundesamt 2024b].

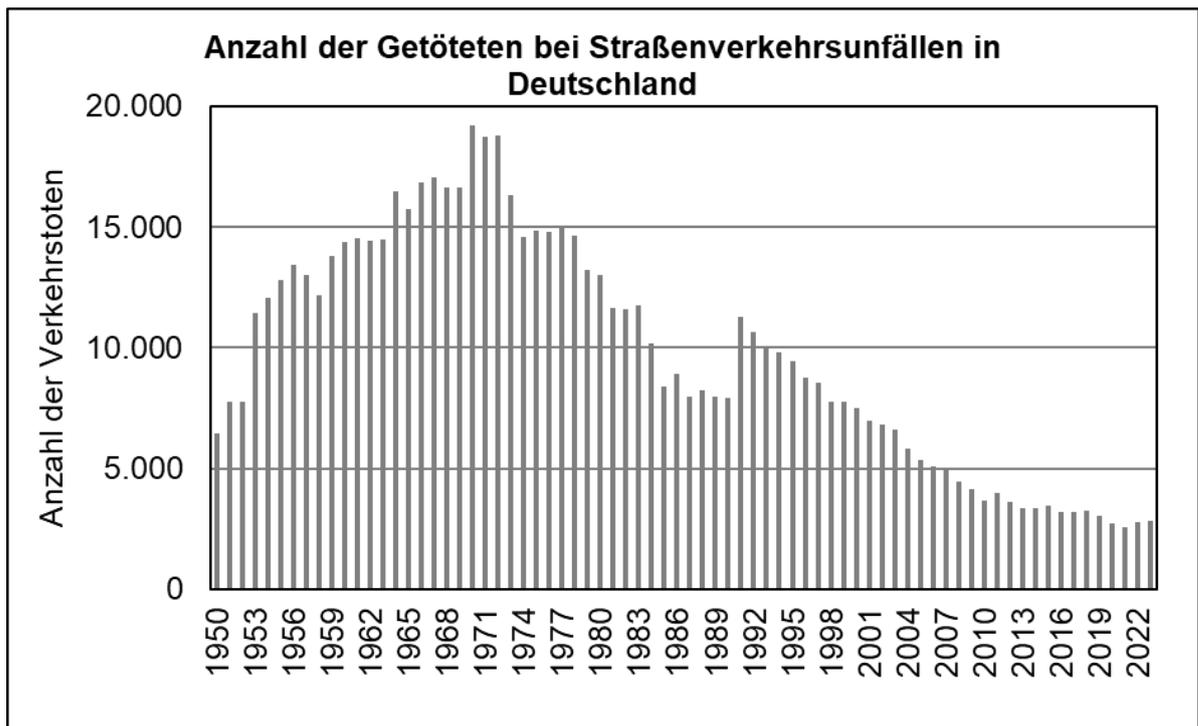


Abbildung 13: Anzahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland, eigene Darstellung i. A. a. [Statistisches Bundesamt 2024b]

Während im Jahr 2000 ungefähr 7 500 Personen bei Straßenverkehrsunfällen getötet wurden, wurde dieser Wert im Jahr 2023 fast gedrittelt (2 830 Personen) [DLR et al. 2023, S. 156f.; Statistisches Bundesamt 2024h]. Zudem sank auch die Anzahl der Verletzten von 504 000 (in 2000) auf 364 900 (in 2023) [DLR et al. 2023, S. 156f.; Statistisches Bundesamt 2024h]. Im Jahr 2023 wurden insgesamt 2,5 Millionen Unfälle registriert [Statistisches Bundesamt 2024h]. Bei 2,2 Millionen dieser Unfälle waren ausschließlich Sachschäden zu verzeichnen [Statistisches Bundesamt 2024h]. Zu 88,9 % lag die Ursache des Unfalls beim Fahrzeugführer [DLR et al. 2023, S. 169]. Die häufigsten Unfallursachen waren zu schnelles Fahren, zu dichtes Auffahren sowie Fehler in den Bereichen Vorfahrt und Einbiegen [DLR et al. 2023, S. 169].

2.2.2 Mobilität und Verkehr in Europa und weltweit

Mit Ausnahme der Auswirkungen der Corona-Pandemie verzeichnet der europäische Verkehr ein kontinuierliches Wachstum der Verkehrsleistung (2022: 5,6 Billionen Pkm) [European Commission 2024, S. 48]. Der dazugehörige Modal Split aus dem Jahr 2022 zeigt zudem, dass der Pkw im Durchschnitt aller EU-Länder einen Anteil von 82 % an der Verkehrsleistung einnimmt (zum Vergleich in Deutschland 85 %) [Statistisches Bundesamt 2024g; European Commission 2024, S. 48f.]. Die verbleibenden 15 Prozent werden dem öffentlichen Verkehr zugerechnet [Statistisches Bundesamt 2024g; European Commission 2024, S. 48f.]. Bei dieser Auswertung werden motorisierte Zweiräder, Radverkehr, Fußverkehr sowie inländischer Schiffs- und Luftverkehr nicht berücksichtigt, weshalb diese Werte von den Daten aus Abschnitt 2.2.1 abweichen [Statistisches Bundesamt 2024g].

Die Anzahl der Pkw in Europa steigt analog zur Entwicklung in Deutschland an [DLR et al. 2023, S. 330f.; Eurostat 2024a, S. 14–16]. Eine Analyse der aktuellen Zahlen aus dem Jahr 2023 ergibt jedoch, dass auch der Eisenbahnverkehr in Europa eine Zunahme der Fahrgastzahl verzeichnet [Eurostat 2024b]. Der Gebrauch des Fahrrads weist in Europa erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern auf. Im Durchschnitt nutzen in Europa 24 % der Bevölkerung ab 15 Jahren das Fahrrad als Fortbewegungsmittel [Statistisches Bundesamt 2022]. In den Niederlanden, die den Höchstwert liefern, sind es sogar 61,3 %, während in Zypern nur 0,6 % der Bevölkerung ab 15 Jahren das Fahrrad nutzen [Statistisches Bundesamt 2022]. Weiterhin buchen im EU-Durchschnitt 6 % der Bevölkerung zwischen 16 und 74 Jahren private Mitfahrangebote von kommerziellen Anbietern [Statistisches Bundesamt 2019a]. Am häufigsten wird in Estland (28 %) die Mitfahrzentrale genutzt, in Deutschland hingegen nur in geringem Umfang (3 %) [Statistisches Bundesamt 2019a].

Die Analyse der Mobilitätskosten ergibt, dass die Preise für Kraftstoffe in Deutschland im europäischen Vergleich im oberen Drittel liegen [Statistisches Bundesamt 2024f]. Einzig in Ländern wie Dänemark, Frankreich, Italien, Niederlande und Finnland sind die Kosten für Benzin und Diesel höher [Statistisches Bundesamt 2024f]. Im Vergleich zum Jahr 1990 haben sich die THG-Emissionen des Verkehrssektors in der EU signifikant erhöht (833 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente in 2019) [European Environment Agency 2023; Eurostat 2024a, S. 46]. Einer Prognose der Europäischen Umweltagentur zufolge werden die THG-Emissionen erst im Jahr 2032 das Niveau von 1990 unterschreiten [European Environment Agency 2023]. Dies setzt jedoch die Umsetzung der geplanten CO₂-Minderungsmaßnahmen voraus [European Environment Agency 2023]. Hinsichtlich der Verkehrsunfälle wird ersichtlich, dass europaweit die Anzahl der Unfälle und getöteten Personen im Straßenverkehr rückläufig ist [DLR et al. 2023, S. 334f.]. Dennoch wurden in Europa im Jahr 2021 über 800 000 Unfälle mit Personenschaden gemeldet, wobei knapp 20 000 Personen gestorben sind [Statistisches Bundesamt 2023]. Die Anzahl der Verkehrstoten pro eine Million Einwohner in Deutschland befindet sich unter dem Mittelwert der 27 Länder der Europäischen Union, wie Abbildung 14 veranschaulicht [Europäische Kommission 2024]. In diesem Zusammenhang zeigt eine Auswertung des VCÖ, dass Länder mit geringeren Geschwindigkeiten und schärferen Regularien weniger Verkehrstote, weniger Lärm und weniger Emissionen aufweisen [VCÖ 2021, S. 8–13].

Die steigende Weltbevölkerung (8,16 Milliarden Menschen in 2024) ist einer der Gründe für die steigende Verkehrsleistung weltweit [UN DESA (Population Division) 2024; OECD 2016, S. 115; International Transport Forum 2017]. Gemäß den Prognosen wird die Verkehrsleistung zukünftig weiter steigen [International Transport Forum 2019; UN DESA (Population Division) 2022; Arthur D. Little 2018]. Demzufolge wird prognostiziert, dass sich die Verkehrsleistung bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu 2010 auf 48 Billionen Pkm verdoppelt [Arthur D. Little 2018]. Hinsichtlich des Modal Splits existieren weltweit keine aggregierten Daten. Jedoch scheint das Automobil gegenwärtig sowie auch zukünftig das bedeutendste Verkehrsmittel zu bleiben [International Transport Forum 2019]. Gemäß den Daten

des Statistischen Bundesamtes steigt nahezu in allen Ländern die Anzahl der zugelassenen Pkw [Statistisches Bundesamt 2024e]. Die Nutzung des ÖPNV weist innerhalb der untersuchten Länder signifikante Unterschiede auf. Während in Russland 50 % und in Südkorea 39 % der Pendler öffentliche Verkehrsmittel für den Arbeitsweg nutzen, tun dies in Spanien 26 % und in den USA 10 % [Boksch 2022].

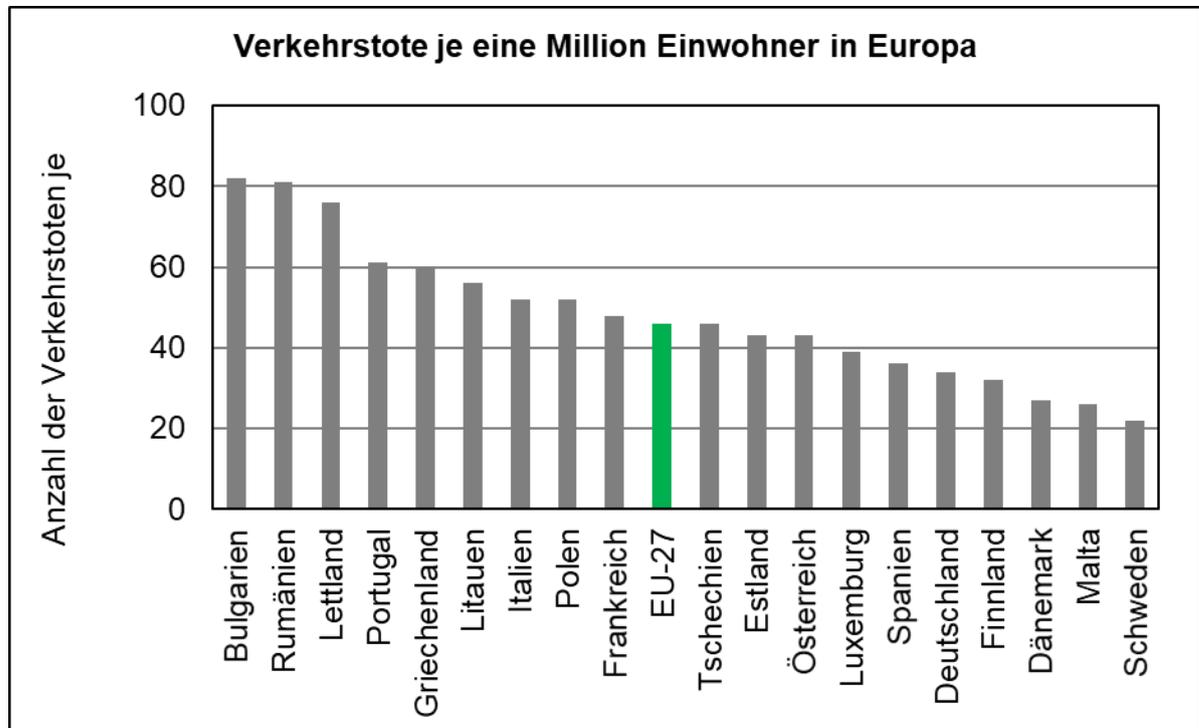


Abbildung 14: Verkehrstote je eine Million Einwohner in Europa, eigene Darstellung i. A. a. [Europäische Kommission 2024]

In Analogie zu den Entwicklungen in Deutschland und Europa ist auch eine Steigerung der Benzinpreise weltweit zu verzeichnen, wodurch die Mobilitätskosten erhöht werden [Statistisches Bundesamt 2024e]. Die THG-Emissionen des Verkehrssektors sind zwischen 1990 und 2022 durchschnittlich um 1,7 % pro Jahr gestiegen [IEA 2023b; IEA 2023a; EDGAR/JRC 2024]. Dieser Trend zeichnet sich auch für die Zukunft ab. Gemäß einer Berechnung des International Transport Forum würden selbst mit den bislang geplanten Minderungsmaßnahmen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors bis 2050 um 60 % steigen [International Transport Forum 2019]. In einem weiteren Szenario mit umfangreicheren Maßnahmen würden die THG-Emissionen im Vergleich zum vorherigen Szenario um 70% reduziert, die Klimaziele aber dennoch verfehlt werden [International Transport Forum 2019]. Des Weiteren verzeichnet die weltweite Statistik einen Rückgang der Verkehrsunfälle und Straßenverkehrstoten [Statistisches Bundesamt 2024e; International Transport Forum 2022].

Zusammenfassend weisen die vorliegenden Daten sowohl auf europäischer als auch auf globaler Ebene eine ähnliche Entwicklung auf wie in Deutschland. Es wird eine Zunahme der Verkehrsleistung beobachtet, der Pkw nimmt eine zentrale Stellung ein, die Mobilitätskosten steigen, die CO₂- bzw. die THG-Emissionen stagnieren oder steigen und die Unfallzahlen sinken.

2.3 Herausforderungen im Bereich Mobilität und Verkehr

Anhand der Ergebnisse aus Abschnitt 2.2 (bspw. Vormachtstellung des MIV) können bereits Herausforderungen für den Bereich von Mobilität und Verkehr abgeleitet werden. Jedoch müssen für eine umfassende Betrachtung der Herausforderungen auch übergeordnete, gesamtgesellschaftliche Entwicklungen einbezogen werden. Diese großen sozialen, wirtschaftlichen, politischen und technologischen Veränderungen, die über einen langfristigen Zeitraum einen globalen Einfluss auf Branchen und Gesellschaften besitzen, werden auch Megatrends genannt [Naisbitt und Aburdene 1990, S. ixf.]. In Bezug auf den Bereich von Mobilität und Verkehr werden zwölf übergeordnete Entwicklungen identifiziert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Gesamtgesellschaftliche Entwicklungen mit Einfluss auf Mobilität und Verkehr, eigene Darstellung i. A. a. [Roland Berger 2017c, S. 7–27; Krys et al. 2023, S. 10; Linthorst und de Waal 2020, S. 5–9; Zukunftsinstitut GmbH 2023a; Zukunftsinstitut GmbH 2023e; Roland Berger 2017a, S. 8–15; Zukunftsinstitut GmbH 2023d; Zukunftsinstitut GmbH 2023b; Roland Berger 2017b, S. 23]

Gesamtgesellschaftliche Entwicklungen mit Einfluss auf Mobilität u. Verkehr		
Bevölkerungswachstum	Migration	Demografischer Wandel
Urbanisierung	Individualisierung	Sicherheit
Klimawandel	Ressourcenknappheit	Neo-Ökologie
Digitale Daten	Automatisierung	Konnektivität

Es wird prognostiziert, dass die Weltbevölkerung bis 2030 auf 8,6 Milliarden Menschen und bis 2060 auf über zehn Milliarden Menschen ansteigt [Roland Berger 2017c, S. 7; UN DESA (Population Division) 2022]. Ein hohes Wachstum wird vor allem in Nigeria, Indien und Pakistan erwartet, während die Bevölkerung in Europa und Deutschland nahezu konstant bleibt [Roland Berger 2017c, S. 9f.]. Migration wird als Aus- bzw. Einwanderung von Menschen weltweit definiert und ist ein Grund für die gleichbleibende Bevölkerungsanzahl in Europa [Roland Berger 2017c, S. 19–23; Krys et al. 2023, S. 10]. Der demografische Wandel, definiert als die Überalterung der Gesellschaft, verändert vor allem die Altersstruktur in entwickelten Ländern [Roland Berger 2017c, S. 12f.]. Für diese Länder wird prognostiziert, dass im Jahr 2030 die Hälfte der Bevölkerung über 44 Jahre alt sein wird [Roland Berger 2017c, S. 12f.]. Urbanisierung beschreibt die Bevölkerungsverschiebung vom ländlichen in den urbanen Raum [Linthorst und de Waal 2020, S. 9]. Berechnungen zufolge leben 2030 82 % der Bevölkerung von entwickelten Ländern im urbanen Raum [Roland Berger 2017c, S. 23f.]. Individualisierung ist als Selbstverwirklichung der Menschen durch einen eigenen Lebensstil und eigene Wertevorstellungen definiert [Zukunftsinstitut GmbH 2023a]. Ausprägung dieser Entwicklung ist eine steigende Nachfrage nach individuellen und personalisierten Produkten oder Dienstleistungen [Linthorst und de Waal 2020, S. 9]. Sicherheit ist in Bezug auf den Menschen hinsichtlich der ökonomischen Sicherheit (bspw. Altersarmut), der gesundheitlichen Sicherheit (bspw. lebensbedrohliche Krankheiten oder Kriminalität) und der ökologischen Sicherheit (bspw. Naturkatastrophen) zu interpretieren [Zukunftsinstitut GmbH 2023e; Roland Berger 2017c, S. 27]. Außerdem sind aufgrund der zunehmenden Digitalisierung auch die Cybersicherheit und der Schutz vor Hackerangriffen notwendig, um die

Privatsphäre und die Daten von Mitarbeitern und Kunden zu schützen [Zukunftsinstitut GmbH 2023e; Roland Berger 2017b, S. 23–37].

Wie bereits in Kapitel 1 dargelegt, stellt der Klimawandel eine der größten Herausforderungen für diese Gesellschaft dar [Linthorst und de Waal 2020, S. 7; Die Bundesregierung 2019, S. 7]. An dieser Stelle wird auf eine weitere Ausführung diesbezüglich verzichtet. Die Ressourcenknappheit als eine Folge des Klimawandels, der steigenden Weltbevölkerung und des menschlichen Konsums bezieht sich vor allem auf den Energieverbrauch, der zukünftig vor allem in Asien, Afrika und Südamerika signifikant ansteigt [Roland Berger 2017a, S. 8; Roland Berger 2017d, S. 7f.]. Ein wachsendes Umweltbewusstsein und ein Nachhaltigkeitsdenken in der Gesellschaft wird durch den Begriff „Neo-Ökologie“ beschrieben [Zukunftsinstitut GmbH 2023d]. Dieser gesellschaftliche Wandel manifestiert sich in zunehmendem Maße im Konsumverhalten und hat sich zu einem signifikanten Wirtschaftsfaktor entwickelt [Zukunftsinstitut GmbH 2023d; Weber 2020, S. 256]. Zur Digitalisierung zählen drei zentrale Bestandteile: Digitale Daten, Automatisierung und Konnektivität [Roland Berger 2017b, S. 23; Nitsche und Straube 2023, S. 2f.]. Unter dem Begriff „digitale Daten“ ist das Erfassen, Verarbeiten und Analysieren großer Datenmengen (Big Data, Internet of Things) zu verstehen [Roland Berger 2017b, S. 23]. Durch die Kombination von traditionellen Technologien mit künstlicher Intelligenz (KI) entstehen Systeme, die automatisiert arbeiten, wie bspw. Drohnen oder automatisierte Fahrzeuge [Roland Berger 2017b, S. 23; Linthorst und de Waal 2020, S. 5; Kryš et al. 2023, S. 55]. Konnektivität ist als Vernetzung auf Basis digitaler Infrastrukturen definiert [Zukunftsinstitut GmbH 2023b]. Dies beinhaltet die Vernetzung zwischen Unternehmen, die Kommunikation zwischen Menschen sowie die Interaktion zwischen Menschen und Maschinen [Roland Berger 2017b, S. 23; Zukunftsinstitut GmbH 2023b].

In Anbetracht der vielfältigen, übergeordneten und gesamtgesellschaftlichen Entwicklungen, mit denen die Mobilität konfrontiert ist, werden eine Vielzahl von Herausforderungen erkennbar [Schneidewind 2019, S. 225; Heggenberger und Mayer 2018, S. 1]. Zur besseren Übersicht werden diese anhand der Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung in ökonomische, ökologische und soziale Herausforderungen eingeteilt [van Dieren 1995, S. 120].

2.3.1 Ökonomische Herausforderungen

Die ökonomische Herausforderung besteht primär darin, ein kostengünstiges Verkehrsangebot für alle Menschen zu realisieren [Statistisches Bundesamt 2021]. In der jüngsten Vergangenheit sind die Kosten für alle Verkehrsmittel angestiegen (siehe auch Abschnitt 2.2) [Wagner 2018]. Beispielsweise haben sich auch aufgrund der Ressourcenknappheit die Nutzungskosten eines Pkw erhöht [ADAC e.V. 2023a; Roland Berger 2017d, S. 6–10]. Grund dafür sind gestiegene Benzinpreise, aber auch höhere Anschaffungspreise der Fahrzeuge sowie höhere Preise für Ersatzteile oder Stellplatzgebühren [ADAC e.V. 2023a; DAT 2024, S. 15; Statistisches Bundesamt 2021]. Zusätzlich verursacht der Erhalt der Straßeninfrastruktur jährlich einen Betrag von 4,5 Milliarden Euro [BMVI 2016a, S. 27]. Alternativen, wie bspw. Pkw mit elektrischem Antrieb, zeichnen sich weiterhin durch hohe Anschaffungskosten und hohe Kosten für die Ladeinfrastruktur aus, wodurch Nutzer zusätzlich belastet

werden [Business Insider Deutschland GmbH 2023; Schubert 2024; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. 2024]. Selbst beim Radverkehr sind die Verbraucherpreise gestiegen [ADAC e.V. 2023a; Agora Verkehrswende 2023, S. 2]. Der ÖV wird analog zum MIV von steigenden Kraftstoffpreisen beeinflusst, jedoch wird durch die Einführung des Deutschlandtickets das Bus- und Bahnfahren in Deutschland für den Verbraucher günstiger [ADAC e.V. 2023a; Agora Verkehrswende 2023, S. 5]. Niedrige Ticketpreise können zwar einen Anreiz für Nutzer geben, jedoch ist das Preis-Leistungs-Verhältnis des ÖV für den langfristigen Erfolg entscheidend [ADAC e.V. 2023a]. Dabei ist die Effizienzsteigerung der öffentlichen Verkehrsmittel im Sinne von Zuverlässigkeit, Pünktlichkeit, Kosteneffizienz und Auslastung eine Herausforderung [Statistisches Bundesamt 2019b; Sustainable Mobility for All 2019, S. 18]. Aufgrund der zunehmenden Urbanisierung ist speziell in ländlichen Siedlungsstrukturen ein ÖV-Angebot nicht wirtschaftlich umsetzbar, da die Anzahl potenzieller Fahrgäste zu niedrig ist [Jürgens 2020, S. 39f.; Canzler und Knie 2007; Roland Berger 2017c, S. 27]. Dies hat zur Folge, dass im ländlichen Raum das ÖV-Angebot mit einer niedrigen Taktfrequenz ausgestaltet wird und die Fahrgäste längere Fahrwege und Umsteigezeiten in Kauf nehmen müssen [Jürgens 2020, S. 39f.]. Weiterhin ist das ÖV-Angebot nicht auf Flexibilität ausgelegt [Jürgens 2020, S. 40]. Besonders aufgrund der steigenden Individualisierung in der Gesellschaft werden individuelle und flexible Verkehrsangebote benötigt, um die Wirtschaftlichkeit des ÖV zu verbessern [Motzer 2023; Zukunftsinstitut GmbH 2023a].

Volkswirtschaftlich betrachtet erhöht sich durch das Bevölkerungswachstum, aber vor allem durch die zunehmende Urbanisierung, die Anzahl der Pkw und das Staurisiko [Marner 2006, S. 199; Roland Berger 2017c, S. 7–27]. Gemäß einer Studie des ADAC standen deutsche Autofahrer in 2022 ca. 333 000 h im Stau [ADAC e.V. 2023b]. Die längere Reisedauer führt dabei zu Zeitverlusten der Verkehrsteilnehmer [Marner 2006, S. 200]. Werden diese Zeitverluste als Opportunitätskosten gewertet, entstehen durch Staus hohe Wohlfahrtsverluste [Marner 2006, S. 200]. Durch die längere Fahrzeit aufgrund der Stausituationen erhöhen sich zusätzlich die Treibstoff- und Betriebskosten der Fahrzeuge [Marner 2006, S. 200]. Gemäß einer Auswertung von INRIX entstanden in Berlin in 2020 Staukosten in Höhe von 559 Millionen Euro [INRIX 2021; Roland Berger 2017c, S. 27]. Ergänzend sind die externen Klimafolgekosten zu berücksichtigen, die durch Luftschadstoffe und THG-Emissionen verursacht werden [Umweltbundesamt 2022a]. Diese volkswirtschaftlichen Kosten zukünftig zu reduzieren ist eine weitere Herausforderung.

2.3.2 Ökologische Herausforderungen

Die ökologischen Herausforderungen resultieren vorrangig aus dem Klimawandel sowie der Ressourcenknappheit und dem Ziel, THG-Emissionen, Energieverbräuche und Ressourcen zu reduzieren [Umweltbundesamt 2024a; Sustainable Mobility for All 2019, S. 19; Agora Verkehrswende 2017, S. 8; Roland Berger 2017a, S. 7–15]. Nicht nur der Klimawandel profitiert von sinkenden THG-Emissionen, denn durch eine geringere Luftverschmutzung können Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen reduziert werden [Sustainable Mobility for All 2019, S. 19; BAFU 2021]. Gemäß Abschnitt 2.2 steigt die Verkehrsleistung weltweit an. Eine Reduktion der THG-Emissionen, des Energieverbrauchs und der Ressourcen ist demnach nur möglich,

wenn eine nachhaltige Nutzung der Verkehrsmittel erfolgt [Sustainable Mobility for All 2019, S. 19; Agora Verkehrswende 2017, S. 3]. Vor diesem Hintergrund liegt im Verkehrssektor die Herausforderung darin, den Anteil von Fahrzeugen, die geringere CO₂-Emissionen verursachen (nachhaltige Verkehrsmittel), zu erhöhen [European Environment Agency 2024; Agora Verkehrswende 2017, S. 52–54]. Da die Verkehrsmittel des ÖV weniger THG-Emissionen pro Pkm als der MIV verursachen, ist eine Verschiebung des Modal Splits zugunsten des ÖV ein Lösungsansatz, bzw. eine weitere Herausforderung [Umweltbundesamt 2022d; Agora Verkehrswende 2017, S. 44–46]. Die Einführung neuer, nachhaltiger Mobilitätsangebote wird dabei durch ein steigendes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung begünstigt (Neo-Ökologie) [Zukunftsinstitut GmbH 2023d; Weber 2020, S. 257].

Zusätzlich wird durch den Verkehr Lärm erzeugt, der vor allem in Ballungsräumen und Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen auftritt [Umweltbundesamt 2022b; Claßen 2013, S. 223; Agora Verkehrswende 2017, S. 8]. Gemäß der EU-Umgebungsrichtlinie sind 2,3 Millionen Menschen in Deutschland ganztägig und nachts zu hohen Lärmpegeln ausgesetzt [Umweltbundesamt 2022b]. Die Folge können u. a. Schlafstörungen, Hörschädigungen, Bluthochdruck oder Herzinfarkte sein [Claßen 2013, S. 226; Hornberg et al. 2013, S. 179]. Aus diesem Grund besteht eine weitere Herausforderung darin, den Lärmpegel des Verkehrs bspw. durch Lärminderung am Kraftfahrzeug, lärmindernde Fahrbahnbeläge oder Geschwindigkeitsbegrenzungen zu reduzieren [Umweltbundesamt 2022b].

Zuletzt sind der Flächenverbrauch und zerschnittene Flächen weitere Begleiterscheinungen des Verkehrs [Agora Verkehrswende 2017, S. 8]. Gemessen an den beförderten Personen werden beim MIV fünfmal mehr Quadratmeter Fläche auf den Straßen benötigt als beim Bus (siehe Abbildung 15) [Allianz pro Schiene e. V. 2020].

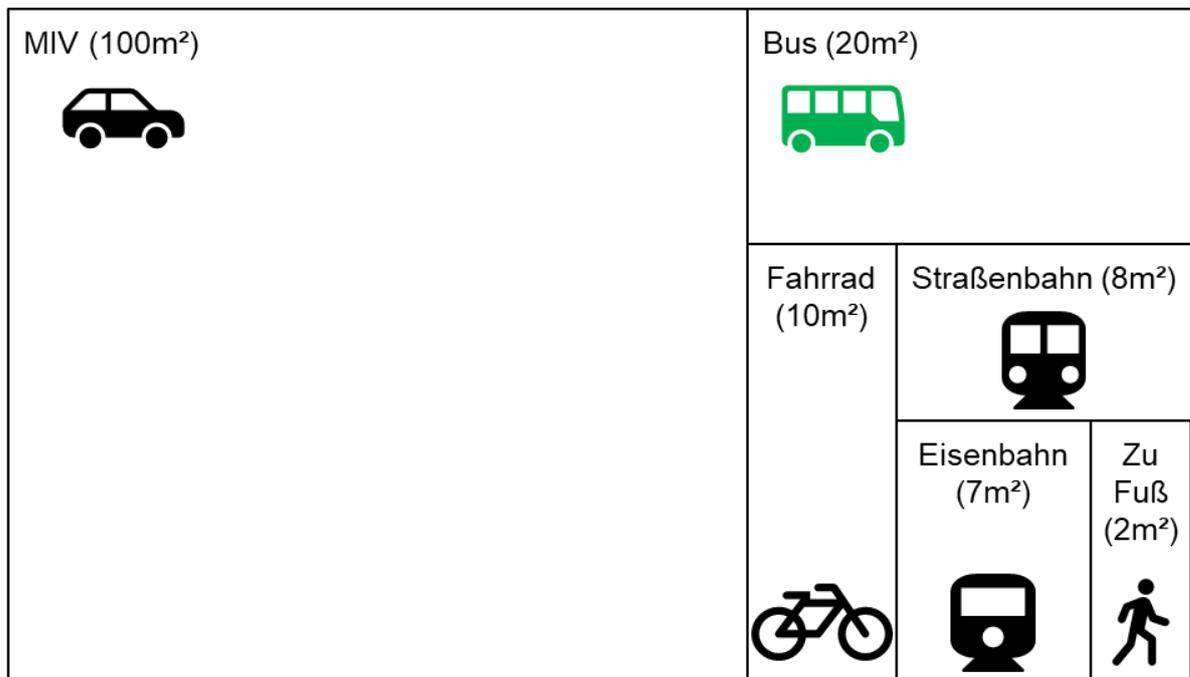


Abbildung 15: Flächenverbrauch in Quadratmeter pro beförderter Person nach Verkehrsmitteln, eigene Darstellung i. A. a. [Allianz pro Schiene e. V. 2020]

Versiegelte Verkehrsflächen führen zu klimatischen Veränderungen (u. a. Überhitzung), zur Zerstörung der Bodenfruchtbarkeit oder zur Abholzung von Wäldern, wodurch der Klimawandel verstärkt wird [European Wilderness Society Gemeinnütziger Verein 2021; Umweltbundesamt 2017]. Es existieren zwar verschiedene Strategien zum Einsparen oder zum Recycling von Flächen [Umweltbundesamt 2017]. Jedoch konnte der zunehmende Flächenbedarf des Verkehrs in Deutschland bislang nicht gestoppt werden [Umweltbundesamt 2024d]. Demnach stellt diese Thematik auch in Zukunft eine Herausforderung dar.

2.3.3 Soziale Herausforderungen

Die Gewährleistung der Daseinsvorsorge ist eine der sozialen Herausforderungen, denen sich die Mobilität gegenüberstellt [Schwedes und Ringwald 2021, S. 44]. „Daseinsvorsorge umfasst die öffentlichen Güter und Dienstleistungen, die dem Gemeinwohl und der Lebensentfaltung der Menschen dienen“ [Dehne 2019, S. 56]. Dementsprechend zählen Mobilität und der öffentliche Verkehr zur Aufgabe der Daseinsvorsorge, die sich auf die Lebensqualität und Attraktivität einer Region auswirkt [Dehne 2019, S. 60f.; Schwedes und Ringwald 2021, S. 23]. Durch den demografischen Wandel und die Urbanisierung wird vor allem die Daseinsvorsorge in ländlichen Räumen erschwert [Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH 2024; MEDIA CONSULTA Deutschland GmbH 2011, S. 2–5]. Dort führt die rückläufige Bevölkerung zu sinkenden Fahrgastzahlen (siehe Abschnitt 2.3.1), so dass ein bedarfsgerechtes ÖPNV-Grundangebot erforderlich wird [MEDIA CONSULTA Deutschland GmbH 2011, S. 16]. Deshalb liegt die Aufgabe der staatlichen Verwaltung darin, Mobilität und Verkehr derart zu gestalten, dass die Bevölkerung Zugang zu nachhaltigen Verkehrsmitteln (wie bspw. dem ÖV) erhält und nahtlose Mobilitätsketten geschaffen werden [Schwedes und Ringwald 2021, S. 43f.; Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH 2024; MEDIA CONSULTA Deutschland GmbH 2011, S. 16; Agora Verkehrswende 2017, S. 36].

Insbesondere der ÖV wird mit dem sich abzeichnenden Fachkräftemangel konfrontiert. Bis 2030 werden in der Mobilitätsbranche in Deutschland 80 000 Beschäftigte in den Ruhestand gehen. Diese Beschäftigten zu kompensieren und darüber hinaus neue Mitarbeiter für eine Angebotserweiterung einzustellen, stellt eine weitere Herausforderung speziell für Verkehrsunternehmen dar. [VDV 2024b]

Der Anteil der älteren Menschen an der Gesamtbevölkerung wird bedingt durch den demografischen Wandel steigen [Roland Berger 2017c, S. 13f.; Krcmar et al. 2017, S. 43]. Aus diesem Grund sind vor allem Verkehrsangebote im ÖV für ältere aber auch für arme und benachteiligte Menschen zu etablieren (bspw. höhere Zugänglichkeit) [Sustainable Mobility for All 2019, S. 17]. Weiterhin sind auch verschiedene Kulturen und unterschiedliche Sprachen zu berücksichtigen, um den Anforderungen der Migration gerecht zu werden [Sustainable Mobility for All 2019, S. 17]. Insbesondere die Zugänglichkeit und Barrierefreiheit öffentlicher Verkehrsmittel stellt eine weitere Herausforderung dar [Krcmar et al. 2017, S. 43; Sustainable Mobility for All 2019, S. 17]. Diese Herausforderung bezieht sich dabei auf das gesamte System bestehend aus ÖV-Netzen, Fahrzeugen, Haltestellen, Zugangsmöglichkeiten und Informationsdiensten [Gipp 2015, S. 31–33]. Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung ist es unerlässlich, die Zugänglichkeit zu Buchungssystemen der Verkehrsangebote

(Ticketautomaten, Smartphone-Apps) für alle Menschen, auch ohne Smartphone oder Internetzugang, angemessen zu gestalten [Krcmar et al. 2017, S. 46].

Obwohl die Unfallzahlen rückläufig sind (siehe Abschnitt 2.2), bleibt die Erhöhung der verkehrlichen Sicherheit für alle Verkehrsangebote und eine weitere Reduzierung von Todesfällen, Verletzungen und Unfällen eine zukünftige Aufgabe [Sustainable Mobility for All 2019, S. 18; Zukunftsinstitut GmbH 2023e]. Insbesondere bei der Einführung neuer Technologien, wie dem automatisierten Fahren, ist der Sicherheitsaspekt in den Vordergrund zu stellen [Krcmar et al. 2017, S. 81; Zukunftsinstitut GmbH 2023e; Zukunftsinstitut GmbH 2023c]. Darüber hinaus ist die Sicherheit in Bezug auf die Nutzung digitaler Informations- und Buchungsdienste zu gewährleisten [Krcmar et al. 2017, S. 24; Zukunftsinstitut GmbH 2023e]. Privatsphäre, Datenschutz und Cybersicherheit sind in diesem Zusammenhang zu nennen [Krcmar et al. 2017, S. 34; Roland Berger 2017b, S. 37–40; Zukunftsinstitut GmbH 2023e].

2.3.4 Zusammenfassende Gegenüberstellung

Abschließend werden die verschiedenen Herausforderungen in Tabelle 2 gesamtseitlich dargestellt. Durch die Dreiteilung in ökonomische, ökologische und soziale Herausforderungen wird erkennbar, dass gegensätzliche Herausforderungen existieren, die zu Dilemmata führen [Schneidewind 2019, S. 240f.; Brodmann und Spillmann 2000, S. 4].

Tabelle 2: Zusammenfassung der Herausforderungen im Bereich Mobilität und Verkehr, eigene Darstellung i. A. a. [Statistisches Bundesamt 2021; Sustainable Mobility for All 2019, S. 17–19; Jürgens 2020, S. 39f.; Marner 2006, S. 199f.; Umweltbundesamt 2024a; Roland Berger 2017a, S. 7–15; Agora Verkehrswende 2017, S. 44–54; Umweltbundesamt 2022b; Umweltbundesamt 2024d; Schwedes und Ringwald 2021, S. 44; VDV 2024b; Krcmar et al. 2017, S. 36–46; Zukunftsinstitut GmbH 2023e]

Ökonomische Herausforderungen	Ökologische Herausforderungen	Soziale Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Kostengünstige Verkehrsangebote bereitstellen • Effizienz und Flexibilität der Verkehrsmittel speziell im ländlichen Raum steigern • Volkswirtschaftliche Schäden (Stau, Klimafolgekosten) reduzieren 	<ul style="list-style-type: none"> • THG-Emissionen, Energieverbräuche und Ressourcen reduzieren • Anteil von CO₂-armen Fahrzeugen erhöhen • Anteil des MIV reduzieren • Lärmpegel des Verkehrs reduzieren • Flächenverbrauch des Verkehrs reduzieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Daseinsvorsorge mit nachhaltigen Verkehrsmitteln gewährleisten • Beschäftigtenzahl des ÖPNV (u. a. Fahrer) halten/erhöhen • Mobilitäts- und Verkehrsangebote allgemein zugänglich und barrierefrei gestalten • Physische und digitale Sicherheit gewährleisten

Tabelle 2 veranschaulicht, dass im Bereich Mobilität und Verkehr konkurrierende Herausforderungen existieren. Die Reduktion der Mobilitätskosten steht dem Anspruch gegenüber, die Emissionen zu reduzieren und das Angebot zu erweitern [Schneidewind 2019, S. 241; Planungsbüro für Verkehr Bornkessel & Markgraf et al. 2017, S. 26–31; Brodmann und Spillmann 2000, S. 11]. In der zunehmenden Digitalisierung (digitale Daten, Automatisierung, Konnektivität) wird dabei die Chance

gesehen, diese gegensätzlichen Ausrichtungen zu vereinen und den Herausforderungen zu begegnen [Canzler und Knie 2021, S. 293f.; Wolking 2021, S. 118; Roland Berger 2017b, S. 23].

2.4 Zukünftige Lösungsansätze im Bereich Mobilität und Verkehr

Um den sich gegenüberstehenden Herausforderungen adäquat zu begegnen, ist eine grundlegende Transformation der Mobilität und des Verkehrs in der Zukunft unabdingbar [Agora Verkehrswende 2017, S. 3; Shukla et al. 2022, S. 32; Schneidewind 2019, S. 224–227; Agora Verkehrswende 2020a, S. 23f.]. In der Literatur wird zukünftige Mobilität als effizient, organisiert, elektrisch, automatisiert, vernetzt und sicher sowie gemeinschaftlich und universell nutzbar beschrieben [Agora Verkehrswende 2017, S. 22–60; Knie et al. 2019, S. 11–20; Kagermann 2017, S. 359–366; Sustainable Mobility for All 2019, S. 16–21]. Effizienz bedeutet, so viel Mobilität wie möglich anzubieten und gleichzeitig so wenig Ressourcen wie möglich dafür einzusetzen [Agora Verkehrswende 2017, S. 22]. Dafür ist es erforderlich, dass der Verkehr flüssig, sozial gerecht und nachhaltig bspw. durch die Gesetzgebung organisiert wird [Knie et al. 2019, S. 12]. Fahrzeuge zukünftig elektrisch und automatisiert zu betreiben, ist ein Schlüssel zur Reduzierung der THG-Emissionen und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit [Agora Verkehrswende 2017, S. 45–52; Kagermann 2017, S. 359f.; Sustainable Mobility for All 2019, S. 18f.]. Die Vernetzung kann in zweierlei Hinsicht ausgelegt werden. Einerseits im Sinne der Vernetzung von Fahrzeugen zur besseren Steuerung des Verkehrsflusses und zur Erhöhung der Sicherheit [Agora Verkehrswende 2017, S. 45f.; Kagermann 2017, S. 363f.]. Andererseits bietet die Vernetzung die Möglichkeit, sämtliche Mobilitätssysteme auf einer digitalen Mobilitätsplattform (Mobility as a Service (MaaS)) zu verknüpfen [Agora Verkehrswende 2017, S. 46–48; Kagermann 2017, S. 364f.; Knie et al. 2019, S. 13]. Dies ist eine Voraussetzung, damit universell (jede Nutzergruppe) Zugang zu einer Vielzahl von Verkehrsangeboten ermöglicht wird [Kagermann 2017, S. 364f.; Agora Verkehrswende 2017, S. 46–48; Sustainable Mobility for All 2019, S. 17]. Das gemeinschaftliche Teilen von Fahrzeugen, anstelle des Besitzens, ist ein notwendiger Wandel in der Mobilitätseinstellung der Bevölkerung, um den zukünftigen Herausforderungen zu begegnen [Agora Verkehrswende 2017, S. 44f.; Knie et al. 2019, S. 12]. Diese Veränderungen werden unter den Begriffen „Verkehrswende“ bzw. „Mobilitätswende“ zusammengefasst [Ritz 2018, S. 229–231].

Im Folgenden werden die bestehenden Maßnahmen und Lösungsansätze für die Mobilitäts- und Verkehrswende einer eingehenden Betrachtung unterzogen. Für eine Aufzählung der Maßnahmen bieten sich verschiedene Gruppierungen an. Beispielsweise teilen die Fokusgruppe Intelligente Mobilität oder auch das Umweltbundesamt die Maßnahmen in sieben bzw. acht Handlungsfelder/Bausteine ein [Fokusgruppe Intelligente Mobilität 2017, S. 2; Umweltbundesamt 2024c]. Im Rahmen der transformative Literacy (Zukunftskunst) wählt Schneidewind für die Beschreibung von gesellschaftlichen Transformationsprozessen vier Dimensionen aus [Schneidewind 2019, S. 38–40]. Dazu zählen die technologische, ökonomische, institutionelle und kulturelle Dimension (siehe Abbildung 16), welche die unterschiedlichen Stakeholder (Unternehmen, Zivilgesellschaft, Politik und Wissenschaft) einbinden [Schneidewind

2013, S. 82–86]. Aufgrund der Allgemeinen Gültigkeit dieses Ansatzes für Transformationsprozesse sowie der Einbindung verschiedener Perspektiven werden im Folgenden die zukünftigen Lösungsansätze im Bereich von Mobilität und Verkehr anhand dieser Dimensionen beschrieben [Schneidewind 2019, S. 38–42; Ritz 2018, S. 231f.; Agora Verkehrswende 2019, S. 9f.].

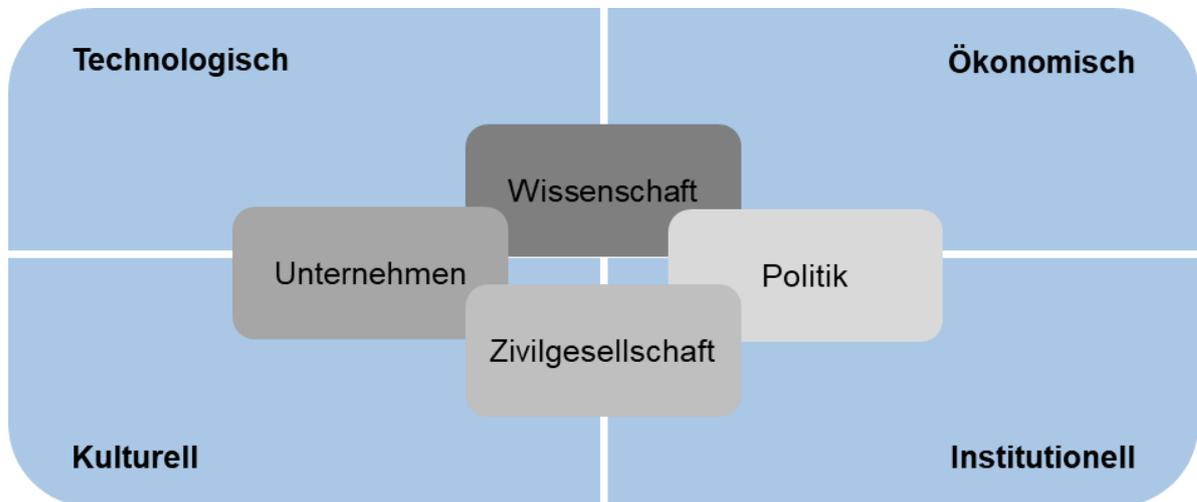


Abbildung 16: Vier Dimensionen der Zukunftskunst, eigene Darstellung i. A. a. [Schneidewind 2013, S. 82–86]

Bei der Beschreibung der Dimensionen wird sich gemäß der Zielsetzung dieses Kapitels vorwiegend auf das automatisierte Fahren und die Verknüpfungen zu anderen technologischen Ansätzen bezogen.

2.4.1 Technologische Dimension

Unter der technologischen Dimension werden technologische Maßnahmen und Lösungsansätze aufgelistet, welche zur Bewältigung der Herausforderungen des Mobilitätssektors eingesetzt werden können [Schneidewind 2019, S. 39]. Gemäß der Literaturanalyse werden folgende technologische Lösungsansätze identifiziert:

- Ausbau der Elektromobilität (Batterieelektrisch und Wasserstoff)
 - Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge
 - Einrichtung eines dezentralen Energiesystems (u. a. Vehicle to Grid, Sektorenkopplung)
- Ausbau der Dienstleistungen im Bereich Fahrdienste und Sharing-Angebote (u. a. Ridesharing, Carsharing, MaaS)
- Ausbau des öffentlichen Verkehrsangebots (u. a. On-Demand-Verkehr, kleinere Gefäßgrößen, virtuelle Haltestellen, Mobilitätsstationen)
- Einführung und Ausbau des automatisierten Fahrens
- Digitalisierung der Verkehrsinfrastrukturen und Vernetzung
- Ausbau einer intelligenten Verkehrssteuerung
- Etablierung einer verkehrsträgerübergreifenden Datenverfügbarkeit
- Breitband- und Mobilfunkausbau [Schneidewind 2019, S. 227–230; von Mörner 2017, S. 296; ADAC e.V. 2023a; atene KOM GmbH 2021, S. 12–14; Hannon et al. 2016, S. 15–22; VCÖ 2023, S. 12–15; Agora Verkehrswende 2020b, S. 35f.; Agora Verkehrswende 2017, S. 45–49; Lemmer 2019, S. 57–67; Herget et al. 2019, S. 4; VCÖ 2021, S. 28]

Mit dem Einsatz automatisierter Fahrzeuge und speziell automatisierter Busse können Kostenvorteile mit Flexibilität und Sicherheit verknüpft werden, sodass die Fahrzeuge preisgünstig eingesetzt werden können und damit u. a. neue Mobilitätsangebote (bspw. die Bedienung im ländlichen Raum) ermöglichen [Rudschies und Kroher 2024; Bösch et al. 2018, S. 82–84; Barrillère-Scholz et al. 2020, S. 16f.; Agora Verkehrswende 2017, S. 42–45]. Weiterhin wird mit dem Durchbruch beim automatisierten Fahren das Verständnis von Mobilität und die Ausgestaltung von Verkehrsmitteln revolutioniert [Schneidewind 2019, S. 228; Ritz 2018, S. 28]. Die Nutzung von Flotten automatisierter Fahrzeuge, die ein individuelles Angebot mit geringen Kosten ermöglichen, können zukünftig private Pkw ersetzen [Schneidewind 2019, S. 228; Ritz 2018, S. 103f.]. Von der Einführung automatisierter Fahrzeuge profitieren dementsprechend insbesondere die digitalen Mobilitätsdienstleistungen (ÖV, Fahrdienste, Sharing-Angebote) [von Mörner 2017, S. 296; Knie et al. 2019, S. 22f.]. Beispielsweise können Verkehrsdienstleistungen, wie Ridesharing oder Carsharing weiterentwickelt und auf Gebiete außerhalb des urbanen Raums ausgeweitet werden [ADAC e.V. 2023a; Zukunftsinstitut GmbH 2023c]. Neben den On-Demand-Angeboten, die durch das automatisierte Fahren im Verkehr gefördert werden, ermöglicht die Digitalisierung im ÖV weitere Innovationen wie bspw. individuelle Routenführung, elektronisches Ticketing, virtuelle Haltestellen und dynamische Fahrgastinformationen [Schneidewind 2019, S. 228; Knie et al. 2019, S. 21f.; Agora Verkehrswende 2020b, S. 35f.; VCÖ 2021, S. 28]. Durch diese Entwicklung vermischen sich die Grenzen zwischen öffentlicher und individueller Mobilität zu einem integrierten Gesamtangebot. Dies führt letztlich zu einem neuen Verkehrsmarkt, dem „Individuellen öffentlichen Verkehr“, der auch unter dem Oberbegriff „Digitale Mobilitätsdienstleistungen“ zusammengefasst werden kann [Weber 2020, S. 235; Barrillère-Scholz et al. 2020, S. 16; Schneidewind 2019, S. 228; Wolking 2021, S. 126; VCÖ 2023, S. 12].

Darüber hinaus kann auch die Elektromobilität vom Durchbruch des automatisierten Fahrens profitieren [Ritz 2018, S. 113f.]. Die Elektromobilität, bestehend aus batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen, führt zu einer direkten Dekarbonisierung des Verkehrs [Schneidewind 2019, S. 227; Weber 2020, S. 84f.; BMUB 2016, S. 53]. Dabei können ökologische Entlastungen aber nur erreicht werden, wenn der Strom aus regenerativen Energiequellen erzeugt wird [Schneidewind 2019, S. 227–230; ADAC e.V. 2023a]. Der Einsatz elektrisch betriebener Fahrzeuge kann im Kontext des automatisierten Carsharing Anwendung finden, bei dem in erster Linie kurze Fahrten angeboten werden [Ritz 2018, S. 112]. In diesem Szenario erweist sich die begrenzte Reichweite der Elektrofahrzeuge als vernachlässigbar [Ritz 2018, S. 112]. Zusätzlich können auch längere Fahrten abgedeckt werden, indem beim Carsharinganbieter ein zusätzliches automatisiertes Elektrofahrzeug gebucht wird und der Nutzer in dieses umsteigt [Ritz 2018, S. 112]. Insbesondere in Bezug auf den Fahrkomfort im Stadtverkehr, der durch eine hohe Zahl an Stop-and-Go-Phasen gekennzeichnet ist, bieten Pkw mit elektrischem Antrieb durch Rekupe-ration und geräuscharmes Fahren Vorteile [Ritz 2018, S. 113]. Des Weiteren führt der geringere Wartungsaufwand von Elektrofahrzeugen zu einer Kostenreduktion für Anbieter von automatisiertem Carsharing [Ritz 2018, S. 113f.]. Die Etablierung von elektrischem Carsharing ist jedoch von einer ausreichend ausgebauten Ladeinfrastruktur abhängig [Schneidewind 2019, S. 230; ADAC e.V. 2023a; Ritz 2018, S. 112].

Zusammenfassend wird ersichtlich, dass automatisierte Fahrzeuge einen signifikanten Beitrag zur Weiterentwicklung technologischer Ansätze in den Bereichen Elektromobilität, Fahrdienste, Sharing- und ÖPNV-Angebote leisten [Schneidewind 2019, S. 224–230; Umweltbundesamt 2024c; ADAC e.V. 2023a; Agora Verkehrswende 2017, S. 42–47; Knie et al. 2019, S. 33f.]. Neue Mobilitätsalternativen sind dabei eine Voraussetzung, den Modal Split zu verändern und die Verkehrsbelastungen bei gleichbleibendem Mobilitätsniveau zu reduzieren [Schneidewind 2019, S. 224–230; Witzke 2016, S. 5f.; Umweltbundesamt 2024c; ADAC e.V. 2023a; Agora Verkehrswende 2017, S. 42–47]. Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge verspricht demnach einen Beitrag zur Bewältigung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Herausforderungen zu leisten (siehe Abschnitt 2.3) [Schneidewind 2019, S. 224–230; Umweltbundesamt 2024c; ADAC e.V. 2023a; Agora Verkehrswende 2017, S. 42–47].

2.4.2 Ökonomische Dimension

Die ökonomische Dimension bezieht sich auf eine wirtschaftliche Einordnung der technologischen Lösungen, wobei das gesamte Wirtschaftssystem betrachtet wird [Schneidewind 2019, S. 39f.]. Der Erfolg einer Erfindung ist dabei auch von den zu erwartenden Kosten und der Marktnachfrage abhängig [Ritz 2018, S. 120]. Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, dass nachhaltige Verkehrsangebote für sämtliche Bevölkerungsgruppen zu bezahlbaren Konditionen zur Verfügung gestellt werden [ADAC e.V. 2023a]. Um den Anforderungen der technologischen Lösungen gerecht zu werden, ist es für Unternehmen und Organisationen deshalb unerlässlich, geeignete Geschäftsmodelle zu entwickeln [Schneidewind 2019, S. 230].

Die Einführung des automatisierten Fahrens verändert die Automobilindustrie [Ritz 2018, S. 134]. Neben den etablierten Automobilherstellern treten zunehmend Zulieferbetriebe (Bosch, Continental), Medienfirmen (Samsung), IT-Unternehmen (Google, Waymo) oder auch Mobilitätsdienstleister (Uber, Lyft) als neue Marktteilnehmer auf [Mitteregger et al. 2020, S. 16; Bormann et al. 2018, S. 14–19; Wong et al. 2018, S. 4]. Zusätzlich stellt vor allem der Wandel vom Besitzen zum Nutzen von Fahrzeugen eine große Veränderung für die Geschäftsmodelle der Automobilhersteller dar [Zingrebe et al. 2016, S. 49f.]. Darüber hinaus wird die Ausstattung der Fahrzeuge als ein Faktor angesehen, der durch das automatisierte Fahren an Bedeutung gewinnt [Ritz 2018, S. 136f.]. Die Fahrgäste zu unterhalten oder Sehenswürdigkeiten zu beschreiben, könnte in Zukunft wichtiger sein, als die Geschwindigkeit im Fahrzeug anzuzeigen [Ritz 2018, S. 138]. Dies könnte zu neuen Geschäftsmodellen führen, da die Werbung in automatisierten Fahrzeugen die Kaufentscheidungen der Fahrgäste beeinflussen kann [Ritz 2018, S. 139].

Insbesondere Google, Waymo, Uber und Lyft setzen auf den Durchbruch des automatisierten Fahrens, damit das eigene Geschäftsmodell des Ridesharings rentabel wird [Schneidewind 2019, S. 231; Mitteregger et al. 2020, S. 26]. Diese Dienstleistungen werden ausschließlich über digitale Plattformen angeboten und für den Service werden kleine Fahrzeugeinheiten bedarfsorientiert eingesetzt [Wong et al. 2018, S. 2f.]. Das Produktportfolio der oben genannten Unternehmen wird dabei kontinuierlich an die Kundenbedürfnisse angepasst, sodass zusätzlich auch Transportdienstleistungen angeboten werden [Weber 2020, S. 212].

Ab der Marktreife weisen geteilte automatisierte Fahrzeuge niedrigere Kosten pro Kilometer als der MIV auf (siehe Abbildung 17) [Bösch et al. 2018, S. 82; Biletska et al. 2023, S. 6–9]. Besonders im ÖV würde der fahrerlose Betrieb deshalb zu einer Kostensenkung führen, wodurch das Angebot ausgeweitet werden kann [Lemmer 2019, S. 42]. Prognosen zeigen, dass die Umstellung von klassischen Bedarfsangeboten auf digitale Systeme für Bedarfsverkehre, welche durch automatisierte Fahrzeuge unterstützt werden, den ÖV attraktiver und speziell in nachfrageschwachen Räumen auch wirtschaftlicher macht [Baumeister und Meier-Berberich 2018, S. 291; Böhler et al. 2009, S. 65; Knie et al. 2019, S. 22f.; von Mörner 2017, S. 296]. Durch die Kombination vom automatisierten ÖV mit Fahrdiensten und Sharing-Angeboten kann ein neues Geschäftsmodell, bspw. eine Karte für alle Mobilitätsangebote, am Markt etabliert werden [VCÖ 2023, S. 15; Eckhardt et al. 2018, S. 81; Wong et al. 2018, S. 10; Agora Verkehrswende 2017, S. 44f.].

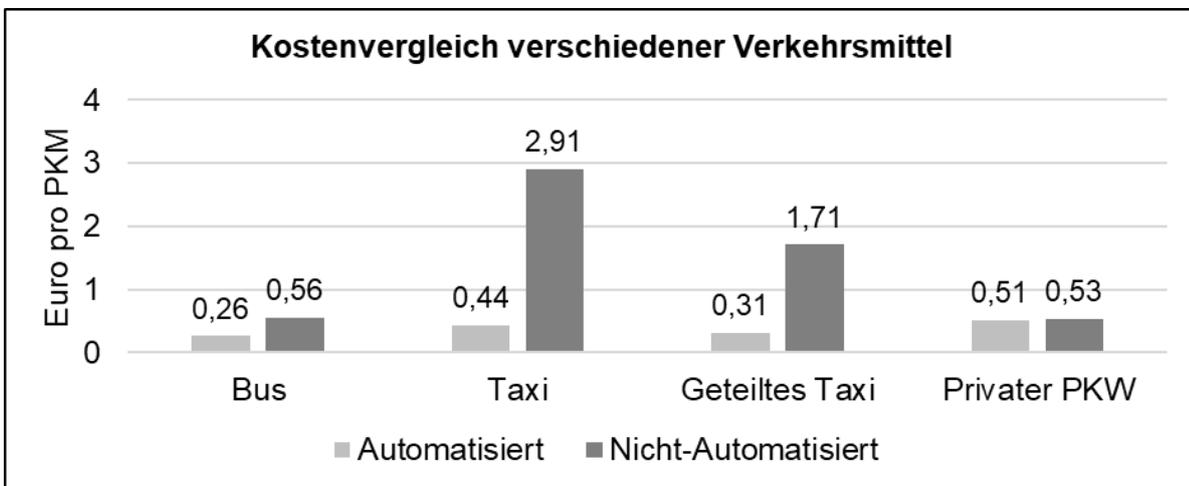


Abbildung 17: Kostenvergleich verschiedener Verkehrsträger mit und ohne Automatisierung, eigene Darstellung i. A. a. [Bösch et al. 2018, S. 82]

Insbesondere in Bezug auf die Elektromobilität werden etablierte Automobilhersteller mit großen Herausforderungen konfrontiert [Schneidewind 2019, S. 230f.]. Das Know-How bzgl. des Verbrennungsmotors sowie die großen Gewinne durch den Verkauf von SUVs erschweren die Umstellung der eigenen Geschäftsmodelle [Schneidewind 2019, S. 231]. Vor allem die Batterie als kostenintensivstes Bauteil erhöht die Produktionskosten der Elektrofahrzeuge [Zingrebe et al. 2016, S. 48f.]. Die Betriebskosten können aber durch geringe Kraftstoffpreise (Strompreise) und geringe Wartungskosten reduziert werden [Ritz 2018, S. 113f.]. Der Einsatz von Elektroautos im Bereich des automatisierten Car- oder Ridesharings kann deshalb ein wachsender Absatzmarkt sein und ein neues Geschäftsmodell bieten [Ritz 2018, S. 113f.; Mitteregger et al. 2020, S. 26; Lennert und Schönduwe 2017, S. 225–229].

2.4.3 Institutionelle Dimension

Politische Steuerungsinstrumente beinhalten Maßnahmen, um Veränderungsprozesse auszulösen oder zu forcieren [Schneidewind 2019, S. 40]. Durch institutionelle und politische Rahmenbedingungen können Vorgaben für eine nachhaltige Mobilität implementiert und die in Abschnitt 2.4.1 genannten Lösungsansätze gefördert werden [Schneidewind 2019, S. 233; Agora Verkehrswende 2020a, S. 11]. Dazu zählt hauptsächlich die Verkehrs- und Mobilitätspolitik [Schneidewind 2019, S. 233f.]. Die

folgenden politischen Maßnahmen stellen dabei eine erste Übersicht ohne den Anspruch auf Vollständigkeit dar:

- Weltweite und europaweite Ebene:
 - Anpassung der Steuer bzw. ökologischen Abgaben auf Benzin/Treibstoffe im Flug- und Schiffsverkehr
 - Einführung von Schadstoffgrenzwerten für Pkw (bspw. in den USA)
 - Erlassung von Neuzulassungsmindestquoten für Elektroautos
 - Ausschluss von Verbrennungsmotoren
 - Anpassung von Grenzwerten für Stickoxide und Feinstaub
 - Anpassung von Flottenverbrauchswerten und CO₂-Grenzwerten
 - Erhöhung der CO₂-Bepreisung
- Nationale Ebene
 - Erhöhung der Mineral- und Pkw-Steuer
 - Anpassung der Pendlerpauschalen und des Dienstwagenprivilegs
 - Einführung des Tempolimits (auf der Autobahn und in der Stadt)
 - Ausgestaltung von infrastrukturellen Investitionsentscheidungen (Priorisierung von Straßen, Radwegen, Fußwegen)
 - Unterstützung (u. a. rechtlicher Rahmen, Marktregulierung) und Förderung von Testfeldern für neue technologische Ansätze (Elektromobilität, automatisiertes Fahren, digitale Mobilitätsdienstleistungen)
 - Orchestrierung von ÖV und digitalen Mobilitätsdienstleistungen im Sinne der Daseinsvorsorge
- Landesebene:
 - Ausgestaltung von Raum- und Flächennutzungskonzepten
 - Allgemeine Ausbauplanung des ÖV
- Kommunalebene:
 - Ausgestaltung von verkehrsberuhigten und autofreien Stadtvierteln (Bewirtschaftung von Parkraum, Einfahrverbote, Geschwindigkeitsreduzierungen, Tempo-30-Zonen, City Maut)
 - Konkrete Ausgestaltung des ÖPNV-Angebots (Koordinierung von Fahrplänen, Ausweitung des Einzugsgebiets, separate Busspuren, finanzielle Unterstützung der Kunden und Verkehrsunternehmen in Form von Sozialtickets oder Mobilitätsprämien)
 - Förderung des lokalen Rad- und Fußverkehrs (eigenständige Radwege, sichere Abstellanlagen, breitere Gehwege) [Schneidewind 2019, S. 234–236; ADAC e.V. 2023a; VCÖ 2023, S. 11; Weber 2020, S. 284–299; VCÖ 2021, S. 9–30; Umweltbundesamt 2024c; Lemmer 2019, S. 40; Herget et al. 2019, S. 58f.; Agora Verkehrswende 2020b, S. 24–32; Mitteregger et al. 2020, S. 24; Bosetti et al. 2014, S. 29; Saar und Marggraf 2021, S. 349; Rudolph et al. 2017, S. 37f.; European Environment Agency 2024; Deutscher Bundestag 2022b; Foulser 2017, S. 14f.; Pangbourne et al. 2018, S. 41f.; Fokusgruppe Intelligente Mobilität 2017, S. 30–32; TU Wien et al. 2019, S. 121f.]

Anhand der Auflistung wird ersichtlich, dass die Mobilitätspolitik ein Beispiel für die klassische Mehrebenenpolitik darstellt [Schneidewind 2019, S. 234]. Je nach

Ausgestaltung der unterschiedlichen Maßnahmen können die jeweiligen Verkehrsmittel in Zukunft priorisiert werden. Zum Beispiel können infrastrukturelle Investitionsentscheidungen oder die Bewirtschaftung des Parkraums den zukünftigen Modal Split beeinflussen und die verkehrsbedingten Emissionen reduzieren [Weber 2020, S. 28; VCÖ 2021, S. 15]. Außerdem ist es mithilfe dieser verschiedenen politischen Maßnahmen möglich, die technologischen Ansätze (automatisiertes Fahren, Elektromobilität, digitale Mobilitätsdienstleistungen oder ÖV) zu fördern oder ggf. zu bremsen [Hannon et al. 2016, S. 16]. So kann bspw. das automatisierte Fahren von finanziellen Förderungen, aber auch von Tempolimits, verkehrsberuhigten Stadtvierteln oder rechtlichen Rahmenbedingungen profitieren. Zusätzlich kann das Mobilitätsaufkommen durch weitere Politikbereiche, wie Siedlungs- und Raumplanungspolitik, Wirtschaftspolitik oder Arbeitspolitik beeinflusst werden [Schneidewind 2019, S. 234; Weber 2020, S. 25–27; TU Wien et al. 2019, S. 118]. Beispielsweise kann Pkw-Verkehr reduziert werden, indem die Lage von Einkaufsmöglichkeiten, Arbeitsplätzen oder Freizeiteinrichtungen in Quartieren derartig geplant werden, dass diese gut zu Fuß, mit dem Fahrrad oder dem ÖV erreichbar sind [VCÖ 2023, S. 28; Weber 2020, S. 25f.; TU Wien et al. 2019, S. 133]. Als Beispiel für die Arbeitspolitik ist die Telearbeit zu nennen, mit der Wege zur Arbeit vermieden werden [Herget et al. 2019, S. 86f.].

2.4.4 Kulturelle Dimension

Der Transformationsprozess hin zu einer nachhaltigen Mobilität verändert die Kultur dieser Gesellschaft, weshalb diese Dimension ebenfalls zu betrachten ist [Schneidewind 2019, S. 40; Hoor 2020, S. 6]. Unter dem Begriff „Mobilitätskultur“ ist zu verstehen, „[...] dass eingefahrene Lebensweisen, Routinen und Überzeugungen auf individueller wie gesellschaftlicher Ebene verstanden und aufgebrochen werden müssen, um eine nachhaltige bzw. postfossile Mobilitätskultur erreichen zu können“ [Hoor 2020, S. 6]. Dies impliziert, dass zwar technologische Ansätze entstehen, die Geschäftsmodelle ausgestaltet und auch politische Rahmenbedingungen geschaffen werden können, der entscheidende Faktor für die Durchsetzung eines technologischen Ansatzes jedoch in der Akzeptanz und der Bereitschaft zur Verhaltensänderung der Bevölkerung liegt [Lemmer 2019, S. 76].

Die Zukunftsvision, automatisierte Fahrzeuge im Carsharing-Bereich einzusetzen, zielt darauf ab, die Anzahl der privaten Pkw zu reduzieren [Ritz 2018, S. 106; Agora Verkehrswende 2020a, S. 13]. Allein die Automatisierung wird jedoch nicht die Anzahl der Pkw reduzieren, sondern die Akzeptanz der Gesellschaft und die Etablierung neuer Mobilitätsmuster [Agora Verkehrswende 2020a, S. 13f.; Hermann 2018, S. 22; Lemmer 2019, S. 76]. Aufgrund der historischen Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland, ist der Besitz eines eigenen Automobils fest in der Gesellschaft verankert [Schneidewind 2019, S. 237; Agora Verkehrswende 2019, S. 9]. Der Pkw ist deshalb nicht nur ein Fortbewegungsmittel, sondern drückt für den Besitzer sozialen Status aus und ist ein Symbol für den Lebensstil und Flexibilität [Weber 2020, S. 264; Agora Verkehrswende 2019, S. 9]. Aufgrund dessen ist die Transformation zum automatisierten und geteilten Fahren (digitale Mobilitätsdienstleistungen oder der Einsatz im ÖV), in der das Automobil seine Dominanz verliert und einen anderen Stellenwert einnimmt, eine große Veränderung für die Gesellschaft [Hermann 2018,

S. 21; Ritz 2018, S. 141; Wolking 2021, S. 121–126]. Dabei hängt die Bereitschaft der Gesellschaft, auf den eigenen Pkw zu verzichten, auch von den jeweiligen Mobilitätsmustern, Pendelwegen, Generationen oder gesellschaftlichen Trends ab [Memon et al. 2019, S. 117–120]. Dies zeigt sich bereits bei der jüngeren Bevölkerung, die teilweise keinen Führerschein besitzt und für die ein eigener Pkw nicht erstrebenswert ist [Schneidewind 2019, S. 238; Lemmer 2019, S. 90]. Nicht zuletzt löst der Einsatz von automatisierten digitalen Mobilitätsdienstleistungen Bedenken in der Bevölkerung in Bezug auf Datenschutz, Datensicherheit sowie Hackerangriffe aus [Beckmann 2018, S. 15; Lemmer 2019, S. 82]. An dieser Stelle besteht die Notwendigkeit eine Datenkultur zu etablieren, die das Verständnis und das Bewusstsein der Daten für alle Beteiligten aufbaut [Fokusgruppe Intelligente Mobilität 2017, S. 34; Krcmar et al. 2017, S. 51].

In Bezug auf die Volkswirtschaft nimmt die Automobilindustrie eine signifikante Rolle für den Wirtschaftsstandort Deutschland ein [Schneidewind 2019, S. 232; Bormann et al. 2018, S. 19]. Die Förderung von Elektromobilität und geteiltem, automatisiertem Fahren hat demnach beträchtliche volkswirtschaftliche Auswirkungen [Schneidewind 2019, S. 232; Bormann et al. 2018, S. 19]. Gemäß einer Studie des ifo-Wirtschaftsforschungsinstituts stehen ungefähr 600 000 Arbeitsplätze mit dem Verbrennungsmotor in Verbindung [Falck et al. 2017, S. 1]. Weiterhin sind alleine im Fahrdienst des ÖV über 83 000 Menschen tätig [VDV 2016, S. 30]. Die Zahl der Unfälle, die durch automatisierte Fahrzeuge verursacht werden, wird zukünftig abnehmen, so dass Kfz-Werkstätten mit weniger Arbeit konfrontiert sein könnten [Ritz 2018, S. 126f.]. Der Umstieg auf Elektromobilität und die Einführung des geteilten automatisierten Fahrens würden sich dementsprechend potenziell negativ auf die Beschäftigtenanzahl auswirken [Agora Verkehrswende 2017, S. 86; Heinrich-Böll-Stiftung und VCD Verkehrsclub Deutschland e. V. 2020, S. 42]. Aus diesem Grund werden negative Assoziationen mit der Technologieentwicklung verknüpft [Lemmer 2019, S. 77]. Daher ist es essenziell, im Vorfeld Maßnahmen zu konzipieren, um einer Massenarbeitslosigkeit in Regionen wie Stuttgart oder Wolfsburg präventiv entgegenzuwirken [Schneidewind 2019, S. 232f.; Agora Verkehrswende 2017, S. 86]. Von den Unternehmen wird deshalb eine hohe Innovations- und Investitionsbereitschaft gefordert [Bormann et al. 2018, S. 19]. Dies beinhaltet die Implementierung neuer Personalentwicklungskonzepte, damit Beschäftigte die notwendigen Qualifikationen für die zukünftigen Tätigkeiten erhalten [Bormann et al. 2018, S. 19]. Dies ist eine Voraussetzung, um neue Arbeitsplätze im Bereich der digitalen Mobilitätsdienstleistungen, des ÖV, der Informationstechnik und der Digitalisierung zu etablieren [Agora Verkehrswende 2017, S. 86; Heinrich-Böll-Stiftung und VCD Verkehrsclub Deutschland e. V. 2020, S. 42].

Die vorherige Beschreibung zeigt, dass der Ausbau des automatisierten Fahrens und der Elektromobilität kombiniert mit dem Wandel vom Besitzen zum Nutzen der Fahrzeuge eine der größten sozio-ökonomischen Veränderungen an der kulturellen DNA der Gesellschaft sind [Schneidewind 2019, S. 238; Ritz 2018, S. 231]. Der Erfolg der Elektromobilität, der digitalen Mobilitätsdienstleistungen einschließlich des ÖV und des automatisierten Fahrens wird daher davon bestimmt, inwieweit die Gesellschaft akzeptiert, auf Gewohntes zu verzichten und ggf. Einschränkungen sowie Risiken in

Kauf zu nehmen [Weber 2020, S. 284; Ritz 2018, S. 229–231; Wolking 2021, S. 121–126; Agora Verkehrswende 2020a, S. 14; Lemmer 2019, S. 76–78; Fraedrich und Lenz 2014, S. 46]. Um die Offenheit der Bevölkerung für intelligente Mobilitätsangebote zu steigern und die Dienste zu etablieren, sind Kommunikation mit den Bürgern sowie die gesellschaftliche Partizipation essenziell [Blechtschmidt 2011, S. 4; Hoor 2020, S. 30; Lemmer 2019, S. 84f.; Fokusgruppe Intelligente Mobilität 2017, S. 33]. Dass Wandel funktionieren kann, zeigt der Radverkehr [Hoor 2021, S. 176]. War das Rad früher ein Spiel- oder Sportgerät, so steht es mittlerweile als Symbol für großstädtische Bevölkerungsschichten und die Verkehrswende [Hoor 2021, S. 176].

2.5 Zusammenfassung und Anforderungen aus dem Forschungsreich von Mobilität und Verkehr

Gemäß der Definition bezieht sich der Begriff „Mobilität“ auf das generelle Bedürfnis der zeitlichen und räumlichen Bewegung. Verkehr wird in Abgrenzung dazu als Instrument zur Ortsveränderung definiert. Das Verkehrsangebot des Personenverkehrs wird in ÖPV, Fahrdienste, Sharing-Angebote und den MIV eingeteilt. Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung sind die Grenzen zwischen den Verkehrsdienstleistungen (ÖPV, Fahrdienste, Sharing-Angebote) fließend. Die Analyse der aktuellen Verkehrssituation in Deutschland veranschaulicht, dass die Verkehrsleistung zunimmt und der Pkw am häufigsten als Verkehrsmittel genutzt wird. Zusätzlich zeigt sich, dass die Mobilitätskosten steigen, die CO₂- bzw. die THG-Emissionen stagnieren und die Unfallzahlen sinken. Ähnliche Tendenzen sind auch auf europäischer und globaler Ebene zu beobachten. Auf Basis des Status Quo und übergeordneten gesellschaftlichen Entwicklungen (Megatrends) werden unterschiedliche ökonomische, ökologische und soziale Herausforderungen definiert. Zusammenfassend besteht die Herausforderung im Bereich Mobilität und Verkehr darin, ein möglichst vielfältiges und gut ausgebautes Mobilitätsangebot für sämtliche Nutzergruppen bereitzustellen. Dies jedoch unter der Prämisse, dass die Mobilitätskosten und die Umweltauswirkungen (THG-Emissionen, Lärm und Flächenverbrauch) reduziert werden. So unterschiedlich und gegenläufig diese Herausforderungen sind, so vielfältig gestalten sich auch die Lösungsansätze. Zukünftige Mobilität wird als effizient, organisiert, elektrisch, automatisiert, vernetzt, sicher sowie gemeinschaftlich und universell nutzbar beschrieben (analog zu Abschnitt 2.4) [Agora Verkehrswende 2017, S. 22–60; Knie et al. 2019, S. 11–20; Kagermann 2017, S. 359–366; Sustainable Mobility for All 2019, S. 16–21]. Die Zusammenhänge in diesem Kapitel sind zusammenfassend in Abbildung 18 visualisiert.

Das automatisierte Fahren stellt dabei eine Schlüsseltechnologie für die zukünftige Mobilität dar. Diese Technologie führt zu umfangreichen Veränderungen im Mobilitätssystem und begünstigt die Attraktivität und den Erfolg von der Elektromobilität sowie von Fahrdiensten, Sharing-Angeboten und dem ÖV. Es zeigt sich jedoch, dass Technologie für sich genommen keinen Erfolg verspricht, sondern dass Geschäftsmodelle und politische Unterstützung erforderlich sind. Nicht zuletzt sind aber auch die Akzeptanz in der Bevölkerung und die Veränderung des Verkehrsverhaltens entscheidend dafür, ob das automatisierte Fahren einen Beitrag zur Mobilitätswende leisten kann.

Definition, Kennzahlen und Formen von Mobilität und Verkehr



Ökonomische, Ökologische und soziale Herausforderungen

Zukünftige Mobilität			
Elektrisch	Automatisiert	Effizient	Organisiert
Vernetzt		Sicher	Universell nutzbar

Abbildung 18: Beschreibung der zukünftigen Mobilität, eigene Darstellung i. A. a. [Agora Verkehrswende 2017, S. 22–60; Knie et al. 2019, S. 11–20; Kagermann 2017, S. 359–366; Sustainable Mobility for All 2019, S. 16–21]

Die Auseinandersetzung mit dem aktuellen Stand und den Entwicklungen im Bereich von Mobilität und Verkehr verdeutlicht, dass neben der Automatisierung auch die Aspekte der Elektromobilität und des flexiblen Bedarfsverkehrs im ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse berücksichtigt werden sollten. Da die Bereitschaft der Gesellschaft, auf das Auto zu verzichten, von den jeweiligen Mobilitätsmustern, Pendelwegen, Generationen oder gesellschaftlichen Trends beeinflusst wird, kann die Nutzung von automatisierten Bussen von Region zu Region variieren [Menon et al. 2019, S. 117–120]. Daher sollte die Akzeptanz in Bezug auf das automatisierte Fahren in den Planungsprozess integriert werden. Zusammenfassend resultieren aus dem Bereich Mobilität und Verkehr folgende Anforderungen an den ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse:

- Flexiblen Bedarfsverkehr berücksichtigen
- Ladezyklen (Elektrobusse) berücksichtigen
- Akzeptanz bzgl. des automatisierten Fahrens berücksichtigen

Diese Anforderungen werden für die Ausarbeitung der Forschungslücke (Kapitel 4) und die Gestaltung des ganzheitlichen Planungsprozesses (Kapitel 5) verwendet.

3 Grundlagen des automatisierten Fahrens

In diesem Kapitel wird die Technologie des automatisierten Fahrens erörtert, um auf dieser Grundlage die Anforderungen dieses Forschungsfeldes an den ganzheitlichen Planungsprozess abzuleiten. Dazu wird zunächst das automatisierte Fahren definiert (Abschnitt 3.1). Anschließend wird in Abschnitt 3.2 die Funktionsweise des automatisierten Fahrens erläutert. Im dritten Unterkapitel (Abschnitt 3.3) werden verschiedene technologische Ansätze im Bereich des automatisierten Fahrens vorgestellt und anhand der Automatisierungsstufen (im weiteren auch „Stufen“ genannt) klassifiziert. Die Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrzeuge unterliegen spezifischen rechtlichen Rahmenbedingungen, die in Abschnitt 3.4 vertiefend untersucht werden. Des Weiteren wird in Abschnitt 3.5 die zukünftige Entwicklung des automatisierten Fahrens analysiert. Abschließend werden in Abschnitt 3.6 die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst und Anforderungen an den Planungsprozess formuliert. Die Ausführungen in diesem Kapitel sind grundsätzlich auf automatisierte Fahrzeuge ausgelegt. In den einzelnen Abschnitten werden jedoch die spezifischen Charakteristika der automatisierten Busse erläutert.

3.1 Definition des automatisierten Fahrens

„Automatisiertes Fahren“ und „autonomes Fahren“ werden in der Öffentlichkeit hauptsächlich als synonyme Begriffe verwendet [Yen und Krenn 2024, S. 2]. Autonomes Fahren beschreibt jedoch ein eigenständiges Fahren, welches vollständig unabhängig (autonom) von der Infrastruktur oder einer Leitstelle (im engl. Operation Control Center (OCC)) ist [Yen und Krenn 2024, S. 2f.; Hey 2019, S. 7]. Beim automatisierten Fahren handelt es sich nach § 1d StVG Absatz (1) um ein Kraftfahrzeug, welches die Fahraufgabe ohne eine fahrzeugführende Person erfüllen kann [Yen und Krenn 2024, S. 2f.]. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das automatisierte Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen, der Infrastruktur und/oder einer Leitstelle vernetzt ist (vernetztes Fahren) [Yen und Krenn 2024, S. 2f.]. In dieser Arbeit wird deshalb der Begriff „automatisiertes Fahren“ verwendet, welcher auf Grundlage der Automatisierungsstufen definiert werden kann. In Deutschland existieren zwei unterschiedliche Darstellungen diesbezüglich [Yen und Krenn 2024, S. 4]. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) teilt das automatisierte Fahren in fünf Kategorien ein [Schreurs und Steuer 2015, S. 166; Bundesanstalt für Straßenwesen 2012, S. 9]. Neben den Einstufungen „Driver Only“ und „Assistiert“ existieren die Klassifizierungen „Teilautomatisierung“, „Hochautomatisierung“ und „Vollautomatisierung“ [Schreurs und Steuer 2015, S. 166; Bundesanstalt für Straßenwesen 2012, S. 9]. Parallel dazu erfolgte im Jahr 2014 seitens der SAE die Einführung der Norm „J3016“, in welcher das automatisierte Fahren in sechs Stufen eingeteilt wird [SAE International 2021, S. 1–3]. In der aktualisierten Fassung aus dem Jahr 2021 wird die Automatisierung von Stufe 0 („No Driving Automation“) bis Stufe 5 („Full Driving Automation“) eingeteilt [SAE International 2021, S. 30–32]. Da die Norm SAE J3016 den gegenwärtig gültigen Standard bei der Bezeichnung der Automationsstufen definiert, wird im Folgenden diese Einteilung verwendet [SAE International 2021, S. 1f.].

In Tabelle 3 sind die sechs Automatisierungsstufen nach SAE J3016 visualisiert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die deutsche Übersetzung verwendet. Anhand der vier Kriterien „Verantwortlichkeit der Fahraufgabe“, „Umgebungsüberwachung“, „Verhalten im Notfall“ und „Betriebsbereich“ werden die Automatisierungsstufen eingeteilt. Die Verantwortlichkeit der Fahraufgabe beschreibt, inwieweit das automatisierte Fahrsystem die Quer- und/oder Längsführung übernehmen kann. Im Rahmen der Fahraufgabe wird die Objekterkennung und eine entsprechende Reaktion durch das Kriterium „Umgebungsüberwachung“ beschrieben, sofern das automatisierte Fahrsystem diese Aufgaben übernimmt. Inwieweit das automatisierte Fahrsystem auf einen Systemausfall oder das Verlassen des Betriebsbereichs reagieren kann, wird durch das Kriterium „Verhalten im Notfall“ ausgedrückt. Das Kriterium „Betriebsbereich“ (engl. ODD) stellt dar, in welchen Anwendungsfällen und Situationen das System in der Lage ist, das Fahrzeug selbstständig zu führen. [SAE International 2021, S.°9-26]

Tabelle 3: Übersicht der Automatisierungsstufen, eigene Darstellung i. A. a. [SAE International 2021, S. 25f.; Weißenborn 2020]

Stufe	Bild	Name	Verantwortlichkeit der Fahraufgabe	Umgebungsüberwachung	Verhalten im Notfall	Betriebsbereich
0		Keine Fahrerautomatisierung	Fahrer	Fahrer	Fahrer	-
1		Assistiertes Fahren	Fahrer + System	Fahrer	Fahrer	Teilweise
2		Teilautomatisiertes Fahren	System	Fahrer	Fahrer	Teilweise
3		Bedingt automatisiertes Fahren	System	System	Fahrer	Teilweise
4		Hochautomatisiertes Fahren	System	System	System	Teilweise
5		Vollautomatisiertes Fahren	System	System	System	Immer/überall

Im Folgenden werden die einzelnen Automatisierungsstufen definiert.

Stufe 0 – Keine Fahrautomatisierung:

- Der Fahrzeugführer übernimmt alle Fahrfunktionen und erhält vom Fahrzeugsystem ausschließlich über Sicherheitssysteme Unterstützung, welche sich nicht direkt auf die Fahraufgabe beziehen.
- Beispiel: Antiblockiersystem [SAE International 2021, S. 25–30]

Stufe 1 – Assistiertes Fahren:

- Das automatisierte Fahrsystem übernimmt in Abhängigkeit des Betriebsbereichs Teilaufgaben der Längs- oder Querverführung. Jedoch nicht beides gleichzeitig. Der Fahrer ist verantwortlich für die übrigen Fahraufgaben, überwacht das Fahrzeug, die Assistenzsysteme und die Umgebung kontinuierlich und greift bei Bedarf ein. Weiterhin entscheidet der Fahrer, wann bzw. ob das automatisierte Fahrsystem eingeschaltet wird.
- Beispiele: Tempomat, Abstandshalter, Spurhalteassistenten, Parkassistent [SAE International 2021, S. 25–31; Science Media Center Germany gGmbH 2021; Bundesanstalt für Straßenwesen 2021; Paulsen 2021]

Stufe 2 – Teilautomatisiertes Fahren:

- Das automatisierte Fahrsystem übernimmt gleichzeitig die Quer- und Längsverführung. Der Fahrer ist verantwortlich für die übrigen Fahraufgaben, überwacht das Fahrzeug, die Assistenzsysteme und die Umgebung kontinuierlich und greift bei Bedarf ein. Jedoch wird es dem Fahrer ermöglicht, die Hände kurzzeitig vom Lenkrad zu lösen. Weiterhin entscheidet der Fahrer, wann bzw. ob das automatisierte Fahrsystem eingeschaltet wird.
- Beispiele: Überholassistent, Stauassistent, „Autopilot“ (Tesla), automatisches Einparken [SAE International 2021, S. 25–31; Science Media Center Germany gGmbH 2021; Paulsen 2021; United States Department of Transportation NHTSA 2021, S. 6–8]

Stufe 3 – Bedingt automatisiertes Fahren:

- Ab Stufe 3 wird die Fahraufgabe vom automatisierten Fahrsystem übernommen, indem sowohl die Quer- und Längsverführung als auch die Überwachung der Umgebung automatisiert durchgeführt werden. In Notfallsituationen, bei einem Systemausfall oder bei Anfragen des automatisierten Fahrsystems reagiert der Fahrer und übernimmt ggf. die Fahraufgabe. Dadurch wird es dem Fahrer temporär ermöglicht, sich von der Teilnahme am Straßenverkehr und der Ausführung der Fahrtätigkeit abzuwenden. Weiterhin entscheidet der Fahrer, wann bzw. ob das automatisierte Fahrsystem eingeschaltet wird.
- Beispiel: Staupilot bis 60 km/h [SAE International 2021, S. 26–31; Paulsen 2021]

Stufe 4 – Hochautomatisiertes Fahren:

- In einem definierten Betriebsbereich wird die gesamte Fahraufgabe (Quer- und Längsführung sowie Überwachung) und auch das Verhalten in Notfallsituationen vom automatisierten Fahrsystem übernommen. In diesem Fall wird die Fahrzeugführung an das automatisierte Fahrsystem abgegeben und der Fahrer wird zum Passagier des Fahrzeugs. Das Fahrzeug ist sich seiner operativen Grenzen bewusst und ist in der Lage, bei deren Überschreitung eigenständig einen risikominimalen Zustand (bspw. an den Fahrbahnrand zu fahren oder den Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung aufzufordern) zu erreichen. Außerhalb des Betriebsbereichs übernimmt der Fahrer die Fahraufgabe. Vor der Fahrt überprüft der Fahrer oder eine Leitstelle die Betriebsbereitschaft des automatisierten Fahrsystems. Weiterhin entscheidet der Fahrer, wann bzw. ob das automatisierte Fahrsystem eingeschaltet wird.
- Beispiele: People Mover, Parkhaus-Chauffeur, automatisiertes Fahren auf der Autobahn [SAE International 2021, S. 26–32; Science Media Center Germany gGmbH 2021; Verband der Automobilindustrie 2024; Paulsen 2021]

Stufe 5 – Vollautomatisiertes Fahren:

- Ein vollautomatisiertes Fahrzeug übernimmt die gesamte Fahraufgabe (Längs- und Querverführung sowie die Umgebungsüberwachung) in allen Verkehrssituationen ohne Überwachung oder Eingriffe eines Fahrers. Dies gilt auch für Notfallsituationen. Der Fahrer wird demnach zum Passagier und verrichtet während der gesamten Fahrt keine Fahraufgaben. Vor der Fahrt überprüft der Fahrer oder eine Leitstelle die Betriebsbereitschaft des vollautomatisierten Fahrzeugs. Weiterhin entscheidet der Fahrer, ob das automatisierte Fahrsystem während der Fahrt aktiviert oder deaktiviert wird.
- Beispiele: Identisch zur Stufe 4, jedoch in jeder Verkehrssituation (bspw. Robotaxi-Dienst) [SAE International 2021, S. 26–32; Science Media Center Germany gGmbH 2021; Leonetti 2023, S. 170f.]

In Anlehnung an die Norm SAE J3016 hat der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) im Rahmen eines Positionspapiers zum automatisierten Fahren zusätzlich die Stufe 4 ÖV eingeführt (siehe Tabelle 4). Diese Stufe dient dazu insbesondere den Regelbetrieb mit automatisierten Bussen im ÖPNV auszubauen und einen fahrzeugführerlosen Betrieb zu ermöglichen. Zur Unterstützung des automatisierten Fahrsystems wird die Leitstelle in den Betriebsablauf eingebunden. [Leonetti et al. 2020, S. 3f.]

Tabelle 4: Automatisierungsstufen des VDV, eigene Darstellung i. A. a. [Leonetti et al. 2020, S. 4]

Automatisierungsstufe	Stufenbeschreibung
Stufe 0	Alleine der Fahrer
Stufe 1	Assistiert
Stufe 2	Teilautomatisiert
Stufe 3	Hochautomatisiert
Stufe 4	Vollautomatisiert
Stufe 4 ÖV	Fahrerlos im spezifischen ÖV-Anwendungsfall
Stufe 5	Fahrerlos

Stufe 4 ÖV – Fahrerlos im spezifischen ÖV-Anwendungsfall:

- Auf einer spezifischen Linie oder in einem spezifischen Bedienungsgebiet im ÖV-Betrieb übernimmt das automatisierte Fahrsystem die gesamte Fahraufgabe (Quer- und Längsführung sowie Überwachung) und das Verhalten in Notfallsituationen. Das Fahrzeug erkennt dabei seine Systemgrenzen und kann jederzeit einen risikominimalen Zustand erreichen. Im Fahrzeug befindet sich kein Fahrer, jedoch wird das automatisierte Fahrzeug in die Leitstellenarchitektur des jeweiligen ÖPNV-Unternehmens integriert. Von der Leitstelle aus wird das automatisierte Fahrzeug überwacht, es können „Fahrmanöver“ erteilt und das Fahrzeug aus der Ferne deaktiviert oder freigeschaltet werden. Die Steuerung und Durchführung des Fahrbefehls erfolgt jedoch selbstständig vom Fahrzeug.
- Der Leitstelle oder einer technischen Aufsicht (TA) wird die Befugnis erteilt, das automatisierte Fahrsystem zu aktivieren, bzw. zu deaktivieren. Denn außerhalb des Betriebsbereichs übernimmt die Leitstelle die Fahraufgabe. Eine TA überprüft vor der Fahrt die Betriebsbereitschaft des automatisierten Fahrsystems.
- Beispiel: Automatisierte Busse auf spezifischen Linien [Leonetti et al. 2020, S. 4–14]

3.2 Funktionsweise des automatisierten Fahrens

Beim automatisierten Fahren übernimmt das automatisierte Fahrsystem alle Fahraufgaben des Fahrzeugführers [SAE International 2021, S. 24–31]. Um die Funktionsweise des automatisierten Fahrens zu verdeutlichen, werden im Folgenden die einzelnen Verarbeitungsphasen des automatisierten Fahrsystems erläutert. Dietmeyer und das Fraunhofer IKS teilen die Funktionsweise des automatisierten Fahrens in drei Schritte ein: Maschinelle Wahrnehmung, Situationsverstehen und Bahnführung [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Anger 2021]. Khan et al. sowie Chai et al. bezeichnen die drei Phasen als „Wahrnehmung“, „Planung“ und „Steuerung“ [Khan et al. 2023, S. 3f.; Chai et al. 2021, S. 50–53]. Ren et al. wählen die Begriffe „Wahrnehmen“, „Vorhersage“ und „Entscheidung“ [Yen und Krenn 2024, S. 6f.]. Da die Begrifflichkeiten der vorgestellten Ansätze ähnliche Charakteristika aufweisen, werden in dieser Arbeit die drei Verarbeitungsphasen des automatisierten Fahrens nach der Definition von Dietmeyer bezeichnet. Im Rahmen der maschinellen Wahrnehmung werden die Informationen aus der Fahrumgebung gesammelt [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Khan et al. 2023, S. 4; Yen und Krenn 2024, S. 6f.]. Dazu zählt die Identifikation und die Entfernungsbestimmung der Objekte sowie das Erkennen von u. a. Verkehrszeichen oder Fahrspuren (durch Sensorik) [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Khan et al. 2023, S. 4; Yen und Krenn 2024, S. 6f.]. Gemeinsam mit der eigenen Lokalisierung werden diese Informationen in einem Fahrzeugumfeldmodell zusammengefügt [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Stiller et al. 2018, S. 85f.]. Das automatisierte Fahrsystem nutzt diese Informationen, um die aktuelle Situation zu erfassen, zukünftige Ereignisse vorherzusagen und die eigene Handlung zu planen [Stiller et al. 2018, S. 85f.; Dietmeyer 2015, S. 420f.; Yen und Krenn 2024, S. 6f.]. Auf dieser Grundlage erfolgt abschließend die Bahnführung (durch Aktorik) [Dietmeyer 2015, S. 420f.].

Diese Dreiteilung wird in Abbildung 19 visualisiert, wobei das automatisierte Fahrzeug optional mittels Vehicle-to-Everything (V2X)-Technologien von Sensoren entlang der Strecke bei der maschinellen Wahrnehmung unterstützt werden kann [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Wahlster 2017b, S. 414; Khan et al. 2023, S. 1–6]. Eine Leitstelle dient in diesem Prozess als zusätzliche Rückfallebene für das automatisierte Fahrzeug.

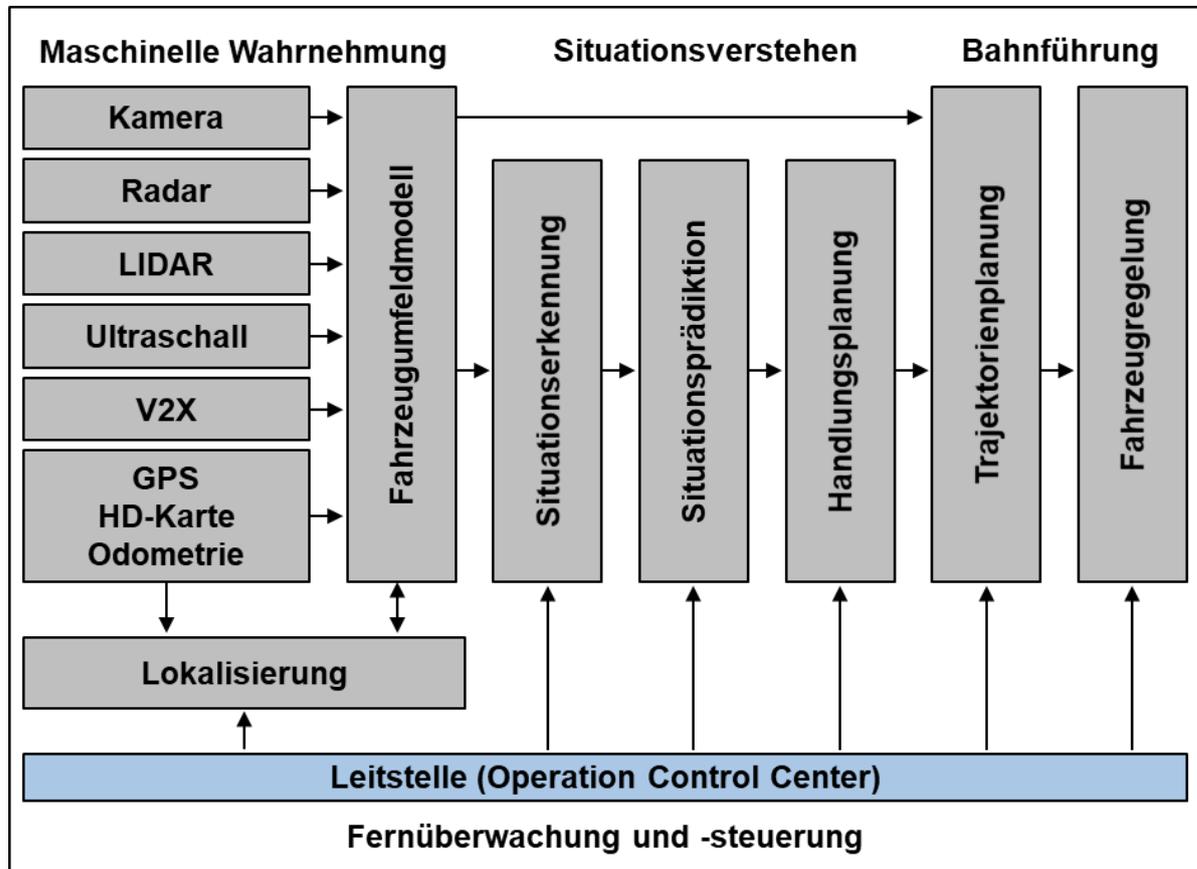


Abbildung 19: Funktionsweise des hochautomatisierten Fahrens, eigene Darstellung i. A. a. [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Khan et al. 2023, S. 1–6; Wahlster 2017b, S. 414; Liu et al. 2020, S. 324–327; Lücke 2022; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50; Clausen und Klingner 2018, S. 388]

Die folgenden vier Abschnitte widmen sich der maschinellen Wahrnehmung, dem Situationsverstehen, der Bahnführung sowie der Fernüberwachung und -steuerung.

3.2.1 Maschinelle Wahrnehmung

Das Ziel der maschinellen Wahrnehmung besteht darin, topografische Informationen der Umgebung, wie etwa Straßen, Bordsteine und Häuser, sowie bewegliche Verkehrsteilnehmer zuverlässig zu identifizieren, zu klassifizieren und der Verkehrsinfrastruktur zuzuordnen [Dietmeyer 2015, S. 420–423; Yen und Krenn 2024, S. 6f.; Wahlster 2017b, S. 411f.; Hey 2019, S. 13]. Automatisierte Fahrzeuge sind mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet, die dazu dienen, Informationen für die Objekterkennung und -klassifizierung zu erfassen [Dietmeyer 2015, S. 420–423; Khan et al. 2023, S. 4; Chai et al. 2021, S. 17f.]. Die Sensoren unterliegen dabei der Anforderung, Verkehrszeichen, Straßenmarkierungen oder andere Verkehrsteilnehmer voneinander zu unterscheiden und sie als solche zu identifizieren [Khan et al. 2023, S. 4; Johanning und Mildner 2015, S. 64–66]. Ergänzend können automatisierte

Fahrzeuge die Funktion besitzen, mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur zu kommunizieren, um weitere Informationen zu erhalten [Dietmeyer 2015, S. 420–423; Khan et al. 2023, S. 4; Chai et al. 2021, S. 17f.].

Auf Basis der Informationen zu den physikalischen Abmessungen der Objekte wird die semantische Bedeutung dieser ermittelt [Dietmeyer 2015, S. 423]. Dazu werden die erkannten Objekte mit Objektklassen von komplexen Modellen abgeglichen und eingeteilt [Dietmeyer 2015, S. 423; Chai et al. 2021, S. 50]. Auf diese Weise werden u. a. Fußgänger, Radfahrer, Pkw, Fahrstreifenmarkierungen oder Verkehrsschilder identifiziert [Dietmeyer 2015, S. 423; Chai et al. 2021, S. 50]. Des Weiteren ist es relevant, ob es sich beim Fußgänger um einen Erwachsenen oder ein Kind handelt [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Weiterhin ist zu unterscheiden, ob sich die Person auf den Verkehr konzentriert oder durch ein Mobiltelefon abgelenkt wird [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Zusätzlich wird die Lage der Objekte, ihre Richtung und ihre Geschwindigkeit in Bezug zum automatisierten Fahrzeug ermittelt [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Neben der Umgebungserkennung ist die Lokalisierung eine weitere Aufgabe der maschinellen Wahrnehmung, die das automatisierte Fahrzeug dazu befähigt, jederzeit seine Position zu bestimmen [Dietmeyer 2015, S. 420–423; Chai et al. 2021, S. 47].

Abschließend werden die Umgebungsinformationen und die eigene Fahrzeugposition in einem dreidimensionalen Fahrzeugumfeldmodell verknüpft [Dietmeyer 2015, S. 424; Chai et al. 2021, S. 50f.; Yen und Krenn 2024, S. 7]. In Bezug auf das Fahrzeugumfeldmodell wird zwischen objektbasierten und gitterbasierten Repräsentationsformen unterschieden, die auch kombiniert werden können [Dietmeyer 2015, S. 424; Chai et al. 2021, S. 51]. In dem objektbasierten Fahrzeugumfeldmodell werden sämtliche relevanten Objekte und Infrastrukturelemente in der Nähe des Fahrzeugs angezeigt [Dietmeyer 2015, S. 424]. Die Visualisierung ist fortlaufend und abhängig von der Position des Fahrzeugs [Dietmeyer 2015, S. 424; Chai et al. 2021, S. 51]. Bei einem gitterbasierten Fahrzeugmodell (siehe Abbildung 20) teilen Rasterkarten die Umgebung in gleich große Zellen [Dietmeyer 2015, S. 425; Chai et al. 2021, S. 51]. Durch die Sensorik erhält das automatisierte Fahrsystem die Information, ob eine spezifische Zelle frei und befahrbar ist [Dietmeyer 2015, S. 425].

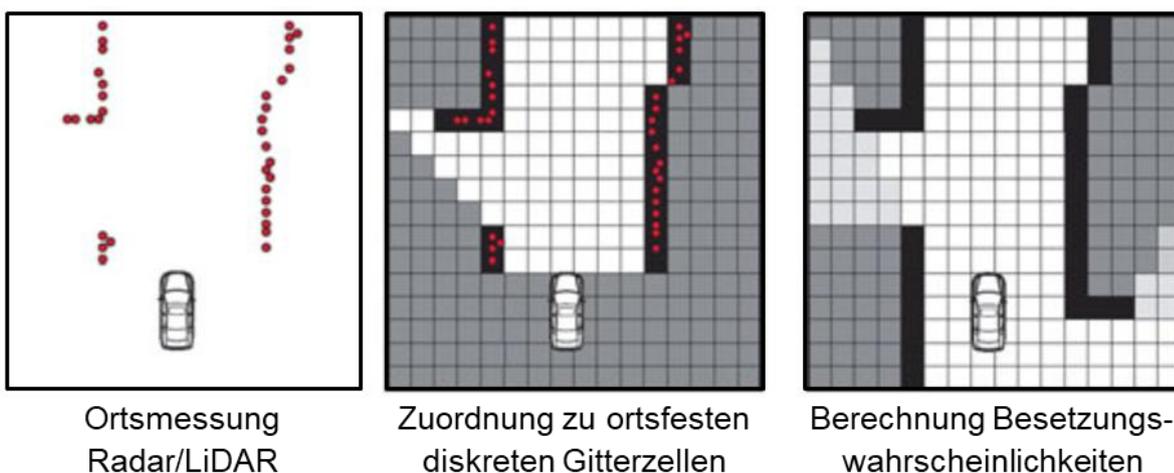


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Aufbaus eines gitterbasierten Fahrzeugumfeldmodells [Dietmeyer 2015, S. 425]

Die Erstellung des Fahrzeugumfeldmodells berücksichtigt drei Arten von Unsicherheiten:

- Existenzunsicherheit: Existiert das Objekt tatsächlich in der Realität?
- Zustandsunsicherheit: Existieren Messabweichungen bei den physikalischen Messgrößen (Position, Größe, Geschwindigkeit) der Objekte?
- Klassenunsicherheit: Ist die semantische Bedeutung der Objekte korrekt? [Dietmeyer 2015, S. 425f.]

In den folgenden Unterkapiteln werden die bordeigenen und externen Informationsquellen (Sensoren) beschrieben, die zur Objekterkennung und -klassifizierung sowie zur Lokalisierung genutzt werden [Khan et al. 2023, S. 4].

3.2.1.1 Sensoren zur Objekterkennung und -klassifizierung

Aufgrund der verschiedenen Aufgabenbereiche bei der Objekterkennung werden unterschiedliche Sensoren für automatisierte Fahrzeuge verwendet [Dietmeyer 2015, S. 422; Khan et al. 2023, S. 4]. Dazu zählen: Kamera, Radio detection and ranging (Radar)sensoren, Light detection and ranging (Lidar)-Sensoren und Ultraschallsensoren [Dietmeyer 2015, S. 422; Khan et al. 2023, S. 4; Chai et al. 2021, S. 17f.]. Kameras erzeugen mit hochauflösenden Graustufen- oder Farbbildern ein 2D-Bild einer 3D-Szene, aus denen einzelne Objekte extrahiert werden können [Dietmeyer 2015, S. 422; Chai et al. 2021, S. 23f.; Punke et al. 2015, S. 348–351; Eßlinger et al. 2024, S. 1851]. Deshalb werden Kameras sowohl in der Umfelderkennung als auch in der Innenraumüberwachung eingesetzt [Dietmeyer 2015, S. 422; Punke et al. 2015, S. 348–351; Eymann 2019; Eßlinger et al. 2024, S. 1838]. Radarsensoren senden Radarwellen aus, die von der Umgebung reflektiert und vom Sensor empfangen werden, um den Abstand zum Hindernis zu bestimmen [Selinger und Schoor 2024, S. 1816f.; Winner 2015, S. 288f.; Chai et al. 2021, S. 18–23]. Mittels der Distanzdifferenzen und dem Dopplereffekt werden zusätzlich die Relativgeschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer und deren Querversatz bestimmt [Winner 2015, S. 288f.; Chai et al. 2021, S. 18–23; Selinger und Schoor 2024, S. 1816]. Zusätzlich werden Radarsensoren zur Erfassung des Straßenuntergrundes eingesetzt [Khan et al. 2023, S. 5; Selinger und Schoor 2024, S. 1816f.]. Ultraschallsensoren besitzen eine ähnliche Funktionsweise, sind allerdings hauptsächlich auf kurzen Distanzen (bis 5,5 m) in der Lage, Hindernisse zu erkennen sowie ihren Abstand zum Fahrzeug zu ermitteln [Chai et al. 2021, S. 30; Pipp et al. 2018, S. 207; Knoll 2024, S. 1812f.]. Mithilfe der Lidar-Sensoren, die Laserimpulse im Infrarotbereich aussenden und wieder empfangen, werden Entfernungen zu Objekten sowie die räumliche Umgebung festgestellt [Dietmeyer 2015, S. 422; Chai et al. 2021, S. 24–30; Gotzig und Geduld 2015, S. 318–333; Sparbert 2024, S. 1824f.]. Als Ergebnis generieren Lidar-Sensoren eine Punktwolke, die in eine hoch aufgelöste 3D-Darstellung verarbeitet wird und die darin enthaltenen Objekte (bspw. Häuser, Passanten und Lichtsignalanlagen) darstellt [Dietmeyer 2015, S. 422; Chai et al. 2021, S. 24–30; Gotzig und Geduld 2015, S. 320–333; Sparbert 2024, S. 1824f.]. Aufgrund ihres Funktionsumfangs werden die Sensoren für die allgemeine Umgebungsüberwachung des Fahrzeuges verwendet [Dietmeyer 2015, S. 422; Gotzig und Geduld 2015, S. 320–333; Eymann 2019; Sparbert 2024, S. 1824–1826].

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Sensoren sind in Tabelle 5 dargestellt [Khan et al. 2023, S. 5f.]. Lidar-Sensoren besitzen bei Reichweiten von bis zu 300 m eine hohe Genauigkeit [Sparbert 2024, S. 1826]. Bei Dunkelheit zeigen Lidar-Sensoren keine Leistungseinbußen, können aber bei Tageslicht geblendet werden [Sparbert 2024, S. 1826]. Die Leistungsfähigkeit von Lidar-Sensoren nimmt zudem bei schlechten Wetterbedingungen ab [Gotzig und Geduld 2015, S. 320–333; Eymann 2019; Sparbert 2024, S. 1826]. Im Vergleich zur Kamera verfügen Lidar-Sensoren über eine schlechtere Winkelauflösung, d. h. die Außenabmessungen von Objekten sind nur eingeschränkt erkennbar, wodurch die Objektklassifizierung erschwert wird [Dietmeyer 2015; Gotzig und Geduld 2015, S. 320–333; Eymann 2019; Sparbert 2024, S. 1826]. Radarsensoren sind für hohe Reichweiten (bis 300 m) und insbesondere bei widrigen Wetterverhältnissen einsetzbar [Winner 2015, S. 288f.; Eymann 2019; Sparbert 2024, S. 1826; Selinger und Schoor 2024, S. 1821f.]. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, mittels Radarsensoren Relativgeschwindigkeiten zu messen, worin ein zusätzlicher Vorteil dieser Sensoren liegt [Sparbert 2024, S. 1826; Selinger und Schoor 2024, S. 1820]. Für eine präzisere Analyse der Abmessungen oder der Beschaffenheit von Objekten reicht die Genauigkeit dieser Sensoren jedoch nicht aus [Winner 2015, S. 288f.; Eymann 2019; Sparbert 2024, S. 1826]. Der Vorteil von Kameras liegt speziell in der Auflösung des Winkels und der Objektkategorisierung [Sparbert 2024, S. 1826; Wang 2021, S. 3–5; Ignatious et al. 2022, S. 739f.]. Ultraschallsensoren finden aufgrund der geringen Reichweite bei Einparkhilfen oder beim Spurwechselassistenten Anwendung [Noll und Rapps 2015, S. 252–256; Pipp et al. 2018, S. 207; Knoll 2024, S. 1812].

Tabelle 5: Eignung von Sensoren für unterschiedliche Anwendungsfälle eines automatisierten Fahrzeugs, eigene Darstellung i. A. a. [Khan et al. 2023, S. 6; Eymann 2019; Wang 2021, S. 3–5; Ignatious et al. 2022, S. 739f.; Sparbert 2024, S. 1825f.; Condurache und Treptow 2024, S. 1860]

Parameter	Kamera	Radar	LiDAR	Ultraschall	Fusion
Reichweite	+	++	++	-	++
Geschwindigkeitsauflösung	-	++	o	-	++
Auflösung des Winkels	++	o	+	-	++
Widrige Wetterverhältnisse	-	++	o	o	++
Dunkelheit / Licht-Störung	o	++	+	++	++
Objektkategorisierung	++	-	o	o	++
Erkennung aller Objektoberflächen	+	o	+	+	++
Legende:	-: Schlecht	o: Mäßig	+: Annehmbar	++: Gut	

Aus der Gegenüberstellung der Sensoren wird ersichtlich, dass für das automatisierte Fahren kein „Ein-Sensor-Konzept“ genutzt werden sollte, sondern eine Kombination verschiedener Sensorarten empfohlen wird (siehe Abbildung 21) [Khan et al. 2023, S. 5f.; Dietmeyer 2015, S. 422; Eymann 2019; Wahlster 2017b, S. 414; Chai et al. 2021, S. 42; Condurache und Treptow 2024, S. 1860–1862]. Die Kombination der Stärken der einzelnen Sensoren wird durch die sogenannte Sensordatenfusion ermöglicht [Khan et al. 2023, S. 5f.; Dietmeyer 2015, S. 422; Condurache und Treptow 2024, S. 1860–1862]. Gleichzeitig wird durch die Verwendung mehrerer Sensortypen eine Redundanz erzeugt, die ausschlaggebend für die Sicherheit im

Verkehr ist [Eymann 2019; Dietmeyer 2015, S. 433]. Dieser Ansatz wird u. a. von Herstellern wie Waymo, Tesla oder Hyundai verfolgt, bei denen teilweise bis zu 42 Sensoren am Fahrzeug installiert werden [Khan et al. 2023, S. 5f.; Hyundai Motor Deutschland GmbH 2016]. Inzwischen werden auch unterschiedliche Sensoren in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut, wodurch der sogenannte Multisensor kompakter und günstiger wird [Moulin 2018; Khan et al. 2023; Punke et al. 2015, S. 349]. Abgesehen von der Art und Anzahl der Sensoren wird ein verstärkter Fokus auf die Erfassung und Weiterverarbeitung der Daten gelegt [Khan et al. 2023, S. 5].

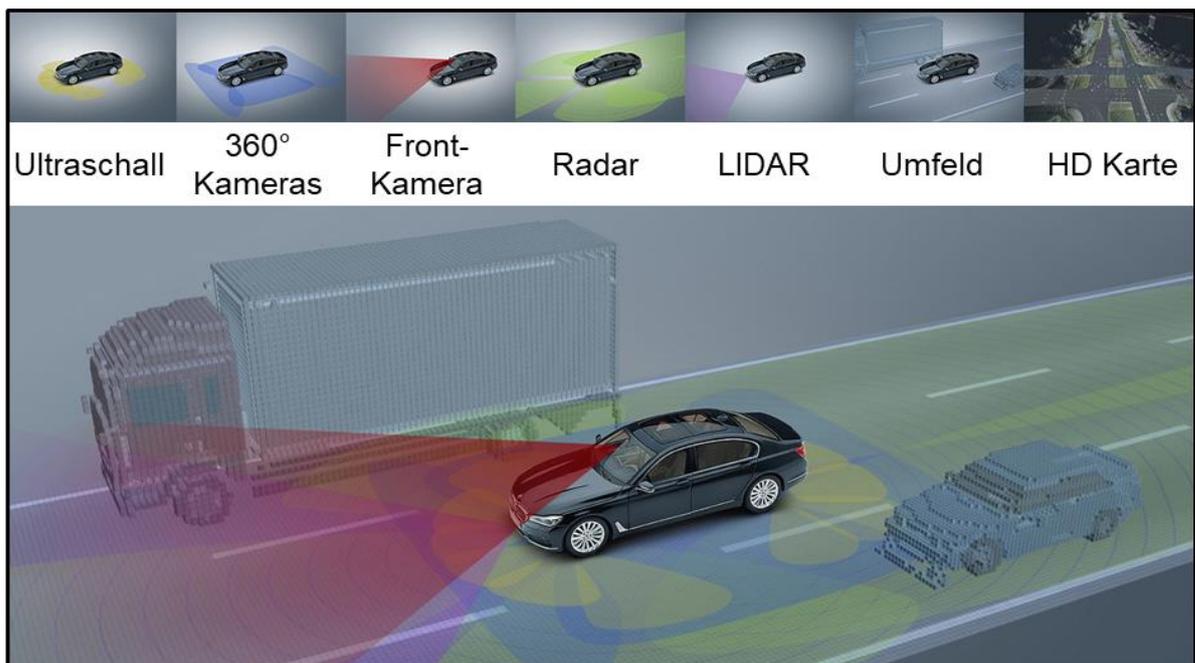


Abbildung 21: Sensoren für das automatisierte Fahren, eigene Darstellung i. A. a. [Eymann 2019]

Neben den eigenen Sensoren können auch Informationen aus der Umgebung und von anderen Verkehrsteilnehmern verwendet werden, damit das automatisierte Fahrzeug seine eigene Wahrnehmung erweitert [Khan et al. 2023, S. 5f.]. Hierfür wird die V2X-Kommunikation eingesetzt, die über eine angepasste Version des 802.11-Funktstandards oder eine Mobilfunkverbindung genutzt werden kann [Khan et al. 2023, S. 6; Coppola und Morisio 2016, S. 10]. Die in V2X enthaltenen Arten der Konnektivität sind: Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Network (V2N) und Vehicle-to-Pedestrian (V2P), welche in Abbildung 22 visualisiert sind [Coppola und Morisio 2016, S. 11; Chai et al. 2021, S. 44; Thales Group 2021]. Generell ermöglicht die V2X-Kommunikation, dass automatisierte Fahrzeuge mit Informationen versorgt werden, die sie selbst nicht oder nur eingeschränkt erhalten können [Thales Group 2021].

Ein Beispiel hierfür ist die frühzeitige Warnung vor Gefahrenstellen, wie z. B. Staus, Fahrzeugpannen oder Glatteis. In diesem Fall kann starkes Bremsen voranfahrender Fahrzeuge mittels V2V-Kommunikation an nachfolgende Fahrzeuge übermittelt und diese dadurch frühzeitig gewarnt und verlangsamt werden. Durch die Kommunikation mit der Infrastruktur (u. a. Lichtsignalanlagen und Verkehrsschilder) werden weitere Anwendungsfälle wie die Übermittlung der Grünphasen, Anzeigen freier Parkplätze und das Zahlen von Straßennutzungsgebühren ermöglicht. [Johanning und Mildner

2015, S. 15; Fuchs et al. 2015, S. 534; Kleine-Besten et al. 2015, S. 1070f.; Chai et al. 2021, S. 44f.; Weber 2020, S. 100]

Folgende Standards werden dabei für die Informationsübertragung verwendet:

- ITS-G5 (V2X) oder Dedicated Short Range Communication (DSRC),
- Cellular-V2X (C-V2X) oder PC-5 (5G) und
- Hybride Ansätze, die V2X- und C-V2X-Kommunikation nutzen [Khan et al. 2023, S. 6].

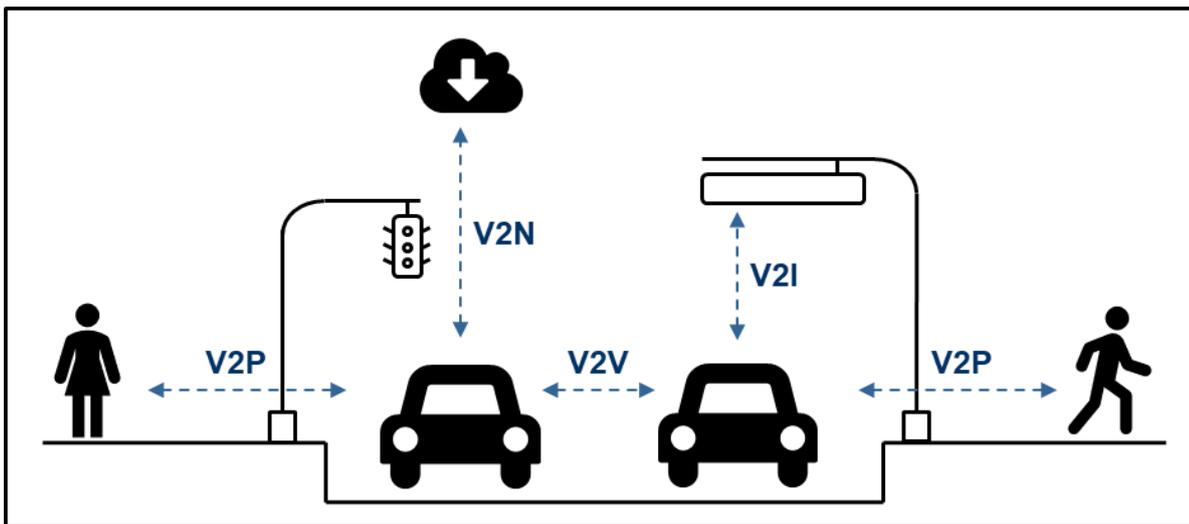


Abbildung 22: Einteilung V2X-Kommunikation, eigene Darstellung i. A. a. [Thales Group 2021]

3.2.2.2 Lokalisierung

Zur Lokalisierung nutzen automatisierte Fahrzeuge ein Differential Global Positioning System (DGPS), mit dem die Position auf bis zu Zentimeter-Genauigkeit bestimmt werden kann [Dietmeyer 2015, S. 421–423; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50; Chai et al. 2021, S. 48f.]. In Unterführungen oder Tunneln können jedoch die Abweichungen von DGPS zunehmen [Dietmeyer 2015, S. 421–423; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50; Chai et al. 2021, S. 47]. Deshalb wird diese Technologie durch den Einsatz von digitalen HD-Karten unterstützt (siehe Abbildung 23), welche eine Genauigkeit von 5 cm bis unter 50 cm aufweisen [Lücke 2022; Chai et al. 2021, S. 31f.; Liu et al. 2020, S. 324–326].

In diesen hochauflösenden Karten werden Informationen über den Straßenverlauf, etwaige Hindernisse sowie Fahrbahnmarkierungen inklusive deren semantischer Bedeutung hinterlegt [Dietmeyer 2015, S. 421–423; Lücke 2022; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50; Liu et al. 2020, S. 328–333]. Dadurch können HD-Karten das Umgebungsmodell des automatisierten Fahrzeugs vervollständigen (siehe Abschnitt 3.2.1) [Khan et al. 2023, S. 5]. Darüber hinaus resultiert aus der Verwendung von HD-Karten der Vorteil, dass die automatisierten Fahrzeuge mittels GPS lediglich die eigene Position bestimmen müssen [Dietmeyer 2015, S. 421–423; Lücke 2022; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50]. Das Fahrverhalten an der jeweiligen Stelle wird aus den HD-Karten entnommen [Dietmeyer 2015, S. 421–423; Lücke 2022; Ullrich und Albrecht 2019, S. 47–50].

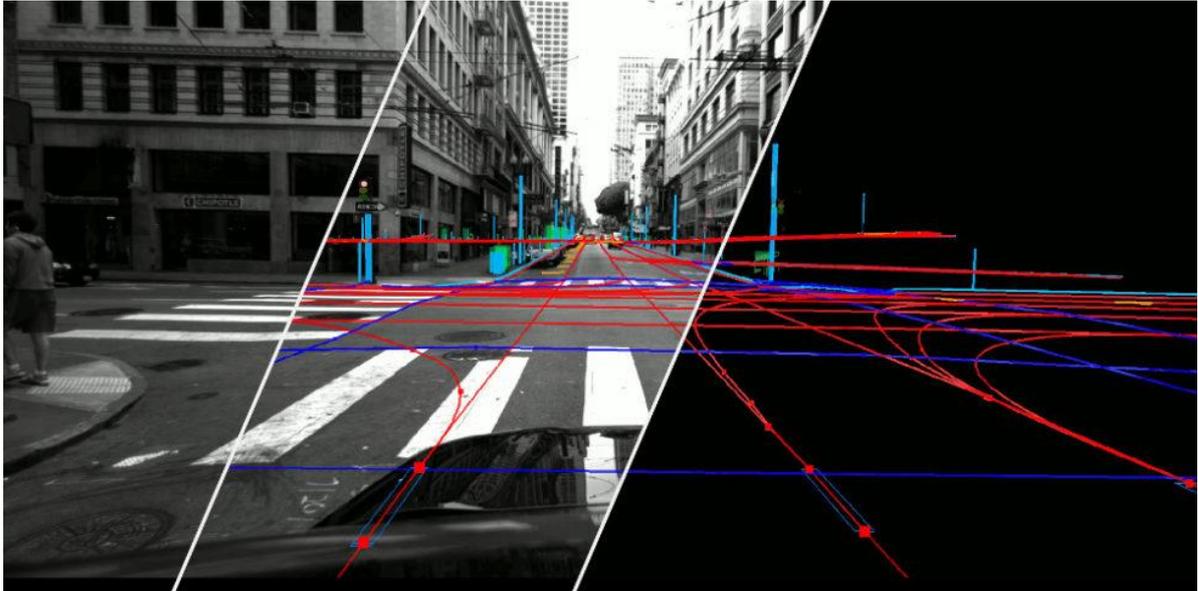


Abbildung 23: Umgebung ohne digitale Karte (links), Umgebung mit digitaler Karte (Mitte) und separierte digitale Karte (rechts) [Lücke 2022]

Zusätzlich wird DGPS auch mit Lidar-Sensoren und Odometrie kombiniert [Clausen und Klingner 2018, S. 388; Chai et al. 2021, S. 47]. Bei letzterem werden die Positionsdaten aus Bewegungssensoren (bspw. Radumdrehungen) ermittelt [Kolb et al. 2020, 63; Clausen und Klingner 2018, S. 388; Chai et al. 2021, S. 47]. Die Daten der Odometrie- und Lidar-Sensoren werden mit den DGPS-Daten zusammengeführt, um die eigene Position zu bestimmen [Kolb et al. 2020, 64; Chai et al. 2021, S. 47f.]. Abschließend werden die gesammelten Positionsdaten per Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Verfahren mit der im Fahrzeug gespeicherten HD-Karte abgeglichen [Kolb et al. 2020, 64].

3.2.2 Situationsverstehen

Basierend auf dem Fahrzeugumfeldmodell, welches die physikalischen (Länge, Breite, Höhe, Position aber auch Geschwindigkeit und Beschleunigung) und semantischen Informationen der Objekte enthält, werden im Rahmen der Situationserkennung die einzelnen Objekte zu einem maschinellen Szenenverständnis zusammengefügt [Dietmeyer 2015, S. 421–425; Wahlster 2017a, S. 17f.]. Die Situationserkennung erfolgt mit Deep Learning, einer Methode des maschinellen Lernens [Weber 2020, S. 104]. Im Verlauf des Lernprozesses werden dem automatisierten Fahrsystem mittels Bildern verschiedene Objekte und Situationen präsentiert, die es verarbeitet, bis eine zuverlässige Identifizierung möglich wird [Weber 2020, S. 104; Anger 2021]. Innerhalb der Situationsprädiktion wird die Position und Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer in der Zukunft vorhergesagt [Dietmeyer 2015, S. 421; Stiller et al. 2018, S. 85f.; Chai et al. 2021, S. 51]. Dabei werden mithilfe der vorherigen Klassifizierung und der eigenen Ziele unterschiedliche zukünftige Entwicklungen der Verkehrssituation (der Szene) mit Deep-Learning-Methoden vorausberechnet [Dietmeyer 2015, S. 421; Yen und Krenn 2024, S. 7; Wahlster 2017a, S. 17f.; Matthaei et al. 2015, S. 1154]. Die Situationsverläufe werden mit KI getestet, mit Eintrittswahrscheinlichkeiten bewertet und das erwartete Fahrverhalten vorhergesagt [Dietmeyer 2015, S. 421; Yen und Krenn 2024, S. 7; Wahlster 2017a, S. 17f.; Matthaei et

al. 2015, S. 1154; Wahlster 2017b, S. 414]. Beispielsweise wird sich eine Laterne am Straßenrand nicht verändern, während sich ein Fußgänger in alle Richtungen und auch über die Straße bewegen kann [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Die zukünftigen Entwicklungen einer Szene werden auch Episoden genannt und bilden eine zeitliche Situation von wenigen Sekunden ab, um die Fehlertoleranz möglichst gering zu halten [Dietmeyer 2015, S. 421]. Die Vorhersage ist dabei umso exakter, je genauer die Objekte wahrgenommen werden [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Karte, dieser Szenensemantik, der daraus resultierenden Verhaltensoptionen und der Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern wird im Rahmen der Handlungsplanung eine übergeordnete Handlung bzw. ein Fahrmanöver festgelegt [Dietmeyer 2015, S. 421; Chai et al. 2021, S. 51; Yen und Krenn 2024, S. 7; Matthaei et al. 2015, S. 1154; Wahlster 2017b, S. 414; Ziegler 2023, S. 9]. Beispielsweise besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass ein Fußgänger, der an einem Fußgängerüberweg wartet, die Straße überquert [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Als übergeordnete Handlung wird in diesem Beispiel das Bremsen an dem Fußgängerüberweg festgelegt [Yen und Krenn 2024, S. 7]. Weitere Beispiele für eine übergeordnete Handlung sind das Umfahren eines Hindernisses oder das Überholen eines langsameren Fahrzeugs [Dietmeyer 2015, S. 421; Ziegler 2023, S. 9; Chai et al. 2021, S. 51f.]. Die einzelnen Schritte des Situationsverstehens (Situationserkennung, -prädiktion und Handlungsplanung) werden voneinander unabhängig durchgeführt, damit das Ergebnis kontinuierlich geprüft werden kann [Fraunhofer IKS 2024].

3.2.3 Bahnführung (Aktorik)

Auf Grundlage der Handlungsplanung, bestimmt die Entscheidungssoftware des automatisierten Fahrzeugs, wie auf eine Szene zu reagieren ist, ermittelt im Rahmen der Bahnführung die exakte Fahrspur und setzt diese um [Dietmeyer 2015, S. 421; Chai et al. 2021, S. 51f.]. Ziel der Bahnführung ist es, die Bewegungen derart zu planen, dass eine Kollision mit Objekten vermieden wird und dass die Fahrt für die Fahrgäste als komfortabel erlebt wird [Chai et al. 2021, S. 51f.; Wahlster 2017a, S. 17f.]. Basierend auf der übergeordneten Handlung (bspw. Spurwechsel), werden mögliche Trajektorien des automatisierten Fahrzeugs für einen Zeithorizont von drei bis fünf Sekunden bestimmt [Dietmeyer 2015, S. 421; Stiller et al. 2018, S. 85f.; Ziegler 2023, S. 10]. Die Trajektorie definiert einen Pfad auf der Straßenoberfläche, für den für jeden Punkt auf dem Pfad eine vorgegebene Geschwindigkeit festgelegt wird [Chai et al. 2021, S. 51f.]. Trajektorien können entweder mittels Verfahren in strukturierten Umgebungen (z. B. entlang von Straßen) oder mittels Verfahren in unstrukturierten Umgebungen (z. B. Parkplätze) berechnet werden [Matthaei et al. 2015, S. 1155f.]. Nach der Berechnung werden die Trajektorien hinsichtlich Sicherheit und Komfort bewertet und die optimale Trajektorie ausgeführt [Chai et al. 2021, S. 53; NavVis GmbH 2022]. Dafür wird die optimale Trajektorie durch Fahrzeugsteuerungsalgorithmen an das Fahrzeugantriebssystem (Aktorik) übermittelt [NavVis GmbH 2022; Chai et al. 2021, S. 53; Ziegler 2023, S. 10; Schucker 2020, S. 63]. Die Fahrzeugbetätigung erfolgt abschließend durch:

- den Antriebsstrang des Fahrzeugs für die Längsbeschleunigung,
- das Bremssystem für die Längsverzögerung und
- das Lenksystem für die Querbewegung [Chai et al. 2021, S. 53].

Das Ansteuern der einzelnen Aktuatoren erfolgt elektronisch über den Bordcomputer. Je nach Art der Komponenten werden eine elektronisch gesteuerte Bremsbetätigung, eine elektronische Motoransteuerung oder Steer-by-Wire-Systeme verwendet. Steer-by-Wire beschreibt das elektronische Lenken des Fahrzeugs ohne eine mechanische Verbindung der Lenk- und Zahnstangenaktuatoren, die letztlich die Räder einlenken. Diese Technologie ermöglicht Echtzeitfähigkeit, Genauigkeit und Sicherheit. [Pipp et al. 2018, S. 206; Weber 2020, S. 102; Robert Bosch GmbH 2022a; Fraunhofer IKS 2024]

Der Prozess der Bahnführung wird ebenso wie die Positionsermittlung, die Navigation und das Situationsverstehen kontinuierlich durchgeführt, wobei die Abweichung der geplanten und umgesetzten Trajektorie ermittelt wird [NavVis GmbH 2022; Ziegler 2023, S. 10f.; Schucker 2020, S. 63f.]. Die ständige Wiederholung der Lokalisierung durch Sensordaten und eine HD-Karte ermöglicht eine genaue Schätzung der aktuellen Position und ein Bild der Umgebung, um auf Aktionen und Reaktionen anderer Verkehrsteilnehmer reagieren zu können [Dietmeyer 2015, S. 421; NavVis GmbH 2022; Ziegler 2023, S. 10f.; Schucker 2020, S. 63f.].

3.2.4 Fernüberwachung und -steuerung (Leitstelle)

Trotz der fortschreitenden Entwicklung automatisierter Fahrzeuge verbleiben mittelfristig eine Reihe von Herausforderungen, die nicht allein durch technologischen Fortschritt bewältigt werden können [Zhang 2020, S. 11348]. Frühe Generationen von automatisierten Fahrzeugen werden mit dynamischen Bedingungen und Situationen eines gemischten Verkehrs konfrontiert, welche von den KI-Methoden nicht eindeutig gelöst werden können [Bout et al. 2017, S. 63]. In diesen Fällen muss ein menschlicher Entscheidungsträger bzw. eine menschliche Assistenz das Fahrzeug unterstützen [Bout et al. 2017, S. 63]. Vor diesem Hintergrund bietet sich der Einsatz von menschlichen Operatoren an, welche die automatisierten Fahrzeuge (ab Stufe 3) von einer Leitstelle aus der Ferne überwachen und bei Bedarf in den Prozess des automatisierten Fahrens (Maschinelle Wahrnehmung, Situationsverstehen und Bahnführung) eingreifen [Dietmeyer 2015, S. 420f.; Wahlster 2017b, S. 414; Bachmann et al. 2022, S. 17819; Biletska et al. 2023, S. 2f.; Zhang 2020, S. 11348; Bout et al. 2017, S. 63; Kettwich und Dreßler 2020, S. 69; Leonetti et al. 2020, S. 4f.]. Die Verwendung einer Leitstelle erlangt insbesondere im Kontext des Einsatzes hochautomatisierter Fahrzeuge im ÖV (Stufe 4 ÖV) eine entscheidende Bedeutung, da in diesem Bereich eine hohe Servicezuverlässigkeit und Sicherheit erforderlich sind [Bout et al. 2017, S. 63; Bachmann et al. 2022, S. 17819; Biletska et al. 2023, S. 2f.; Gontscharow et al. 2023, S. 4319].

Derzeit zählen die Durchführung des Betriebs (u. a. Verkehrs- und Betriebsplanung, Fahrzeugdisposition, Störungs- und Notfallmanagement), Serviceaufgaben (u. a. Fahrgastinformation und -kommunikation) sowie das Fahrzeug-/Depotmanagement zu den Kernaufgaben einer Leitstelle für konventionelle Fahrzeuge [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Bergner et al. 2015, S. 8–15; Bachmann et al. 2022, S. 17819; Janecke et al. 2005, S. 167–174]. Biletska et al. identifizieren 24 Anforderungen, die zukünftige Leitstellen erfüllen müssen, um den Einsatz hochautomatisierter Fahrzeuge zu ermöglichen [Biletska et al. 2022, S. 742f.; Biletska et al. 2023, S. 2f.].

Neben den zuvor genannten Aufgaben besteht eine der Hauptaufgaben darin, die Funktionstüchtigkeit der Fahrzeugsensoren, die Verbindung zum Fahrzeug und die Funktionstüchtigkeit der für die V2X-Kommunikation notwendigen Infrastruktur zu überwachen [Biletska et al. 2022, S. 742f.; Gontscharow et al. 2023, S. 4322]. Die Überwachung der Verkehrssituation, die Freigabe von Fahrmanövern, die Teleoperation sowie die Überwachung der Fahrzeugkapazität und des Batteriemagements müssen als neue Aufgaben von der Leitstelle erfüllt werden [Gontscharow et al. 2023, S. 4319; Biletska et al. 2022, S. 742f.]. Durch die Erweiterung des Funktionsumfangs mit Zugriff auf sämtliche Informationen des Fahrzeugs und der Infrastruktur, wird die Leitstelle als Rückfallebene für das automatisierte Fahrsystem fungieren [Bout et al. 2017, S. 63].

Die Leitstelle kann das automatisierte Fahrzeug in allen drei Verarbeitungsphasen (maschinelle Wahrnehmung, Situationsverstehen und Bahnführung) unterstützen, falls die bordeigene Sensorik oder die V2X-Kommunikation nicht ausreichen [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 59–64]. Indem die Leitstelle bspw. auf das Kamerabild des automatisierten Busses oder auf die Sensorik an einer Lichtsignalanlage zugreift und den Zustand ermittelt, kann die maschinelle Wahrnehmung unterstützt werden [Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Das Kamerabild des Fahrzeugs ist auch für das Situationsverständnis von entscheidender Relevanz, bspw. im Falle eines Unfalls anderer Verkehrsteilnehmer [Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Es ermöglicht den Verantwortlichen in der Leitstelle, die Situation präzise zu erfassen und darauf aufbauend zielgerichtet Handlungspläne zu entwickeln [Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Inwieweit die Leitstelle zukünftig in die Bahnführung der automatisierten Fahrzeuge eingreifen kann, wird derzeit diskutiert [Biletska et al. 2021, S. 60–63; Biletska et al. 2022, S. 740–743; Gontscharow et al. 2023, S. 4320]. Unstrittig ist dabei, dass das automatisierte Fahrzeug mit Situationen konfrontiert ist, die es nicht alleine lösen kann und bei der die Notwendigkeit der Fernsteuerung besteht [Gontscharow et al. 2023, S. 4322]. Hierbei existieren zwei Optionen. Als erste Option (Mindestausstattung) sollte die Leitstelle abstraktere Fahrbefehle erteilen oder Fahrtrouten freigeben können, welche das automatisierte Fahrzeug selbst errechnet und umsetzt (Tele-Assist oder Fernassistenz) [Gontscharow et al. 2023, S. 4320–4322; Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 60–63; Herzberger et al. 2022, S. 502–504]. Die Maximalausstattung (zweite Option) umfasst die Übertragung von Lenkwinkeln und Geschwindigkeitssignalen [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 60–63; Gontscharow et al. 2023, S. 4320–4322]. Dies ermöglicht eine Fernsteuerung des Fahrzeugs (Teleoperation) mittels Lenkrad oder Joystick aus der Leitstelle heraus [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 60–63; Gontscharow et al. 2023, S. 4320–4322]. Für diesen Fall ist jedoch ein Schutz vor Hackerangriffen essenziell, damit die Sicherheit im öffentlichen Raum gewährleistet wird [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Damit bei einer Teleoperation eine geringe Latenzzeit gewährleistet werden kann, bedarf es zudem einer ausreichenden Mobilfunkverbindung (5G) [Khan et al. 2023, S. 2].

Ergänzend zur Unterstützung des automatisierten Fahrzeugs bei der Fahrtätigkeit, ist es insbesondere beim Einsatz von automatisierten Bussen erforderlich, dass die

Leitstelle auch für die Sicherheit der Passagiere im Fahrzeug sorgt [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Dadurch, dass kein Fahrer im Fahrzeug anwesend ist, kommt der Fahrgastkommunikation eine entscheidende Bedeutung zu [Biletska et al. 2022, S. 740–743; Biletska et al. 2021, S. 60–63; Bachmann et al. 2022, S. 17822]. Neben der Beantwortung von Fahrgestanfragen oder der Kommunikation in Notfallsituationen, sollte auch eine Ankündigung erfolgen, wenn die Steuerung aus der Ferne übernommen wird [Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Dafür eignet sich ein Interface mit Bildschirm, Kamera, Mikrophon und Lautsprechereinrichtung im Fahrzeug [Biletska et al. 2021, S. 60–63]. Weiterhin soll eine cloudbasierte KI das Personal in Leitstellen unterstützen und den Arbeitsaufwand minimieren [Biletska et al. 2021, S. 60–63].

Die vorangegangenen Ausführungen veranschaulichen, dass Leitstellen zukünftig das zentrale Bindeglied in einem Verkehrsmanagement zwischen Verkehrsleitzentralen, automatisierten Fahrzeugen, Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern einnehmen (siehe Abbildung 24) [Biletska et al. 2021, S. 64].

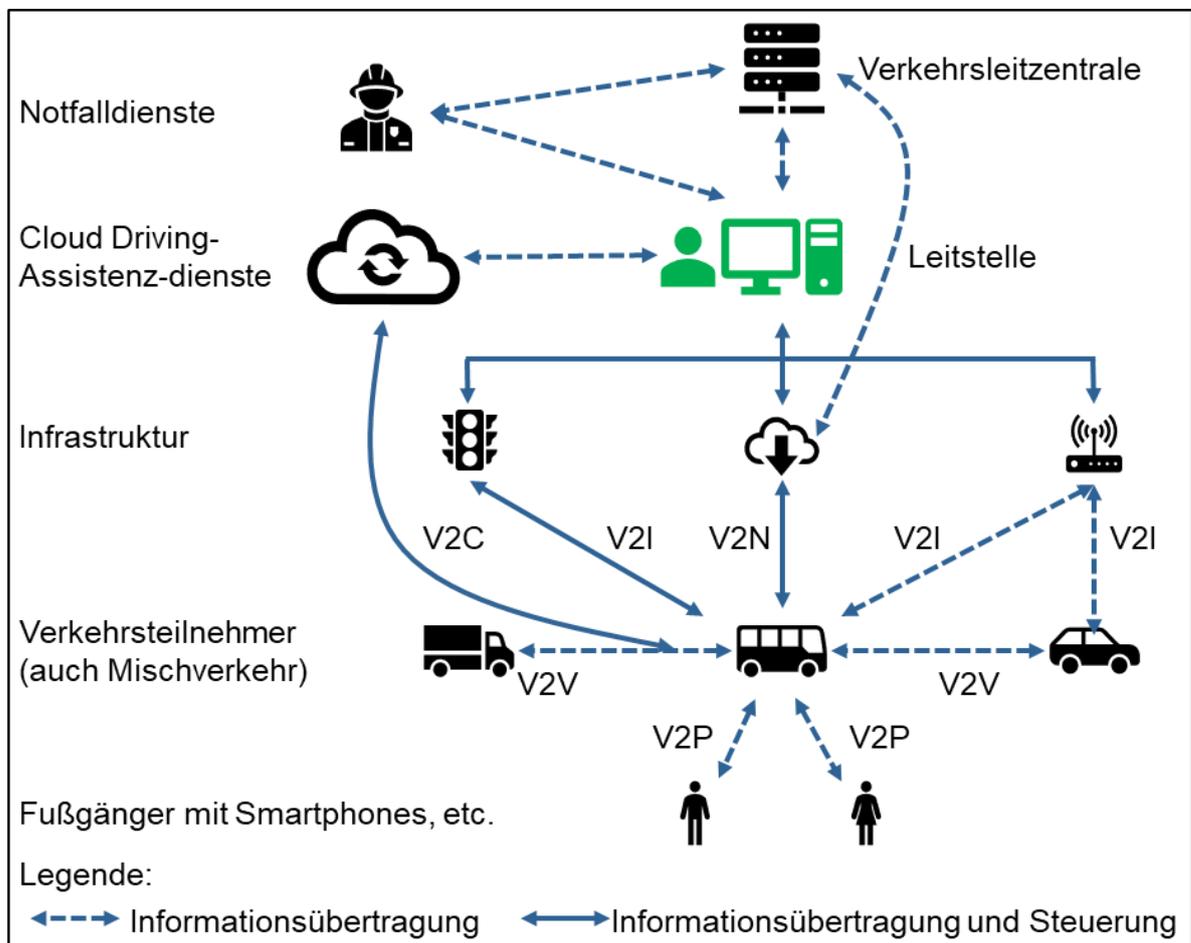


Abbildung 24: Einbindung der Leitstelle in das Verkehrsmanagement, eigene Darstellung i. A. a. [Biletska et al. 2021, S. 64]

3.3 Status Quo des automatisierten Fahrens

Für die Zielstellung dieser Arbeit, einen ganzheitlichen Planungsprozess inklusive Bewertungsverfahren zur Streckenauswahl für automatisierte Busse zu entwickeln,

ist die Analyse des aktuellen Entwicklungsstandes der Fahrzeuge essenziell. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abschnitten zuerst Technologieansätze aus dem Bereich MIV sowie ÖPNV (Abschnitt 3.3.1) vorgestellt. In diesem Zusammenhang werden Technologieansätze aus dem Bereich der Leitstelle präsentiert. Anschließend werden diese Technologieansätze eingeordnet und die Einsatzbedingungen beim Betrieb der Fahrzeuge im öffentlichen Raum erläutert (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Vorstellung der Technologieansätze im Bereich MIV und ÖPNV

In einer Analyse von Guidehouse Insights aus dem Jahr 2020 wurden die führenden Unternehmen im Bereich des automatisierten Fahrens anhand von einer Vielzahl von Kriterien im Zusammenhang mit ihrer Strategie und Umsetzung bewertet, darunter Vision, Partner, Technologie und Produktfähigkeit bewertet. Die Firmen Waymo, Ford und Cruise wurden dabei als marktführende Unternehmen identifiziert. Während Tesla in diesem Ranking auf dem letzten Platz gelistet ist, zählen auch Volkswagen oder Daimler zu den marktführenden Unternehmen. Bei dieser Auflistung bestätigen sich die Ausführungen in Abschnitt 2.4.2, nach denen neben bekannten Automobilherstellern auch vermehrt IT-Unternehmen den Markt betreten. [Manager-Magazin 2021; Greifenstein et al. 2024, S. 61f.; Matousek 2020]

Der Markt für automatisierte Busse gestaltet sich ähnlich vielfältig. In Tabelle 6 findet sich eine Auflistung einiger Hersteller automatisierter Busse. Im deutschen Raum sind vor allem die französischen Firmen GAMA (ehemals Navya) und EasyMile mit Fahrzeugen aktiv. Weitere Hersteller sind u.a. 2getthere, Zoox und COAST Autonomous, sowie die chinesischen Anbieter Baidu, Dongfeng und YUTONG. Darüber hinaus ist auch die IAV an der Automatisierung konventioneller Busse in Deutschland beteiligt. [Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH 2021; Holst 2022, S. 37; Greifenstein et al. 2024, S. 61f.; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024; Sustainable Bus 2023]

Tabelle 6: Übersicht verschiedener Hersteller von automatisierten Bussen, eigene Darstellung i. A. a. [Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH 2021; Holst 2022, S. 37; Greifenstein et al. 2024, S. 61f.; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024; Sustainable Bus 2023]

Hersteller automatisierter Busse	
2getthere	Baidu
COAST Autonomous	Dongfeng
EasyMile	GAMA (ehemals Navya)
IAV	Mobileye
Yutong	Zoox

Aufgrund der weltweit hohen Bedeutung und der Vorreiterrolle werden im Weiteren die automatisierten Fahrzeuge von Waymo vorgestellt. Im deutschen Raum werden insbesondere automatisierte Fahrzeuge von Mercedes-Benz, BMW, Tesla, EasyMile, GAMA, 2getthere und der IAV im öffentlichen Raum eingesetzt [Greifenstein et al. 2024, S. 61f.; Holst 2022, S. 37; Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH 2021; Rudschies und Kroher 2024]. Deshalb werden nachfolgend die Fahrzeuge dieser Firmen präsentiert. In Anbetracht der vergleichbaren Technologieansätze zwischen Mercedes-Benz und BMW werden die Ausführungen zu BMW im Anhang A.2 dargestellt.

Waymo:

Ursprünglich unter Google gestartet, existiert die Firma Waymo seit der Unabhängigkeit 2016 [Waymo LLC 2024f]. Als Fahrzeug wird ein modifizierter Chrysler Pacifica Hybrid Minivan, der mit dem sog. „Waymo Driver“ ausgestattet ist, verwendet [Waymo LLC 2024f]. Wie Abbildung 25 visualisiert, sind die Fahrzeuge von Waymo mit Lidar- und Radarsensoren sowie Kamerasystemen ausgerüstet [Waymo LLC 2021]. Die Expertise von Waymo liegt in der Sensorfusion (siehe Abschnitt 3.2.1.1), mit welcher die Vorteile der einzelnen Sensoren kombiniert und sämtliche Anwendungsfälle abgedeckt werden können [Waymo LLC 2021]. Zusätzlich wird das Fahrzeug durch digitale Karten unterstützt, die vor dem Betrieb eingepflegt werden [Waymo LLC 2024d].

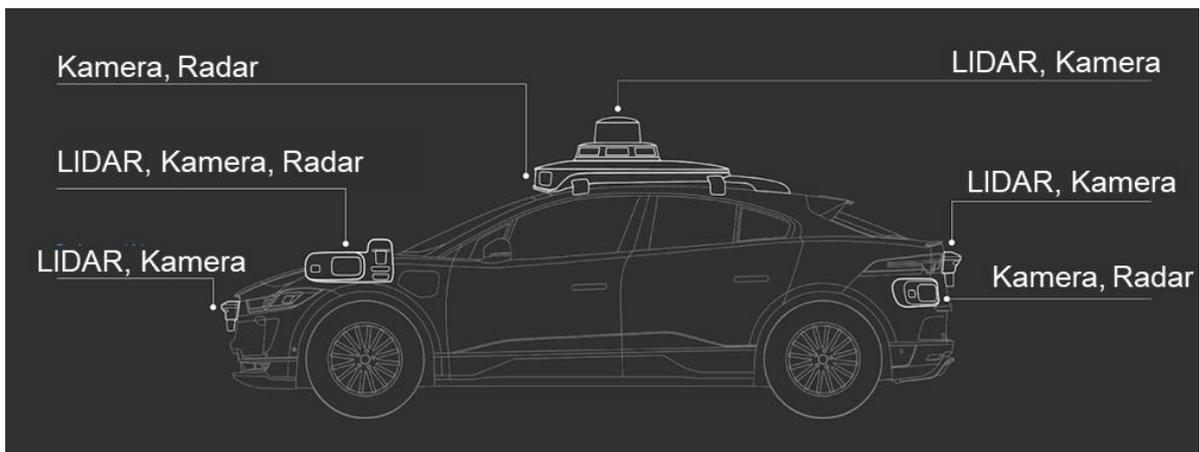


Abbildung 25: Übersicht der Sensoren im automatisierten Fahrzeug von Waymo, eigene Darstellung i. A. a. [Waymo LLC 2020]

Waymo betreibt seit 2018 unter dem Projekt „Waymo One“ den ersten öffentlichen hochautomatisierten On-Demand-Betrieb [Waymo LLC 2024f; Waymo LLC 2024a]. Dabei können die Fahrzeuge per App bestellt und zu sämtlichen Tageszeiten genutzt werden [Waymo LLC 2024f; Waymo LLC 2024a; Waymo LLC 2024c; Waymo LLC 2024b]. Seit 2020 befindet sich kein Sicherheitsfahrer im Fahrzeug [Ackerman 2021; Waymo LLC 2024c]. Stattdessen wird eine Leitstelle eingesetzt, von welcher aus Mitarbeiter die Fahrzeugsteuerung übernehmen können, falls die Verkehrssituation die Fähigkeiten des Waymo Drivers übersteigt [Ackerman 2021; Waymo LLC 2024c]. Besonders in Baustellen, bei Handsignalen und allgemein unübersichtlichen Stellen wird die Leitstelle von den automatisierten Fahrzeugen angefordert [Ackerman 2021]. Da die Fahrzeuge von Waymo nur in bestimmten Betriebsbereichen operieren dürfen, handelt es sich hierbei um vollautomatisiertes Fahren (Stufe 4) [Waymo LLC 2024d; Ackerman 2021]. Der Einsatzbereich wurde in der Vergangenheit stetig ausgeweitet, sodass in 2024 815 km² Einsatzfläche in Phoenix (Arizona) durch die Fahrzeuge erschlossen wurden [Waymo LLC 2024b]. Weitere Anwendungsfälle befinden sich in San Francisco, Los Angeles und Austin [Waymo LLC 2024f; Waymo LLC 2021; Waymo LLC 2024e].

Mercedes Benz:

Mercedes Benz bietet an, die S-Klasse serienmäßig mit einem „Drive Pilot“ auszustatten [Pertschy 2021]. Mit dieser Technologie wird von Mercedes-Benz das erste

bedingt automatisierte Fahrzeug (Stufe 3) eingeführt, das in Deutschland auf öffentlichen Straßen zugelassen ist [Pertschy 2021; Mercedes-Benz Group AG 2024c]. Der Einbau des Drive Pilots enthält zusätzliche Sensoren rundum das Fahrzeug, wie bspw. Lidar-, Radar- und Ultraschallsensoren sowie Kamerasysteme [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024c; Mercedes-Benz Group AG 2024b]. Zur Lokalisierung werden GPS und digitale Karten verwendet [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024b; Mercedes-Benz Group AG 2024c]. Die Besonderheit des Drive Pilots besteht darin, dass die gesammelten Daten, wie bspw. Straßengeometrie, Streckeneigenschaften und Verkehrszeichen, gebündelt an einen Backend-Rechner weitergeleitet werden, der die Karten kontinuierlich aktualisiert [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024b; Mercedes-Benz Group AG 2024c]. Mithilfe der Aktualisierung können in Zukunft eine präzisere Lokalisierung und ein vorausschauendes Fahrverhalten realisiert werden [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024b].

Der Drive-Pilot ermöglicht das bedingt automatisierte Fahren (Stufe 3) im Stau auf der Autobahn, welches Geschwindigkeits- und Abstandsregelung sowie das Einhalten der Fahrspur beinhaltet [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024c; Mercedes-Benz Group AG 2024b; Pertschy 2021]. Dabei ist der Einsatz nur auf Autobahnen bis 60 km/h bei Tageslicht, nicht in Tunneln sowie Baustellen und nur bei Temperaturen über 3 °C möglich [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024b]. Ein Spurwechsel ist nicht möglich, jedoch ist das Fahrzeug selbstständig imstande, innerhalb der Spur aufgrund von Hindernissen oder anderen Fahrzeugen auszuweichen [Hebermehl und Baumann 2022; Pertschy 2021]. Das Zusammenspiel von Heckscheiben-Kamera und Mikrofonen ermöglicht es, herannahende Rettungsfahrzeuge zu erkennen und präventiv eine Rettungsgasse zu bilden [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024c; Mercedes-Benz Group AG 2024b]. Aufgrund dessen, dass der Fahrer im Notfall eingreifen muss, wurde die Mensch-Maschine-Kommunikation in die Entwicklung einbezogen [Mercedes-Benz Group AG 2024b; Hebermehl und Baumann 2022]. Demnach wird dem Fahrer signalisiert, wenn er das Fahrzeug wieder übernehmen muss [Hebermehl und Baumann 2022; Mercedes-Benz Group AG 2024b]. Mit der Übergabe der Steuerung vom Fahrer an das automatisierte Fahrsystem wird auch die Verantwortung an das Fahrzeug bzw. an den Hersteller übergeben [Hebermehl und Baumann 2022].

Tesla:

Tesla stattet seine Fahrzeuge seit 2021 mit einem kamerabasierten Autopilotensystem aus, welches in den USA eingesetzt wird [Tesla Inc. 2024e]. Dabei wird der Autopilot je nach Komplexität der Assistenzsysteme in unterschiedliche Stufen eingeteilt [Pertschy 2021; Tesla Inc. 2024a; Tesla Inc. 2024b]. Als Standardvariante ist der Autopilot in jedem Fahrzeug enthalten und übernimmt Fahraufgaben wie Beschleunigen, Bremsen oder Lenken [Pertschy 2021; Tesla Inc. 2024a]. Die nächste Stufe, der Enhanced Autopilot, führt u. a. die Navigation aus [Pertschy 2021; Tesla Inc. 2024b]. Die höchste Automatisierungsstufe wird als Full Self-Driving bezeichnet [Pertschy 2021; Tesla Inc. 2024b]. Diese befindet sich derzeit in der Beta-Phase, wobei geplant

wird, dass in Zukunft die Verkehrszeichen erkannt und der Lenkassistent für den Stadtverkehr freigegeben werden [Pertschy 2021; Tesla Inc. 2024b].

Im Gegensatz zu den anderen Technologieansätzen verzichtet Tesla auf Lidar-Sensoren und zukünftig auch auf Radarsensoren [Tesla Inc. 2024a; Köllner 2022]. Stattdessen wird der Fokus auf Kamerasysteme gelegt [Tesla Inc. 2024a; Köllner 2022]. Insgesamt werden acht Kameras verwendet, die eine 360° Umfeldüberwachung bei einer Reichweite von bis zu 250 m ermöglichen [Tesla Inc. 2024a]. Um dennoch die verschiedenen Anforderungen des Straßenverkehrs zu erfüllen, werden unterschiedliche Kameratypen eingesetzt [Tesla Inc. 2024a]. Weitwinkelkameras können vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten Lichtsignalanlagen, einscherende Fahrzeuge und nahende Objekte erkennen [Tesla Inc. 2024a]. Telekameras hingegen besitzen Vorteile bei der Identifizierung von weiter entfernten Objekten, die besonders bei hohen Geschwindigkeiten Anwendung finden [Tesla Inc. 2024a].

Obwohl das automatisierte Fahrsystem derzeit einige Fahraufgaben übernehmen kann, bleibt die Verantwortung über das Fahrzeug beim Fahrer, welcher die Systeme aktiv überwacht [Tesla Inc. 2024b; Tesla Inc. 2024d]. Zusätzlich ist es erforderlich, dass der Fahrer während der Fahrt das Lenkrad festhält, um im Notfall eingreifen zu können [Tesla Inc. 2024c; Tesla Inc. 2024d]. Beim Verstoß gegen diese Anforderung werden mehrere visuelle und akustische Warnungen ausgelöst, bis schließlich die Nutzung des Autopiloten für den Rest der Fahrt gesperrt wird [Tesla Inc. 2024c; Tesla Inc. 2024d]. Aufgrund dieser teils starken Einschränkungen wird derzeit nur ein teilautomatisierter Betrieb (Stufe 2) und kein bedingt automatisierter Betrieb (Stufe 3) von Tesla erreicht [Tesla Inc. 2024c; Tesla Inc. 2024d; Stegemann 2023]. Allerdings soll es zukünftig Software-Updates geben, die ein vollautomatisiertes Fahren ermöglichen [Tesla Inc. 2024c; Tesla Inc. 2024d].

EasyMile und GAMA:

EasyMile und GAMA, ehemals Navya, sind zwei französische Hersteller für automatisierte Kleinbusse. Beide Unternehmen wurden 2014 gegründet, wobei Navya in 2023 von GAMA übernommen wurde. Das Unternehmen EasyMile ist der Hersteller des Kleinbusses EZ10, der mittlerweile in der dritten Generation produziert wird. GAMA stellt den Autonom® Shuttle Evo her. Die Fahrzeuge beider Firmen sind für Anwendungsfälle im Personentransport konzipiert. [Navya SAS 2024a; Navya SAS 2024b; Sustainable Bus 2023; Fluhr 2019; EasyMile 2024a; Navya SAS 2024c; EasyMile 2024c]

In Tabelle 7 werden die Basisdaten der beiden Fahrzeuge gegenübergestellt. Beide automatisierten Busse besitzen die Abmaße eines Kleintransporters und können ähnliche Passagierzahlen (zwölf und fünfzehn) befördern. Hinsichtlich der Geschwindigkeit und maximalen Fahrdauer weist der EZ10 die besseren Werte auf. Beide Hersteller geben an, dass ihre Fahrzeuge hochautomatisiert (Stufe 4) und auch manuell per Joystick (Stufe 0) fahren können. [Kolb et al. 2020, 68; Navya SAS 2024a; EasyMile 2024a; Navya SAS 2022a, S. 8–21; Reichel 2020; EasyMile 2023, S. 8–22; Navya SAS 2022b; Butcher 2022]

Tabelle 7: Basisdaten der automatisierten Busse von EasyMile und GAMA, eigene Darstellung i. A. a. [Kolb et al. 2020, 68; Navya SAS 2024a; EasyMile 2024a; Navya SAS 2022a, S. 8–21; Reichel 2020; EasyMile 2023, S. 8–22; Navya SAS 2022b; Butcher 2022]

Basisdaten	EasyMile EZ10	Autonom® Shuttle Evo
Fahrgäste	6 Sitz- und 6 Stehplätze	11 Sitz- und 4 Stehplätze
Abmessungen (LxBxH)	4,05 x 1,89 x 2,87 m	4,78 x 2,10 x 2,67 m
Gewicht (Leer / Gesamt)	2.130 / 3.130 kg	2.600 / 3.500 kg
Max. Geschwindigkeit	40 km/h	25 km/h
Max. Fahrdauer	14 h	9 h
Automatisierungsstufe	0 und 4	0 und 4

Hinsichtlich der Sensorik werden bei beiden Bussen GPS, Odometrie und Lidar-Sensoren zur Lokalisierung eingesetzt. Die Objekterkennung wird mittels Lidar- und Radarsensoren sowie Kamera durchgeführt. Eine detaillierte Darstellung der Sensoren ist im Anhang A.3 zu finden. [Kolb et al. 2020, 68-69; Navya SAS 2024a; EasyMile 2024a; Navya SAS 2022a, S. 8–21]

Abbildung 26 zeigt den EZ10 von EasyMile in der dritten Generation [Neißendorfer 2021; EasyMile 2021].



Abbildung 26: EasyMile EZ10 Gen 3 (© EasyMile) [Neißendorfer 2021; EasyMile 2021]

Die Fahrzeuge von EasyMile und GAMA wurden in über 50 Projekten in Deutschland für die Personenbeförderung eingesetzt, wobei die Projekte häufig temporär angelegt waren [Beckmann und Zadek 2022, S. 31–33]. Die Fahrzeuge werden ausschließlich mit einer Begleitperson (Operator) im öffentlichen Raum eingesetzt [EasyMile 2024a; Beckmann und Zadek 2022, S. 80; Kolb et al. 2020, S. 61; Gertz et al. 2021, S. 23]. Diese Begleitperson kann über einen Touchscreen oder einen Joystick im Notfall in das Fahrgeschehen eingreifen [Navya SAS 2022a, S. 8–21; Kolb et al. 2020, S. 61; Navya SAS 2024a]. Des Weiteren umfasst das Angebot beider Hersteller neben dem Fahrzeug selbst eine Leitstellenanwendung, die eine Fernüberwachung ermöglicht [Beckmann und Zadek 2022, S. 79]. Diese dient allerdings ausschließlich zur Überwachung der Fahrzeuge (u. a. Position, Batteriezustand, Türstatus) [Beckmann und Zadek 2022, S. 79]. In Abschnitt 3.3.2 erfolgt eine vertiefende Auseinandersetzung mit dem Einsatz der automatisierten Busse im öffentlichen Raum.

2getthere / ZF:

Das niederländische Unternehmen 2getthere arbeitet bereits seit über 30 Jahren im Bereich der automatisierten Busse und wurde 2019 von ZF übernommen [2getthere 2024b; ZF Friedrichshafen AG 2019]. Im Jahr 1997 wurde bereits das erste automatisierte Transitsystem am Amsterdamer Flughafen Schiphol getestet [2getthere 2024b; ZF Friedrichshafen AG 2019]. Angewendet wurde das System darüber hinaus in Rotterdam, Abu Dhabi, Singapur und in vielen Häfen und Flughäfen [2getthere 2024b; ZF Friedrichshafen AG 2019]. Das aktuelle Fahrzeug von 2getthere wird als „GRT“ bezeichnet und weist eine ähnliche Bauweise wie die Busse von EasyMile und GAMA auf [2getthere 2024c; 2getthere 2024d; 2getthere 2024a]. Der automatisierte Bus bietet Platz für bis zu 22 Fahrgäste (acht Sitzplätze), die mit einer Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h befördert werden können [2getthere 2024c; 2getthere 2024d; 2getthere 2024a]. Die Türen befinden sich auf beiden Seiten des Fahrzeugs, damit die Fahrzeuge universell in verschiedenen Anwendungsfällen eingesetzt werden können [2getthere 2024c; 2getthere 2024d]. Außerdem verfügt das Fahrzeug über eine Vorder- und Hinterradlenkung, womit es besser an Haltestellen navigieren kann und somit das Ein- und Aussteigen erleichtert [2getthere 2024c; 2getthere 2024d].

Analog zu den vorherigen Technologieansätzen werden von 2getthere verschiedene Sensoren am Fahrzeug verbaut und diese miteinander fusioniert [2getthere 2024d]. Zu den verwendeten Sensoren zählen Kamerasysteme sowie Lidar-, Radar- und Ultraschallsensoren [2getthere 2024d]. Diese ermöglichen eine 360° Umfeldüberwachung und einen Betrieb bei allen Wetterbedingungen [2getthere 2024d]. Eine der Kernaufgaben von 2getthere ist die Verbesserung der Wahrnehmungssysteme von automatisierten Bussen, wobei jederzeit die Sicherheit und Redundanz der Systeme im Vordergrund steht [2getthere 2024d]. Bislang wird sich auf Anwendungsfälle fokussiert, bei denen die automatisierten Fahrzeuge eine eigene Infrastruktur nutzen und auf einem abgesperrten Fahrstreifen fahren [2getthere 2024b; ZF Friedrichshafen AG 2019; 2getthere 2024e]. Das bekannteste Projekt ist der Einsatz automatisierter Busse in einem Business Park in Rivium, welcher 1999 mit einer eigenen Infrastruktur gestartet wurde [2getthere 2024b; ZF Friedrichshafen AG 2019; 2getthere 2024e]. Mittlerweile wurde der Betrieb auf den Mischverkehr ausgeweitet [2getthere 2024b; 2getthere 2024e].

IAV:

Die IAV ist kein direkter Hersteller von automatisierten Fahrzeugen, arbeitet jedoch im Feld des automatisierten Fahrens und entwickelt automatisierte Fahrsysteme [IAV GmbH 2024]. Zusätzlich ertüchtigt die IAV konventionelle Busse zum automatisierten Fahren [IAV GmbH 2024; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2021; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Dazu zählt der Verbau der entsprechenden Sensorik und die Implementierung eines Software-Stacks für das automatisierte Fahrzeugsystem [IAV GmbH 2024; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2021]. Ein Beispiel hierfür ist ein Kleinbus der im Landkreis Nordsachsen im Projekt Flash eingesetzt wird [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2021; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Dieser automatisierte Bus kann 20 Personen befördern und fährt mit einer Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h (siehe Abbildung 27)

[Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2021; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024; Projektteam FLASH 10.07.2024].



Abbildung 27: Automatisierter Bus der IAV im Projekt Flash [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]

Die Besonderheit dieses Fahrzeugs ist ein hybrides Steuerungskonzept, mit dem der automatisierte Bus manuell per Lenkrad und automatisiert betrieben werden kann [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Der Wechsel zwischen diesen beiden Modi erfolgt nahtlos [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Zur Umgebungsüberwachung werden Kameras, Lidar- sowie Radarsensoren eingesetzt [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2021; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Zusätzlich kommuniziert der automatisierte Bus mit der Lichtsignalanlage, sodass auch Kreuzungen automatisiert bewältigt werden können [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Dennoch wird die Fahrt von einem Sicherheitsfahrer im Fahrzeug überwacht, der im Bedarf eingreifen kann [Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2021; Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH 2024]. Der sogenannte Flash-Bus wird während der Fahrt von einer neu entwickelten Leitstelle überwacht, welche Fahrmanöver vorschlagen kann [Landratsamt Nordsachsen 2023]. Das Vorschlagen der Fahrmanöver wird jedoch bislang nur im nicht-öffentlichen Raum getestet [Landratsamt Nordsachsen 2023].

Leitstelle / Teleoperiertes Fahren:

Wie bereits beschrieben, entwickeln die Hersteller von automatisierten Bussen neben den Fahrzeugen auch Leitstellensysteme, mit denen die Fahrzeuge überwacht werden können. Darüber hinaus fokussieren sich einige spezialisierte Unternehmen auf das teleoperierte Fahren. Dazu zählen u. a. Ottopia, Fernride, MIRA und Vay [Ottopia Technologies 2024b; Fernride GmbH 2024a; MIRA GmbH 2024]. Ottopia teilt die Aufgaben der Leitstelle in Fernunterstützung und ferngesteuertes Fahren ein [Ottopia Technologies 2024a]. Bei der Fernunterstützung leitet der Mensch die KI im Fahrzeug an [Ottopia Technologies 2024a]. Dagegen übernimmt der Mensch beim ferngesteuerten Fahren die Kontrolle über das Fahrzeug [Ottopia Technologies 2024a]. Das teleoperierte Fahren ist bei Ottopia für verschiedene Anwendungen sowohl in der Personenbeförderung als auch in der Güterlogistik einsetzbar [Ottopia

Technologies 2024a]. Fernride konzentriert sich mit den Lösungen zum teleoperierten Fahren ebenfalls auf Logistikanwendungen und speziell auf den Containerverkehr mit Lkw [Fernride GmbH 2024a; Fernride GmbH 2024b]. Ein Operator kann dabei mehrere Fahrzeuge überwachen, um die Effizienz zu erhöhen [Fernride GmbH 2024a; Fernride GmbH 2024b]. Der Arbeitsplatz in der Leitstelle zum teleoperierten Fahren ist wie ein Fahrerarbeitsplatz mit Lenkrad, Fahrersitz, Schaltung und zusätzlichen Bildschirmen aufgebaut (siehe Abbildung 28) [Fernride GmbH 2024b].



Abbildung 28: Arbeitsplatz zum teleoperierten Fahren [Fernride GmbH 2024b]

MIRA GmbH entwickelt teleoperiertes Fahren hauptsächlich für die Steuerung von On-Demand-Bussen und Sharing-Fahrzeugen [MIRA GmbH 2024]. MIRA teilt die Aufgaben des teleoperierten Fahrens in „TeleDriving“ und „TeleAssist“ ein [MIRA GmbH 2024]. Beim TeleDriving wird ein Fahrzeug kontinuierlich aus der Ferne gesteuert [MIRA GmbH 2024]. Dagegen wird beim TeleAssist nur im Bedarfsfall (bspw. bei einer Störung) die Fahrzeugführung übernommen [MIRA GmbH 2024]. Der Ansatz der Firma Vay konzentriert sich auf teleoperiertes Fahren für Sharing-Fahrzeuge [Vay Technology GmbH 2024]. In Las Vegas werden von Vay bereits Fahrzeuge ohne Sicherheitsfahrer kommerziell eingesetzt [Vay Technology GmbH 2024]. Weiterhin wurden erste Testfahrten ohne Sicherheitsfahrer in Hamburg durchgeführt [Prawitz 2022; Vay Technology GmbH 2023].

3.3.2 Einordnung der Technologieansätze

Unabhängig von den Herstellerangaben werden im Folgenden die unterschiedlichen Technologieansätze anhand der Kriterien der SAE J3016 eingeordnet (siehe Abbildung 29). Gemäß Abschnitt 3.1 werden folgende Kriterien dafür verwendet: „Übernahme der Fahraufgabe“ (Quer- oder Längsführung, bzw. Quer- und Längsführung), „Umgebungsüberwachung“, „Verhalten in Notfallsituationen“ und „Betriebsbereich“ [SAE International 2021, S. 24–26]. Zusätzlich wird für die Bewertung das Kriterium „Leitstelle / TA“ hinzugefügt, da bereits einige Hersteller eigene Leitstellenanwendungen einsetzen (siehe Abschnitt 3.3.1). Die Mindestausstattung von Leitstellen bezieht sich gemäß der Technologieansätze von EasyMile und Gama auf die Kommunikation und Positionsübertragung (siehe Abschnitt 3.3.1). Weiterhin werden die

Ausprägungen der Leitstelle in Assistenzanwendungen, die Fahrmanöver freigeben, und in teleoperiertes Fahren unterteilt.

Die automatisierten Fahrzeuge von Waymo übernehmen die Quer- und Längsführung, die Umgebungsüberwachung und den Eingriff in Notfallsituationen [Waymo LLC 2024c; Waymo LLC 2024d; Waymo LLC 2024b; Computerbase 2023]. Dabei werden komplizierte Verkehrssituationen, wie bspw. Gegenverkehr in Baustellen oder parkende Fahrzeuge auf der Fahrspur, bewältigt [Rudschies und Kroher 2024; Waymo LLC 2024d]. Jedoch ist der Einsatz der Fahrzeuge derzeit auf einen bestimmten Betriebsbereich begrenzt [Waymo LLC 2024c; Waymo LLC 2024b; Computerbase 2023]. Eine Leitstelle, die Fahrmanöver freigeben kann, aber kein teleoperiertes Fahren zulässt, ergänzt den Service von Waymo [Ackerman 2021; Whole Mars Catalog 2024]. Aus diesem Grund werden die Fahrzeuge von Waymo gemäß der Definition vom VDV (siehe Abschnitt 3.1) der Stufe 4 ÖV zugeordnet.

Kriterien	Ausprägungen			
Übernahme der Fahraufgabe (Quer- oder Längsführung)	Fahrer	Fahrer und System		
Übernahme der Fahraufgabe (Quer- und Längsführung)	Fahrer	Fahrer und System		
Umgebungsüberwachung	Fahrer	Fahrer und System		
Verhalten in Notfallsituationen	Fahrer	Fahrer und System		
Betriebsbereich	Keine	Teilbereiche	Alle Bereiche	
Leitstelle / Technische Aufsicht	Keine	Kommunikation und Position	Fahrmanöverfreigabe	Teleoperation
Tesla (Stufe 2) Ansätze im ÖPNV (Stufe 2+) Mercedes/BMW (Stufe 3) Waymo (Stufe 4 ÖV)				

Abbildung 29: Einordnung der Technologieansätze des automatisierten Fahrens, eigene Darstellung i. A. a. [SAE International 2021, S. 24–26]

Die Automatisierungssysteme von Mercedes-Benz und BMW sind für das bedingt automatisierte Fahren (Stufe 3) zugelassen und werden dementsprechend eingeordnet [Rudschies und Kroher 2024]. Die Systeme sind in der Lage die Quer- und Längsführung zu übernehmen und die Umgebung zu überwachen [Mercedes-Benz Group AG 2024b; Mercedes-Benz Group AG 2024c; Hebermehl und Baumann 2022; BMW AG 2023a; Fasse und Hubik 2023]. Jedoch ist der Einsatz auf einen Anwendungsfall (Staupilot) beschränkt und der Fahrer muss im Notfall eingreifen [Mercedes-Benz Group AG 2024b; Mercedes-Benz Group AG 2024c; Hebermehl und Baumann 2022; BMW AG 2023a; Fasse und Hubik 2023]. Der Einsatz einer Leitstelle wird nicht erwähnt. Beim automatisierten Fahrsystem von Tesla wird zwar auch die Quer- und Längsführung übernommen, allerdings ist der Fahrer weiterhin verantwortlich, die Umgebung zu überwachen und im Notfall einzugreifen [Tesla Inc. 2024d; Tesla Inc. 2024c; Stegemann 2023; Fasse und Hubik 2023]. Deshalb werden die Fahrzeuge von Tesla der Stufe 2 zugeordnet [Tesla Inc. 2024d; Tesla Inc. 2024c; Stegemann

2023; Fasse und Hubik 2023]. Im Bereich des MIV sind weitere Entwicklungen zu verzeichnen, die von den Automobilherstellern Ford (Ford Mustang – Stufe 2+) VW (VW ID. Buzz – in Entwicklung) und General Motors (Cruise – Stufe 4) initiiert werden [Rudschies und Kroher 2024; Greifenstein et al. 2024, S. 61f.].

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Einsatz automatisierter Busse, weshalb diese Technologie im Weiteren vertiefend behandelt wird. Gemäß der Herstellerangaben werden die automatisierten Busse (von 2getthere, EasyMile, GAMA und IAV), die in Abschnitt 3.3.1 dargestellt werden, der Automatisierungsstufe 4 zugeordnet. Jedoch ist für eine korrekte Einordnung der Technologie der Betrieb dieser Fahrzeuge im öffentlichen Raum zu analysieren [Leonetti 2023, S. 172]. Beckmann und Zadek haben in 2022 insgesamt 59 Pilotbetriebe mit automatisierten Bussen in Deutschland identifiziert und analysiert [Beckmann und Zadek 2022, S. 32; VDV 2024a; Braun et al. 2020, S. 5f.; PTV Group et al. 2019b, S. 2]. Bei dieser Analyse wird erkennbar, dass vor dem Betrieb der automatisierten Busse die Strecke abgefahren und die Streckenführung in das Fahrzeug einprogrammiert wird [Beckmann und Zadek 2022, S. 78; Kolb et al. 2020, S. 62]. Dementsprechend bewegt sich das Fahrzeug auf einer virtuellen Linie [Beckmann und Zadek 2022, S. 78; Kolb et al. 2020, S. 62f.]. Diese kann im automatisierten Fahrmodus nicht verlassen werden, weshalb parkende Fahrzeuge nur manuell umfahren werden können [Leonetti 2023, S. 172; Beckmann und Zadek 2022, S. 163–165]. Wie bereits in Kapitel 3.3.1 dargelegt, befindet sich während der Fahrt stets ein Sicherheitsfahrer im Fahrzeug [Beckmann und Zadek 2022, S. 80; Leonetti 2023, S. 172]. Häufig sind in der einprogrammierten Strecke virtuelle Haltepunkte (sogenannte Yield-Stops) hinterlegt [Beckmann und Zadek 2022, S. 85; Kolb et al. 2020, 62-63; Projektteam FLASH 10.07.2024]. An diesen Stellen, die sich häufig an komplexen Verkehrspunkten (bspw. Kreuzung oder Fahrbahnverengung) befinden, wird das Fahrzeug angehalten und setzt die Fahrt erst nach Freigabe durch den Operator fort [Beckmann und Zadek 2022, S. 88f.; Kolb et al. 2020, 62-63; Projektteam FLASH 10.07.2024; Kreis Soest 2022]. Die automatisierten Busse sind gemäß der Genehmigung für eine fest definierte Strecke (Betriebsbereich) zugelassen [Beckmann und Zadek 2022, S. 72–77]. Dabei werden automatisierte Busse in den Pilotbetrieben auch in Fußgängerzonen eingesetzt [Ainsalu et al. 2018, S. 10; Beckmann et al. 2020, S. 10–13]. Eine Leitstelle zur Kommunikation und Überwachung der Fahrzeugposition wird von den Herstellern angeboten [Beckmann und Zadek 2022, S. 79f.]. Die Umgebungsüberwachung wird aufgrund der Nutzung von virtuellen Haltepunkten nicht vollumfänglich durch das Fahrzeug übernommen. Insbesondere bei komplexen Verkehrssituationen wird eine menschliche Unterstützung benötigt. Deshalb werden die automatisierten Busse von der Entwicklung zwischen der zweiten und dritten Automatisierungsstufe nach SAE J3016 eingeordnet und in dieser Arbeit als Stufe 2+ definiert [Kolb et al. 2020, 63; Gertz et al. 2021, S. 55].

In Bezug zur Geschwindigkeit sind die Fahrzeuge von EasyMile und GAMA im öffentlichen Raum bis 15 km/h oder 18 km/h zugelassen [Leonetti 2023, S. 172; Kolb et al. 2020, 63; Beckmann und Zadek 2022, S. 69]. Im Projekt HEAT in Hamburg erreichte ein eigens entwickelter automatisierter Bus der IAV im Jahr 2021 eine Geschwindigkeit von 25 km/h [Hamburger Hochbahn AG 2021]. Demgegenüber ist der

automatisierte Bus im Landkreis Nordsachsen für eine Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h zugelassen [Projektteam FLASH 10.07.2024; Mitteldeutscher Verkehrsverband GmbH 2024].

Zusätzlich werden in den Projekten unterschiedliche verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle (digitale und physische) Maßnahmen entlang der Strecke durchgeführt, um den Betrieb der automatisierten Busse zu ermöglichen und zu erleichtern [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–72; Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH 2024; Aleksa et al. 2024, S. 94–98]. Dazu zählen u. a.:

- Anpassung / Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit
- Errichtung von Temposchwellen
- Anpassung von Lichtsignalanlagen (u. a. Grünphasen)
- Implementierung von Umleitungen oder Einbahnstraßen
- Erhöhung der Straßenbreite
- Auftragen eines Mittelstreifens
- Errichtung von zusätzlichen Halte- bzw. Parkverboten
- Trimmen der Vegetation (überhängende Bäume)
- Errichtung von Lokalisierungspanelen (Schilder in Gebieten ohne Häuser)
- Errichtung von Informationstafeln
- Installation von RSUs zur V2X-Kommunikation [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–72; Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH 2024; Aleksa et al. 2024, S. 94–98]

Zusätzlich zu diesen Maßnahmen sind eine digitale Karte der Strecke und eine ausreichende Mobilfunkabdeckung (bestenfalls 5G) erforderlich [Aleksa et al. 2024, S. 94–98].

Zusammenfassend zeigt diese Analyse, dass die derzeit eingesetzten Technologieansätze im ÖPNV in Deutschland nicht für einen automatisierten Betrieb ohne Sicherheitsfahrer im Fahrzeug (Stufe 4 ÖV) geeignet sind. Gründe hierfür sind u. a. der technologische Reifegrad der Fahrzeuge sowie fehlende Mindeststandards für den Aufbau der Fahrzeuge, für die Auswahl geeigneter Strecken und für die Gestaltung passender Betriebskonzepte [Leonetti 2024, S. 118].

3.4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Einführung von automatisierten Fahrzeugen unterliegt nicht nur technischen, sondern auch rechtlichen Rahmenbedingungen. Im Falle eines Unfalls ist die Frage der Haftung von zentraler Bedeutung. Rechtliche Rahmenbedingungen beinhalten jedoch viele weitere Schwerpunkte, die für die Einführung automatisierter Busse betrachtet werden müssen [Lutz 2017, S. 211; Oppermann und Stender-Vorwachs 2020, S. vf.]. Zu den relevanten Rechtsgebieten zählen das Straßenverkehrs-, das Datenschutz-, das Haftungs-, das Verfassungs-, das Straf- und das Personenbeförderungsrecht [Lutz 2017, S. 211; Oppermann und Stender-Vorwachs 2020, S. 5f.]. In Bezug zur Aufgabenstellung wird im Folgenden das Straßenverkehrsrecht, welches die Zulassung und den Betrieb von Kraftfahrzeugen regelt, und das

Personenbeförderungsrecht in Deutschland näher erläutert (Abschnitt 3.4.1). Im Anschluss werden die rechtlichen Rahmenbedingungen in anderen Ländern dargestellt.

3.4.1 Gesetzgebung in Deutschland

Das Straßenverkehrsrecht kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden [Leonetti 2023, S. 177]. Der erste Teilbereich beinhaltet das Genehmigungs- und Zulassungsrecht [Leonetti 2023, S. 177; Lutz 2017, S. 212–215]. Dieses definiert die Voraussetzungen, unter denen ein Kraftfahrzeug auf öffentlichen Straßen in Betrieb genommen werden darf [Leonetti 2023, S. 177; Lutz 2017, S. 212–215]. Deutschland orientiert sich im Bereich der Zulassung nach den europäischen UN/ECE-Regelungen [Leonetti 2023, S. 177; Lutz 2017, S. 212–215]. Ausgestaltet wird das Genehmigungs- und Zulassungsrecht in Deutschland jedoch durch das StVG, die Fahrzeugzulassungsverordnung (FZV) und die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [Leonetti 2023, S. 177]. Für die Zulassung wird auf Basis einer Einzelgenehmigung oder einer europäischen Typengenehmigung die Betriebserlaubnis erteilt [Leonetti 2023, S. 177]. Auf dieser Grundlage erfolgt die entsprechende Zulassung, indem das amtliche Kennzeichen zugeteilt wird (§ 1 Abs. 1, S. 2, § 3 Abs. 1. S. 2, 3 StVG und §§ 3, 9 FZV) [Leonetti 2023, S. 177].

Die Definition, wie das Fahrzeug unter welchen Voraussetzungen geführt wird, ist Aufgabe des Verhaltensrechts (zweiter Teilbereich des Straßenverkehrsrechts) [Leonetti 2023, S. 178; Lutz 2017, S. 215–218; Johanning und Mildner 2015, S. 72f.; Pipp et al. 2018, S. 211]. Für den Betrieb von automatisierten Fahrzeugen ist demnach zu definieren, wer die Überwachung des Fahrzeugs und der Umgebung übernimmt, wenn der Fahrer zum Passagier wird und sich anderweitig beschäftigt (siehe Abschnitt 3.1) [Lutz 2017, S. 215–218; Johanning und Mildner 2015, S. 72f.; Pipp et al. 2018, S. 211]. In der Gesetzgebung richtet sich das Verhaltensrecht und die Straßenverkehrsordnung (StVO) an den Fahrzeugführer [Leonetti 2023, S. 178]. Daher ist es unerlässlich, dass die Verhaltenspflichten zukünftig in das automatisierte Fahrsystem integriert und im Rahmen der Zulassungs- und Genehmigungserteilung überprüft werden [Leonetti 2023, S. 178].

Seit 2017 wird in Deutschland die Zulassung von hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen (Stufe 4 und Stufe 5) über das StVG geregelt [Leonetti 2023, S. 179; BMDV 2021]. Jedoch wurde bislang kein Kraftfahrzeug mit automatisierten Fahrfunktionen nach §§ 1a/b StVG zugelassen [Leonetti 2023, S. 179; Deutscher Bundestag 2021b, S. 3–16]. Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten automatisierten Busse unterliegen einer besonderen Bauart, weshalb in den erwähnten Projekten die Fahrzeuge eine Einzelgenehmigung nach § 21 Abs. 1 StVZO erhalten haben [Leonetti 2023, S. 179f.; Beckmann und Zadek 2022, S. 72–75]. Aufgrund der Tatsache, dass die automatisierten Busse nicht sämtliche Anforderungen der StVZO erfüllen (bspw. ist bei Easy-Mile und GAMA kein Lenkrad verbaut), wird zusätzlich eine Ausnahmegenehmigung gemäß § 70 StVZO benötigt [Leonetti 2023, S. 179f.; Beckmann und Zadek 2022, S. 72–75]. Die Ausnahmegenehmigung ist örtlich beschränkt und bezieht sich auf eine vorgegebene Strecke, zu der ein Streckengutachten vorliegen muss [Leonetti 2023, S. 180; Beckmann und Zadek 2022, S. 72–75]. Auf Basis der Einzel- und Ausnahmegenehmigung wird die Zulassung erteilt und das Kennzeichen vergeben

[Leonetti 2023, S. 180; Beckmann und Zadek 2022, S. 72–75]. Folglich stellt der gesamte Prozess in jedem Projekt und für jedes Fahrzeug einen Einzelfall dar [Leonetti 2023, S. 180; Beckmann und Zadek 2022, S. 72–75; Leonetti 2021, S. 88].

Mit dem Gesetz zum autonomen Fahren in 2021 sowie mit der Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und Betriebsverordnung (AFGBV) in 2022 wurde ein weltweit einmaliger Rechtsrahmen für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Regelbetrieb geschaffen [Leonetti 2023, S. 181; Deutscher Bundestag 2021a, S. 3; Deutscher Bundestag 2022a; BMDV 2022a; BMDV 2021; BMDV 2022c]. Das neue Genehmigungs- und Zulassungsverfahren orientiert sich dabei an den bisherigen Prozessen und besteht nach § 1e Abs. 1 StVG aus drei Schritten, die nachfolgend erläutert werden [Leonetti 2023, S. 181; BMDV 2022c, S. 10–18]:

1. Erteilung der Betriebserlaubnis für das Kraftfahrzeug mit autonomen Fahrfunktionen (BEaF): Der Hersteller des automatisierten Fahrzeugs beantragt beim KBA die BEaF, welche die Grundgenehmigung darstellt. Die Anforderungen an die Ausstattung und die Dokumentations- und Nachweispflicht (u. a. Betriebshandbuch und Sicherheitskonzept) sind in §§ 2, 3 der AFGBV geregelt. Das KBA prüft die Unterlagen und stellt die BEaF aus, welche den Funktionsumfang des Fahrzeugs sowie die Einsatzumgebung (ODD) beinhaltet.
2. Verfahren zur Betriebsbereichsfestlegung: Die Betriebserlaubnis stellt die Grundlage dar, auf welcher anschließend der Halter das Verfahren zur Betriebsbereichsfestlegung nach § 7 Abs. 1 AFGBV beantragt. „Der Betriebsbereich iSd § 1d Abs. 2 StVG ist dabei der örtlich und räumlich bestimmte öffentliche Straßenraum, in dem das Kraftfahrzeug mit autonomen Fahrfunktionen betrieben werden darf“ [Leonetti 2023, S. 182]. Der Funktionsumfang des Fahrzeugs bestimmt, unter welchen Umständen und in welchem Betriebsbereich das automatisierte Fahrzeug eingesetzt werden kann. Das Verfahren zur Betriebsbereichsfestlegung wird bei den örtlich und sachlich zuständigen Landesbehörden beantragt, welche den Betriebsbereich überprüfen und einen zeitlich definierten Einsatzraum festlegen.
3. (Reguläre) Zulassung: Zuletzt erfolgt bei den örtlichen Zulassungsbehörden die Zulassung (§ 1e Abs. 1 Nr. 4 i. V. m. § 1 Abs. 1 StVG) und die Zuteilung des Kennzeichens. Ein gesondertes Kennzeichen für automatisierte Fahrzeuge wird nicht vergeben, jedoch müssen im Betriebsbereich Verkehrszeichen und Hinweisschilder aufgestellt werden, um andere Verkehrsteilnehmer über den Einsatz automatisierter Fahrzeuge zu informieren. [Leonetti 2023, S. 181–183; BMDV 2022c, S. 10–18]

Weiterhin wird in der Verordnung auf die TA und die Erprobungsgenehmigung eingegangen [Leonetti 2023, S. 183–185; BMDV 2022c, S. 22f.]. Die TA ist eine natürliche Person, welche aus der Ferne in einer Leitstelle (siehe Abschnitt 3.2.4) mehrere Fahrzeuge überwachen kann [Leonetti 2023, S. 183f.; BMDV 2022c, S. 22f.; Deutscher Bundestag 2021a, S. 20]. Dabei ist es für die TA möglich, Fahrzeuge zu deaktivieren sowie Manöver freizugeben oder vorzuschlagen [Leonetti 2023, S. 183f.; Deutscher Bundestag 2021a, S. 27; BMDV 2022c, S. 108]. Gemäß den Regularien der AFGBV wird eine unmittelbare Steuerung des Fahrzeugs (teleoperiertes Fahren, siehe Abschnitt 3.2.4) nicht gestattet [Leonetti 2023, S. 183]. Dementsprechend kann

die TA auch nicht für ein „Verschulden“ des automatisierten Fahrsystems verantwortlich gemacht werden [Leonetti 2023, S. 183].

Zusätzlich zum beschriebenen Prozess der Zulassung, ist es nach § 16 AFGBV möglich, eine Erprobungsgenehmigung zu beantragen [Leonetti 2023, S. 185]. Diese wird vom Halter zentral beim KBA beantragt und für vier Jahre erteilt [Leonetti 2023, S. 185]. Die Erprobungsgenehmigung unterscheidet sich insofern vom Zulassungsprozess, als dass eine permanente Überwachung vor Ort im Fahrzeug erforderlich ist [Leonetti 2023, S. 185].

Bezüglich des Personenbeförderungsrechts wird gemäß § 1 PBefG eine rechtliche Unterscheidung zwischen der Beförderung mit Pkw und Bussen bzw. Straßenbahnen vorgenommen [Leonetti 2023, S. 175]. Eine Unterscheidung, ob die Fahrzeuge konventionell mit Fahrer oder automatisiert ohne Fahrer betrieben werden, erfolgt nicht [Leonetti 2023, S. 175]. Bei den Genehmigungsvoraussetzungen in § 13 Abs. 1 PBefG erfolgt diesbezüglich ebenfalls keine Unterscheidung [Leonetti 2023, S. 175]. Aus diesem Grund kann das PBefG für automatisierte Verkehrsleistungen genutzt werden und bedarf hinsichtlich dieser Thematik keiner Anpassung [Leonetti 2023, S. 175; Leonetti 2021, S. 90]. Für On-Demand-Angebote (siehe Abschnitt 2.1.2) wurden im Jahr 2021 in der PBefG neue Regelungen hinzugefügt, welche die Einführung dieser Verkehre ermöglichen [Leonetti 2023, S. 175].

Mit diesem Gesetz zum autonomen Fahren wird die Grundlage geschaffen, um automatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr in Deutschland zu ermöglichen [BMDV 2022c, S. 1; BMDV 2022a]. Zusammenfassend wird ersichtlich, dass sich die rechtlichen Rahmenbedingungen an der Stufe 4 ÖV aus dem Arbeitspapier des VDV orientieren (siehe Abschnitt 3.1). Da die spezifischen Anforderungen (u. a. Betriebsbereich und TA) hauptsächlich von gewerblichen Haltern und nicht von Verbrauchern erfüllt werden können, werden primär örtliche Verkehrsgesellschaften die rechtlichen Anforderungen für das automatisierte Fahren erfüllen [Petereit 2022; BMDV 2022c, S. 67; Leonetti 2023, S. 185; Verbraucherzentrale Bundesverband 2021, S. 4–7]. Abschließend ist zu bemerken, dass das Gesetz lediglich eine Übergangslösung darstellt, bis auf internationaler Ebene eine Harmonisierung der UN/ECE-Regelungen erfolgt ist [BMDV 2021; AUDI AG 2021, S. 28].

3.4.2 Gesetzgebung in Europa und weltweit

Im europäischen Raum sind die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Einführung automatisierter Fahrzeuge unterschiedlich weit fortgeschritten (siehe Abbildung 30) [MOIA GmbH 2024].

In Frankreich besteht seit 2022 die Regelung, hochautomatisierte Fahrzeuge in festgelegten Betriebsbereichen einzusetzen (analog zu Deutschland) [MOIA GmbH 2024]. Für einen Betrieb ist es jedoch notwendig, eine Leitstelle einzusetzen, die dazu befugt ist, Fahrmanöver zu autorisieren [MOIA GmbH 2024]. In der Schweiz wurde 2023 und Anfang 2024 das StVG angepasst sowie Verordnungen zum automatisierten Fahren erlassen [Braun Binder und Fasler 2024, S. 248–252; Egger 2024; Der Bundesrat 2023; Bundesamt für Straßen ASTRA 2022a; Bundesamt für Straßen ASTRA 2022b, S. 2–7]. Auf dieser Grundlage wird das bedingt automatisierte Fahren (Stufe 3) auf öffentlichen Straßen geregelt [Braun Binder und Fasler

2024, S. 248–252; Egger 2024; Der Bundesrat 2023; Bundesamt für Straßen ASTRA 2022a; Bundesamt für Straßen ASTRA 2022b, S. 2–7]. Hochautomatisiertes Fahren ohne Fahrer im Fahrzeug (Stufe 4) wird auf ausgewählten Strecken genehmigt, wobei die einzelnen Kantone die Zulassung ausstellen [Braun Binder und Fasler 2024, S. 248–252; Egger 2024; Der Bundesrat 2023; Bundesamt für Straßen ASTRA 2022a; Bundesamt für Straßen ASTRA 2022b, S. 2–7].

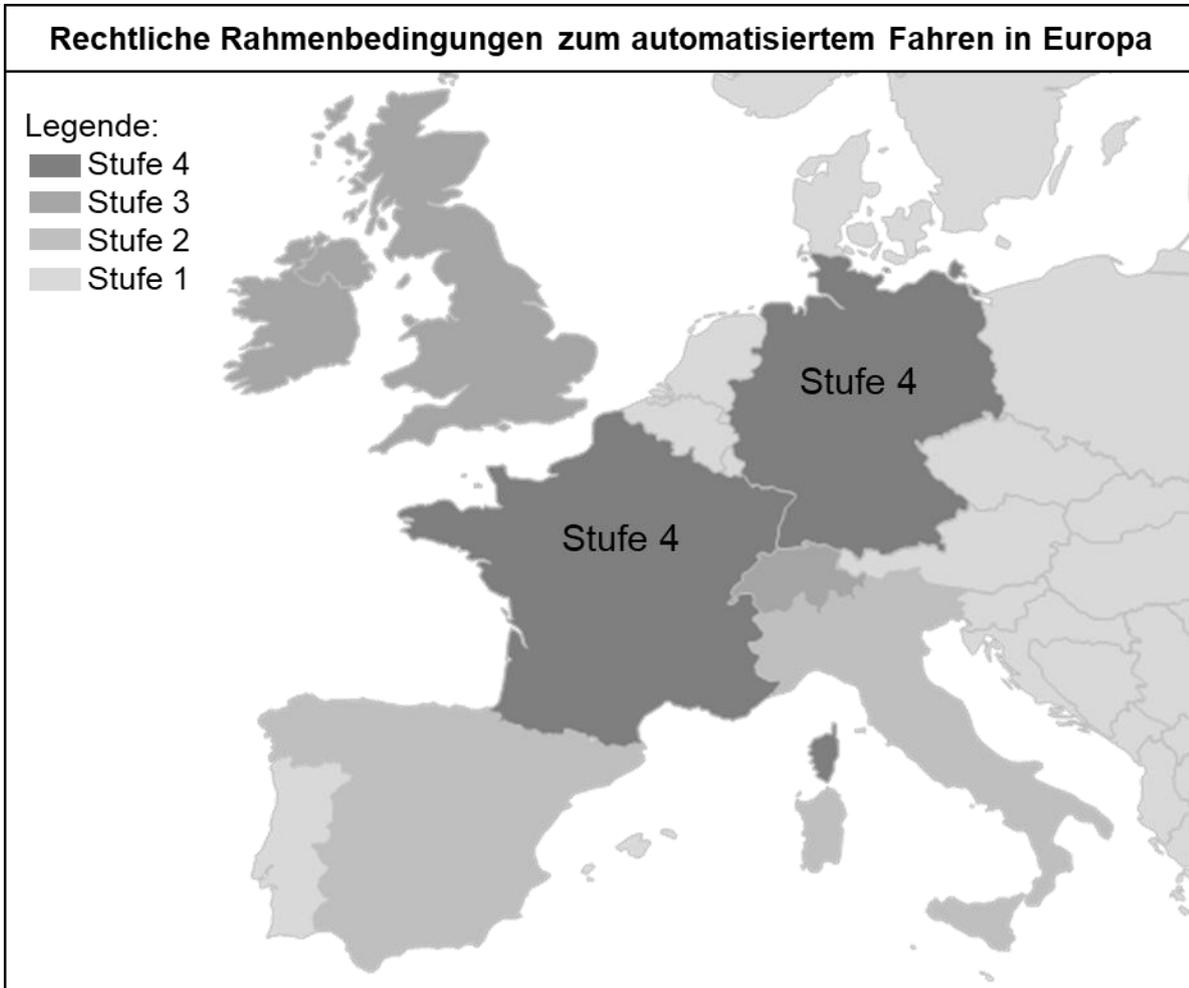


Abbildung 30: Rechtliche Rahmenbedingungen zum automatisierten Fahren in Europa, eigene Darstellung i. A. a. [MOIA GmbH 2024]

Die Gesetzgebung in Großbritannien erlaubt das bedingt automatisierte Fahren (Stufe 3) [MOIA GmbH 2024]. Gemäß der aktuellen Planung ist die Einführung weiterer Gesetze für hochautomatisiertes Fahren bis zum Jahr 2025 vorgesehen [MOIA GmbH 2024]. In Spanien wird derzeit an einer Gesetzgebung für hochautomatisierte Fahrzeuge gearbeitet, die sich an den Beispielen in Deutschland und Frankreich orientieren soll [MOIA GmbH 2024]. Gegenwärtig sind die rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich ausschließlich auf die Anforderungen von Testbetrieben ausgerichtet und regulieren nicht grundsätzlich den Einsatz automatisierter Fahrzeuge [Zweig 2024, S. 310]. Im Gegensatz zu den zuvor angeführten Beispielen wurden in Italien bisher keine spezifischen Gesetze für automatisiertes Fahren erlassen [MOIA GmbH 2024]. Dementsprechend ist in Italien ausschließlich teilautomatisiertes Fahren (Stufe 2) zulässig [MOIA GmbH 2024]. Des Weiteren existieren in zahlreichen

weiteren europäischen Ländern derzeit keine Regulierungen bezüglich des hochautomatisierten Fahrens (Stufe 4) [Traton SE 2022].

Während in Europa an einem harmonisierten Typengenehmigungsverfahren gearbeitet wird, fokussieren sich die USA auf herstellerseitige Selbstzertifizierung [Traton SE 2022]. Aus diesem Grund existieren bzgl. des automatisierten Fahrens derzeit keine staatenübergreifenden rechtlichen Regelungen in den USA [Traton SE 2022]. Demzufolge variieren die rechtlichen Rahmenbedingungen zwischen den einzelnen Staaten, wobei Arizona, Kalifornien, Texas, Nevada und Michigan am fortschrittlichsten in Bezug auf automatisierte Fahrzeuge sind [Traton SE 2022; Huber 2017, S. 231; Duisberg und Mauroschat 2023]. In Kalifornien bspw. müssen umfassende technische Anforderungen erfüllt werden, wozu u. a. eine durchgehende wechselseitige Kommunikationsverbindung zwischen Fahrzeug und Betreiber zählt [Duisberg und Mauroschat 2023; Huber 2017, S. 235–238]. Die US-amerikanische Bundesagentur für Straßen- und Fahrzeugsicherheit (National Highway Traffic Safety Administration) erarbeitet jedoch gegenwärtig neue Vorschriften für das automatisierte Fahren [Glaser 2023c; Huber 2017, S. 223].

In der Volksrepublik China sind gemäß der rechtlichen Lage Erprobungen von vollautomatisierten Fahrzeugen auf Autobahnen und städtischen Straßen zulässig. Die Strecken werden von lokalen Behörden nach eigenen Vorschriften ausgewählt und freigegeben. Im Gegensatz dazu ist in Singapur sowohl die Erprobung als auch der Regelbetrieb von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen (Stufe 4 und 5) auf öffentlichen Straßen seit 2017 rechtlich geregelt. Genehmigt wird der Einsatz dieser automatisierten Fahrzeuge bei der Land Transport Authority of Singapore, welche den Einsatz auf einem definierten Gebiet festlegt. Japan hat mittlerweile ebenfalls das StVG geändert und vollautomatisiertes Fahren ohne Fahrer aber mit Fernüberwachung durch den Betreiber (Stufe 4 ÖV) ermöglicht. [Traton SE 2022]

3.5 Zukünftige Entwicklungen des automatisierten Fahrens

Im Folgenden werden die zukünftigen Prognosen, Anwendungsfälle und Projekte im Bereich des automatisierten Fahrens zusammengestellt und analysiert.

In Bezug auf die zukünftige Entwicklung des automatisierten Fahrens existieren diverse Prognosen und Zukunftsvisionen. Beiker prognostiziert 2015, dass vollautomatisiertes Fahren erst nach 2030, aber das automatisierte Autobahnfahren vor 2020 erreicht wird [Beiker 2015, S. 200]. Eine Studie von McKinsey aus dem Jahr 2016 beschreibt ein progressives Szenario, wonach im Jahr 2030 15 % der neu verkauften Fahrzeuge hochautomatisiert fahren werden [Kaas et al. 2016, S. 11]. Lalli zufolge wird die vierte Automatisierungsstufe in der ersten Hälfte der 2020er-Jahre und das vollautomatisierte Fahren erst gegen 2035 erreicht [Lalli 2019, S. 19]. Im Jahr 2020 formulierte die Europäische Kommission in der „Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität“ die Vision, bis zum Jahr 2030 den großflächigen Einsatz automatisierter Fahrzeuge zu realisieren [van Driel et al. 2024, S. 20; Europäische Kommission 2020, S. 3]. Die European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC) hat im Jahr 2021 eine Studie zur Entwicklung des automatisierten Fahrens publiziert (neueste Fassung aus dem Jahr 2024)

[ERTRAC 2021; ERTRAC 2024]. In einer Roadmap für die technologische Entwicklung des automatisierten und vernetzten Fahrens in Europa wird eine Vision für das Jahr 2050 und eine Agenda bis zum Jahr 2030 beschrieben [ERTRAC 2021, S. 3]. Da diese Roadmap von verschiedenen Interessensgruppen beachtet und stetig aktualisiert wird, orientieren sich die weiteren Ausführungen an dieser Studie [van Driel et al. 2024, S. 21f.]. In der Vision bis 2050 wird prognostiziert, dass die überwiegende Mehrheit der ÖPNV-Fahrzeuge in Städten vollautomatisiert mit Unterstützung einer Leitstelle fahren [ERTRAC 2021, S. 5]. Das vollautomatisierte Fahren bedingt eine hohe Kartenverfügbarkeit sowie einen technologischen Ansatz für alle Anwendungsfälle, weshalb als Zwischenschritt auf das Ziel des hochautomatisierten Fahrens hingearbeitet wird [ERTRAC 2019, S. 12–17; ERTRAC 2024, S. 17f.]. Deshalb werden in der Agenda bis zum Jahr 2030 für das automatisierte Fahren fünf verschiedene Anwendungsfälle verfolgt, die nachfolgend erläutert werden:

1. Parken (Parken in Parkhäusern bei Flughäfen oder Einkaufszentren inklusive Überführungen, Abgabe eines Mietwagens)
2. Eingeschränkte Bereiche (Shuttles mit langsamen Geschwindigkeiten bspw. im Flughafen, Busverkehr in Depot)
3. Autobahn (Staupilot, Autobahnchauffeur bis 130 km/h, Lkw-sicheres Auto-Folgen)
4. Städtischer und stadtnaher Mischverkehr (Städtische Abfallwirtschaft, Fahrten auf der letzten Meile in Wohngebieten, flexible Anwendungen im ÖPNV in vordefinierten Gebieten)
5. Landstraßen und untergeordnetes Straßennetz (Fahrerlose ÖSPV-Dienste auf vordefinierten Routen, automatisierte Kommunaldienste, erste / letzte Meile Belieferungen) [ERTRAC 2021, S. 9–16; ERTRAC 2024, S. 4–18; van Driel et al. 2024, S. 21–23]

Die Umsetzung der einzelnen Anwendungsfälle wird durch die beiden Kriterien „Komplexität“ und „Geschwindigkeit“ beeinflusst (siehe Abbildung 31) [Huber 2020]. Parkbereiche und eingeschränkte Bereiche (Industriegelände, Flughafen und Depot) weisen aufgrund der Zutrittsbegrenzungen weniger komplexe Verkehrsbedingungen auf [ERTRAC 2021, S. 9–12; ERTRAC 2024, S. 5–10; van Driel et al. 2024, S. 21; Huber 2020]. Deshalb können dort automatisierte Fahrzeuge zuerst eingesetzt werden [ERTRAC 2021, S. 9–12; ERTRAC 2024, S. 5–10; van Driel et al. 2024, S. 21]. Des Weiteren sind in Parkbereichen geringere Höchstgeschwindigkeiten vorgeschrieben [Huber 2020; ERTRAC 2021, S. 11; ERTRAC 2024, S. 8]. Aus diesem Grund wird für diese Anwendungsfälle bis 2030 das hochautomatisierte Fahren (Stufe 4) angestrebt [ERTRAC 2021, S. 9–12; ERTRAC 2024, S. 5–10; van Driel et al. 2024, S. 22].

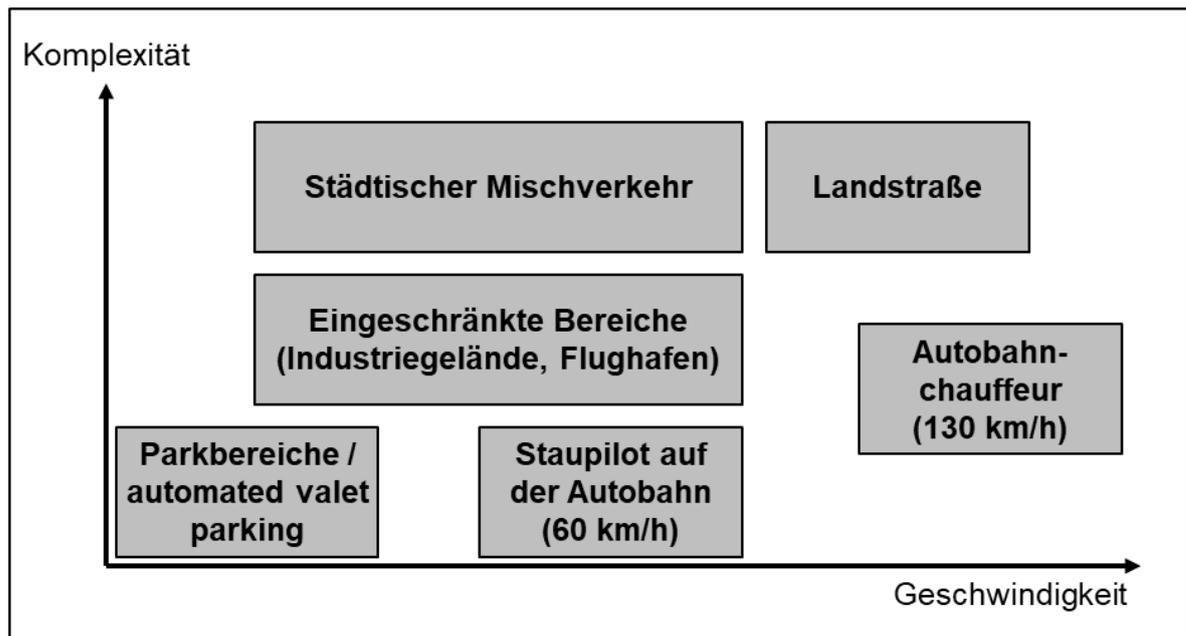


Abbildung 31: Anwendungsfälle für das automatisierte Fahren, eigene Darstellung i. A. a. [Huber 2020; ERTRAC 2021, S. 9–16; ERTRAC 2024, S. 4–18; van Driel et al. 2024, S. 21–23]

Der Staupilot ist ein Beispiel für einen Anwendungsfall mit geringer Geschwindigkeit und geringer Komplexität [Huber 2020]. Da Autobahnen generell durch die Streckenführung eine hohe Komplexität ausschließen, können dort früher automatisierte Fahrzeuge eingesetzt werden [Huber 2020; ERTRAC 2021, S. 9f.; ERTRAC 2024, S. 10–13]. In der Roadmap von ERTRAC wird beschrieben, dass bis 2030 die Geschwindigkeit schrittweise von 60 km/h auf 130 km/h gesteigert und mindestens die dritte, ggf. auch die vierte Automatisierungsstufe erreicht wird [ERTRAC 2021, S. 9f.; ERTRAC 2024, S. 10–13; van Driel et al. 2024, S. 21–23]. Weiterhin wird im „Auto-Folgen“ die Chance gesehen, das hochautomatisierte Fahren im Lkw-Verkehr zu etablieren [ERTRAC 2021, S. 9f.; ERTRAC 2024, S. 10–13; van Driel et al. 2024, S. 21–23]. Beim „Auto-Folgen“ fährt der erste Lkw teilautomatisiert (Stufe 2) und weitere Lkw folgen diesem hochautomatisiert (Stufe 4) [ERTRAC 2024, S. 12].

Der städtische Mischverkehr sowie die Landstraße sind Anwendungsfälle, die eine hohe Komplexität besitzen und bei denen von den automatisierten Fahrzeugen eine mittlere bis hohe Geschwindigkeit verlangt wird [ERTRAC 2021, S. 12–16; ERTRAC 2024, S. 13–18; van Driel et al. 2024, S. 21–23; Huber 2020]. Gemäß der Analyse von ERTRAC wird die Implementierung des automatisierten Fahrens in diesen Szenarien zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, wobei Landstraßen aufgrund der zusätzlichen hohen Geschwindigkeiten eine besondere Herausforderung darstellen [ERTRAC 2021, S. 9–16; ERTRAC 2024, S. 5–18; Huber 2020]. Aus diesem Grund wird bis zum Jahr 2030 der bedingt automatisierte oder hochautomatisierte Betrieb in diesen beiden Anwendungsfällen nur auf ausgewählten Strecken erfolgen, wobei die Fahrzeuge von einer Leitstelle überwacht werden [ERTRAC 2021, S. 12–16; ERTRAC 2024, S. 13–18].

Zur Realisierung dieser Anwendungsfälle sowie zur Erreichung einer hohen Marktakzeptanz werden zwei Hauptansätze verfolgt [ERTRAC 2021, S. 9–18]: Die

Höchstgeschwindigkeit bei begrenzter Verkehrskomplexität (auf Autobahnen) schrittweise zu erhöhen oder mit niedrigen Geschwindigkeiten schrittweise die gesamte Verkehrskomplexität abzudecken [ERTRAC 2021, S. 17f.].

Die vorherige Analyse der Technologieansätze von Mercedes-Benz und BMW (siehe Abschnitt 3.3.1 und Anhang A.2) zeigt, dass bereits erste Anwendungsfälle der Roadmap von ERTRAC (beispielsweise Staupilot) erreicht wurden. Weiterhin wurde der automatisierte Parkservice (Stufe 4) von Bosch und Mercedes-Benz für ein Parkhaus am Stuttgarter Flughafen zugelassen [Robert Bosch GmbH 2022b]. Das Projekt KIRA, welches das Ziel verfolgt, automatisierte On-Demand-Verkehre im Regelbetrieb einzusetzen, hat 2024 vom KBA eine Erprobungsgenehmigung für hochautomatisiertes Fahren erhalten [Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH 2024; Deutsche Bahn AG 2024]. Dies bedeutet, dass sich während der Testfahrten ein Sicherheitsfahrer im Fahrzeug befindet [Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH 2024; Deutsche Bahn AG 2024]. Wie bereits in Kapitel 1 kurz dargestellt wurde, werden weitere Projekte mit automatisierten Fahrzeugen im ÖPNV geplant. Die Projekte „MINGA“ in München, „AHOI“ in Hamburg sowie ein Projekt in Berlin haben zum Ziel, hochautomatisierte Busse im öffentlichen Raum einzusetzen [Glaser 2023d]. In München werden die automatisierten Busse von MAN hergestellt, während die Bushersteller in Hamburg und Berlin bislang nicht festgelegt wurden [Glaser 2023a; Glaser 2023b]. Zusätzlich plant MOIA mit dem ID Buzz von VW bis 2025 einen großflächigen Einsatz hochautomatisierter Fahrzeuge in Hamburg zu etablieren [MOIA GmbH 2021; Meyer 2023, S. 31f.].

Die vorliegenden Erläuterungen verdeutlichen, dass die Entwicklung des automatisierten Fahrens weltweit, insbesondere jedoch in Deutschland und Europa, voranschreitet.

3.6 Zusammenfassung und Anforderungen aus dem Forschungsbereich des automatisierten Fahrens

Das automatisierte Fahren wird nach SAE J3016 in sechs Stufen eingeteilt. Bis einschließlich Stufe 4 werden automatisierte Fahrzeuge nur teilweise in ausgewählten Betriebsbereichen eingesetzt. Die Funktionsweise von automatisierten Fahrzeugen wird anhand der drei Phasen maschinelle Wahrnehmung, Situationsverstehen und Bahnführung erläutert. Innerhalb dieser drei Phasen nehmen die Sensorik der Fahrzeuge, die Verarbeitung der erhobenen Daten sowie die Entscheidungsfindung eine zentrale Rolle ein. Da speziell in der Übergangsphase bis zum vollautomatisierten Fahren das Fahrzeug in bestimmten Situationen Unterstützung benötigt, erfolgt eine Fernüberwachung der automatisierten Fahrzeuge aus einer Leitstelle. Hinsichtlich der existierenden Technologieansätze wird erkennbar, dass Waymo als einziges Unternehmen hochautomatisierte Fahrzeuge einsetzt. In Europa sind nach heutigem Stand die bedingt automatisierten Fahrzeuge von Mercedes-Benz und BMW technologisch am weitesten entwickelt und zugelassen. Die rechtliche Situation gestaltet sich indes konträr (Abschnitt 3.4). Während bereits einige Länder in Europa (speziell Deutschland und Frankreich) nationale Regelungen für die Einführung automatisierter Fahrzeuge geschaffen haben, existieren in den USA und in Asien keine

nationalen Lösungen. Dort werden automatisierte Fahrzeuge über Ausnahmegenehmigungen oder Regelungen des Bundesstaates zugelassen. Die Beschreibung der zukünftigen Entwicklung des automatisierten Fahrens verdeutlicht, dass die Anforderungen an das vollautomatisierte Fahren (Stufe 5) komplex sind. Aus diesem Grund wird die Strategie verfolgt, hochautomatisierte Fahrzeuge einzuführen und den Funktionsumfang schrittweise auszubauen.

Zusammenfassend wird eine weltweite Fokussierung auf die Automatisierungsstufe 4 ÖV beobachtet. Dies verdeutlichen sowohl die Roadmap zur zukünftigen Entwicklung des automatisierten Fahrens als auch die Ausgestaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen. In beiden Fällen wird sich auf spezifische Betriebsbereiche fokussiert und der Einsatz einer Leitstelle vorausgesetzt. Insbesondere Verkehrsunternehmen sind für den zukünftigen Einsatz automatisierter Fahrzeuge im ÖV prädestiniert, weil diese bereits über Leitstellen verfügen.

Auf Basis der Ausführungen in diesem Kapitel werden im Folgenden die Anforderungen des automatisierten Fahrens an den ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse erläutert.

Gemäß Abbildung 31 in Abschnitt 3.5 wird beim Einsatz von automatisierten Fahrzeugen zwischen komplexeren und weniger komplexen Anwendungsfällen unterschieden [Ainsalu et al. 2018, S. 12–23; Iclodean et al. 2020, S. 21–31; University of Michigan 2018, S. 17–31; Richter et al. 2020, S. 90–103]. Aus diesem Grund ist vor der Implementierung eines automatisierten Fahrzeugs eine Streckenanalyse im jeweiligen Bedienungsgebiet erforderlich. Dies ist eine Anforderung des automatisierten Fahrens, die im ganzheitlichen Planungsprozesses berücksichtigt werden sollte. Da automatisierte Busse auch in Fußgängerzonen eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.3.2), sollten diese Bereiche ebenfalls in die Streckenanalyse eingebunden werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Performance der Sensoren von Witterungsbedingungen beeinflusst werden (siehe Tabelle 5 in Abschnitt 3.2.1.1), sollten zudem Wetterdaten bei der Streckenauswahl im Planungsprozess inkludiert werden [Ainsalu et al. 2018, S. 20–23; Iclodean et al. 2020, S. 21–31; University of Michigan 2018, S. 17–19].

In Abschnitt 3.3 wird beschrieben, dass zur Realisierung des Einsatzes eines automatisierten Busses verschiedene verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle (digitale und physische) Maßnahmen entlang der Strecke implementiert werden. Deshalb sollte ergänzend zur Streckenanalyse untersucht werden, inwieweit verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen den Einsatz eines automatisierten Busses unterstützen können. Da zwischen den Technologieansätzen (siehe Abschnitt 3.3) Unterschiede in Bezug auf die Leistungsfähigkeit bestehen, welche die Auswahl der Strecke beeinflussen, sollte die Fahrzeugtechnologie im Planungsprozess berücksichtigt werden [Ainsalu et al. 2018, S. 20–23; Iclodean et al. 2020, S. 8–35; University of Michigan 2018, S. 17–19; Richter et al. 2020, S. 80–103].

Weiterhin sollten die derzeit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse in den Planungsprozess einbezogen werden [Ainsalu et al. 2018, S. 20–27; Iclodean et al. 2020, S. 31–37; University of Michigan 2018, S. 11–19]. Ab der vierten Automatisierungsstufe werden automatisierte

Fahrzeuge ohne Fahrer eingesetzt, jedoch aus der Ferne von einer Leitstelle überwacht (Stufe 4 ÖV) [Ainsalu et al. 2018, S. 28; SAE International 2021, S. 30–32; Ackerman 2021]. In der Konsequenz vergrößert sich dadurch der Arbeitsumfang des Leitstellenpersonals, weshalb dieser Aspekt in den Planungsprozess integriert werden sollte [Kettwich und Dreßler 2020, S. 69–73].

Zusammenfassend resultieren aus dem Bereich des automatisierten Fahrens folgende Anforderungen an den ganzheitlichen Planungsprozess für den Einsatz automatisierter Busse:

- Auf den Einsatz automatisierter Busse bezogene Streckenanalyse (inkl. Fußgängerzonen) im Bedienungsgebiet durchführen
- Wetterdaten bei der Streckenauswahl im Bedienungsgebiet berücksichtigen
- Verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen zur Unterstützung des automatisierten Busses festlegen
- Fahrzeugtechnologie berücksichtigen
- Rechtliche Rahmenbedingungen für das automatisierte Fahren berücksichtigen
- Personaleinsatzplanung vom stationären Personal in der Leitstelle anpassen

Abschließend können die in Abschnitt 2.5 dargelegten Anforderungen bestätigt werden. Die automatisierten Fahrzeuge von Waymo werden flexibel als Bedarfsverkehr eingesetzt. Weiterhin werden insbesondere die automatisierten Busse von 2getthere, EasyMile und GAMA elektrisch betrieben. Deshalb können der Bedarfsverkehr und die Elektromobilität mit dem Einsatz automatisierter Busse verknüpft werden. [Mounce und Nelson 2019, S. 20–29; Jonuschat et al. 2021, S. 5–23; Ainsalu et al. 2018, S. 12–23; Richter et al. 2020, S. 105f.]

4 Analyse von Planungsprozessen der Verkehrsplanung

Das Ziel des vierten Kapitels ist die Überprüfung der Hypothese dieser Arbeit, wonach derzeit kein ganzheitlicher Planungsprozess für die Einführung automatisierter Busse existiert. Da der Forschungsbereich der Verkehrsplanung mit der Aufgabenstellung dieser Arbeit verknüpft ist, werden zunächst die Grundlagen dieses Forschungsgebietes erläutert (Abschnitt 4.1). Anschließend werden bestehende Planungsprozesse der Verkehrsplanung analysiert (Abschnitt 4.2). In Abschnitt 4.3 werden die bestehenden Verfahren anhand der festgestellten Anforderungen an einen ganzheitlichen Planungsprozess für automatisierte Busse bewertet und die Forschungslücke konkretisiert. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und einem Zwischenfazit.

4.1 Grundlagen der Verkehrsplanung

Um das Forschungsfeld der Verkehrsplanung zu beschreiben, wird zuerst der Begriff definiert und anschließend Handlungsfelder und Maßnahmen der Verkehrsplanung erläutert (Abschnitt 4.1.1). Zur Einordnung der ÖPNV-Planung in die Verkehrsplanung werden anschließend die Planungsebenen der Verkehrsplanung erläutert (Abschnitt 4.1.2).

4.1.1 Definition, Handlungsfelder und Maßnahmen der Verkehrsplanung

Die Verkehrsplanung umfasst neben der Planung von Verkehrsinfrastruktur (Fußgänger-, Radfahr-, Straßen- oder Schienennetz) auch organisatorische und betriebliche Maßnahmen [Gertz 2021, S. 3; Steierwald et al. 2005, S. 9f.; O'Flaherty 1997, S. 26]. Dabei ist sie als integraler Bestandteil der Stadtplanung zu definieren und orientiert sich an der regionalen und nationalen Politik [Gertz 2021, S. 2; O'Flaherty 1997, S. 26]. Als führende Organisation für die Verkehrsplanung in Deutschland definiert die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) Verkehrsplanung wie folgt: „(Verkehrs-)Planungen bereiten zielorientiert, systematisch, vorausschauend und informiert Entscheidungen über Interventionen (Maßnahmen und Maßnahmenbündel) vor, die den Verkehr (Angebot, Nachfrage, Abwicklung und Auswirkung) betreffen“ [FGSV 2018a, S. 2]. Planungsgegenstand der Verkehrsplanung ist dabei sowohl der Personen- als auch der Güterverkehr [Gertz 2021, S. 4]. Weiterhin werden innerhalb des Stadtverkehrs alle Verkehrsmittel außer Luft- und Schiffsverkehr in der Planung betrachtet [Gertz 2021, S. 4].

Grundlegend ist die Verkehrsplanung in Angebotsplanung und Nachfragesteuerung aufgeteilt (siehe Abbildung 32) [Gertz 2021, S. 4]. In der Angebotsplanung wird die Verkehrsinfrastruktur und das betriebliche Verkehrsangebot zur Verfügung gestellt [Gertz 2021, S. 4f.]. Demgegenüber verfolgt die Nachfragesteuerung das Ziel, die Verkehrsnachfrage zu gestalten und zu beeinflussen [Gertz 2021, S. 4f.]. Um sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite zu berücksichtigen, zählen „Infrastrukturplanung und -management“, „Planung und Management Verkehrs-/Mobilitätsdienstleistungen“, „Verkehrsmanagement“ und „Mobilitäts-/Transportmanagement“ zu den vier Handlungsfeldern der Verkehrsplanung [FGSV 2018a, S. 8f.; Gertz 2021, S. 4f.].

Verkehrsplanung	
Infrastrukturplanung und -management	Erstellung und Unterhalt von Verkehrsinfrastruktur <i>Städte, Infrastrukturbetreiber</i>
Planung und Management Verkehrs-/ Mobilitätsdienstleistungen	Betriebliches Verkehrsangebot <i>Verkehrs- und Carsharing-Unternehmen, Rideselling-Anbieter, etc.</i>
Verkehrsmanagement	Betriebliche Gestaltung von Verkehrsabläufen <i>Städte, Verkehrsunternehmen</i>
Mobilitäts- und Transportmanagement	Zielgruppenspezifische Ansätze zur Beeinflussung von Mobilität <i>Städte, Verkehrsunternehmen, Unternehmen, Schulen, etc.</i>

Angebotsplanung

Nachfragesteuerung

Abbildung 32: Elemente der Verkehrsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Gertz 2021, S. 5]

Die Verkehrsinfrastruktur beinhaltet neben den Verkehrsnetzen, u. a. auch den Parkraum, Umsteigepunkte, Sharing-Angebote, Ladestationen und digitale Infrastruktur, wie bspw. 5G oder V2X-Sensoren [Gertz 2021, S. 4f.; TU Wien et al. 2019, S. 122; PTV Group et al. 2019c, S. 23–25]. Diese Infrastruktur zu planen und baulich umzusetzen ist Aufgabe der Infrastrukturplanung [Gertz 2021, S. 4f.; Umweltbundesamt 2022c]. Infrastrukturmanagement fokussiert sich darüber hinaus auf den Erhalt und die Verbesserung der Infrastruktur, indem diese überwacht und Maßnahmen abgeleitet werden [Gertz 2021, S. 4f.; Kielhauser und Adey 2018, S. 117f.]. Verantwortlich für diesen Planungsgegenstand sind Städte und Infrastrukturanbieter [Gertz 2021, S. 4f.]. Ein wesentlicher Aspekt der Planung von Verkehrs- und Mobilitätsdienstleistungen besteht in der Bereitstellung eines effizienten, umweltverträglichen und sozial gerechten betrieblichen Verkehrsangebots [Gertz 2021, S. 4f.]. Dementsprechend ist es die Aufgabe von Verkehrsunternehmen, dieses Angebot mit den entsprechenden Verkehrsmitteln bereitzustellen [Gertz 2021, S. 4f.].

Kurzfristige, betriebliche und organisatorische Maßnahmen umzusetzen ist die Aufgabe des Verkehrs- und Mobilitätsmanagements [Gertz 2021, S. 4f.; Leonhardt 2021, S. 507–509]. Die FGSV definiert Verkehrsmanagement als die „Beeinflussung des Verkehrsgeschehens durch ein Bündel von Maßnahmen und mit dem Ziel, die Verkehrsnachfrage und das Angebot an Verkehrssystemen optimal aufeinander abzustimmen“ [FGSV 2012, S. 122]. Beeinflussbar ist die Verkehrsnachfrage über die Zeit- und Wegewahl [Gertz 2021, S. 4f.; Steierwald et al. 2005, S. 691f.]. Aus diesem Grund sind die Steuerung der Verkehrsabläufe und die Bereitstellung von Informationen über den Verkehrszustand Beispiele des Verkehrsmanagements [Gertz 2021,

S. 4f.; Steierwald et al. 2005, S. 691f.]. Als Abgrenzung fokussiert sich das Mobilitätsmanagement auf die Einflussnahme der personenbezogenen Verkehrsnachfrage durch Verkehrsberatung, Kommunikation, Organisation und Information [Steierwald et al. 2005, S. 692; IVV und ISB 2003, S. 17; FGSV 2018b, S. 5]. Dies hat zum Ziel, die Mobilitätsbedürfnisse verschiedener Personengruppen (u. a. Beschäftigte, Kinder, Senioren, Touristen) an die Angebote anzupassen und eine effiziente Nutzung zu erreichen [Steierwald et al. 2005, S. 692; Louen 2021, S. 162–166; FGSV 2018b, S. 5]. Um nicht nur den Personen- sondern auch den Güterverkehr in die Betrachtung mit einzubeziehen, wird das Transportmanagement zu diesem Handlungsfeld hinzugefügt [Gertz 2021, S. 4f.].

Zu jedem dieser vier genannten Handlungsfelder können unterschiedliche Maßnahmen zugeordnet werden. Ein Auszug dieser Maßnahmen wird in Tabelle 8 dargestellt [Gertz 2021, S. 27f.; FGSV 2018a, S. 10f.]. In Bezug zur Aufgabenstellung wird die Einführung einer neuen Buslinie der Planung von Verkehrsdienstleistungen zugeordnet.

Tabelle 8: Handlungsfelder und Maßnahmen der Verkehrsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Gertz 2021, S. 27f.; FGSV 2018a, S. 10f.]

Handlungsfelder	Maßnahmen
Infrastrukturplanung und Management	<ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung einer Straßenbahnlinie • Bau einer Umgehungsstraße • Erweiterung Park-and-Ride-Kapazitäten
Planung und Management Verkehrs-/ Mobilitätsdienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Einführung einer neuen Buslinie</u> • Taktausweitung • Anpassung des Netzplans
Verkehrsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung von Immissions- und Emissionsgrenzwerte (Umweltzonen) • Anpassung von Geschwindigkeitsbeschränkungen • Einführung von Parkgebühren oder Road-Pricing
Mobilitäts- und Transportmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Zielgruppenspezifische Öffentlichkeitsarbeit • Standortbezogene Logistik

Die Auflistung zeigt, dass sich die Aufgaben der Verkehrsplanung in der Maßstabsebene, in der Konkretisierung und auch im Zeitbezug unterscheiden [Gertz 2021, S. 4]. Die Erweiterung einer Straßenbahnlinie ist ein Prozess, der sich bspw. über einen Zeitraum von mehreren Jahren erstreckt. Im Gegensatz dazu können Parkgebühren in der Regel mit einem geringeren Zeitaufwand implementiert werden.

4.1.2 Planungsebenen der Verkehrsplanung

In Abschnitt 4.1.1 wurde bereits erläutert, dass die Verkehrsplanung auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt wird und verschiedene Objekte und Maßnahmen betrachtet werden [FGSV 2018a, S. 8; Gertz 2021, S. 3f.; Meyer 2016, S. 3]. Für den Erfolg der Verkehrsplanung ist es essenziell, die übergeordnete Planungsebene zu berücksichtigen [FGSV 2018a, S. 20–34]. In Abbildung 33 werden aus diesem Grund

die Planungsebenen der Stadt- und Verkehrsplanung zueinander in Beziehung gesetzt [FGSV 2013, S. 6–12; Gertz 2021, S. 36; Engel 2021, S. 67].

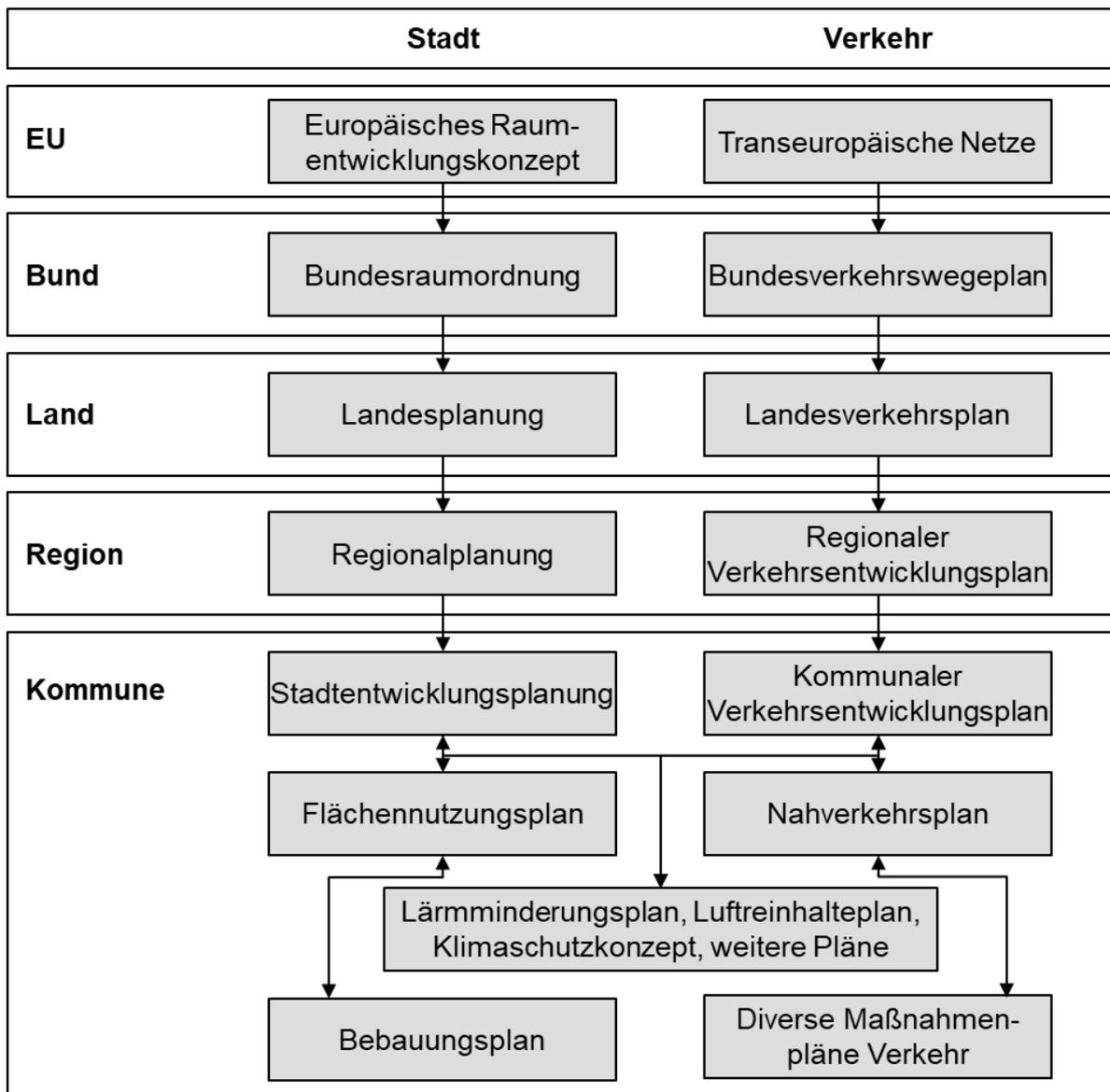


Abbildung 33: Räumliche Planungsebenen der Stadt- und Verkehrsplanung in Deutschland, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2013, S. 6–12; Gertz 2021, S. 36; Engel 2021, S. 67]

Das europäische Raumentwicklungskonzept und die transeuropäischen Netze werden auf europäischer Ebene festgelegt und beziehen sich auf länderübergreifende Flächen und Verkehrswege, die auf nationaler Ebene ausgestaltet werden [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36]. Auf Bundesebene existiert der Bundesverkehrswegeplan, welcher Bedarfs- und Ausbaupläne von Bundesstraßen und Bundesautobahnen beinhaltet [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36; BBSR 2024]. Auf der Seite der Stadtplanung wird durch eine gemeinsame Initiative des Bundes und der Länder die Raumordnung festgelegt [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36; BBSR 2024]. Die Bundesländer entwickeln auf Landesebene Raumordnungsprogramme und Landesverkehrskonzepte mit geplanten Infrastrukturprojekten [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36]. Zwischen der Landesplanung und der kommunalen Planung befindet sich die Regionalplanung, welche die Raumordnung und die Nutzungsanforderungen in der Planungsregion koordiniert [FGSV 2013, S. 12;

Regionale Planungsgemeinschaft Magdeburg 2024]. Im Verkehrsbereich werden regionale Verkehrskonzepte entwickelt, die ggf. auch bereits Nahverkehrspläne enthalten können [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36]. Die unterste Ebene stellt die Stadt- und Verkehrsplanung auf der kommunalen Ebene für Gesamtstädte oder Gemeinden dar [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36; Engel 2021, S. 67]. Auf Basis eines integrierten Stadtentwicklungsplans werden der Flächennutzungsplan und der Bebauungsplan erarbeitet [FGSV 2013, S. 12; Engel 2021, S. 67]. Diese beiden Rahmenpläne werden zur Bauplanung verwendet [FGSV 2013, S. 12]. Der (kommunale) Verkehrsentwicklungsplan definiert die Ziele und Handlungsmaßnahmen für die Mobilitätsentwicklung der Stadt [Engel 2021, S. 68]. Daraus werden weitere Verkehrskonzepte, wie der Nahverkehrsplan oder Stadtteilverkehrspläne entwickelt und umgesetzt [FGSV 2013, S. 12; Gertz 2021, S. 36; Engel 2021, S. 68]. Als übergeordnete strategische Instrumente dienen der integrierte Stadtentwicklungsplan und der Verkehrsentwicklungsplan dazu, die Ziele und Wirkungsrichtungen der einzelnen Pläne auf kommunaler Ebene aufeinander abzustimmen [FGSV 2013, S. 6; Gertz 2021, S. 36; Engel 2021, S. 67f.]. Aus diesem Grund ist eine Rückkopplung der einzelnen Pläne zu den übergeordneten Instrumenten auf dieser Ebene essenziell [FGSV 2013, S. 6].

In Anbetracht der Tatsache, dass der lokale ÖPNV und folglich auch der Einsatz automatisierter Busse von den Verkehrsentwicklungs- und Nahverkehrsplanungen abhängig sind, werden diese beiden Instrumente im Folgenden ausführlich erörtert.

Verkehrsentwicklungsplan:

Die „Verkehrsentwicklungsplanung ist das zentrale Instrument zur Entwicklung eines effizienten Verkehrssystems“ [FGSV 2013, S. 9]. Das Ziel dieser Pläne ist es, die Attraktivität, Mobilität und Erreichbarkeit in einer Stadt oder Gemeinde zu verbessern, indem alle Verkehrsarten betrachtet und vorwiegend im Sinne der nachhaltigen Mobilität ausgebaut werden [Engel 2021, S. 68]. Dementsprechend enthalten Verkehrsentwicklungspläne Ziele, Strategien, Rahmenbedingungen und Maßnahmen auf kommunaler Ebene [Engel 2021, S. 68; FGSV 2013, S. 5]. Das Vorgehen zur Verkehrsentwicklungsplanung gliedert sich in fünf Phasen (Orientierung, Problemanalyse, Maßnahmenuntersuchung, Abwägung und Entscheidung sowie Umsetzung) inklusive begleitender Information, Beteiligung und Evaluation [FGSV 2013, S. 15].

Innerhalb der Verkehrsentwicklungsplanung werden zum einen strategisch-konzeptionelle Planungen durchgeführt und zum anderen Maßnahmenpläne entwickelt. In der strategisch-konzeptionellen Ebene werden Ziele, Szenarien, Strategien und Konzepte langfristig erarbeitet und periodisch aktualisiert. Dazu werden auch kontinuierlich Analysen zu verschiedenen Kennzahlen, wie bspw. der Verkehrsnachfrage, ausgewertet. Diese Vorüberlegungen werden in der Maßnahmenebene konkretisiert, indem einzelne Fachpläne, wie ein Nahverkehrsplan, ein Radverkehrskonzept oder ein Lärminderungsplan erarbeitet werden. Weiterhin zählen Maßnahmenbündel oder Einzelmaßnahmen, wie bspw. die Umgestaltung von ÖPNV-Linien, zur Maßnahmenebene. Der Erfolg eines Verkehrsentwicklungsplans ist dabei von der Interaktion und Konsistenz dieser beiden Ebenen abhängig. [FGSV 2013, S. 25–27]

Nahverkehrsplan:

Im Nahverkehrsplan, der als strategisches Planungsinstrument für fünf bis zehn Jahre ausgelegt ist, werden Ziele, Standards und Maßnahmen für den ÖPNV in einem definierten Einzugsgebiet festgelegt. Ziel des Nahverkehrsplans ist es, ein zusammenhängendes ÖPNV-Netz auszuarbeiten. Der Nahverkehrsplan gewährleistet demnach eine bedarfsgerechte Versorgung der Bevölkerung innerhalb eines definierten Einzugsgebiets. In einem Nahverkehrsplan werden Anforderungen, Kennzahlen und Bedienungsstandards festgelegt. Dies betrifft folgende Bereiche:

- Strecken- und Liniennetz
- Erschließungsqualität (Linien und Haltestellen)
- Bedienungsqualität (bspw. Bedienungshäufigkeit)
- Verbindungsqualität (Schnittstellen im Netz und zu anderen Verkehrsträgern)
- Tarifstruktur
- Ausrüstungsqualität (vor allem barrierefreie Gestaltung)
- Fahrzeuge

Beispielsweise können Haltestelleneinzugsbereiche (von 300 m bis 700 m) für die Erschließungsqualität definiert werden. Für die Bedienungsqualität kann exemplarisch ein Takt zwischen 20 min und 60 min festgelegt werden. Diese Bedienungsstandards werden auf Basis des Finanzbudgets und Erfahrungswerten der FGSV, des VDV oder anderen Nahverkehrsplänen festgelegt. Der Planungsablauf für den Nahverkehrsplan gliedert sich analog der Verkehrsentwicklungsplanung in fünf Phasen inklusive begleitender Prozesse. Wie bereits erläutert wurde, ist der Nahverkehrsplan dem Verkehrsentwicklungsplan untergeordnet und orientiert sich an den dort festgelegten Zielen und Maßnahmen. [Sommer und Deutsch 2021, S. 256–264; ISUP Ingenieurbüro für Systemberatung und Planung GmbH 2016, S. 2f.]

Auf Basis des Nahverkehrsplans erfolgt in der operativen Planungsebene die Angebotsplanung, deren Ziel es ist, das Nahverkehrssystem basierend auf den Anforderungen für die Fahrgäste zu entwerfen [West 2007, S. 3–5; Sommer und Deutsch 2021, S. 273; Wagner 2009, S. 22; Suhl et al. 2007, S. 449; Borndörfer et al. 2008b, S. 133; Borndörfer et al. 2008a, S. 1]. Dementsprechend ist die Angebotsplanung der Prozess, mit dem das Verkehrsangebot, bspw. eine Buslinie (siehe Abschnitt 4.1.1), geplant wird [Hartl 2020, S. 29]. Im Hinblick auf die vorliegende Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die Planung und Streckenauswahl für den Einsatz automatisierter Busse demnach der Angebotsplanung zuzuordnen. Die Angebotsplanung des ÖPNV ist dabei nicht eindeutig dem Aufgabenträger, der Nahverkehrsgesellschaft oder dem Verkehrsunternehmen zuzuordnen [West 2007, S. 4f.]. Dieser Aspekt wird im Anhang A.5 vertiefend erläutert. Grundsätzlich ist der Autor der Meinung, dass die Angebotsplanung eine gemeinsame Aufgabe für Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen ist und der Zusammenarbeit beider Organisationen bedarf.

4.2 Existierende Planungsprozesse zur Einführung einer Buslinie

Zur Identifikation der bereits bestehenden Planungsprozesse im Forschungsgebiet der Verkehrsplanung, wird die systematische Literaturanalyse als Methodik verwendet [Kitchenham et al. 2007, S. 3]. Nach vom Brocke et al. gliedert sich diese Methodik in fünf Schritte: Definition des Review-Umfangs, Konzeptualisierung des Themas, Literaturrecherche, Literaturanalyse und Forschungsagenda [vom Brocke et al., S. 6f.]. Da die Literaturrecherche eine Vielzahl unterschiedlicher Quellen umfasst, wird zuerst der Umfang der Literaturrecherche festgelegt [vom Brocke et al., S. 6f.]. Danach werden die Schlüsselwörter erarbeitet, nach denen gesucht wird [vom Brocke et al., S. 8]. Die Literaturrecherche (dritter Schritt) gliedert sich in diesem Fall in drei Themenbereiche [vom Brocke et al., S. 8f.]. Der Prozess der Verkehrsplanung ist als Planungsprozess für die Einführung eines automatisierten Busses prädestiniert, weshalb in diesem Themenbereich zuerst recherchiert wird. Als zweites wird analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.1.2 die Literatur direkt zur ÖPNV-Planung und Angebotsplanung gesichtet. Schließlich werden im dritten Bereich verwandte Forschungsgebiete untersucht. Aus den Themenbereichen werden Schlagwörter auf Deutsch und auf Englisch abgeleitet, nach denen in der systematischen Literaturanalyse gesucht wird. In Bezug auf die Verkehrsplanung werden die Suchbegriffe „Verkehrsplanung“, „Verkehrsplanungsprozess“, „Transportation planning“, „Transportation planning process“ und „Traffic planning“ verwendet. „Angebotsplanung“, „Prozess der Angebotsplanung“, „Bus network design“, „Planning phases public transportation“, „Transit planning process“, „Transit network design“, „Public transport systems“ werden als Suchbegriffe für die Angebotsplanung ausgewählt. Die Suchbegriffe „Flexible Bedienungsformen“, „Planung des öffentlichen Verkehrs in ländlichen Gebieten“, „Betrieb von automatisierten Bussen“, „Logistikplanung“, „Einführung von fahrerlosen Transportsystemen“, „Flexible forms of service“, „Planning public transport in rural areas“, „Operation of automated buses“, „Logistics planning“ und „Introduction of driverless transport systems“ werden für die verwandten Forschungsgebiete verwendet. Im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche in den Datenbanken Scopus und Google Scholar erfolgt zunächst die Identifizierung der relevanten Literatur anhand des Titels, der Kurzfassung und der Schlüsselwörter. Anschließend wird die relevante Literatur auf ihre Eignung geprüft.

In den folgenden Unterkapiteln werden nacheinander die Planungsprozesse der Verkehrsplanung, der Angebotsplanung und angrenzender Forschungsbereiche vorgestellt.

4.2.1 Planungsprozesse der Verkehrsplanung

In der Verkehrsplanung existieren weltweit unterschiedliche Planungsprozesse, von denen eine Auswahl in Tabelle 9 abgebildet ist. Das US-Verkehrsministerium veröffentlichte 1970 einen Verkehrsplanungsprozess mit neun Phasen [U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3]. Auf Basis der Ziele folgt eine Analyse und Prognose bevor verschiedene kurz- und langfristige Maßnahmen erarbeitet und umgesetzt werden [U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3]. Der Planungsprozess von Pas aus dem Jahr 1995 umfasst zwar nur drei Phasen, enthält jedoch die Zielformulierung, Datenerfassung,

Entwicklung, Bewertung von Alternativen sowie die Umsetzung und kontinuierliche Überwachung [Pas 1995, S. 59–73]. Im dem Ansatz von Ognjenovic et al. erfolgt ebenfalls die Analyse des aktuellen Zustands, die Prognose des Verkehrs sowie die Bewertung und Auswahl einer Handlungsalternative [Ognjenović et al. 2015, S. 575–577]. Die Auswahl der Handlungsalternative beinhaltet zudem auch die Umsetzung und kontinuierliche Überwachung [Ognjenović et al. 2015, S. 575–577].

Tabelle 9: Übersicht der Verkehrsplanungsprozesse, eigene Darstellung i. A. a. [U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3; Pas 1995, S. 59–73; Meyer 2016, S. 3–6; Ognjenović et al. 2015, S. 575–577; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 2f.; FGSV 2018a, S. 11–15]

U.S. Verkehrsministerium (1970)	Pas (1995)	Ognjenovic et al. (2015)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ziele und Zielsetzungen 2. Organisation und Bestandsaufnahme 3. Analyse der aktuellen Situation 4. Gebietsweite Prognosen 5. Analyse von Zukunftsalternativen 6. Langfristige Projektplanung 7. Kurzfristige Projektplanung 8. Umsetzung 9. Kontinuierliche Planung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Phase der Voranalyse 2. Technische Analysephase 3. Post-Analyse-Phase 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aufbau einer Informationsbasis 2. Analyse der Situation 3. Planungs- und Prognosegrundlage 4. Bewertung und Auswahl einer Lösung
Meyer (2016)	U.S. Verkehrsministerium (2018)	FGSV (2018)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Problemverständnis 2. Vision 3. Ziele und Zielsetzungen 4. Kennzahlen zur Systemleistung 5. Sammeln und Analysieren von Daten 6. Alternative Verbesserungsstrategien 7. Bewertung 8. Umsetzung 9. Systembetrieb 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Regionale Vision und Ziele 2. Alternative Verbesserungsstrategien 3. Bewertung und Priorisierung von Strategien 4. Entwicklung eines Verkehrsplans 5. Entwicklung von Programmen zur Verbesserung der Verkehrsbedingungen 6. Projektentwicklung 7. Systembetrieb 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Orientierung 2. Problemanalyse 3. Maßnahmenuntersuchung 4. Abwägung und Entscheidung 5. Umsetzung der Konzepte

Der Ansatz von Meyer weist eine Analogie zum Planungsprozess des US-Verkehrsministeriums auf, bei dem nacheinander Ziele abgeleitet, Daten gesammelt und analysiert, Verbesserungsstrategien entwickelt und diese letztlich bewertet und umgesetzt werden [Meyer 2016, S. 3–6]. Im Unterschied zu den vorherigen Ansätzen

werden bei diesem Planungsprozess die Arbeitsschritte iterativ durchgeführt [Meyer 2016, S. 3–6]. Darüber hinaus berücksichtigt dieses Vorgehen kurz-, mittel- und langfristige Planungshorizonte [Meyer 2016, S. 3–6]. Zusätzlich werden auch übergeordnete Prioritäten wie Politik oder Finanzen in den Prozess einbezogen [Meyer 2016, S. 3–6]. Das US-Verkehrsministerium hat 2018 einen neuen siebenstufigen Planungsprozess entwickelt, welcher Ähnlichkeiten zu den bereits genannten Planungsprozessen aufweist, sich jedoch auf Projektentwicklung und Systembetrieb fokussiert [Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 2f.]. In Deutschland wird für die Verkehrsplanung ein fünfstufiger Prozess eingesetzt [FGSV 2018a, S. 11–15]. Beginnend mit der Orientierung folgen Problemanalyse, Maßnahmenuntersuchung, Abwägung und Entscheidung sowie Umsetzung der Konzepte [FGSV 2018a, S. 11–15]. Wirkungsmonitoring, Prozessevaluation, Information, Partizipation und Qualitätsmanagement werden parallel zu den fünf Planungsphasen durchgeführt [FGSV 2018a, S. 11–15].

Trotz der unterschiedlichen Bezeichnungen der einzelnen Planungsprozesse sind die Elemente der genannten Beispiele in ihrer Grundstruktur vergleichbar. Die Themenstellung dieser Arbeit fokussiert sich auf den Einsatz automatisierter Busse in Deutschland (siehe Abschnitt 1.2). Weiterhin ist der Verkehrsplanungsprozess der FGSV der aktuellste Ansatz und enthält die Bestandteile der anderen Alternativen sowie die Beteiligung der Gesellschaft. Aus diesem Grund orientieren sich die weiteren Ausführungen in dieser Arbeit an dieser Vorgehensweise. Der Verkehrsplanungsprozess nach FGSV ist in Abbildung 34 visualisiert [FGSV 2018a, S. 13]. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen kurz erläutert, wobei die Inhalte der alternativen Planungsprozesse integriert werden, um möglichst eine Allgemeingültigkeit zu gewährleisten.

Der Verkehrsplanungsprozess wird zumeist durch externe Auslöser, wie bspw. Problemhinweise oder Lösungsvorschläge aus der Bürgerschaft gestartet. Ziel der Orientierungsphase ist es, diese Auslöser näher zu überprüfen. Diese Phase endet mit der politischen Entscheidung, ob das Planungsverfahren gestartet werden soll. [FGSV 2018a, S. 19; Pas 1995, S. 60f.; Meyer 2016, S. 4]

Im Rahmen der Problemanalyse wird der Planungsgegenstand untersucht. Innerhalb dieser Phase erfolgt die Festlegung von Leitlinien und Zielvorstellungen, die Analyse des Ist-Zustands sowie die Identifizierung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Untersuchungsgegenstandes. [FGSV 2018a, S. 23; U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3; Pas 1995, S. 62f.; Meyer 2016, S. 4; Ognjenović et al. 2015, S. 575–577]

Innerhalb der Maßnahmenuntersuchung werden, basierend auf den Vorarbeiten, ein Handlungsprogramm mit Maßnahmenbündel und eine Vorgehensweise für die Umsetzung entwickelt. Dazu werden zunächst mehrere Handlungskonzepte erarbeitet und anschließend die Auswirkungen abgeschätzt. Die Bewertung der verschiedenen Handlungskonzepte schließt diese Phase ab. [FGSV 2018a, S. 25–33; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 3; Pas 1995, S. 70–72; Meyer 2016, S. 4f.]

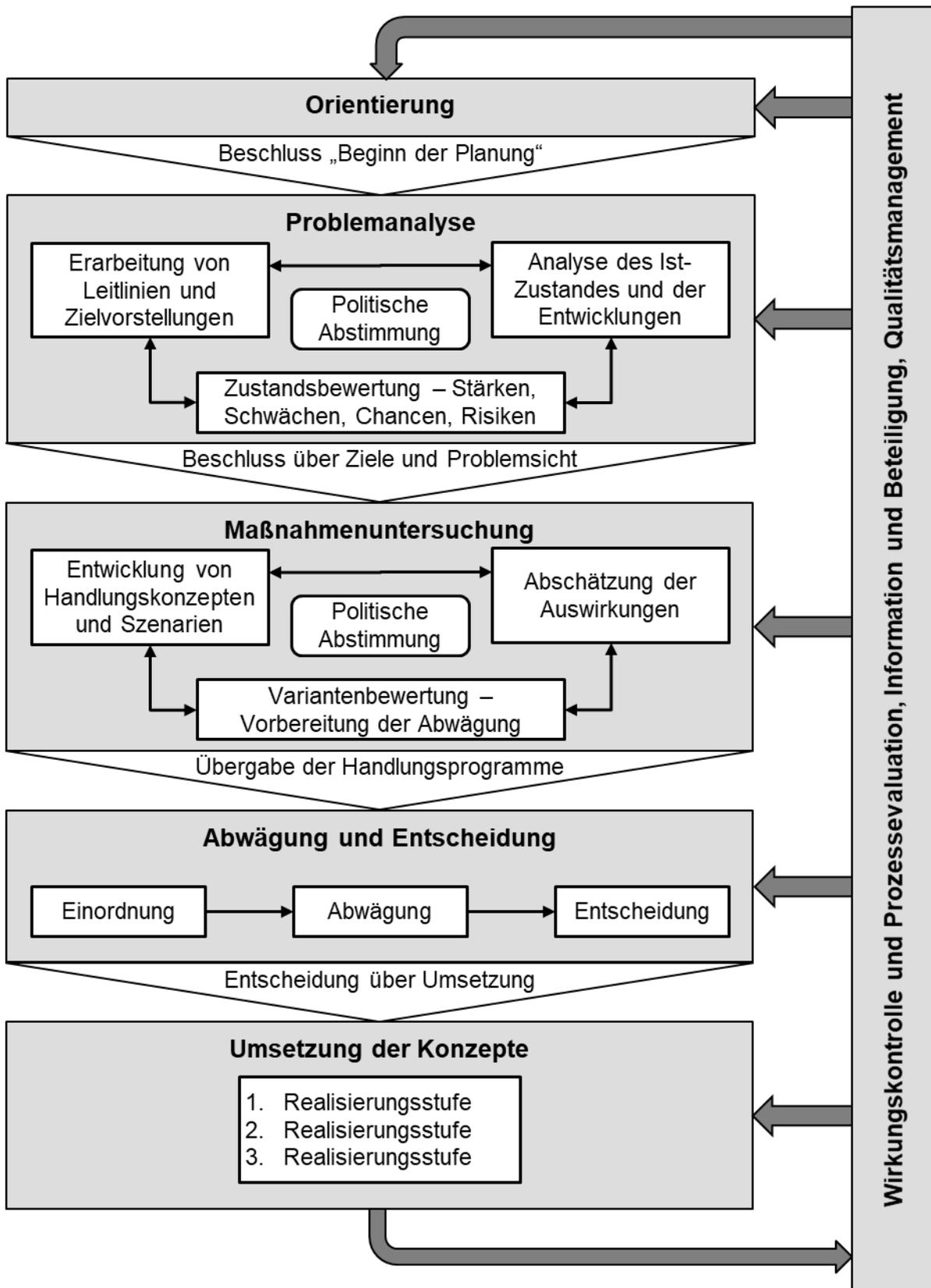


Abbildung 34: Verkehrsplanungsprozess nach FGSV, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2018a, S. 13]

Entscheidungslegitimierte Akteure aus der Politik, aus Gremien oder zuständigen Verwaltungsbehörden treffen auf Basis der erarbeiteten Konzepte in der vierten Phase eine Entscheidung bzgl. der Umsetzung der Handlungskonzepte [FGSV

2018a, S. 34–36]. In der Umsetzungsphase wird anschließend das beschlossene Handlungskonzept realisiert, wofür eine gesicherte Finanzierung erforderlich ist [FGSV 2018a, S. 12; Pas 1995, S. 73; Meyer 2016, S. 5].

Während des gesamten Verkehrsplanungsprozesses sind Information und Beteiligung der unterschiedlichen Stakeholder unerlässlich [FGSV 2018a, S. 39–41; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 5; Beckmann 2021, S. 457–460]. Um die Qualität des Planungsprozesses und des Ergebnisses zu gewährleisten, wird zudem ein kontinuierliches Monitoring mit Evaluation und Qualitätsmanagement durchgeführt [FGSV 2018a, S. 43–45].

4.2.2 Planungsprozesse der Angebotsplanung

Für die Planung des ÖPNV existiert eine Vielzahl von Ansätzen. Tabelle 10 zeigt sieben verschiedene Ansätze der Angebotsplanung.

Tabelle 10: Übersicht der Planungsprozesse der Angebotsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332; Desaulniers und Hickman 2007, S. 70–94; Liebchen und Möhring 2007, S. 3–5; Häll 2011, S. 3–5; Schöbel 2012, S. 491f.; Schnieder 2018, S. 16f.; Liu et al. 2021, S. 1–3]

Ceder u. Wilson	Desaulniers u. Hickman	Liebchen u. Möhring	Häll
<ol style="list-style-type: none"> 1. Netzwerkdesign 2. Festlegung der Frequenz 3. Fahrplanentwicklung 4. Einsatzplanung für Busse 5. Einsatzplanung der Fahrer 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Netzwerkdesign 2. Festlegung der Frequenz 3. Fahrplanerstellung 4. Fahrzeugeinsatzplanung 5. Dienstleistungsplanung 6. Dienstleistungsplanung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Netzwerkplanung 2. Linienplanung 3. Fahrplanerstellung 4. Fahrzeugeinsatzplanung 5. Dienstleistungsplanung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Netzwerkdesign 2. Festlegung der Frequenz 3. Fahrplanerstellung 4. Fahrzeugeinsatzplanung 5. Dienstleistungsplanung
Schöbel	Schnieder	Liu et al.	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Infrastruktur 2. Linien und Frequenzen 3. Fahrplan 4. Fahrzeugrouten und -einsatzpläne 5. Einsatzpläne der Besatzung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Netzplanung 2. Linienplanung 3. Kapazitätsplanung 4. Fahrlagenplanung 5. Fahrzeugeinsatzplanung 6. Personaleinsatzplanung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Infrastrukturplanung 2. Netzwerkdesign 3. Festlegung der Frequenz 4. Fahrplanentwicklung 5. Fahrzeugeinsatzplanung 6. Dienstleistungsplanung u. Dienstpläne 	

Ceder und Wilson unterteilen den Planungsprozess der Angebotsplanung in fünf Schritte: Netzwerkdesign, Festlegung von Frequenzen, Fahrplanentwicklung, Einsatzplanung der Busse und Einsatzplanung der Fahrer [Ceder und Wilson 1986, S. 332]. Desaulniers und Hickman verwenden dieselben Schritte, erweitern sie jedoch um die Dienstplanung, bei welcher der Personaleinsatz kurzfristig auf der

Grundlage der tatsächlich verfügbaren Fahrer geplant wird [Desaulniers und Hickman 2007, S. 70–94]. Die Ansätze von Liebchen und Möhring (2007) und Häll (2011) decken sich wiederum mit dem Ansatz von Ceder und Wilson [Liebchen und Möhring 2007, S. 3–5; Häll 2011, S. 3–5]. Nach dem Vorgehen von Schöbel beginnt die Angebotsplanung mit der Festlegung der Infrastruktur des ÖPNV-Netzes [Schöbel 2012, S. 491f.]. Anschließend werden Linien und Frequenzen, der Fahrplan, Fahrzeugrouten sowie der Personaleinsatz geplant [Schöbel 2012, S. 491f.].

Schieders Vorgehensweise weist Ähnlichkeiten mit anderen Ansätzen auf, jedoch erfolgt eine Unterteilung der Netz- und Linienplanung in zwei Schritte [Schnieder 2018, S. 16f.]. Weiterhin wird die Kapazitätsplanung als ein eigenständiger Planungsschritt dargestellt [Schnieder 2018, S. 16f.]. Abschließend gestaltet sich der Ansatz von Liu et al. analog zur Arbeit von Schöbel, bei der zuerst die Infrastrukturplanung durchgeführt wird [Liu et al. 2021, S. 1–3].

Die Schritte Fahrlagenplanung, Fahrzeugeinsatzplanung und Personaleinsatzplanung sind in jedem zuvor genannten Ansatz vertreten. Darüber hinaus wird auch die Netzplanung (bzw. die Linienbildung) in jedem Ansatz durchgeführt. Nach Schnieder beinhaltet die Kapazitätsplanung die Festlegung von Frequenzen, sodass auch dieses Element in den sieben Planungsprozessen berücksichtigt wird. Da sich das Vorgehen von Schnieder auf die Angebotsplanung in Deutschland bezieht, werden innerhalb dieser Arbeit für die Angebotsplanung folgende fünf Schritte verwendet:

1. Netzplanung
2. Kapazitätsplanung
3. Fahrlagenplanung
4. Fahrzeugeinsatzplanung
5. Personaleinsatzplanung

Der erste Schritt der Netzplanung beinhaltet die Verkehrswegeplanung, die zusätzlich eine Infrastrukturanalyse enthält [Schöbel 2012, S. 491f.]. Anschließend werden Anzahl und Lage der Haltestellen festgelegt [Schöbel 2012, S. 492–497; Schnieder 2018, S. 21–24]. Die Verknüpfung der Haltestellen untereinander wird im Rahmen der Liniennetzplanung (der letzte Teilaspekt der Netzplanung) durchgeführt [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Schöbel 2012, S. 491–497]. Ausgehend von der Nachfrage erfolgt im Rahmen der Kapazitätsplanung eine Variation des Fahrtenabstands und der Fahrzeuggröße, bis die Beförderungskapazität und Beförderungsqualität als ausreichend erachtet werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–90; Schnieder 2018, S. 45–47]. Auf Basis des Liniennetzes, der Frequenzen und der Fahrzeiten der Busse wird im dritten Schritt der Fahrplan für jede Linie erstellt [Desaulniers und Hickman 2007, S. 90–94; Schnieder 2018, S. 77–90]. Im Rahmen der Fahrlagenplanung wird zudem auch die Anschlussplanung an den Haltestellen berücksichtigt, um die Wartezeit für die Fahrgäste zu minimieren [Schnieder 2018, S. 92–95; Liu et al. 2021, S. 1–3]. Die Fahrzeugeinsatzplanung umfasst die qualitative und quantitative Berechnung der Fahrzeuge, damit der Fahrplan eingehalten werden kann [Desaulniers und Hickman 2007, S. 95–100; Schnieder 2018, S. 107–119]. Darüber hinaus wird eine Fahrzeugreserve eingeplant

[Schnieder 2018, S. 119–126]. Ziel der Personaleinsatzplanung ist es, die einzelnen Dienste unter Berücksichtigung von Arbeitszeitgesetzen festzulegen [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104]. Um wöchentliche und tägliche Bedarfsspitzen abzudecken, wird die Dienstreihenfolgeplanung durchgeführt, bei der jeder Mitarbeiter einer anderen Schichtplangruppe zugeordnet wird [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104; Schnieder 2018, S. 136–143].

In der Literatur werden die einzelnen Schritte den Überbegriffen „Verkehrsplanung“ und „Betriebsplanung“ zugeordnet (siehe Abbildung 35) [Schnieder 2018, S. 16f.; Hartl 2020, S. 29].

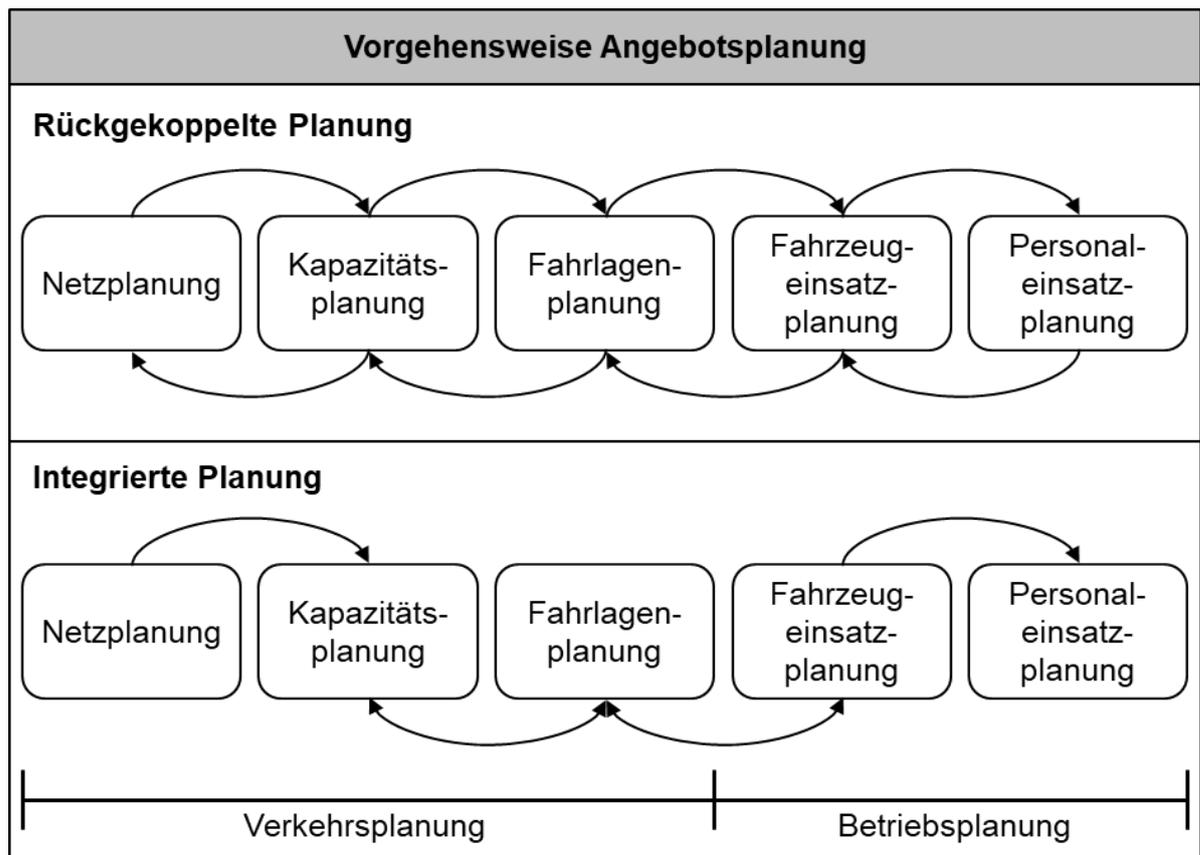


Abbildung 35: Vorgehensweise der Angebotsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Hartl 2020, S. 31]

Netz-, Kapazitäts- und Fahrlagenplanung zählen zur Verkehrsplanung [Hartl 2020, S. 29–31]. Diese Definition steht im Einklang mit den Ausführungen in Abschnitt 4.1.1, in denen die Einrichtung einer Buslinie der Verkehrsplanung zugewiesen wird. Der Fahrplan stellt den Übergang zur Betriebsplanung dar, welche die Fahrzeugeinsatz- und Personaleinsatzplanung einschließt [Schnieder 2018, S. 16f.; Hartl 2020, S. 29–31]. Die einzelnen Schritte werden anhand von unterschiedlichen Zielwerten ausgerichtet [Desaulniers und Hickman 2007, S. 70–104]. Zum Beispiel werden Haltestellen nach Kosten, Erschließungsqualität und Reisezeit optimiert [Desaulniers und Hickman 2007, S. 75–85; Schöbel 2012, S. 491–497; Schnieder 2018, S. 21–31]. Der Fahrplan wiederum orientiert sich u. a. an den Zielgrößen Stabilität, Anzahl der Fahrzeuge und Kapazitätsmaximierung [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 78–80]. Zusammenfassend konzentrieren sich die Schritte der Betriebsplanung auf die Kostenreduktion, während

bei den Schritten der Verkehrsplanung Ziele aus Nutzer- und Betreibersicht im Fokus stehen [Hartl 2020, S. 29–31].

Darüber hinaus besitzen die einzelnen Schritte unterschiedliche Planungshorizonte (bspw. langfristige Netzwerkplanung und kurzfristige Personaleinsatzplanung) [Farina 2018, S. 8]. Weiterhin bestehen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten, sodass bspw. die tatsächliche Fahrzeit, nach welcher die Netzplanung ausgelegt wird, erst während der Fahrlagenplanung ermittelt werden kann [Schnieder 2018, S. 30]. Ein weiteres Beispiel ist die Anzahl der Fahrzeuge, die zwar bei der Fahrlagenplanung berücksichtigt, aber erst bei der Fahrzeugeinsatzplanung im Detail berechnet wird [Schnieder 2018, S. 78; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.]. Vor diesem Hintergrund werden für die Lösung der Angebotsplanung verschiedene mathematischer Modelle eingesetzt [Ceder und Wilson 1986, S. 333–336; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–105; Schnieder 2018, S. 23–29]. Auf diese wird im Rahmen dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen.

Die Auswirkungen bzw. die Erfüllung der Zielgrößen können an unterschiedlichen Stellen im Prozess der Angebotsplanung ermittelt und bewertet werden, wie bspw. nach der Netzplanung [Kirchhoff 2002, S. 112–139]. Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Auswirkungen stellt der Übergang von der Angebotsplanung zur Betriebsplanung (nach der Fahrlagenplanung) dar [Hartl 2020, S. 30–32]. Abschließend können die Auswirkungen auch nach dem Abschluss aller fünf Schritte berechnet und bewertet werden [Friedrich 1994, S. 44]. Aufgrund dieser vielfältigen Betrachtungsweisen werden die einzelnen Planungsschritte entweder iterativ durchlaufen oder integriert betrachtet (siehe Abbildung 35) [Ceder und Wilson 1986, S. 335–337; Liebchen und Möhring 2007, S. 3–7; Häll 2011, S. 3–5; Hartl 2020, S. 31].

4.2.3 Planungsprozesse aus angrenzenden Forschungsbereichen

In diesem Abschnitt werden Planungsansätze des ÖPNV aus den Bereichen flexible Bedienungsformen, ländlicher Raum, Elektrofahrzeuge, automatisierte Busse, Logistikplanung und FTS analysiert.

Flexible Bedienungsformen:

Im Themenfeld der Planung flexibler Bedienungsformen im ÖPNV existiert kein vollständiger Planungsprozess, jedoch ein Grobkonzept, das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung erarbeitet wurde. Abbildung 36 zeigt das Grobkonzept, welches in die drei Hauptphasen räumliche Aspekte, zeitliche Aspekte und weitere Aspekte aufgeteilt ist. Das Bedienungsgebiet wird anhand der Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung vor Ort abgegrenzt und ist eine essenzielle Eingangsgröße, um im zweiten Schritt die Betriebsform zu wählen. In diesem Kontext erfolgt eine Differenzierung zwischen Linien-, Richtungsband- und Flächenbetrieb. Die Form wird entsprechend der Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung ausgewählt. Im Anschluss werden analog zur Angebotsplanung die Linien und Haltestellen geplant. Innerhalb der Haltestellenplanung werden auch Haustürbedienungen und Bedarfshaltestellen mit betrachtet. Darauf folgend wird im siebten Schritt der Bedienungszeitraum festgelegt. Eine flexible Bedienung kann fahrplangebunden oder nicht fahrplangebunden angeboten werden. Die Entscheidung diesbezüglich ist

Teil des achten Bearbeitungsschritts. Abschließend werden die Fahrtwunschbündelung, die Dispositionregelung, die Bestell- und Abwicklungsprozesse, die Verknüpfung mit dem regionalen ÖPNV sowie die Integration des Schülerverkehrs betrachtet. Diese Aspekte stellen eine Neuerung zum konventionellen Planungsprozess des ÖPNV dar. [Böhler et al. 2009, S. 44–52; Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg 2016, S. 14f.]

Planerisches Grobkonzept zur Einführung flexibler Bedienungsformen	
1. Bedienungsgebiet abgrenzen	Räumliche Aspekte
2. Betriebsform wählen	
3. Linien, Linienwege, Richtungsbänder definieren	
4. Überlegung zur Haltestellen- und Haustürbedienung	
5. Überlegung bzgl. Haltestellendichte und -einzugsbereichen	
6. Entscheidung über Bedarfshaltestellen treffen	
7. Bedienungszeitraum festlegen	Zeitliche Aspekte
8. Fahrtenhäufigkeit/ Taktichte definieren	Weitere Aspekte
9. Möglichkeiten zur Fahrtwunschbündelung	
10. Verknüpfung mit regionalem ÖPNV	
11. Integration des Berufs- und Schülerverkehrs	

Abbildung 36: Grobkonzept zur Einführung flexibler Bedienungsformen, eigene Darstellung i. A. a. [Böhler et al. 2009, S. 44]

In der englischsprachigen Literatur existieren weder spezifische Planungsprozesse noch Konzepte für die Einführung des Bedarfsverkehrs im ÖPNV. Es werden jedoch Anpassungen aufgelistet, die berücksichtigt werden müssen. Ein besonderer Schwerpunkt des Bedarfsverkehrs liegt in der Verknüpfung von individuellen Fahrgastfahrten und entsprechender Fahrzeugdisposition [Hartleb et al. 2022, S. 1133–1141]. Diese beiden Anforderungen bei gleichzeitiger Minimierung der Wartezeit zu erfüllen, ist eine Herausforderung, für die bereits Algorithmen entwickelt werden [Hartleb et al. 2022, S. 1142–1147; Chen et al. 2021, S. 9–11; Miyamoto et al. 2003, S. 620–625]. Ein weiterer Fokus liegt auf dem Bestell- und Abwicklungsprozess, für welchen die relevanten Informationen bezüglich des Ortes und der Zeit der Fahrt erforderlich sind [Chen et al. 2021, S. 3–9; Miyamoto et al. 2003, S. 620–625].

Ländliche Räume:

Als größte Herausforderungen in ländlichen Gebieten werden die geringe Bevölkerungsdichte und die großen Entfernungen zwischen den Ortschaften identifiziert [Petersen 2016, S. 175–182; Verma und Ramanayya 2015, S. 95–110; Zhang et al. 2023, S. 1]. Dadurch wird es erschwert, einen qualitativ hochwertigen ÖV anzubieten [Petersen 2016, S. 175–182; Verma und Ramanayya 2015, S. 95–110; Zhang et al. 2023, S. 1]. Der Einsatz von Bedarfsverkehren stellt eine Lösungsmöglichkeit für den ÖV im ländlichen Raum dar [BMDV 2024a]. Der

Schwerpunkt bei der Planung des ÖPNV im ländlichen Raum liegt zum einen auf der Netzplanung [Petersen 2016, S. 175–179; Verma und Ramanayya 2015, S. 95–110]. Andererseits wird die Fahrplan- und Umlaufplanung an die Nachfrage angepasst, weshalb in der Schweiz und in China bereits Lösungsansätze entwickelt und Algorithmen dafür getestet werden [Petersen 2016, S. 176–184; Zhang et al. 2023, S. 2–15].

Die Universität Kassel hat ein Planungsvorgehen für den ÖPNV im ländlichen Raum erarbeitet, welches Ähnlichkeiten zum Verkehrsplanungsprozess der FGSV aufweist. Im ersten Schritt erfolgt eine Problemanalyse, in der das Zielsystem definiert, Angebot und Nachfrage analysiert und daraus Mängel abgeleitet werden. Anschließend wird die Angebotsform anhand raumspezifischer Merkmale, wie bspw. Raum- und Siedlungsstruktur, Straßennetz und Verkehrsnachfrage, ausgewählt. Das Angebot wird im dritten Schritt geplant und besteht aus den Elementen Verkehrs-, Finanzierungs-, Organisations- und Dispositions-konzept. Für das Verkehrskonzept werden zuerst Linien, Haltestellen und Fahrwege festgelegt. Je nach Angebotsform werden anschließend die Netzelemente zeitlich miteinander verknüpft und der Fahrplan erstellt. Zusätzlich erfolgt eine räumliche und zeitliche Anpassung an den Schülerverkehr. Nach Fertigstellung des Angebots wird zunächst die Fahrgastnachfrage abgeschätzt und anschließend die Auswirkungen analysiert und bewertet. Auf Basis der Bewertung erfolgt die Abwägung und Entscheidung. Umsetzung und Evaluation schließen den Planungsprozess ab. Bei der Analyse dieses Vorgehens wird ersichtlich, dass die Angebotsplanung in die Phase der Maßnahmenuntersuchung integriert wird. [BMVI 2016b, S. 42–52]

Elektrofahrzeuge:

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen im ÖV stellt eine Herausforderung für die Routenplanung dar. Aus diesem Grund entwickeln Emami et al. ein Verfahren zur Ermittlung geeigneter Routen für Elektrobusse. Ein gesonderter Planungsprozess für die Einführung von Elektrofahrzeugen existiert jedoch nicht. [Emami et al. 2022, S. 10–21]

Automatisierte Busse:

Für den Einsatz von automatisierten Bussen existieren lediglich Projektberichte oder Zeitschriftenartikel, welche die Ergebnisse und Erkenntnisse aus Pilotbetrieben mit automatisierten Bussen zusammenfassen [Ainsalu et al. 2018, S. 8–28; Iclodean et al. 2020, S. 5–38; Salonen und Haavisto 2019, S. 4–12; Tapiovaara et al. 2021, S. 6–18; University of Michigan 2018, S. 3–31]. In den Arbeiten wird erkennbar, dass ein besonderes Augenmerk beim Einsatz automatisierter Busse auf der Routenwahl liegt, da diese von der Fahrzeugtechnologie und von der Infrastruktur entlang der Route abhängig ist [Ainsalu et al. 2018, S. 20–23; Iclodean et al. 2020, S. 5–38; Tapiovaara et al. 2021, S. 6–18; University of Michigan 2018, S. 17–19]. Darüber hinaus werden bei der Routenwahl die rechtlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt [Ainsalu et al. 2018, S. 20–28; Iclodean et al. 2020, S. 21–37; University of Michigan 2018, S. 11–19]. Aufgrund der Elektrifizierung der Busse wird bei der Routenplanung zudem der Ladevorgang miteinbezogen [Ainsalu et al. 2018, S. 12–23; Iclodean et al. 2020, S. 21–30].

Im Abschlussbericht zum Einsatz eines automatisierten Busses im Landkreis Ostprignitz-Ruppin wird das Vorgehen im Projekt beschrieben. Auf Basis einer Analyse von nationalen und internationalen Projekten wird ein Bewertungsraster für die Streckenauswahl erstellt. Dieses enthält Machbarkeitskriterien, wie bspw. Straßentyp, Verkehrsdichte, Geschwindigkeit, Hindernisse oder Mobilfunk, und Potenzialkriterien, wie bspw. Einwohner oder Streckenlänge. Mithilfe des Bewertungsrasters werden verschiedene Strecken im Landkreis bewertet und Favoriten ausgewählt. Die Favoriten werden im Anschluss hinsichtlich Erschließungspotenzial, Gefahrenanalyse, Netzabdeckung, Verkehrsanalyse und Infrastrukturanpassungen untersucht. Um eine Strecke und die Linienführung für den automatisierten Bus final auszuwählen, werden die Fahrzeugeigenschaften der Hersteller analysiert. Nachdem die Linienführung festgelegt wurde, werden anhand der Geschwindigkeit und Streckenlänge die Fahrzeugumläufe und Betriebszeiten definiert. In diesem Schritt wird die Anschlussplanung zu anderen Linien berücksichtigt. Daraufhin wird die Lage der Haltestellen geplant. Dies geschieht unter der Beachtung von stark frequentierten Orten (u. a. Freizeiteinrichtungen, Kitas, Einkaufszentren) entlang der Strecke und den Haltestellenradien. Weiterhin werden an dieser Stelle die technischen Randbedingungen des automatisierten Busses einbezogen. Im letzten Schritt wird ein Abstell- und Ladekonzept erarbeitet, da der Bus elektrisch betrieben wird. [Richter et al. 2020, S. 80–112]

Weitere Abschlussberichte, bspw. vom Projekt Hubchain (Osnabrück) oder vom Projekt NAF-Bus (Keitum auf Sylt und Lunden/Lehe) bestätigen die Vorgehensweise in Ostprignitz. Einzig beim Projekt in Lauenburg wird zuerst die Fahrzeugbeschaffung durchgeführt und anschließend die Strecke festgelegt. [Gertz et al. 2021, S. 32–39; Jonuschat et al. 2021, S. 11–56; Projektkonsortium NAF-BUS 2021, S. 34–39]

Ein Leitfaden zur Einführung automatisierter Busse wurde im Rahmen von zwei Projekten in Magdeburg und Stolberg erarbeitet. Die Vorgehensweise gliedert sich dabei in fünf Phasen (siehe Abbildung 37).

Zuerst wird die Planung initiiert, indem das Budget eingeholt, die Kommune ausgewählt und das Projektteam zusammengestellt wird, welches die Planung übernimmt. In der zweiten Phase erfolgt die Vergabe und Beschaffung des Fahrzeugs. Dafür werden potenzielle Strecken anhand von Machbarkeitskriterien (Streckenlänge, Fahrbahnabmessungen, Steigung, Geschwindigkeitsbeschränkungen und das Verkehrsaufkommen) festgelegt. Die Kriterien werden anhand einer Marktanalyse der Hersteller und einer Best-Practice-Analyse von Projekten mit automatisierten Bussen identifiziert. Die Vorbereitung des Betriebs (dritter Schritt) beinhaltet die Vorbereitung der Strecke und Infrastruktur (Haltestellen), die Einholung der Genehmigung, die Vorbereitung des Fahrzeugs und die Organisation des Betriebsablaufs. Auf Basis der Fahrzeugeigenschaften und der Streckenbeschaffenheit wird schließlich die Strecke festgelegt. Zuletzt folgt die Durchführung und Auswertung des Betriebs. [Beckmann und Zadek 2022, S. 54–81]

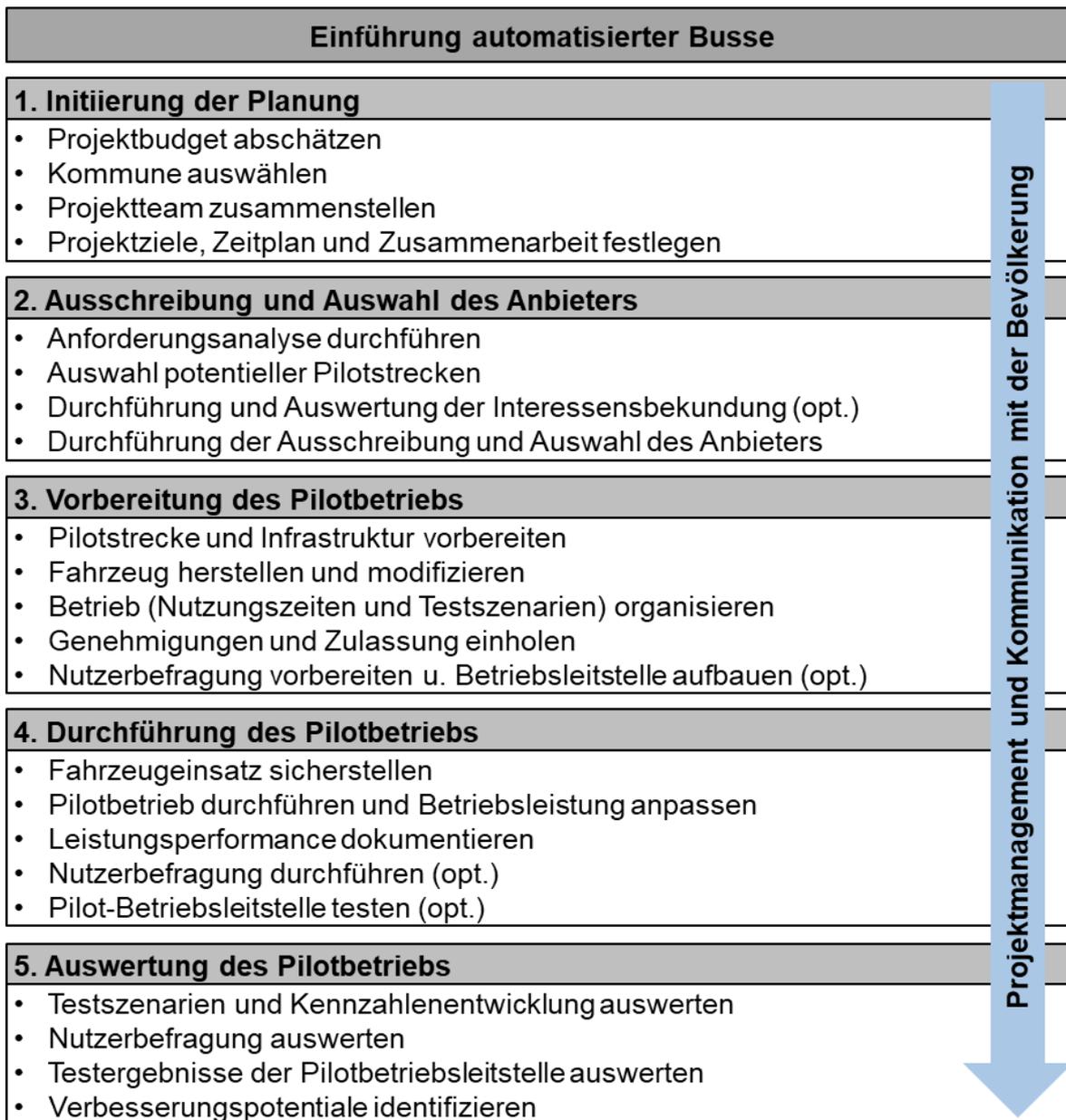


Abbildung 37: Vorgehen zur Umsetzung eines Projekts mit automatisierten Bussen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 55]

Grundsätzlich beschreibt diese Vorgehensweise nicht die Planungsaktivitäten, die vor der Entscheidung, ob und wo ein automatisierter Bus eingesetzt werden soll, durchgeführt werden. Des Weiteren wird auch nicht das gesamte ÖPNV-Netz betrachtet, um die geeignete Strecke auszuwählen (siehe Abschnitt 1.1). Deshalb ist dieses Vorgehen ausschließlich für die Umsetzungsphase geeignet. [Beckmann und Zadek 2022, S. 54; FGSV 2018a, S. 13]

Logistikplanung:

Gegenstand der Logistikplanung ist u. a. die Auswahl von Fahrzeugen und Verkehrsträgern für logistische Transportaktivitäten und die Festlegung von Einsatzplänen für Fahrzeuge [Krampe et al. 2002, S. 59]. Dies verdeutlicht die Ähnlichkeit zu den Planungsprozessen aus dem Bereich der Verkehrsplanung. Darüber hinaus wird die Logistikplanung u. a. auch hinsichtlich der Transportkosten,

der Anzahl der Fahrzeuge und der Reduzierung der Umweltbelastung optimiert [Nuzzolo und Comi 2014, S. 240–244]. Innerhalb der Logistikplanung werden drei Ansätze von Nuzzolo und Comi, Safran et al. und Sosunova et al. identifiziert, die zusammenfassend in folgende Phasen unterteilt werden:

1. Problemidentifikation
2. Zieldefinition
3. Analyse und Prognose zukünftiger Bedingungen
4. Maßnahmenentwicklung mit Materialflüssen, Prozessen und Layout
5. Bewertung verschiedener Szenarien
6. Auswahl der besten Lösung und Umsetzung [Nuzzolo und Comi 2014, S. 240–244; Safran et al. 2008, S. 59–64; A. Sosunova et al. 2018, S. 48–58].

Glistau et al. unterteilen die Logistikplanung in sieben Phasen, die eine hohe Ähnlichkeit zu den obigen Ansätzen aufweisen:

1. Abgrenzung (Ziele und Aufgabenstellung)
2. Analyse
3. Konzeption (Sollkonzept)
4. Bewertung
5. Konfiguration
6. Realisierung
7. Betrieb / Kontrolle / Optimierung [Glistau et al. 2022, S. 114f.]

Die Abgrenzung umfasst neben der Definition des Untersuchungsbereichs auch das Ziel der Logistikplanung sowie die konkrete Aufgabenstellung [Glistau et al. 2022, S. 114–118]. Zur Analysephase zählen Marktanalyse, Ist-Analyse, Benchmarking und eine Analyse der Umfeldentwicklungen [Glistau et al. 2022, S. 115]. Während der Konzeption werden auf Basis der Stoffflusswerte (analog zur Nachfrage beim ÖPNV) die Betriebsmittel ausgewählt, dimensioniert und im Layout angeordnet [Glistau et al. 2022, S. 115–129]. Für die Dimensionierung wird bspw. auch die benötigte Anzahl der Fahrzeuge über den Tagesverlauf erhoben und daraufhin die Fahrzeuganzahl bestimmt [Krampe et al. 2002, S. 77]. Auf dieser Basis wird ein Soll-Konzept erstellt, welches in Grob- und Feinplanung unterteilt wird [Glistau et al. 2022, S. 115]. In der Bewertungsphase wird die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Handlungsalternativen evaluiert, damit auf dieser Basis eine Grundsatzentscheidung zur Umsetzung oder Nicht-Umsetzung getroffen werden kann [Glistau et al. 2022, S. 114f.]. Die Detailplanung ist Gegenstand der Konfiguration und wird nachfolgend von der Umsetzungsplanung und Realisierung abgelöst [Glistau et al. 2022, S. 114f.]. Während des Betriebs wird das System getestet, kontrolliert und optimiert [Glistau et al. 2022, S. 114f.].

FTS:

In der Logistik werden u. a. auch FTS eingesetzt. Die Planung von FTS gliedert sich nach VDI 2710 in sechs Phasen: Systemfindung, System-Ausplanung, Beschaffung, Betriebsplanung, Änderungsplanung und Außerbetriebsetzung. Das Ziel der Systemfindung ist es, die Entscheidung für ein FTS zu treffen. Innerhalb der System-Ausplanung wird das Projekt geplant und ein Pflichtenheft erstellt. In dieser Phase werden zusätzlich die technischen und organisatorischen Maßnahmen überprüft. Im

Rahmen der Beschaffungsphase wird das FTS erworben sowie in Betrieb genommen. Diese Phase gliedert sich in die Analyse des Anbietermarktes, Ausschreibung, Angebotsbewertung und Auftragsvergabe, Spezifikation sowie Realisierung. Anschließend zielt die Betriebsplanung darauf ab, einen störungsfreien Betrieb des FTS zu gewährleisten. Ergeben sich Änderungen in der Nutzung des FTS, werden Anpassungen in der Bedienung des FTS oder in der Betriebsumgebung vorgenommen. Ist das FTS veraltet, unwirtschaftlich oder ändert sich das Einsatzgebiet, wird das System außer Betrieb genommen. [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2010, S. 8–31]

4.2.4 Anforderungen aus dem Forschungsbereich der Verkehrsplanung

Die Handlungsfelder und Maßnahmen der Verkehrsplanung (Abschnitt 4.1.1) sowie die Ausführungen zu den Planungsebenen (Abschnitt 4.1.2) zeigen, dass die Einführung eines automatisierten Busses Teil der Verkehrsplanung und der Angebotsplanung des ÖPNV ist. Da der Verkehrsplanungsprozess standardisiert und allgemeingültig gestaltet ist, wird daraus abgeleitet, dass ein ganzheitlicher Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse die fünf Phasen inkl. begleitender Prozesse der Verkehrsplanung enthalten sollte. Um insbesondere den Fokus der Angebotsplanung zu inkludieren, sollten im ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse auch die fünf Schritte der klassischen Angebotsplanung (Netz-, Kapazitäts-, Fahrlagen-, Fahrzeugeinsatz- und Personaleinsatzplanung) berücksichtigt werden. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.2.2 ist die Angebotsplanung als iterative oder integrierte Planung durchzuführen. Dabei sollten Zwischenergebnisse kontinuierlich überprüft werden. Zusätzlich sollte auch die Nachfrage berücksichtigt werden [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Liebchen und Möhring 2007, S. 3–7; Häll 2011, S. 3–5; Schnieder 2018, S. 16f.; Liu et al. 2021, S. 1–3].

Weiterhin werden Effektivität, Effizienz, Korrektheit, Transparenz und Akzeptanz als allgemeine Anforderungen an Verkehrsplanungsprozesse gestellt. Effektivität und Effizienz beziehen sich darauf, dass die definierten Ziele möglichst vollständig und mit geringem Ressourceneinsatz erreicht werden. Fachlich geeignete Methoden sollten in der Planung eingesetzt werden, damit die Ergebnisse korrekt erarbeitet werden. Darüber hinaus sollten die Methoden und Verfahren für Außenstehende transparent und nachvollziehbar erläutert werden. Beteiligte und Betroffene sollten in den Planungsprozess einbezogen werden, um eine Akzeptanz für die Planung und Umsetzung zu erreichen. [FGSV 2018a, S. 9; Meyer 2016, S. 3–6]

Zusammenfassend resultieren aus dem Bereich der Verkehrsplanung folgende Anforderungen an den ganzheitlichen Planungsprozess für den Einsatz automatisierter Busse:

- Phasen des Verkehrsplanungsprozesses einhalten
- Schritte der Angebotsplanung einhalten
- Schritte der Angebotsplanung rückgekoppelt oder integriert durchführen
- Auswirkungen kontinuierlich in der Angebotsplanung ermitteln und bewerten
- Nachfrage berücksichtigen
- Effektivität im Planungsprozess einhalten
- Effizienz im Planungsprozess einhalten
- Korrektheit im Planungsprozess einhalten
- Transparenz im Planungsprozess einhalten
- Akzeptanz im Planungsprozess einhalten

4.3 Überprüfung der Anwendbarkeit bestehender Planungsprozesse für die Einführung automatisierter Busse

Im Folgenden wird die Hypothese dieser Arbeit, dass derzeit kein ganzheitlicher Planungsprozess für den Einsatz automatisierter Busse existiert, verifiziert. Zu diesem Zweck wird eine Konzeptmatrix verwendet, welche die bereits existierenden Planungsprozesse (Abschnitt 4.2) mit den Anforderungen (Abschnitte 2.5, 3.6 und 4.2.4) gegenüberstellt [vom Brocke et al., S. 9; Webster und Watson 2002, S. xvif.]. Zur Erstellung der Konzeptmatrix werden zunächst die zu betrachtenden Planungsprozesse ausgewählt (Abschnitt 4.3.1). Anschließend folgt eine Zusammenfassung der Anforderungen an den Planungsprozess (Abschnitt 4.3.2). In Abschnitt 4.3.3 werden anhand der Konzeptmatrix die bestehenden Planungsprozesse bewertet.

4.3.1 Ausgewählte Planungsprozesse

In Abschnitt 4.2.1 wurden verschiedene Planungsprozesse für die Verkehrsplanung untersucht, wobei der Prozess der FGSV als Grundlage für diese Arbeit ausgewählt wurde. Aus diesem Grund wird dieser Planungsprozess in der Konzeptmatrix bewertet. In Bezug auf die klassische Angebotsplanung (Abschnitt 4.2.2) wurden die Ansätze von Ceder und Wilson, Desaulniers und Hickman, Liebchen und Möhring, Häll, Schöbel, Schnieder und Liu et al. analysiert. Daraufhin wurden diese zu einem gemeinsamen Ansatz für die Planung des ÖV zusammengefasst, welcher bei der folgenden Bewertung berücksichtigt wird. Weiterhin wurden in Abschnitt 4.2.3 verschiedene Vorgehensweisen und Ansätze von angrenzenden Forschungsbereichen aufgeführt. Dazu zählen ein Ansatz zur Einführung von flexiblen Bedienungsformen und ein Planungsprozess zur Einführung des ÖPNV in ländlichen Gebieten. Bezüglich der Einführung von Elektrofahrzeugen im ÖPNV existiert kein separater Planungsprozess, jedoch werden in der Literatur Hinweise gegeben, die bei einer Einführung beachtet werden sollen. Für die Einführung automatisierter Busse existieren verschiedene Projektberichte, welche die Vorgehensweise auf Basis von Pilotbetrieben mit automatisierten Bussen beschreiben. Jeweils ein Ansatz

aus den zuvor genannten Themenbereichen wird für die Gegenüberstellung in der Konzeptmatrix ausgewählt. In Bezug auf die Logistikplanung wird für die folgende Bewertung im Rahmen der Konzeptmatrix der Ansatz von Glistau et al. berücksichtigt. Zuletzt wird das Vorgehen zur Einführung von FTS nach VDI 2710 für die weitere Bewertung aufgenommen. Zusammenfassend werden in der Konzeptmatrix folgende Planungsprozesse analysiert, die zur besseren Darstellung im Weiteren abgekürzt werden (siehe Klammerausdrücke):

- Verkehrsplanungsprozess gemäß FGSV (Verkehrsplanung)
- Angebotsplanung gemäß der Kombination von Ceder und Wilson, Desaulniers und Hickman, Liebchen und Möhring, Häll, Schöbel, Schnieder und Liu et al. (Angebotsplanung)
- Grobkonzept zur Einführung flexibler Bedienungsformen im ÖPNV gemäß Böhler et al. (Bedarfsverkehr)
- ÖPNV-Planung in ländlichen Räumen gemäß der Universität Kassel (Ländliche Räume)
- Hinweise für den Einsatz von Elektrofahrzeugen gemäß Emami et al. (Elektrofahrzeuge)
- Praxisberichte zum Einsatz automatisierter Busse gemäß der Kombination von Richter et al., Gertz et al., Jonuschat et al.; Projektkonsortium NAF-BUS sowie Beckmann und Zadek (Automatisierte Busse)
- Prozess der Logistikplanung gemäß Glistau et al. (Logistikplanung)
- Planungsprozess von FTS gemäß VDI 2710 (FTS – VDI 2710)

4.3.2 Übersicht der Anforderungen an den Planungsprozess für automatisierte Busse

Der Übersichtlichkeit halber werden in diesem Abschnitt zusammenfassend alle Anforderungen an den Planungsprozess für automatisierte Busse aufgeführt. Aus der Verkehrs- und Angebotsplanung werden folgende allgemeine Anforderungen an den Prozessablauf in die Bewertung einbezogen:

- Phasen des Verkehrsplanungsprozesses einhalten
- Schritte der Angebotsplanung einhalten
- Schritte der Angebotsplanung rückgekoppelt oder integriert durchführen
- Auswirkungen kontinuierlich in der Angebotsplanung ermitteln und bewerten
- Nachfrage berücksichtigen
- Effektivität im Planungsprozess einhalten
- Effizienz im Planungsprozess einhalten
- Korrektheit im Planungsprozess einhalten
- Transparenz im Planungsprozess einhalten
- Akzeptanz im Planungsprozess einhalten

Auf Basis der Beschreibung des automatisierten Fahrens und der Darstellungen aus dem Bereich Mobilität und Verkehr werden zusätzlich weitere Anforderungen speziell für den Einsatz automatisierter Busse mit betrachtet:

- Auf den Einsatz automatisierter Busse bezogene Streckenanalyse (inkl. Fußgängerzonen) im Bedienungsgebiet durchführen
- Wetterdaten bei der Streckenauswahl im Bedienungsgebiet berücksichtigen
- Verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen zur Unterstützung des automatisierten Busses festlegen
- Fahrzeugtechnologie berücksichtigen
- Rechtliche Rahmenbedingungen für das automatisierte Fahren berücksichtigen
- Personaleinsatzplanung vom stationären Personal in der Leitstelle anpassen
- Flexiblen Bedarfsverkehr berücksichtigen
- Ladezyklen (Elektrobusse) berücksichtigen
- Akzeptanz bzgl. des automatisierten Fahrens berücksichtigen

4.3.3 Gegenüberstellung der Planungsprozesse und Anforderungen

Im Folgenden werden die existierenden Planungsprozesse anhand der Anforderungen auf einer dreistufigen Skala (Anforderung erfüllt, Anforderung teilweise erfüllt, Anforderung nicht erfüllt) bewertet. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse für die allgemeinen Anforderungen an den Prozessablauf.

Das Planungsverfahren der Verkehrsplanung ist standardisiert und verfügt über eine parallele Wirkungskontrolle und Prozessevaluation sowie über Information, Beteiligung und Qualitätsmanagement. Damit erfüllt dieser Planungsprozess alle allgemeinen Anforderungen (Effektivität, Effizienz, Korrektheit, Transparenz, Akzeptanz) sowie die Anforderungen der kontinuierlichen Abschätzung von Auswirkungen. Die Nachfrage wird zudem in der Phase der Problemanalyse berücksichtigt. Die Schritte der Angebotsplanung werden jedoch nicht explizit in der Beschreibung erwähnt. [Pas 1995, S. 59–73; Ognjenović et al. 2015, S. 575–577; FGSV 2018a, S. 11–15]

Gemäß der Darstellung in Abschnitt 4.2.2 umfasst die Angebotsplanung die Netz-, Kapazitäts-, Fahrlagen-, Fahrzeugeinsatz- und Personaleinsatzplanung. Zwischen den einzelnen Schritten findet eine Rückkopplung sowie eine kontinuierliche Abschätzung der Auswirkungen statt. Außerdem wird in dem Vorgehen der Angebotsplanung die Nachfrage berücksichtigt. Das Verfahren ist standardisiert, weshalb die allgemeinen Anforderungen (Effektivität, Effizienz, Korrektheit, Transparenz) erfüllt werden. Die Akzeptanz wird als teilweise erfüllt bewertet, da die Ansätze in Abschnitt 4.2.2 nicht direkt darauf eingehen, aber Kennzahlen diesbezüglich in der Bewertung berücksichtigt werden (z. B. die Merkfähigkeit des Fahrplans). [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–105; Häll 2011, S. 3–5; Schnieder 2018, S. 14–17; Liu et al. 2021, S. 1–3]

Das Grobkonzept zur Planung flexibler Bedienungsformen im ÖPNV ist kein standardisiertes Vorgehen, sondern beinhaltet nur Teilaspekte der Angebotsplanung. Aus diesem Grund werden Effektivität, Effizienz, Korrektheit und

Transparenz als nur teilweise erfüllt angesehen. Einzig die Akzeptanz wird als nicht erfüllt bewertet, weil dieser Aspekt im Grobkonzept nicht erwähnt wird. Außerdem werden die Phasen des Verkehrsplanungsprozesses nicht abgebildet. [Böhler et al. 2009, S. 44–52]

Tabelle 11: Bewertung der allgemeinen Anforderungen an den ganzheitlichen Planungsprozess

Anforderungen	Prozesse									
	Phasen des Verkehrsplanungsprozesses einhalten	Schritte der Angebotsplanung einhalten	Schritte der Angebotsplanung rückgekoppelt oder integriert durchführen	Auswirkungen kontinuierlich in der Angebotsplanung ermitteln und bewerten	Nachfrage berücksichtigen	Effektivität im Planungsprozess einhalten	Effizienz im Planungsprozess einhalten	Korrektheit im Planungsprozess einhalten	Transparenz im Planungsprozess einhalten	Akzeptanz im Planungsprozess einhalten
Verkehrsplanung	X			X	(X)	X	X	X	X	X
Angebotsplanung		X	X	X	X	X	X	X	X	(X)
Bedarfsverkehr		(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Ländliche Räume	X	(X)	(X)	(X)	X	X	X	X	X	X
Elektrofahrzeuge		(X)	(X)	(X)	X					
Automatisierte Busse		(X)			(X)					X
Logistikplanung	(X)	(X)			(X)	X	X	X	X	
FTS – VDI 2710	(X)	(X)			(X)	X	X	X	X	

Legende: X: Anforderungen erfüllt | (X): Anforderungen teilweise erfüllt |
 Leer: Anforderungen nicht erfüllt

Die Vorgehensweise der ÖPNV-Planung im ländlichen Raum der Universität Kassel ist grundsätzlich analog des Vorgehens der FGSV aufgebaut, weshalb Effektivität, Effizienz, Korrektheit, Transparenz und Akzeptanz sowie die Phasen des Verkehrsplanungsprozesses erfüllt werden. Das Verkehrskonzept enthält einige aber nicht alle Bestandteile der Angebotsplanung, welche iterativ durchlaufen werden. Auswirkungen werden einmalig nach der Konzepterarbeitung ermittelt und bewertet. Die Nachfrage wird zu Beginn des Prozesses eingebunden. [BMVI 2016b, S. 42–73]

Der Ansatz von Emami et al. ist nicht standardisiert und beinhaltet nur Teile der Angebotsplanung, Rückkopplung und Wirkungsabschätzung. Die Nachfrage wird jedoch vollständig berücksichtigt. [Emami et al. 2022, S. 10–21]

Die Ansätze zur Einführung automatisierter Busse stellen Projektberichte und keine standardisierten Planungsvorgehen dar. Deshalb werden die allgemeinen Anforderungen (Effektivität, Effizienz, Korrektheit und Transparenz) nicht erfüllt. In den Projekten wird jedoch die Bevölkerung eingebunden, weshalb die Akzeptanz berücksichtigt wird. Die Schritte der Angebotsplanung werden teilweise und nicht iterativ durchgeführt. Zudem erfolgt keine Abschätzung der Auswirkungen. Die Nachfrage wird jedoch, bspw. in Form einer Potenzialanalyse, berücksichtigt. [Ainsalu et al. 2018, S. 8–28; Iclodean et al. 2020, S. 5–38; Tapiovaara et al. 2021, S. 6–18; Richter et al. 2020, S. 80–110; Gertz et al. 2021, S. 32–63; Jonuschat et al. 2021, S. 11–56; Projektkonsortium NAF-BUS 2021, S. 31–44; Beckmann und Zadek 2022, S. 54–84]

Aus der Darstellung in Abschnitt 4.2.3 wird ersichtlich, dass die beiden Planungsprozesse aus der Logistik standardisiert aufgebaut sind. Des Weiteren weisen die Prozesse eine Ähnlichkeit zum Verkehrsplanungsprozess auf, wobei sich der Schwerpunkt und die Bezeichnungen unterscheiden. Es wird das Transportvolumen bzw. die Nachfrage berechnet und es werden Fahrzeuge und Personal dimensioniert (analog zur Kapazitätsplanung), weshalb einige Phasen der Verkehrs- und Angebotsplanung enthalten sind. Ob diese Bearbeitung iterativ erfolgt und kontinuierlich Wirkungen ermittelt werden, wird nicht genannt. Inwieweit Mitarbeiter in den Planungsprozess einbezogen werden, um die Akzeptanz zu erhöhen, wird ebenfalls nicht beschrieben. [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2010, S. 8–31; Glistau et al. 2022, S. 114–149; Krampe et al. 2002, S. 59–78]

Tabelle 12 zeigt die Bewertung der speziell für die Einführung automatisierter Busse gestellten Anforderungen. Der Ansatz zur Verkehrsplanung wird von der FGSV allgemein beschrieben, weshalb nicht auf die Detailanforderungen für automatisierte Busse sowie Elektrofahrzeuge und Bedarfsverkehre eingegangen wird [Pas 1995, S. 59–73; Ognjenović et al. 2015, S. 575–577; FGSV 2018a, S. 11–15]. In der Angebotsplanung werden bislang lediglich Ladezyklen und rechtliche Rahmenbedingungen (allerdings nicht zum automatisierten Fahren) berücksichtigt [Ceder und Wilson 1986, S. 332; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104; Häll 2011, S. 3–5; Schnieder 2018, S. 115–136; Liu et al. 2021, S. 1–3]. Die Ansätze aus den Bereichen Bedarfsverkehr und den ländlichen Räumen beziehen sich ausschließlich auf das Kriterium des flexiblen Bedarfsverkehrs [Böhler et al. 2009, S. 44–52; BMVI 2016b, S. 42–73]. Emami et al. konzentrieren sich hingegen ausschließlich auf den Ladezyklus und analysieren die Infrastruktur, um geeignete Routen für Elektrobusse zu ermitteln [Emami et al. 2022, S. 10–21].

Die Projektberichte der automatisierten Busse beziehen Fahrzeugtechnik, Infrastruktur, Wetterbedingungen, rechtliche Rahmenbedingungen, die Akzeptanz bzgl. des automatisierten Fahrens und Ladezyklen in die Planung ein [Ainsalu et al. 2018, S. 8–28; Iclodean et al. 2020, S. 5–38; Tapiovaara et al. 2021, S. 6–18; Richter et al. 2020, S. 80–120; Beckmann und Zadek 2022, S. 54–84; Gertz et al. 2021, S. 32–63; Projektkonsortium NAF-BUS 2021, S. 31–44]. Zur Personalplanung in der Leitstelle sowie zum Einsatz von Bedarfsverkehren werden aber keine Aussagen getroffen.

Tabelle 12: Bewertung der für die Einführung automatisierter Busse spezifischen Anforderungen

Anforderungen	Prozesse								
	Auf den Einsatz automatisierter Busse bezogene Streckenanalyse (inkl. Fußgängerzonen) im Bedienungsgebiet durchführen	Wetterdaten bei der Streckenauswahl im Bedienungsgebiet berücksichtigen	Verkehrsg. und infrastrukturelle Maßnahmen zur Unterstützung des automatisierten Busses festlegen	Fahrzeugtechnologie berücksichtigen	Rechtliche Rahmenbedingungen für das automatisierte Fahren berücksichtigen	Personaleinsatzplanung vom stationären Personal in der Leitstelle anpassen	Flexiblen Bedarfsverkehr berücksichtigen	Ladezyklen (Elektrobusse) berücksichtigen	Akzeptanz bzgl. des automatisierten Fahrens berücksichtigen
Verkehrsplanung									
Angebotsplanung								X	
Bedarfsverkehr							X		
Ländliche Räume							X		
Elektrofahrzeuge	(X)							X	
Automatisierte Busse	X	X		X	X			X	X
Logistikplanung	(X)			(X)					
FTS – VDI 2710	(X)			(X)					

Legende: X: Anforderungen erfüllt | (X): Anforderungen teilweise erfüllt |

Leer: Anforderungen nicht erfüllt

In der Logistikplanung und beim Einsatz von FTS werden zunächst die Betriebsmittel (Fahrzeuge) ausgewählt und erst anschließend das Layout entwickelt. Dies ist vergleichbar mit der Anforderung, dass die Fahrzeugtechnologie bei der Angebotsplanung berücksichtigt wird. Des Weiteren erfolgt eine Anpassung der Arbeitsumgebung an die neuen Betriebsmittel, wobei eine Analogie zur Infrastrukturanalyse ersichtlich wird. [Nuzzolo und Comi 2014, S. 240–244; Safran et al. 2008, S. 59–64; A. Sosunova et al. 2018, S. 48–58; Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2010, S. 8–31; Glistau et al. 2022, S. 128f.]

Die Analyse der Tabellen 11 und 12 ergibt, dass kein existierender Planungsprozess sämtliche Anforderungen an einen ganzheitlichen Prozess der Einführung automatisierter Busse erfüllt. Damit wird die in Abschnitt 1.1 aufgestellte Forschungshypothese bestätigt.

4.4 Zusammenfassung und Zwischenfazit zur Forschungslücke

Die Verkehrsplanung umfasst ein breites Spektrum mit vier Handlungsfeldern und vielfältigen Maßnahmen. Dabei unterscheiden sich die Maßnahmen in Bezug auf die Maßstabebene, die Konkretisierung und den Zeitbezug. Aus diesem Grund existieren in der Verkehrsplanung unterschiedliche Planungsebenen. Die Einführung automatisierter Busse wird basierend auf der Analyse der Planungsebenen der Angebotsplanung zugeordnet. Innerhalb der Verkehrsplanung existieren weltweit unterschiedliche Vorgehensweisen. In der vorliegenden Arbeit wird der Verkehrsplanungsprozess nach FGSV ausgewählt, da sich dieser auf Deutschland bezieht und der aktuellen Forschungslage entspricht. Für die Angebotsplanung existieren ebenfalls unterschiedliche Planungsprozesse, wobei sich im Rahmen dieser Arbeit für eine Kombination der unterschiedlichen Ansätze entschieden wird. Des Weiteren werden in den angrenzenden Forschungsbereichen (Bedarfsverkehr, ländlicher Raum, Elektrofahrzeuge, automatisierte Busse, Logistikplanung und FTS) weitere Konzepte und Vorgehensweisen eingesetzt. Die bereits existierenden Planungsprozesse werden mit den Anforderungen aus dem Bereich Mobilität und Verkehr (Abschnitt 2.5), aus dem Bereich des automatisierten Fahrens (Abschnitt 3.6) und aus dem Bereich der Verkehrsplanung (Abschnitt 4.2.4) in einer Konzeptmatrix gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass derzeit kein Planungsprozess sämtliche Anforderungen an die Einführung automatisierter Busse erfüllt. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel 5 ein eigener Planungsprozess entwickelt.

5 Ganzheitlicher Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse entwickelt. Damit richtet sich dieses Kapitel direkt an eines der beiden Hauptziele dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.2). Ziel des ganzheitlichen Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse ist die Entwicklung eines schrittweisen Vorgehens, welches sich speziell an den Rahmenbedingungen automatisierter Busse orientiert und die Anforderungen dieser Technologie berücksichtigt. Der Planungsprozess dient als Instrument zur Gestaltung des gesamten Liniennetzes mit konventionellen und automatisierten Bussen. Zusätzlich werden auch unterschiedliche Bedienungsformen (klassisch oder flexibel) in der Planung berücksichtigt. Dabei bezieht sich der Planungsraum auf ein Bedienungsgebiet (z. B. Stadt oder Landkreis). Dieser Planungsprozess wird insbesondere Verkehrsplaner bei der frühzeitigen Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse unterstützen.

Zur Gestaltung des ganzheitlichen Planungsprozess wird sich im Folgenden an den Ergebnissen aus Kapitel 4 orientiert. Aus diesem Grund werden die fünf Phasen des Verkehrsplanungsprozesses nach FGSV als Grundstruktur für den ganzheitliche Planungsprozess zu Einführung automatisierter Busse ausgewählt. In dieser Grundstruktur werden die fünf Schritte der Angebotsplanung (siehe Abschnitt 4.2.2) in die Phase der Maßnahmenuntersuchung integriert. In dieser Phase erfolgen zudem in Anlehnung an das Vorgehen der FGSV die Abschätzung der Auswirkungen und die Variantenbewertung. Mit diesem Aufbau werden die allgemeinen Anforderungen an den Planungsprozess (siehe Tabelle 11 in Abschnitt 4.3.3) erfüllt. Innerhalb der Schritte der Angebotsplanung werden die spezifischen Anforderungen für die Einführung automatisierter Busse integriert (siehe Tabelle 12 in Abschnitt 4.3.3). Diese Vorgehensweise deckt sich mit den Ausführungen von Rosenkranz und Rudloff. Gemäß diesen Autoren werden für den Einsatz automatisierter Busse herkömmliche Planungsansätze mit neuen Fragestellungen konfrontiert [Rosenkranz und Rudloff 2024, S. 205].

In der Ausgestaltung des ganzheitliche Planungsprozesses werden die bestehenden Ansätze aus der Verkehrs- und Angebotsplanung (siehe Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2) miteinander kombiniert. Damit wird sichergestellt, dass die Elemente zur Planung von konventionellen Buslinien im Vorgehen enthalten sind. Die bereits existierenden Ansätze aus der Verkehrs- und Angebotsplanung, die im ganzheitlichen Planungsprozess gekennzeichnet sind, werden um die spezifischen Anforderungen in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse ergänzt (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Der ganzheitliche Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse wird auf der Grundlage folgender Annahme entwickelt:

- Der Planungsprozess wird für den Einsatz hochautomatisierter Busse ohne Fahrer im Fahrzeug, jedoch mit einer Fernüberwachung durch eine Leitstelle (Stufe 4 ÖV) konzipiert.
- Der Planungsprozess wird für eine Planung des ÖV ausgelegt und berücksichtigt konventionelle und automatisierte Busse (Stufe 4 ÖV).
- Die Möglichkeit konventionelle und automatisierte Busse als Bedarfsverkehr einzusetzen, wird berücksichtigt, steht jedoch nicht im Mittelpunkt der Ausarbeitung.
- Der Einsatz von elektrischen Antrieben für konventionelle und automatisierte Busse wird berücksichtigt, steht jedoch nicht im Mittelpunkt der Ausarbeitung.

In Abbildung 38 wird die Grundstruktur des entwickelten Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse visualisiert.

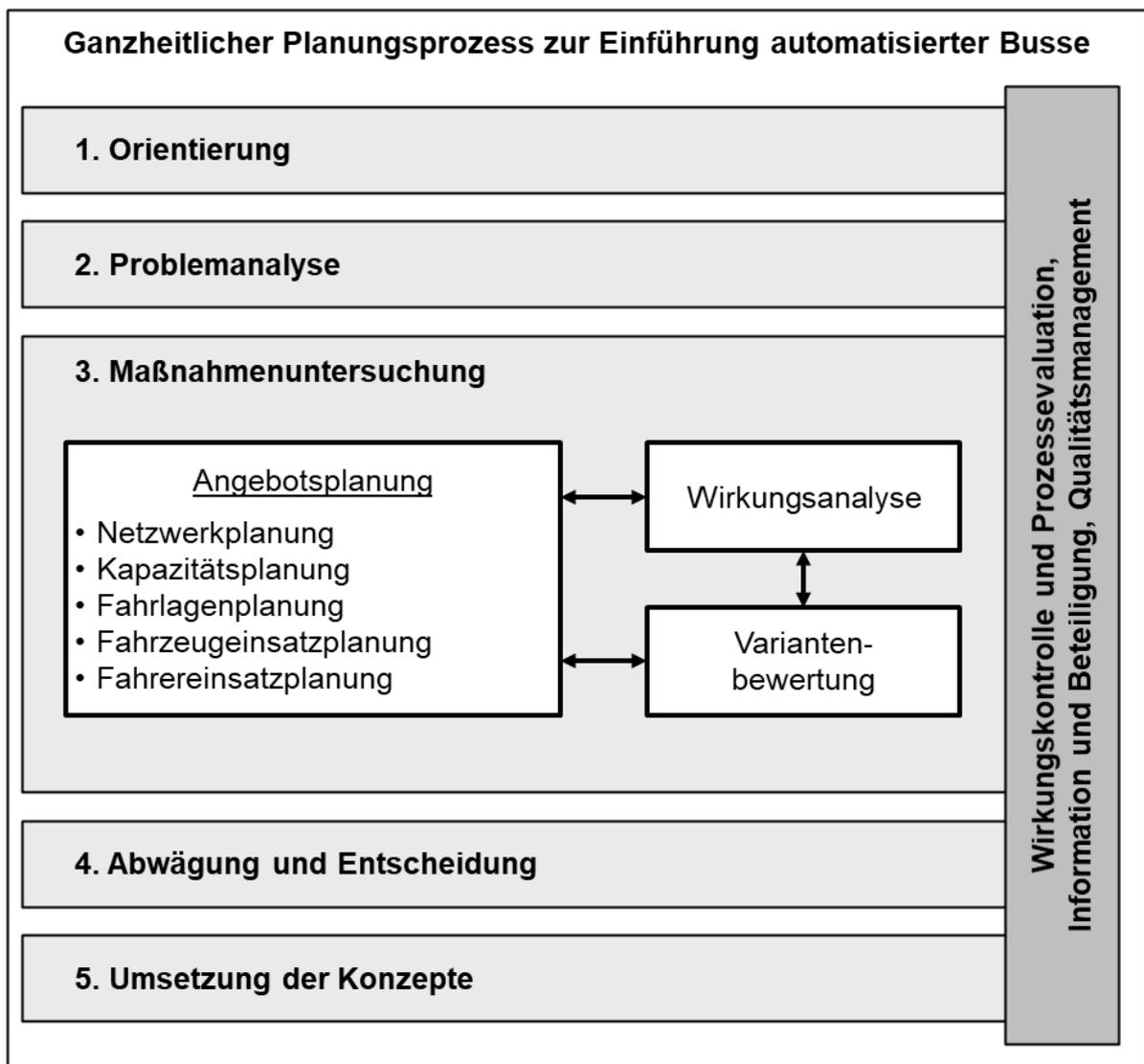


Abbildung 38: Struktur des ganzheitlichen Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse (auf Basis von [FGSV 2018a, S. 13])

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Phasen des Planungsprozesses beschrieben. Dabei wird jeweils zuerst das Vorgehen für konventionelle Busse und im Anschluss daran die Änderungen, die speziell durch den Einsatz automatisierter Busse notwendig sind, beschrieben. Der Fokus des Planungsprozesses wird auf die Phase der Maßnahmenuntersuchung gerichtet. Dabei werden insbesondere die Angebotsplanung sowie die Anpassungen, die sich aus dem Einsatz automatisierter Busse ergeben, beleuchtet. In den Phasen Orientierung, Problemanalyse, Abwägung und Entscheidung sowie Umsetzung werden das Vorgehen für konventionelle Busse und die Änderungen durch die Betrachtung automatisierter Busse in Grundzügen erläutert.

5.1 Orientierung

Ausgangspunkt der Verkehrsplanung sind zumeist externe Auslöser. Dazu zählen Defizite oder Problemhinweise aus der Bürgerschaft oder von Politikern, wie bspw. ein zu hohes Verkehrsaufkommen oder die Überschreitung von Emissionsgrenzwerten. Der technologische Fortschritt, wie etwa die Einsatzmöglichkeiten flexibler Bedienungsformen, ermöglicht zudem die Implementierung neuer Lösungsmöglichkeiten im Untersuchungsgebiet. Weiterhin können auch Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen (ÖPNV-Gesetz oder Immissionsgrenzwerte), Anstöße aus anderen Bereichen (Stadtentwicklungskonzept, Konzept für ein neues Gewerbegebiet) oder Fristen (Auslaufen vom Vertrag mit dem Verkehrsunternehmen) Auslöser für Verkehrsplanungsprozesse sein. [FGSV 2018a, S. 19]

Ziel der Orientierungsphase ist es, diese Auslöser näher zu überprüfen und festzustellen, ob im konkreten Untersuchungsgebiet ein verkehrsplanerischer Handlungsbedarf besteht. Dazu werden Verkehrsdaten (Verkehrszählungen, Immissionsmessungen oder Unfalldaten) gesammelt, Befragungen durchgeführt und erste Maßnahmenvorschläge analysiert. Auf Basis dieser Datengrundlage wird die Aufgabenstellung abgeleitet und ein entsprechender Ressourcenbedarf (Zeit, Kosten, Personalbedarf) ermittelt. Abschließend wird die politische Entscheidung, ob das Planungsverfahren gestartet werden soll, vorbereitet und getroffen. [FGSV 2018a, S. 19; Pas 1995, S. 60f.; Meyer 2016, S. 4]

Automatisierte Busse können die Wirtschaftlichkeit von Linienverbindungen steigern sowie neue Linienverbindungen oder eine Ausweitung Betriebszeitraums ermöglichen. Demnach können Defizite im bestehenden ÖPNV-Angebot oder der technologische Fortschritt im Bereich des automatisierten Fahrens als Auslöser für den Einsatz automatisierter Busse genannt werden. Um die Technologie im Rahmen der Orientierungsphase näher zu untersuchen, wird nach verfügbaren automatisierten Bussen, deren Herstellern und deren Leistungsfähigkeit (u. a. Geschwindigkeit, Abmessungen, Betriebsdauer) recherchiert. Ergänzend werden auch bereits existierende Betriebe mit automatisierten Bussen untersucht, um die Einsatzmöglichkeiten der Busse im öffentlichen Raum einschätzen zu können. Abschließend werden die geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen für die Einführung von automatisierten Bussen ermittelt. Die Durchführung unterschiedlicher Recherchen ist eine essentielle Voraussetzung, um den Ressourcenbedarf (Zeit, Personal, Finanzmittel) abzuleiten

und folglich die politische Entscheidung zur Initiierung des Planungsprozesses herbeizuführen.

5.2 Problemanalyse

Im Rahmen der Problemanalyse erfolgt die Untersuchung des Planungsgegenstandes. Dafür werden in dieser Phase Ziele abgeleitet, der Ist-Zustand analysiert und Stärken, Schwächen, Chancen sowie Risiken identifiziert (Zustandsbewertung). [FGSV 2018a, S. 20–24]

Im ersten Schritt werden Leitlinien und Zielvorstellungen festgelegt. Leitlinien oder Leitbilder fokussieren sich auf einen wünschenswerten Zustand im Untersuchungsgebiet (bspw. lebenswerte Stadt oder Mobilität für alle Bevölkerungsgruppen). Ziele sind im Vergleich dazu spezifischer (bspw. Verringerung des MIV-Verkehrs um 20 % oder Reduzierung der Verkehrsunfälle um 30 %) und können mit Kennzahlen hinterlegt werden. Bei der Festlegung der Ziele ist es zusätzlich von Bedeutung, Zielkonflikte aufzudecken. Im Anhang A.4 wird deshalb die Zielformulierung vertiefend erläutert. [FGSV 2018a, S. 20–23; Pas 1995, S. 62; Meyer 2016, S. 4]

Anschließend werden der Ist-Zustand und die zukünftigen Entwicklungen in Bezug auf die verkehrliche Situation im Untersuchungsgebiet analysiert. Dementsprechend werden verkehrsspezifische Informationen (u. a. Verkehrsaufkommen, Modal-Split) sowie Strukturdaten der Bevölkerung, Pendler und Touristen (u. a. Anzahl, Altersstruktur) erhoben und die Zusammenhänge analysiert. [FGSV 2018a, S. 23; U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3; Pas 1995, S. 62f.; Meyer 2016, S. 4]

Für die Angebotsplanung im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung werden zusätzlich Daten zum Streckennetz, zur Verkehrsnachfrage und zu den Verkehrsmitteln (u. a. Fahrzeugleistung und Fahrgeschwindigkeiten) benötigt. Des Weiteren werden die Erreichbarkeit sowie Zugänglichkeit der Haltestellen analysiert. Zusammenfassend werden die für den Einsatz von konventionellen Bussen notwendigen Daten in Tabelle 13 dargestellt.

Die Zustandsbewertung (dritter Schritt) kombiniert die Ergebnisse der beiden vorherigen Arbeitsschritte und vergleicht die Analyse des aktuellen sowie zukünftigen Zustands mit den erarbeiteten Zielen und den Anspruchsniveaus. Als Methodik zur Strategieentwicklung und zum systematischen Vergleich eignet sich die Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse (SWOT-Analyse (Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats)), mit der Ansatzpunkte für zukünftige Maßnahmen aufgezeigt werden. Grundsätzlich werden in der Verkehrsplanung drei Strategien eingesetzt: „Vermeiden“, „Verlagern“ und „Verträglich Gestalten“. Die Strategien (bspw. ÖPNV ausbauen oder Fahrverbote erlassen) sind nicht mit Einzelmaßnahmen (bspw. Einführung eines automatisierten Busses) zu verwechseln, die erst in der nächsten Phase bestimmt werden. Im Anhang A.4 werden zum besseren Verständnis die Strategien der Verkehrsplanung ergänzend erläutert. [Schneidewind 2019, S. 225f.; Gertz 2021, S. 25f.; FGSV 2018a, S. 10; FGSV 2018a, S. 23f.; Ognjenović et al. 2015, S. 575–577]

Diese drei Arbeitsschritte bedingen sich wechselseitig, sodass sich die Problemanalyse als iterativer Prozess darstellt [FGSV 2018a, S. 19f.].

Tabelle 13: Notwendige Daten für den Einsatz konventioneller Busse

Fahrzeugtyp	Notwendige Daten
Konventionelle Busse	<ul style="list-style-type: none"> • Wegenetz inkl. zulässiger Geschwindigkeit • Verkehrszellen mit Nutzungsschwerpunkten, Verkehrsaufkommen und Modal-Split • ÖPNV-Liniennetz (u. a. Linien, Haltestellen, Bedienungszeitraum) • Siedlungsstrukturdaten und Daten zur Bevölkerung • Fahrzeugleistung und technische Randbedingungen • Fahrzeiten im Realbetrieb (Messung oder Erfahrungswerte) • Fahrzeugkosten (fix und variabel inkl. Kraftstoffverbrauch/-kosten) • Erreichbarkeit und Zugänglichkeit der Haltestellen • Eignung der Haltestellen für Wendemanöver • Verkehrliche Randbedingungen für den Bau von Haltestellen • Rechtliche Rahmenbedingungen zum Personaleinsatz • Personalkostensätze

In Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse bedarf es keiner Änderung der Vorgehensweise. Jedoch werden im Rahmen der Ist-Analyse als Vorbereitung für die Angebotsplanung zusätzliche Daten erhoben. Die Implementierung automatisierter Busse auf einer bestimmten Strecke ist maßgeblich abhängig von der technologischen Reife der Fahrzeuge sowie der Infrastruktur der Straße [Ainsalu et al. 2018, S. 8–23; Iclodean et al. 2020, S. 5–38]. Daher wird aufbauend auf der Orientierungsphase eine Marktanalyse bzgl. automatisierter Busse durchgeführt. Dies empfiehlt sich, weil im Gegensatz zu konventionellen Bussen die Leistungsmerkmale der einzelnen Anbieter sehr unterschiedlich sind. Neben den Anbietern und den technischen Leistungsmerkmalen der Busse werden auch die Umstände, unter denen die automatisierten Busse eingesetzt werden, recherchiert. Deshalb wird zusätzlich zur Marktanalyse eine Best-Practice-Analyse durchgeführt, um Projekte oder Betriebe mit automatisierten Bussen im öffentlichen Raum zu identifizieren. Die Best-Practice-Analyse dient weiterhin dazu, den Einsatz der Fahrzeuge im öffentlichen Raum besser beurteilen zu können.

Gemäß Rosenkranz und Rudloff wird für die Angebotsplanung eine aktuelle Datenlage zur physischen und digitalen Infrastruktur benötigt [Rosenkranz und Rudloff 2024, S. 205]. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Problemanalyse die Infrastruktur des gesamten Verkehrsnetzes inkl. Fußgängerzonen analysiert. Als zu beachtende Kriterien bei der Infrastrukturanalyse werden von Soteropolous et al. und Beckmann et al. u. a. Internetkonnektivität, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Fahrspurbreite und Verkehrsaufkommen genannt [Beckmann et al. 2020, S. 7–13; Soteropoulos et al. 2020, S. 68–74; Beckmann und Zadek 2022, S. 64–72]. In Abhängigkeit von der Infrastrukturanalyse werden zusätzlich mögliche verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen (z. B. Einführung eines Parkverbots)

abgeleitet und die jeweiligen Kosten pro Maßnahme ermittelt. Um eine vorläufige Kostenschätzung der Infrastrukturmaßnahmen zu erhalten, wird eine Internetrecherche genutzt. Sofern dieser Detailgrad nicht ausreicht, ist es notwendig, dass vom Landkreis oder von der Kommune Kostenvoranschläge von potenziellen Firmen eingeholt werden.

Darüber hinaus werden in dieser Phase die rechtlichen Rahmenbedingungen für automatisierte Busse vertiefend analysiert. Dafür wird die aktuelle Gesetzgebung in Deutschland zum automatisierten Fahren begutachtet. Zusätzlich erfolgt der Austausch mit der unteren und oberen Straßenverkehrsbehörde bzgl. des Genehmigungsverfahrens. Beim Betrieb von hochautomatisierten Bussen ohne Fahrer übernimmt die Betriebsleitstelle die Fernüberwachung und -steuerung (siehe Abschnitt 3.3.1). Demnach werden die Mitarbeiter in der Betriebsleitstelle neue Aufgaben übernehmen. Im Rahmen der Best-Practice-Analyse erfolgt daher eine zusätzliche Untersuchung, inwieweit bereits Schätzungen zum Arbeitsaufwand der Leitstellenmitarbeiter existieren.

Insbesondere zu Beginn des Einsatzes automatisierter Busse ist die Akzeptanz der Nutzer von signifikanter Relevanz. Aus diesem Grund wird ergänzend zur allgemeinen Nachfrage nach ÖPNV-Angeboten (siehe Tabelle 13) die Akzeptanz der Nutzer untersucht. Dafür werden bspw. Befragungen oder Interviewmethoden eingesetzt. Da Witterungsbedingungen den Einsatz automatisierter Busse beeinflussen, werden ergänzend zur Infrastrukturanalyse Wetterdaten aufgenommen. Als Wetterdaten werden u. a. die Anzahl der Tage mit Regen und Schnee erhoben. Zusammenfassend zeigt Tabelle 14 die zusätzlichen Daten für automatisierte Busse, die in der Problemanalyse erhoben werden.

Tabelle 14: Zusätzliche Daten speziell für den Einsatz automatisierter Busse

Fahrzeugtyp	Notwendige Daten
Automatisierte Busse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wegenetz und Fußgängerzone inkl. zulässiger Geschwindigkeit ▪ Fahrzeugleistung und technische Randbedingungen ▪ Fahrzeiten im Realbetrieb (Messung oder Erfahrungswerte) ▪ Fahrzeugkosten ▪ Fahrzeugkosten (fix und variabel inkl. Kraftstoffverbrauch/-kosten) ▪ Infrastrukturausprägungen der Straßen im Bedienungsgebiet ▪ Infrastrukturmaßnahmen inkl. Kosten ▪ Rechtliche Rahmenbedingungen zum Einsatz automatisierter Busse ▪ Wetterdaten (u. a. Anzahl der Tage mit Regen und Schnee) ▪ Akzeptanz von automatisierten Bussen ▪ Abschätzung des Arbeitsaufwands für die Überwachung automatisierter Busse aus einer Leitstelle ▪ Personalkostensätze der Leitstellenmitarbeiter

5.3 Maßnahmenuntersuchung

Die Maßnahmenuntersuchung hat zum Ziel, aufbauend auf den Vorarbeiten, ein Handlungsprogramm mit Maßnahmenbündeln zu entwickeln. Dies beinhaltet zudem eine Vorgehensweise für die Umsetzung unter der Berücksichtigung von Kosten, Zeit und Prioritäten. Bei der Entwicklung von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündeln wird sich an dem in der Problemanalyse entwickelten Zielsystem orientiert. Diese Phase wird in drei Arbeitsschritte aufgeteilt, welche nacheinander bearbeitet werden, jedoch auch iterativ durchlaufen werden können. [FGSV 2018a, S. 25–33]

Im ersten Schritt werden Strukturszenarien, Handlungskonzepte und Planfälle erarbeitet [FGSV 2018a, S. 25–29]. „Strukturszenarien beschreiben mögliche Entwicklungspfade der verkehrsrelevanten Rahmenbedingungen, die außerhalb des Handlungsspektrums der Planungsaufgabe oder des Planungsträgers liegen“ [FGSV 2018a, S. 27]. Beispiele hierfür sind u. a. Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung oder Technikentwicklung [FGSV 2018a, S. 27; U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration 1970, I-3].

Handlungskonzepte bestehen aus Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündel, die u. a. durch Expertengespräche, Diskussionen mit Interessensgruppen und Methoden des systematischen Zweifels erarbeitet werden. Analog zu den Strukturszenarien werden mehrere Handlungskonzepte mit unterschiedlichen Schwerpunkten (u. a. Aufwand oder Technologieaffinität) entwickelt. [FGSV 2018a, S. 27f.; Meyer 2016, S. 6]

Planfälle werden als Resultat aus der Verknüpfung von Strukturszenarien und Handlungskonzepten (siehe Tabelle 15) gebildet [FGSV 2018a, S. 28].

Tabelle 15: Verknüpfung von Handlungskonzepten und Strukturszenarien, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2018a, S. 28]

Strukturszenarien	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario X
Handlungskonzepte				
Konzept A	Planfall A.1	Planfall A.2	Planfall A.3	Planfall A.X
Konzept B	Planfall B.1	Planfall B.2	Planfall B.3	Planfall B.X
Konzept C	Planfall C.1	Planfall C.2	Planfall C.3	Planfall C.X
Konzept Y	Planfall Y.1	Planfall Y.2	Planfall Y.3	Planfall Y.X

Bezogen auf den vorliegenden Anwendungsfall ist es das Ziel, Buslinien für konventionelle und automatisierte Busse zu identifizieren, Haltestellen zu definieren, einen Fahrplan zu erstellen und den Einsatz von Fahrzeugen und Personal zu planen. Dementsprechend werden die fünf Schritte der Angebotsplanung durchgeführt. Die Ergebnisse der Angebotsplanung werden in verschiedenen Handlungskonzepten verarbeitet, die jeweils einen Maßnahmenplan mit einem Liniennetzplan, einem Kapazitätsplan, einem Fahrplan, einem Fahrzeugeinsatz- und einem Personaleinsatzplan enthalten. Nachfolgend werden die fünf Schritte der Angebotsplanung beschrieben (Abschnitt 5.3.1 bis 5.3.5). In Abschnitt 5.3.6 werden die beiden fehlenden Arbeitsschritte der Maßnahmenuntersuchung (Abschätzung der Auswirkungen und Variantenbewertung) erläutert.

5.3.1 Netzplanung

Ziel der Netzplanung ist es, die zukünftigen Strecken des ÖPNV auf der Grundlage der Planungsziele festzulegen [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1254]. Dazu werden drei Schritte durchlaufen:

- Verkehrswegeplanung
- Haltestellenplanung
- Liniennetzplanung [Schöbel 2012, S. 491–493; Schnieder 2018, S. 21–38; Liu et al. 2021, S. 1–3; Hartl 2020, S. 29–35; Kirchhoff 2002, S. 98]

Verkehrswegeplanung:

Das Vorgehen in der Verkehrswegeplanung inklusive der genutzten Methoden ist in Tabelle 16 dargestellt. Dabei werden die für den automatisierten Bus spezifischen Arbeitsschritte und Methoden grün hervorgehoben. Dies gilt auch für alle weiteren Tabellen im Abschnitt 5.3. Zunächst werden die Verkehrswege im Untersuchungsgebiet ermittelt [Schöbel 2012, S. 491–493; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1253; Kirchhoff 2002, S. 98–113; Jaquet und Korte 2024b, S. 198f.]. Dazu zählen Straßen, Fußgängerzonen, Fuß- und Radwege sowie, soweit vorhanden, das bestehende Liniennetz des ÖPNV [Schöbel 2012, S. 491–493; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Kirchhoff 2002, S. 98–113]. Ziel ist es, das gesamte Verkehrswegenetz inkl. Infrastruktur sowie das derzeitige Liniennetz für die öffentlichen Verkehrsmittel zu bestimmen [Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Schöbel 2012, S. 492; Liu et al. 2021, S. 2f.]. In Bezug auf konventionelle Busse wird im ersten Arbeitsschritt das gesamte Netz des Untersuchungsgebietes abgegrenzt und beschrieben [Kirchhoff 2002, S. 111–113]. Im zweiten Arbeitsschritt werden die Kategorien der Verkehrswege auf Basis der FGSV bestimmt [Gerike und Vallée 2021, S. 101–114; FGSV 2008, S. 8–18; Jaquet und Korte 2024b, S. 198f.]. Damit endet die Verkehrswegeplanung für konventionelle Busse.

Tabelle 16: Arbeitsschritte und Methoden der Verkehrswegeplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Schöbel 2012, S. 491–493; Schnieder 2018, S. 21–38; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1254; Kirchhoff 2002, S. 98–113; Gerike und Vallée 2021, S. 101–114; FGSV 2008, S. 8–18]

Verkehrswegeplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Beschreibung und Analyse des Verkehrswegenetzes für konventionelle und automatisierte Busse	Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Machbarkeit und der Infrastrukturkosten
2	Berechnung der Infrastrukturkosten pro Strecke für den Einsatz konventioneller und automatisierter Busse	
3	Bestimmung der Verkehrskategorie für die Fahrzeuge des ÖPNV	Verkehrskategorien, z. B. basierend auf FGSV

Prinzipiell können konventionelle Busse auf fast allen Straßen, die für den motorisierten Verkehr freigegeben sind, eingesetzt werden. Allerdings existieren Einschränkungen hinsichtlich Gewicht, Breite oder des öffentlichen Zugangs zu einer Straße [Schnieder 2018, S. 113–116]. Bei automatisierten Bussen ist diese Analyse

umfangreicher, da diese Fahrzeuge von einer Vielzahl von Infrastrukturmerkmalen abhängig sind, wie die Abschnitte 3.3.2 und 4.2.3 zeigen. Daher ist bei der Einführung von automatisierten Bussen eine vertiefende Analyse der Infrastruktur in Bezug auf diese Technologie notwendig. Daher wird der erste Arbeitsschritt der Verkehrswegeplanung um die Analyse der Infrastruktur in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse erweitert. Neben der Infrastrukturanalyse werden auch Infrastrukturkosten für verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen, die den Betrieb automatisierter Busse unterstützen, recherchiert (neuer zweiter Arbeitsschritt). Als neue Methode innerhalb der Verkehrswegeplanung wird aus diesem Grund ein Bewertungsverfahren eingesetzt werden, welches darstellt, inwieweit eine Straße für den Einsatz von konventionellen oder automatisierten Busse geeignet ist. Weiterhin werden die Infrastrukturkosten, die notwendig sind, um den Einsatz automatisierter Busse zu ermöglichen, im Bewertungsverfahren berechnet. Dadurch wird eine Übersicht der Straßen hinsichtlich der Komplexität in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse erstellt. Diese Übersicht zeigt zudem, bei welchen Straßen verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen durchgeführt werden müssen. Diese Ergebnisse werden in den weiteren Schritten der Angebotsplanung berücksichtigt. Im Bewertungsverfahren werden die Maßnahmen monetär und nicht-monetär, bewertet. Dies wird empfohlen, da aufgrund des frühen Planungsstadiums die Kostenschätzungen der angefragten Unternehmen gewissen Annahmen unterliegen. Abschließend werden auch für automatisierte Busse die Verkehrswegekategorien bestimmt (neuer dritter Arbeitsschritt). Die für die Arbeitsschritte der Verkehrsplanung notwendigen Eingangsdaten und die resultierenden Ergebnisse werden in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Eingangsdaten und Ergebnisse der Verkehrswegeplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Schöbel 2012, S. 491–493; Schnieder 2018, S. 21–38; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1254; Kirchhoff 2002, S. 98–113; Gerike und Vallée 2021, S. 101–114; FGSV 2008, S. 8–18]

Verkehrswegeplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Wegenetz (inkl. Straßennetz, Fußwege und Fußgängerzonen) mit Daten zur räumlichen Ausprägung des Wegenetzes • Verkehrszellen mit Nutzungsschwerpunkten und Verkehrsaufkommen • ÖPNV-Liniennetz • Leistungsdaten von konventionellen und automatisierten Bussen • Infrastrukturanalyse • Infrastrukturkosten pro Maßnahme • Rechtliche Rahmenbedingungen zum Einsatz automatisierter Busse • Wetterdaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtes Verkehrswegenetz • Verkehrswegenetz für konventionelle und automatisierte Busse (Einsatzfähigkeit) • Kosten, Aufwand und gesellschaftliche Konsequenzen zur Erschließung pro Straße für den Einsatz automatisierter Busse • Fahrzeiten (auch für automatisierte Busse) im Verkehrswegenetz

Haltestellenplanung:

Die Haltestellen werden mit dem Ziel geplant, die Anzahl der Haltestellen in dem Untersuchungsgebiet zu definieren [Hartl 2020, S. 34f.]. Dabei werden die Anzahl und die Lage der Haltestellen hinsichtlich folgender drei Ziele optimiert:

- Erschließungskosten
- Erschließungsqualität
- Reisezeit [Ceder und Wilson 1986, S. 333–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–86; Schnieder 2018, S. 23–26; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 34f.; Laporte et al. 2007, S. 193–198]

Erschließungskosten berechnen sich aus der Anzahl der Haltestellen, die gebaut und unterhalten werden müssen [Hartl 2020, S. 34f.]. Haltestellen stellen die räumliche Erschließung im Bedienungsgebiet sicher [Schnieder 2018, S. 21–26]. Der Anteil der Einwohner, die im Einzugsbereich einer Haltestelle wohnen, und die mittlere Zugangsweite von der Haltestelle zum Fahrgast beschreiben die Erschließungsqualität [Hartl 2020, S. 34f.; Laporte et al. 2007, S. 193–198]. Die Reisezeit setzt sich aus den Zeitkomponenten Zugang zur Starthaltestelle, Fahrzeit(en) (evtl. inkl. Umsteigezeiten) und Abgang von der Endhaltestelle zum Ziel zusammen [Schnieder 2018, S. 24–31]. Gemäß des VDV ist eine Mindesterschließung von 80 % der Bewohner in einem Einzugsbereich zu gewährleisten [Schnieder 2018, S. 24; VDV 2019a, S. 15–20]. Als Zugangsweite zur Haltestelle werden 300 m – 700 m empfohlen [FGSV 2010a, S. 8]. Daher minimiert eine große Anzahl von Haltestellen die Zu- und Abgangsdistanzen zur Haltestelle, die Reisezeit wird jedoch erhöht, da die Busse häufiger anhalten müssen [Schnieder 2018, S. 23–31; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.]. Für jeden Halt werden dementsprechend Fahrzeitmehrbedarfe für Brems- und Verzögerungsvorgänge sowie für den Fahrgastwechsel berechnet [Schnieder 2018, S. 23–31]. Aus diesem Grund ist in der Haltestellenplanung das Optimum zwischen kurzen Zugangswegen zu Haltestellen und kurzen Reisezeiten zu berechnen [Schnieder 2018, S. 23f.; FGSV 2008, S. 19–24]. Die Arbeitsschritte und Methoden der Haltestellenplanung werden in Tabelle 18 dargestellt.

Im ersten Arbeitsschritt der Haltestellenplanung für konventionelle Busse des klassischen Linienverkehrs werden die Einzugsbereiche anhand der Verkehrsmittel und der Lage des Siedlungsgebietes bestimmt [Schnieder 2018, S. 24–31; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.]. Dabei wird erstmal nur betrachtet, ob es sich beim Verkehrsmittel, um eine U-Bahn, um eine Straßenbahn oder einen Bus handelt und ob das Siedlungsgebiet ein Oberzentrum, Mittelzentrum oder Unterzentrum ist [Schnieder 2018, S. 30]. Aus dem Einzugsbereich, der die lineare Entfernung zur Haltestelle beschreibt, wird der tatsächliche Fußweg und die daraus resultierenden Wegezeiten zur Haltestelle berechnet [Schnieder 2018, S. 30f.; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.]. Innerhalb des zweiten Arbeitsschritts werden die Haltestellen auf Basis des Einzugsbereichs der Haltestelle, der verkehrlichen Bedeutung des Siedlungsgebiets und der verkehrlichen Randbedingungen positioniert [Schnieder 2018, S. 30f.]. Die verkehrliche Bedeutung eines Siedlungsgebiets basiert auf der Nachfrage, die sich aus der Anzahl der Einwohner sowie Unternehmen, Freizeiteinrichtungen, Supermärkten und Ausbildungseinrichtungen zusammensetzt [Desaulniers und Hickman 2007, S. 78–83; Schnieder 2018, S. 30–34]. Verkehrliche

Randbedingungen beziehen sich auf die exakte Positionierung und Ausführung der Haltestelle im öffentlichen Raum [Schnieder 2018, S. 30f.].

Tabelle 18: Arbeitsschritte und Methoden der Haltestellenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–337; Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–85; Schnieder 2018, S. 21–31; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 34–38]

Haltestellenplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Wahl der Betriebsform	
2	Ermittlung zumutbarer Einzugsgebiete (Luftlinienentfernung)	
3	Positionierung der Haltestellen	
4	Überprüfung flächenhafter Erschließung	Mathematische Modellierung von Reisezeit und Haltestellenabständen. Optimierung in Bezug auf Erschließungskosten, Erschließungsqualität und Reisezeit.

Abschließend erfolgt eine Überprüfung der flächenhaften Erschließung in Form der drei Ziele Erschließungsqualität, Erschließungskosten und Reisezeit, die mathematisch formuliert werden [Schnieder 2018, S. 24–31]. Durch Optimierungsverfahren wird iterativ eine Lösung berechnet [Ceder und Wilson 1986, S. 335–337; Schnieder 2018, S. 24–31; Kepaptsoglou und Karlaftis 2009, S. 497–501]. Aus dem ersten Entwurf, der intuitiv erfolgen kann, lassen sich direkt Erschließungsqualität und Erschließungskosten ermitteln [Ceder und Wilson 1986, S. 333–337; Schnieder 2018, S. 24–31]. Die Reisezeit wird erst abschließend nach Erstellung des Fahrplans (siehe Fahrlagenplanung) überprüft [Schnieder 2018, S. 29–31]. Daher werden die Ergebnisse der Haltestellenplanung an die Liniennetzplanung, die Kapazitätsplanung und die Fahrlagenplanung weitergegeben [Schnieder 2018, S. 29–31]. Anhand des Fahrplanentwurfs werden die Reisezeiten erneut überprüft und bei unzureichenden Reisezeiten die Haltestellenplanung und der gesamte Prozess wiederholt [Schnieder 2018, S. 29–31].

Als geeignete Optimierungsverfahren können die Ansätze von Furth und Rahbee (2002), Saka (2001), Schöbel (2005) oder Khondaker und Wirasinghe (2013) herangezogen werden [Hartl 2020, S. 36–38; Furth und Rahbee 2000, S. 15–22; Saka 2001, S. 195–199; Schöbel 2005, S. 211–225; Khondaker und Wirasinghe 2013, S. 1–13]. Als Ergebnisse der Haltestellenplanung resultieren die Anzahl der Haltestellen, der Haltestellenabstand, die Definition der Haltestellen (einschließlich Knotenpunkten oder Endhaltestellen), Verlustzeiten, Wartezeiten und die Erschließungskosten [Ceder und Wilson 1986, S. 333–337; Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–85; Schöbel 2012, S. 491–497; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 34f.].

Da automatisierte Busse auch bedarfsgesteuert betrieben werden können, wird vor der Definition der Haltestellen die Betriebsform im Bedienungsgebiet festgelegt. Zur

Auswahl stehen Linien-, Richtungs- und Flächenbetrieb [Böhler et al. 2009, S. 46]. Die Auswahl der Betriebsform erfolgt unter der Prämisse, dass diese die Verkehrsnachfrage in der jeweiligen Siedlungsstruktur am ehesten erfüllt. Dieser Arbeitsschritt ist der Ermittlung zumutbarer Einzugsgebiete vorgeschaltet und wird als neuer erster Schritt durchgeführt. Der Einsatz automatisierter Busse bedingt darüber hinaus keine weiteren Modifikationen in Bezug auf die Arbeitsschritte und Methoden.

Jedoch werden innerhalb der Haltestellenplanung für diese Technologie neue Eingangsdaten berücksichtigt. In Bezug auf die verkehrliche Bedeutung des Siedlungsgebietes werden neben der Nachfrage auch die Akzeptanz sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen der neuen Technologie berücksichtigt. Weiterhin werden die technischen Eigenschaften der Busse, wie z. B. der Wenderadius oder die Einstiegshöhe benötigt. Diese werden für die Bestimmung der verkehrlichen Randbedingungen verwendet, um die exakte Positionierung und Gestaltung der Bushaltestellen im öffentlichen Raum zu ermitteln (dritter Arbeitsschritt). Zusammenfassend beeinflussen Akzeptanz, rechtliche Rahmenbedingungen und die technischen Eigenschaften der automatisierten Busse die Erschließungsqualität. Die Kosten, um eine Straße für den Einsatz automatisierter Busse herzurichten (siehe Verkehrswegeplanung) wirken sich zudem auf die Erschließungskosten und die Leistung der automatisierten Busse auf die Fahrzeit aus. In Tabelle 19 sind die Eingangsdaten und Ergebnisse der Haltestellenplanung aufgelistet.

Tabelle 19: Eingangsdaten und Ergebnisse der Haltestellenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–337; Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–85; Schnieder 2018, S. 21–31; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 34–38]

Haltestellenplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Entwurfsziele / Planungsziele • Siedlungsstruktur • Verkehrsnachfrage in Verkehrszellen • Akzeptanz von automatisierten Bussen • Verkehrswegenetz für konventionelle und automatisierte Busse • Liniennetzplan • Zu betrachtende Verkehrsmittel • Leistungsdaten von konventionellen und automatisierten Bussen • Geforderte Erreichbarkeit und Zugänglichkeit der Haltestellen • Eignung der Haltestellen für Wendemanöver • Verkehrliche Randbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Definition und Anzahl der Haltestellen • Haltestellenabstand entlang einer Linie und zwischen den Haltestellen • Zuordnung von Verkehrszellen zu Bushaltestellen • Verlustzeiten durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge • Wartezeiten an Haltestellen für den Ein- und Ausstiegsvorgang • Erschließungsqualität (in %) • Erschließungskosten • Reisezeit (bei bereits vorliegendem Fahrplan) • Kosten der Haltestellen • Angebote Betriebsformen • Haltestellen- und/oder Haustürbedienung

Diese neuen Eingangsgrößen haben Auswirkungen auf die mathematische Modellierung und werden dort berücksichtigt. Dies wird am Beispiel von Furth und Rahbee dargestellt, die Haltestellen (von Haltestelle j bis Haltestelle N , vorausgesetzt, dass i die Haltestelle vor j ist und p der am weitesten entfernten Haltestelle, die vor der Haltestelle j liegen kann, entspricht) für eine Linie aus einer gegebenen Menge von Haltestellenpositionen auswählen, indem die Gesamtkosten für den Betreiber und die Fahrgäste minimiert werden [Furth und Rahbee 2000, S. 19]. Die Gesamtkosten setzen sich aus den Nettogehzeitkosten pro Zeiteinheit (Z_w), den Fahrzeitverzögerungskosten pro Zeiteinheit (Z_r) und den Betriebskosten pro Zeiteinheit (Z_{op}) zusammen (siehe Formel 1) [Furth und Rahbee 2000, S. 19]. Dementsprechend lautet die Zielfunktion f wie folgt:

$$(1) \quad f(N; i) = \{Z_w(N; i, N + 1) + Z_r(N; i, N + 1) + Z_{op}(N; i, N + 1)\}$$

für $i = p(N), \dots, N - 1$

Formel 1: Kostenminimierung im Rahmen der Haltestellenplanung [Furth und Rahbee 2000, S. 19]

Automatisierte Busse können durch den Wegfall des Fahrerarbeitsplatzes die Betriebskosten (Z_{op}) im Vergleich zu konventionellen Bussen verringern (siehe Abschnitt 2.4.2). Jedoch kann die Fahrzeugleistung der automatisierten Busse (bspw. Geschwindigkeit) zu höheren Zugangs- oder Wartezeiten (Z_w und Z_r) führen.

Liniennetzplanung:

Im Rahmen der Liniennetzplanung werden zunächst die einzelnen Linien bzw. die Flächenverkehre gebildet und anschließend in Abhängigkeit von den gewählten Betriebsformen zu einem Netz zusammengefasst [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Schnieder 2018, S. 32–42]. Die Validierung des Planungsentwurfs der Liniennetzplanung erfolgt durch die Ermittlung und Bewertung folgender Zielgrößen:

- Wirtschaftlichkeit der Betriebsführung (u. a. Fahrplankilometer, Fahrplanwirkungsgrad, Fahrplaneffektivität, Fahrgeldeinnahmen, Treibstoffverbrauch, THG-Emissionen, Infrastrukturkosten)
- Verbesserung des Fahrangebots (z. B. mittlere Umsteigehäufigkeit, mittlere Reisezeit)
- Steigerung der Betriebsqualität [Desaulniers und Hickman 2007, S. 71–86; Schöbel 2012, S. 491–497; Schnieder 2018, S. 31–41; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 38f.; Kirchhoff 2002, S. 111–123]

Bevor die Liniennetzplanung durchgeführt werden kann, wird im ersten Schritt eine Übersicht der verschiedenen Linien- (bspw. Grundlinien, Sonderlinien, Hauptlinien, Nebenlinien, Ortslinien oder Tangentiallinien) und Netzformen (bspw. Ringnetz, Radialnetz, Achsliniennetz) erstellt (siehe Tabelle 20) [Schnieder 2018, S. 32–38; Kirchhoff 2002, S. 117–121]. Anschließend erfolgt die Linien- und Flächenbetriebsplanung [Kirchhoff 2002, S. 113]. Zu diesem Zweck wird die Linienbelastung und Umsteigequalität im gesamten Bedienungsgebiet (sofern ein existierendes Liniennetz vorhanden ist) ermittelt [Kirchhoff 2002, S. 113–117]. In Abhängigkeit der Nachfrage einer Haltestellen wird auf dieser Basis eine entsprechende Linienform ausgewählt [Schnieder 2018, S. 34–39; Kirchhoff 2002, S. 117–120]. Im Anschluss werden die Linien festgelegt, indem die einzelnen

Haltestellen, wenn möglich, über Direktverbindungen miteinander verknüpft werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 74–86; Schnieder 2018, S. 31–41; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Kirchhoff 2002, S. 117f.]. Dabei wird die Lösung der Linienplanung anhand der drei genannten Zielgrößen optimiert [Schnieder 2018, S. 32]. Hierbei existiert eine Verknüpfung zur Fahrzeugeinsatzplanung, welche die Eingangsdaten für den Treibstoffverbrauch bereitstellt. Weiterhin ist bei der Linienplanung darauf zu achten, dass der Linienverlauf des ÖPNV und vor allem der automatisierten Busse auf Straßen verläuft, die für den Einsatz der Fahrzeuge geeignet sind [Kirchhoff 2002, S. 118]. Wird in der Haltestellenplanung ein Flächenbetrieb als Betriebsform ausgewählt, entfällt die Linienplanung, da die Haltestellen nicht zu Linien zusammengefasst werden müssen.

Tabelle 20: Arbeitsschritte und Methoden der Liniennetzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 72–86; Schöbel 2012, S. 491–499; Schnieder 2018, S. 32–49; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 38–50; Kirchhoff 2002, S. 113–123; Friedrich 1994, S. 151–157]

Liniennetzplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Verschaffung einer Übersicht über Linien- und Netzwerkformen	Keine Methoden
2	Linien-/Flächenbetriebsplanung <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung der Linienbelastung und Umsteigequalität • Auswahl von Linienformen • Festlegung der Linien 	Optimierung der Linien hinsichtlich Wirtschaftlichkeit der Betriebsführung, Verbesserung des Fahrangebots und Steigerung der Betriebsqualität.
3	Netzplanung (Zuordnung von Haltestellen und Linien)	Optimierung des Netzes hinsichtlich Flächenerschließungswirkung, Umsteigehäufigkeit, Mittlere Reisezeiten, Wagenkilometer und Dienstplanstunden. Entwurfsverfahren mithilfe von intuitiven Verfahren und Optimierungsverfahren.
4	Ermittlung und Bewertung der Auswirkungen	Keine Methoden

Im dritten Schritt werden die einzelnen Linien und Flächenbetriebe an ausgewählten Haltestellen miteinander verknüpft und schrittweise verdichtet, so dass ein Liniennetz entsteht [Ceder und Wilson 1986, S. 333–335; Schnieder 2018, S. 38–42; Kirchhoff 2002, S. 117–120]. Die Netzbildung orientiert sich dabei an folgenden Zielgrößen:

- Maximierung der Flächenerschließungswirkung
- Minimierung der mittleren Umsteigehäufigkeit
- Minimierung der mittleren Reisezeiten
- Minimierung der Wagenkilometer
- Minimierung der Dienstplanstunden [Schnieder 2018, S. 38f.; Völker 2001, S. 12–17; VDV 2000, S. 80–82]

Als Entwurfsverfahren für das Liniennetz können intuitive Verfahren oder Optimierungsverfahren eingesetzt werden [Hartl 2020, S. 39–50; Kirchhoff 2002, S. 120f.]. Intuitive Verfahren werden in Planungsentwurf und Wirkungsberechnung unterteilt [Hartl 2020, S. 39–42]. Das bedeutet, dass die Planung auf der Grundlage bestimmter Entwurfsregeln erfolgt und die Wirkungen anhand eines rechnergestützten Wirkungsmodells ermittelt werden [Hartl 2020, S. 39–42]. Eine bekannte Methode stammt u. a. von Friedrich [Hartl 2020, S. 41f.; Friedrich 1994, S. 44–127]. Optimierungsverfahren wandeln die Liniennetzplanung in ein mathematisches Problem mit einer zu optimierenden Zielfunktion um [Schöbel 2012, S. 493–499; Hartl 2020, S. 43–45]. Unter anderem haben Gattermann et al. einige Optimierungsverfahren für die Netzbildung entwickelt [Hartl 2020, S. 50; Gattermann et al. 2017, S. 13–31]. Basierend auf den Ergebnissen der Optimierungsverfahren werden im vierten Arbeitsschritt die Auswirkungen auf Basis der genannten Zielgrößen ermittelt und bewertet.

Im Allgemeinen verändern sich die vier Arbeitsschritte der Liniennetzplanung durch den Einsatz automatisierter Busse nicht. Bei der Linienplanung (zweiter Arbeitsschritt) wird jedoch besonders darauf geachtet, dass die automatisierten Busse nur auf Straßen eingesetzt werden können, für die sie technologisch geeignet sind. Analog zur Haltestellenplanung werden in Bezug auf den automatisierten Bus neue Eingangsdaten (u. a. Akzeptanz und Fahrzeiten) berücksichtigt. Im Sinne einer nachhaltigen Bewertung werden in der Betrachtung auch Treibstoffverbrauch, bzw. -kosten, und THG-Emissionen berücksichtigt.

Jedoch beeinflusst der Einsatz automatisierter Busse in zweierlei Hinsicht die Wirtschaftlichkeitsberechnung und die Linienplanung. Die Kosten für infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Maßnahmen und die geringere Geschwindigkeit wirken sich negativ auf die Kostenstruktur aus, während die Betriebskosten aufgrund geringerer Personalkosten und des geringeren Kraftstoffverbrauchs die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen. Dies wird am Beispiel des Optimierungsverfahrens von Gattermann et al. erläutert, die ein Liniennetz mit ausreichender Qualität erstellen, bis die Nachfrage nach ÖPNV-Fahrten bedient werden kann [Gattermann et al. 2017, S. 7–19]. Für die Kostenberechnung werden die Länge der Linie ($cost_{length}$), die Anzahl der Kanten ($cost_{edge}$) und die Fixkosten ($cost_{fixed}$) zu den Gesamtkosten einer Linie ($cost_{line}$) addiert (Formel 2) [Gattermann et al. 2017, S. 19].

$$(2) \quad cost_{line} = cost_{length} + cost_{edge} + cost_{fixed}$$

Formel 2: Berechnung der Kosten für die Liniennetzplanung [Gattermann et al. 2017, S. 19]

In diesem Beispiel würden die Kosten für infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Maßnahmen in die Kosten der Streckenlänge einfließen, womit eine signifikante Erhöhung der Kosten für den Einsatz automatisierter Busse einhergehen würde. Die Fixkosten würden jedoch aufgrund der geringeren Personalkosten reduziert werden. Dies bedeutet, dass der Einsatz automatisierter Busse und die zusätzlichen Eingangsdaten einen Einfluss auf die Bewertung des Streckennetzes haben.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 21 eine Übersicht der Eingangsdaten und Ergebnisse der Liniennetzplanung.

Tabelle 21: Eingangsdaten und Ergebnisse der Liniennetzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 72–86; Schöbel 2012, S. 491–499; Schnieder 2018, S. 32–49; Guihaire und Hao 2008, S. 1253f.; Hartl 2020, S. 38–50; Kirchhoff 2002, S. 113–123; Friedrich 1994, S. 151–157]

Liniennetzplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Entwurfsziele / Planungsziele • ÖPNV-Liniennetz • VerkehrswegeNetz für konventionelle und automatisierte Busse • Fahrzeiten (auch für automatisierte Busse) im Verkehrsnetz • Lage der Haltestellen und Haltestellenaufenthaltszeiten • Eignung der Haltestellen für einen Wendevorgang • Verkehrsnachfragematrix zwischen Verkehrszellen • Akzeptanz automatisierter Busse • Zuordnung von Verkehrszellen zu Bushaltestellen • Betriebsform • Kosten, Aufwand und gesellschaftliche Konsequenzen zur Erschließung pro Straße für den Einsatz auto. Busse • Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • Liniennetz mit einzelnen Linien inkl. Ausgangs- und Endpunkten mit allen Haltestellen • Fahrplankilometer, -stunden, -wirkungsgrad • Abschätzung der Fahrzeuganzahl • Fahrgeldeinnahmen • Betriebskosten der Linien (inkl. Infrastrukturkosten) • Kraftstoffverbrauch und THG-Emissionen pro Betriebstag (auf Basis der Fahrzeugeinsatzplanung) • Mittlere Umsteigezeit und Reisezeit • Anzahl der Direktfahrten

5.3.2 Kapazitätsplanung

Im Rahmen der Kapazitätsplanung wird die Anzahl und Art der angebotenen Sitzplätze berechnet, die dem Bedarf im Bedienungsgebiet entsprechen [Schnieder 2018, S. 45]. Die Kapazität ist aufgrund der variablen Fahrtintervalle (zeitlich) und der eingesetzten Fahrzeuge (räumlich) variabel [Schnieder 2018, S. 45; Guihaire und Hao 2008, S. 1254]. Da die Kapazität aus dem Produkt der Fahrtenhäufigkeit und der Größe der eingesetzten Fahrzeuge resultiert, ist es das Ziel der Kapazitätsplanung, den Betriebsmitteleinsatz zu minimieren, damit Energieverbräuche sowie THG-Emissionen reduziert werden und weniger Personal (Betriebskosten) gebunden wird [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Schnieder 2018, S. 45f.; Guihaire und Hao 2008, S. 1254]. Dies wird durch einen bedarfsgerechten Einsatz von Fahrzeugen erreicht [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–90; Schnieder 2018, S. 45–47; Guihaire und Hao 2008, S. 1254]. Weitere Ziele sind die Maximierung des Fahrgastkomforts in Bezug auf die Fahrtenhäufigkeit, Sitzplatzverfügbarkeit, Minimierung der Standzeiten und die Erhöhung der Sicherheit [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–90; Schöbel 2012, S. 495–499; Schnieder 2018, S. 45–47]. Die einzelnen Arbeitsschritte der Kapazitätsplanung werden in Tabelle 22 dargestellt.

Wesentlich für die Kapazitätsplanung sind die auf den Tag und die Linie (bzw. den Bereich) bezogenen Fahrgastzahlen [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–90;

Schnieder 2018, S. 47–52]. Um die Nachfragedaten zu erheben eignen sich als Methoden u. a. Fahrgastzählungen, Fahrgastbefragungen, Nachfragemodelle, die Auswertung der verkauften Fahrkarten oder die Auswertung der Mobilfunkdaten [Schnieder 2018, S. 47–52]. Im Rahmen der Kapazitätsplanung werden die Nachfragedaten weiter verarbeitet, um die Auslastung von Linien und Strecken für verschiedene Jahreszeiten, Wochentage und Verkehrszeiten zu ermitteln [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–90; Schöbel 2012, S. 493–499; Schnieder 2018, S. 53–57]. Die Daten werden anschließend zur Querschnittsbelastung aggregiert, welche die Anzahl der Fahrgäste pro Zeiteinheit darstellt, die einen Strecken- bzw. Linienabschnitt zwischen zwei benachbarten Haltestellen befahren [Schöbel 2012, S. 493–499; Schnieder 2018, S. 53–57]. Als weitere Kennzahl wird die Haltestellenbelastung berechnet, aus der das Ein- und Aussteigeverhalten abgeleitet werden kann und auf deren Grundlage auch die Ausstattung der Haltestelle (Informations- und Wetterschutzeinrichtungen) festgelegt wird [Schnieder 2018, S. 54–57]. Auf Basis der Querschnitts- und Haltestellenbelastung wird der maßgebende Querschnitt (Querschnitt mit der stärksten Belastung) identifiziert [Schnieder 2018, S. 53–57].

Tabelle 22: Arbeitsschritte und Methoden der Kapazitätsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–91; Schöbel 2012, S. 493–499; Schnieder 2018, S. 45–73; Guihaire und Hao 2008, S. 1254; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 121–123]

Kapazitätsplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Ermittlung der Linien- und Flächenbelastung	Fahrgasterhebungen
2	Identifikation maßgebender Querschnitte	Auswertung und Weiterverarbeitung von Nachfrage- und Akzeptanzdaten.
3	Auswahl des Fahrtenabstandes und der Gefäßgröße	Berechnung der Beförderungskapazität und -qualität auf der Grundlage der Kennzahlen Betriebsmitteleinsatz, Fahrgastkomfort und Sicherheit.
4	Überprüfung der Beförderungskapazität/-qualität (Ermittlung und Bewertung der Auswirkungen)	Überprüfung der Qualitätskriterien anhand von Regelwerken der FGSV und vom VDV.

Im dritten Arbeitsschritt werden der Fahrtenabstand und die Gefäßgröße ausgewählt und auf dieser Basis die oben genannten Kennzahlen (Betriebsmitteleinsatz, Fahrtenhäufigkeit, Sitzplatzverfügbarkeit, Stehdauer, Stehfläche und Sicherheit) berechnet [Schnieder 2018, S. 47–66; Guihaire und Hao 2008, S. 1254]. Darüber hinaus können der Besetzungsgrad und die maximale Fahrzeugbesetzung kalkuliert werden [Schnieder 2018, S. 57–60]. Die Berechnung wird anhand von Regelwerken der FGSV und des VDV durchgeführt [Schnieder 2018, S. 57–59; Kirchhoff 2002, S. 121–124; FGSV 2015, S7-2-S7-18; VDV 2019a, S. 20–29]. Abschließend werden die Beförderungskapazität und -qualität überprüft, indem die Ergebnisse mit den

Vorgaben der FGSV und des VDV sowie den eigenen Entwurfszielen und Kennzahlen verglichen werden [Schnieder 2018, S. 47–60; Kirchhoff 2002, S. 121–124]. Bei ausreichender Kapazität und Qualität wird mit der Fahrlagenplanung fortgeführt [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–91; Schnieder 2018, S. 47]. Andernfalls werden Fahrtenabstand und Gefäßgröße angepasst und die Qualitätskriterien erneut berechnet [Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–91; Schnieder 2018, S. 47–60]. Die Fahrlagenplanung erfolgt parallel zur Kapazitätsplanung, weshalb zwischen diesen beiden Schritten eine Rückkopplung existiert [Schnieder 2018, S. 16f.; Hartl 2020, S. 50–53].

Die Berücksichtigung automatisierter Busse in der Kapazitätsplanung führt zu keiner Änderung im Ablauf der fünf Arbeitsschritte. Jedoch wird bei einem bedarfsgesteuerten Einsatz von automatisierten oder konventionellen Bussen zusätzlich die Flächenbelastung (erster Schritt) ermittelt. Weiterhin sind die Nachfragedaten mit der Akzeptanz in Bezug auf diese Technologie zu kombinieren, wodurch die Berechnung der Linienbelastung verändert wird (erster Schritt). Da hochautomatisierte Busse ohne Fahrer eingesetzt und häufig elektrisch betrieben werden (siehe Abschnitt 2.4.2 und Abschnitt 3.3), verändert sich durch diese Technologie die Kostenstruktur. Niedrige Betriebskosten der automatisierten Busse ermöglichen es, die Taktfrequenz der Fahrzeuge zu erhöhen und den Fahrgastkomfort zu verbessern. Dies hat Auswirkungen auf die Auswahl des Fahrtenabstandes und die Gefäßgröße (dritter Schritt). Die Eingangsdaten und Ergebnisse der Kapazitätsplanung werden in Tabelle 23 aufgelistet.

Tabelle 23: Eingangsdaten und Ergebnisse der Kapazitätsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 86–91; Schöbel 2012, S. 493–499; Schnieder 2018, S. 45–73; Guihaire und Hao 2008, S. 1254; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 121–123]

Kapazitätsplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Planungsziele / Entwurfsziele • Verkehrsnachfragematrix zwischen Verkehrszellen (Ergebnisse der Verkehrserhebung) • Akzeptanz von automatisierten Bussen • Verkehrsnetz für konventionelle und automatisierte Busse • Liniennetz und Linienabschnitte • Personalkosten • Fahrzeugtypen (Größe und Anzahl der Sitz- und Stehplätze) • Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • Taktzeiten (Frequenzen) • Anzahl, Art und Größe der Fahrzeuge • Querschnittsbelastung • Haltestellenbelastung

5.3.3 Fahrlagenplanung

Verkehrsunternehmen sind gemäß §40 PBefG verpflichtet, Fahrpläne zu erstellen [Schnieder 2018, S. 77]. Fahrpläne enthalten die Linienführung mit allen Haltestellen sowie die Abfahrts- und Ankunftszeiten [Ceder und Wilson 1986, S. 332; Schnieder

2018, S. 77; Farina 2018, S. 12–14; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.]. Die Ziele der Fahrlagenplanung sind:

- Minimierung der Reisezeiten (höhere Beförderungsgeschwindigkeiten, geringere Wartezeiten, Reduzierung der Umsteigehäufigkeit)
- Maximierung der Fahrplanstabilität (Zuverlässigkeit des Betriebs, Pufferzeiten, Fahrzeitzuschläge)
- Optimierung der Anzahl der Fahrzeuge (höhere Fahrzeiten führen zu mehr Umläufen und einer höheren Fahrzeuganzahl)
- Maximierung der Kapazität (innerhalb kurzer Zeit, viele Fahrgäste mit wenig Fahrzeugen befördern)
- Optimierung des Energiemanagements (Reichweitenerhöhung, Reduktion der Ladezeiten, energetisch optimiertes Fahrprofil)
- Merkbarkeit des Fahrplans (konstante Fahrzeitvorgaben) [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 77–79; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 50–52]

Die Anzahl der Fahrzeuge ergibt sich aus der Fahrzeugeinsatzplanung, weshalb der Fahrplan dort als Eingangsgröße berücksichtigt wird [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 77–79; Liu et al. 2021, S. 1–3; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 60]. Dementsprechend besteht eine Rückkopplung zwischen der Fahrzeugeinsatzplanung und der Fahrlagenplanung. Das Vorgehen der Fahrlagenplanung unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob straßengebundene Verkehrsmittel (Busse und Straßenbahnen) oder vom Straßenverkehr unabhängige Verkehrsmittel (U-Bahnen und Eisenbahnen) eingesetzt werden [Schnieder 2018, S. 77]. In den folgenden Ausführungen wird ausschließlich das Vorgehen für straßengebundene Verkehrsmittel erläutert (siehe Tabelle 24).

Grundlage für die Fahrplanerstellung ist das Liniennetz [Farina 2018, S. 12–15; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.]. Zunächst werden die Zeitkomponenten des Fahrplans, z. B. Beförderungszeit, Wendezeit oder Leerfahrtzeit, auf Basis von Regeln und Vorschriften definiert [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 85–89]. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Fahrzeit [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 89–92]. Die Fahrzeit einer Linie wird bei der Betriebsdurchführung oder bei einer Testfahrt gemessen und statistisch ausgewertet [Schnieder 2018, S. 89–92; Kirchhoff 2002, S. 139–146]. Auf dieser Grundlage wird die Sollfahrzeit ermittelt [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 89–92; Kirchhoff 2002, S. 140–146]. In Kombination mit der Kapazitätsplanung und den daraus resultierenden Taktzeiten werden die Ergebnisse in einem Fahrplan pro Linie zusammengefasst [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 78–92; Hartl 2020, S. 50–55; Kirchhoff 2002, S. 139–146]. Dabei wird sich an unterschiedlichen Zielkonzepten, wie z. B. Taktfahrplan, Rendezvousfahrplan oder integriertem Taktfahrplan, orientiert [Schnieder 2018, S. 101–104; Farina 2018, S. 12–15; Hartl 2020, S. 53–55].

Tabelle 24: Arbeitsschritte und Methoden der Fahrlagenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 77–104; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 139–151]

Fahrlagenplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Definition der Zeitanteile des Fahrplans	Ableitung von Zeitanteilen aus Regelwerken (FGSV, VDV).
2	Fahrzeitermittlung pro Abschnitt und Linie (Sollfahrzeit)	Auf Basis von Berechnung oder Betriebsdurchführung mit anschließender Auswertung.
3	Fahrplanerstellung pro Linie	Auf Basis der Zielgrößen mit verschiedenen Methoden: Synchronisation individueller Fahrten, Quadratic Semi-Assignment Problem und Periodic Event Scheduling Problem (PESP).
4	Anschlussplanung	Vergleich der Fahrpläne zweier Linien und Berechnung einer Soll-Versatzzeit an Umsteigehalttestellen.
5	Anpassung der einzelnen Fahrpläne	Keine Methoden
6	Ermittlung und Bewertung der Auswirkungen	Bewertung der Anschlussplanung anhand der definierten Zielgrößen.

Neben den Sollfahrzeiten und den Ergebnissen der Kapazitätsplanung wird die Erstellung des Fahrplans an den oben genannten Zielgrößen ausgerichtet [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Schnieder 2018, S. 89–92]. Da diese Zielgrößen divergent sind, wird die Lösung mit Optimierungsverfahren berechnet [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Hartl 2020, S. 50–58; Kirchhoff 2002, S. 139–149]. Zur Optimierung können die drei Verfahren „Synchronisation individueller Fahrten“, „Quadratic Semi-Assignment Problem“ und „PESP“ eingesetzt werden [Guihaire und Hao 2008, S. 1255–1261; Hartl 2020, S. 55–58]. Abschließend wird der Systemtakt aus der Kapazitätsplanung genutzt, um die Fahrplanzeiten zu definieren und die Merkbarkeit für den Fahrgast zu erhöhen [Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 58–60].

Im vierten Schritt werden die Anschlüsse zwischen den Linien geplant [Schnieder 2018, S. 92–94; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.]. Ziel der Anschlussplanung ist es, betriebliche Randbedingungen (z. B. Länge der Halttestellen und Fahrzeugstellplätze) zu berücksichtigen, die Zuverlässigkeit der Betriebsabwicklung zu erhöhen und die zusätzliche Verlängerung der Gesamtreisezeit und der Umsteigewege zu minimieren [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 92–94; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.]. Da beim Umsteigen mindestens zwei Linien aufeinander abgestimmt werden müssen, wird eine Versatzzeit ermittelt, um die Anschlusssicherheit zu gewährleisten [Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 97f.; Liu et al. 2021, S. 1–3]. Analog zur vorherigen

Methodik werden die Fahrzeiten von zwei Linien gemessen und „Soll-Versatzzeiten“ ermittelt [Schnieder 2018, S. 97f.]. Die Soll-Versatzzeiten werden anschließend an den Umsteigepunkten in den Fahrplan aufgenommen, woraufhin dieser aktualisiert wird [Schnieder 2018, S. 97f.]. Abschließend werden die Auswirkungen der Fahrlagenplanung anhand der Zielgrößen ermittelt und bewertet [Kirchhoff 2002, S. 150]. Der Fahrplan stellt den Übergang von der Verkehrsplanung zur Betriebsplanung dar, auf die im nächsten Schritt eingegangen wird [Schnieder 2018, S. 16f.].

Wird ein automatisierter Bus flexibel (On-Demand) eingesetzt, wird entweder eine fahrplanmäßige oder eine nicht fahrplanmäßige Betriebsweise ausgewählt [Schmidt und Schöbel 2015, S. 76–87]. Für fahrplanmäßige Angebote wird die Vorgehensweise analog zum klassischen Linienverkehr durchgeführt. Jedoch können die Fahrpläne und Fahrzeiten nicht exakt berechnet werden, da die Haltestellen nur bei Bedarf angefahren werden [Salicrú et al. 2011, S. 721–733]. Bei einem nicht fahrplanmäßigen Betrieb wird kein Fahrplan erstellt, sondern ein Betriebszeitraum festgelegt. In diesem Fall würde sich das Verfahren zur Fahrplanerstellung grundlegend ändern, da weder ein Fahrplan erstellt noch die Anschlussplanung ausgearbeitet werden.

Unter der Annahme, dass ein Fahrplan erstellt werden muss, bringt die Fahrlagenplanung für automatisierte Busse keine neuen Arbeitsschritte mit sich. Einige Arbeitsschritte werden jedoch angepasst und neue Eingangsdaten berücksichtigt (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Eingangsdaten und Ergebnisse der Fahrlagenplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 332–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 91–94; Schnieder 2018, S. 77–104; Guihaire und Hao 2008, S. 1254f.; Hartl 2020, S. 50–60; Kirchhoff 2002, S. 139–151]

Fahrlagenplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Planungsziele / Entwurfsziele • Verkehrswegenetz (auch für automatisierte Busse) inkl. zulässiger Geschwindigkeiten und Trassenverlauf • Liniennetz • Taktzeiten • Anzahl, Art, Größe der Fahrzeuge • Betriebskosten der Linien (inkl. Infrastrukturkosten) • Verkehrsnachfrage • Querschnittsbelastung • Haltestellenbelastung • Leistungsdaten von konventionellen und automatisierten Bussen • Erfahrungswerte beim Einsatz automatisierter Busse (z. B. Fahrzeiten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrplan für das Liniennetz • Fahrplan pro Linie • Busankunfts- und Busabfahrtszeiten pro Haltestelle • Zeitanteile im Fahrplan

In Bezug auf den zweiten Arbeitsschritt wird auch für den automatisierten Bus empfohlen, die Fahrzeit zu messen, da die Sensoren häufiger Hindernisse erkennen, die zu außerplanmäßigen Stopps führen können und die Fahrzeit verlängern. Sollte ein automatisierter Bus zur Verfügung stehen, wird eine Testfahrt durchgeführt und die Fahrzeit gemessen. Sofern kein Fahrzeug vorhanden ist, wird die Fahrzeit anhand der Erfahrungen des Herstellers und anderer Betriebe mit automatisierten Bussen bestimmt. Darüber hinaus werden aufgrund des Einsatzes automatisierter Busse neue Eingangsdaten (Verkehrswegenetz und Fahrzeugleistung) in die Bewertung der Fahrpläne (dritter Arbeitsschritt) einbezogen.

Dies wird am folgende Beispiel von Schmidt und Schöbel erläutert [Schmidt und Schöbel 2015, S. 76–87]. Für die Fahrplanerstellung wird die Methodik des „PESP“ genutzt, die es ermöglicht, die Routenwahl integriert zu berücksichtigen (Formel 3) [Schmidt und Schöbel 2015, S. 76–87; Hartl 2020, S. 56f.]. Die Gesamtfahrzeit ($cTTF(\pi)$) ergibt sich aus der Summe der Reisezeiten eines Fahrgastes ($\pi_j - \pi_i$, wobei π ein Fahrplan und i und j Aktivitäten der gesamten Aktivitäten A_{op} sind), multipliziert mit dem Gewicht jeder Aktivität ($w_{(i,j)}$) [Schmidt und Schöbel 2015, S. 78–80].

$$(3) \quad cTTF(\pi) = \min \sum_{(i,j) \in A_{op}} w_{(i,j)} (\pi_j - \pi_i)$$

Formel 3: Berechnung der Gesamtfahrzeit mit der Methode PESP [Schmidt und Schöbel 2015, S. 79f.]

Der Einsatz von automatisierten Bussen hat verschiedene Auswirkungen auf die Formel 3. Aufgrund der geringen Betriebskosten (siehe Abschnitt 2.4.2) bietet sich die Möglichkeit, mehr Fahrzeuge einzusetzen und somit die Taktfrequenz zu erhöhen. Durch geringere Wartezeiten würde sich die Reisezeit der Fahrgäste und auch die Gesamtreisezeit verringern. Falls automatisierte Busse jedoch mit geringeren Geschwindigkeiten als konventionelle Busse fahren (siehe Abschnitt 3.3.2), erhöht sich die Reisezeit. Unabhängig davon ist der Einsatz von automatisierten Bussen personalunabhängig, weshalb die Busse auch in verkehrsschwachen Zeiten (z. B. nachts) mit höheren Taktfrequenzen eingesetzt werden können. Diese durch den Einsatz von automatisierten Bussen veränderten Bedingungen finden im Fahrplan entsprechende Berücksichtigung.

5.3.4 Fahrzeugeinsatzplanung

Auf Basis des Fahrplans ist es die Aufgabe der Fahrzeugeinsatzplanung, die einzelnen Fahrten mit Fahrzeugumläufen zu verknüpfen [Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 107f.; Guihaire und Hao 2008, S. 1255]. Im ÖPNV beschreibt ein Fahrzeugumlauf die Verbindung einzelner Fahrten eines Fahrzeugs vom Beginn bis zum Ende des Betriebstages [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Schnieder 2018, S. 107f.]. Bei der Umlaufplanung wird zwischen liniengebundenen (Endhaltestelle = Starthaltestelle) und nicht-liniengebundenen (Umsetzung auf eine andere Linie) Umläufen unterschieden [Farina 2018, S. 15–18; Hartl 2020, S. 61f.]. Die Umsetzung erhöht die Flexibilität des Verkehrsunternehmens, da der Personaleinsatz besser geplant werden kann [Schnieder 2018, S. 107–113; Hartl 2020, S. 60–62]. Allerdings verursachen Leerfahrten zusätzliche Kosten [Hartl 2020, S. 62]. Daher ist es das Ziel der

Fahrzeugeinsatzplanung, den Fahrplan mit der geringstmöglichen Anzahl von Fahrzeugen zu bedienen, wobei folgende Ziele verfolgt werden:

- Wirtschaftliche Optimierung (Gesamtzahl der eingesetzten Fahrzeuge, Maximierung der Fahrzeuglaufzeiten, Minimierung von Anzahl und Länge der Leerfahrten und Minimierung der Infrastrukturkosten beim Einsatz von automatisierten Bussen)
- Stabilität der Betriebsdurchführung (Wiederholbarkeit der betrieblichen Abläufe, Beachtung von Betriebsreserven und Reduzierung von Störungen) [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 107–110; Farina 2018, S. 15–18; Hartl 2020, S. 60]

Beide Ziele sind unter Berücksichtigung der betrieblichen und technischen Rahmenbedingungen zu optimieren [Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 113–116]. Dazu gehört, den Beförderungsvorgängen geeignete Verkehrsmittel zuzuordnen (Kapazität), die Länge der Umläufe an die Tank- und Ladevorgänge anzupassen, zusätzliche Tank- oder Ladezeiten zu berücksichtigen und die Kapazität von Betriebshöfen im Hinblick auf Abstellplätze zu beachten [Schnieder 2018, S. 113–116]. Des Weiteren wird bei der Planung berücksichtigt, dass der Fahrplan und die Wartungsintervalle eingehalten und verschiedene Fahrzeugtypen eingesetzt werden müssen [Ceder und Wilson 1986, S. 331–336; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Kirchhoff 2002, S. 151–153]. Das Vorgehen der Fahrzeugeinsatzplanung ist in Tabelle 26 abgebildet.

Tabelle 26: Arbeitsschritte und Methoden der Fahrzeugeinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–336; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 107–126; Farina 2018, S. 15–18; Hartl 2020, S. 60–62; Chen et al. 2021, S. 11–19; Kirchhoff 2002, S. 151–153]

Fahrzeugeinsatzplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Qualitative Planung des Fahrzeugeinsatzes	Feststellung der technischen Randbedingungen der Fahrzeuge. Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Machbarkeit und der Infrastrukturkosten.
2	Quantitative Planung des Fahrzeugeinsatzes: <ul style="list-style-type: none"> • Verknüpfung einzelner Fahrten • Erstellung eines Wagenlaufplans • Berechnung von Fahrzeuganzahl und Einsatzkurve 	Quantitative Ermittlung des Fahrzeugeinsatzes anhand der Zielgrößen unter Verwendung von Optimierungsmethoden (u. a. von Bunte und Kliewer oder aus dem Operation-Research Bereich).
3	Quantitative Planung der Fahrzeugreserven	Berechnung der Betriebs- und Werkstattreserve auf Basis des Regelwerks vom VDV.

Der erste Arbeitsschritt der Fahrzeugeinsatzplanung beinhaltet die qualitative Planung des Fahrzeugeinsatzes, bei welcher die technischen Randbedingungen der Fahrzeuge Einsatzprofilen zugeordnet werden [Schnieder 2018, S. 110–116]. Die technischen Randbedingungen werden sowohl bei schienengebundenen Fahrzeugen als auch beim Busverkehr berücksichtigt [Schnieder 2018, S. 110–116]. Einflussfaktoren wie Kurvenlaufeigenschaften, Lichtraumprofil, Fahrzeugbreite, zulässiges Gesamtgewicht sowie Länge, Ladezyklen und Reichweite der Busse bestimmen, welche Straßen von konventionellen Bussen befahren werden können [Schnieder 2018, S. 110–116]. Weiterhin wird beachtet, ob die Fahrzeuge eine Genehmigung für den Betrieb mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 km/h besitzen und ob Befahrungseinschränkungen aufgrund der Luftreinhaltung vorliegen [Schnieder 2018, S. 115f.].

Im zweiten Schritt erfolgt die quantitative Planung des Fahrzeugeinsatzes [Schnieder 2018, S. 116–118]. Dabei werden einzelne Fahrten über Verknüpfungselemente verbunden und ein Wagenlaufplan erstellt, der mehrere Kurse enthält [Schnieder 2018, S. 116–118]. Ein Kurs beschreibt sämtliche Teile der Fahrt eines Fahrzeugs vom Verlassen des Betriebshofs bis zu seiner Rückkehr [Schnieder 2018, S. 116]. Der Wagenablaufplan wird grundsätzlich nicht verändert, aber die Zuordnung der Fahrzeuge zu den Kursen kann täglich variieren [Schnieder 2018, S. 116f.]. Die Anzahl der Fahrzeuge auf einer Linie wird auf der Grundlage der Umlaufzeit einer Linie und der Taktfrequenz bestimmt, die für das gesamte Liniennetz addiert werden [Schnieder 2018, S. 116–118]. Als Ergebnis dieser Berechnungen resultiert eine Einsatzkurve über den Tagesverlauf, aus welcher die Belastungsspitzen abgeleitet werden können [Schnieder 2018, S. 117f.]. In diesem Arbeitsschritt werden Optimierungsverfahren (z. B. von Bunte und Kliewer (2009) oder Ansätze aus dem Bereich des Operations Research) eingesetzt, um die gegenläufigen Ziele der Wirtschaftlichkeit und der Betriebsstabilität unter Berücksichtigung der betrieblichen und technischen Randbedingungen bestmöglich zu erreichen [Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Hartl 2020, S. 60–62; Bunte und Kliewer 2009, S. 299–317; Pätzold et al. 2017, 17:1-17:8].

Um die Zuverlässigkeit im Betriebsprozess zu gewährleisten, werden zusätzliche Fahrzeugreserven vorgehalten, die abschließend geplant werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 119–126]. Aus wirtschaftlichen Gründen sollten nur so viele Fahrzeuge als Reserve angeschafft werden, wie nötig sind [Schnieder 2018, S. 119–122]. Die Fahrzeugreserve teilt sich in die Betriebsreserve (Fahrzeugbestand für unvorhergesehene Ausfälle und Betriebsstörungen) und Werkstattreserve (Fahrzeugbestand für geplante Instandhaltungen) auf [VDV 2019b, S. 16–24]. Beide Reservearten werden getrennt voneinander anhand eines Regelwerks des VDV berechnet [VDV 2019b, S. 16–29].

Der Einsatz von automatisierten Bussen hat einen Einfluss auf den allgemeinen Ablauf der Fahrzeugeinsatzplanung sowie auf die Ausgestaltung der einzelnen Arbeitsschritte, die Eingangsdaten und die Ergebnisse (siehe Tabellen 26 und 27). Die qualitative Bewertung des Fahrzeugeinsatzes von automatisierten Bussen ist für die Netzplanung, Kapazitätsplanung und Fahrlagenplanung essenziell, weshalb diese bereits im Rahmen der Verkehrswegeplanung (Bewertungsverfahren)

durchgeführt wurde. Diese Ergebnisse, welche die Eignung von Strecken für automatisierte Busse zeigen, werden an dieser Stelle erneut verwendet.

Tabelle 27: Eingangsdaten und Ergebnisse der Fahrzeugeinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–336; Desaulniers und Hickman 2007, S. 94–100; Schnieder 2018, S. 107–126; Farina 2018, S. 15–18; Hartl 2020, S. 60–62; Chen et al. 2021, S. 11–19; Kirchhoff 2002, S. 151–153]

Fahrzeugeinsatzplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrplan mit Linienzuordnung • Vorgegebene zeitliche Puffer für Verspätungen • Anforderungen an die Umlaufplanungsmethode (Umsetzfahrten erlaubt, maximale Umsetzentfernung oder Wartezeiten) • Zeitanteile im Fahrplan • Technische Randbedingungen konventioneller und automatisierter Busse • Verkehrswegenetz für konventionelle und automatisierte Busse • Kosten, Aufwand und gesellschaftliche Konsequenzen zur Erschließung pro Straße für den Einsatz auto. Busse • Fahrzeugkosten (fix und variabel inkl. Kraftstoffverbrauch/-kosten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Umlaufpläne / Wagenlaufpläne • Anzahl der Fahrzeuge pro Betriebstag • Kosten der Fahrzeuge (fix und variabel) • Kraftstoffverbrauch und THG-Emissionen pro Betriebstag (auf Basis der Liniennetzplanung) • Einsatzkurve pro Tag • Betriebs- und Werkstattreserve • Anzahl der Umsetzfahrten, Servicezeiten, Leerzeiten, Servicekilometer, Leerkilometer

Auf die quantitative Planung des Fahrzeugeinsatzes (zweiter Arbeitsschritt) hat der Einsatz von automatisierten Bussen einen großen Einfluss, da keine Flexibilität hinsichtlich des Fahrereinsatzes berücksichtigt werden muss. Dadurch kann mit automatisierten Bussen theoretisch ein komplett linienbezogener Umlaufplan umgesetzt werden. Dementsprechend werden keine Umsetzungen und keine Leerfahrten aufgrund von Fahrerwechseln, sondern höchstens aufgrund von Taktwechseln, benötigt. Dies vereinfacht den gesamten Prozess der Fahrzeugeinsatzplanung und trägt zur Kostensenkung bei. Inwieweit dies die mathematische Optimierung beeinflusst wird am folgenden Beispiel erläutert. Bunte und Kliewer haben ein Zuordnungsmodell entwickelt, das die Summe der Betriebskosten (c_{ij}) pro Verbindung (x_{ij}) zwischen Fahrt i und Fahrt j minimiert (siehe Formel 4) [Bunte und Kliewer 2009, S. 303–309].

$$(4) \quad \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Formel 4: Optimierung der Fahrzeugeinsatzplanung [Bunte und Kliewer 2009, S. 303]

Beim Einsatz von automatisierten Bussen wird kein Fahrpersonal eingesetzt, weshalb die Betriebskosten reduziert werden, wodurch auch gemäß der Formel 4 die Gesamtkosten sinken. Anders interpretiert könnten bei gleichbleibenden Gesamtkosten mehr Verbindungen (mehr Fahrzeuge) eingesetzt werden.

Werden konventionelle oder auch automatisierte Busse im Flächenbetrieb ohne Fahrplan eingesetzt, können keine Wagentouren definiert werden. In diesem Fall wird nur die Anzahl der Fahrzeuge auf Basis der Kapazitätsplanung verwendet. Ein Fahrerwechsel wird bei konventionellen Bussen berücksichtigt, während dies bei automatisierten Bussen entfällt. Durch die Umlaufplanung und die Möglichkeit der Bündelung von Fahrten können jedoch im Flächenbetrieb Leerfahrten minimiert werden [Chen et al. 2021, S. 15].

5.3.5 Personaleinsatzplanung

Nachdem die Fahrzeuge dem Fahrplan zugeordnet wurden, wird in diesem Schritt das Personal dem Fahrplan zugewiesen und Dienstpläne sowie Dienstreihenfolgepläne erstellt [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Schnieder 2018, S. 129–152; Guihaire und Hao 2008, S. 1255]. Der Dienstplan ist das zentrale Element für die Mitarbeiter des Verkehrsunternehmens und wird oft in langen Verhandlungen zwischen Betriebsrat und Unternehmensleitung beschlossen [Schnieder 2018, S. 129]. Im Rahmen der Angebotsplanung wird bei der Personaleinsatzplanung zwischen dem Fahrpersonal und dem stationären Personal, wie z. B. Mitarbeitern der Leitstelle oder der Werkstatt, unterschieden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104; Schnieder 2018, S. 129]. Ziel der Personaleinsatzplanung ist es, den Fahrplan mit einer minimalen Anzahl an Fahrern zu erfüllen [Schnieder 2018, S. 129–133; Kirchhoff 2002, S. 153f.]. Zu diesem Zweck werden folgende Ziele in die Bewertung einbezogen:

- Effizienz des Personaleinsatzes (minimaler Arbeitnehmerbedarf, Minimierung der Arbeitskosten, Flexibilisierung der zulässigen Arbeitszeiten)
- Minimierung von Störungen im Betriebsablauf
- Zuordnung des geeigneten Personals zu den Dienstplänen (allgemeine Fachkenntnisse, fahrzeugbezogene Fachkenntnisse, Streckenkenntnis)
- Schaffung eines geeigneten Arbeitsumfelds (arbeitsmedizinische Zielkriterien, soziale Einflussgrößen)
- Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104; Schnieder 2018, S. 129–134; Hartl 2020, S. 62f.]

Die Effizienz des Personaleinsatzes wird anhand der Personalkosten gemessen [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Schnieder 2018, S. 130]. Diese können reduziert werden, indem die Mitarbeiteranzahl oder die Arbeitskosten verringert sowie Arbeitszeiten flexibilisiert werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104; Schnieder 2018, S. 130]. Die Aufteilung eines Mitarbeiters auf verschiedene Dienste hat Vorteile in Bezug auf die Flexibilität [Schnieder 2018, S. 129–131]. Jedoch sind die Wechsellpunkte störanfällig, da Verspätungen auf andere Linien übertragen werden oder die Fahrzeugübergabe nicht sorgfältig genug stattfindet [Schnieder 2018, S. 130f.]. Aus diesem Grund sind Störungen zu minimieren [Schnieder 2018, S. 130f.]. Für die Zuordnung eines Mitarbeiters zu einem Fahrzeug auf einer Linie sind allgemeine Kenntnisse über das Verkehrssystem, Fachkenntnisse über das Fahrzeug und Streckenkenntnisse der Linie erforderlich [Schnieder 2018, S. 131–133; Farina 2018, S. 19]. Bei der Gestaltung der

Arbeitsumgebung werden arbeitsmedizinische Zielkriterien und soziale Einflussgrößen berücksichtigt [Schnieder 2018, S. 132–134]. Im Rahmen der Personaleinsatzplanung sind eine Vielzahl gesetzlicher Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Zu diesen zählen u. a. die Arbeitsstättenverordnung, das Arbeitsschutzgesetz, das Arbeitssicherheitsgesetz sowie das Arbeitszeitgesetz [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–104; Schnieder 2018, S. 132–134; Farina 2018, S. 19].

Die Planung des Personaleinsatzes für den Personenverkehr gliedert sich in drei Schritte (siehe Tabelle 28) [Schnieder 2018, S. 136–148].

Tabelle 28: Arbeitsschritte und Methoden der Personaleinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 129–152; Farina 2018, S. 19; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1255; Hartl 2020, S. 62f.; Kirchhoff 2002, S. 151–156]

Personaleinsatzplanung		
Nr.	Arbeitsschritte	Methoden
1	Bildung einzelner Dienste	Festlegung des Dienstplans auf der Grundlage der fünf Kennzahlen durch Nutzung von Algorithmen (bspw. Borndörfer et al.).
2	Dienstreihenfolgeplanung	Festlegung eines Turnusmusters und der Übergänge zwischen Dienstarten.
3	Anpassung der Personalpräsenz an die Umlaufmasse	Angleichung durch Variation innerhalb eines Turnusmusters oder durch Überlagerung verschiedener Turnusmuster.
4	Planung des Personaleinsatzes für die Instandhaltung (auch für automatisierte Busse)	Für die Instandhaltung: Berechnung des Aufwands und Ableitung eines Ressourcen- und Terminplans zur Bestimmung des qualitativen und quantitativen Personaleinsatzes.
5	Planung des Personaleinsatzes in der Leitstelle (vor allem bei automatisierten Bussen) <ul style="list-style-type: none"> • Aufwand bestimmen • Bildung einzelner Dienste • Dienstreihenfolgeplanung • Anpassung der Personalpräsenz an die Umlaufmasse 	Für die Planung des Personaleinsatzes werden die Methoden der ersten drei Arbeitsschritte der Personaleinsatzplanung verwendet.

Zunächst werden einzelne Dienste durch die Festlegung von Ort und Zeit des Schichtbeginns und -endes gebildet [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 136–140; Hartl 2020, S. 62f.]. Dabei werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich der täglichen und wöchentlichen Arbeitszeit sowie der Ruhe- und Pausenzeiten berücksichtigt [Ceder und Wilson 1986, S. 331–333; Schnieder 2018, S. 136–138]. Dienste können u. a. in Früh-, Spät- oder Nachtdienste

sowie in durchgehende oder geteilte Dienste eingeteilt werden [Schnieder 2018, S. 137; Suhl et al. 2007, S. 452]. Weiterhin ist die Gestaltung der Fahrtunterbrechungen eine Variable, die bei der Dienstplanung verändert werden kann [Schnieder 2018, S. 137]. Dies ist aber nur unter Beachtung der Fahrzeugumläufe möglich [Schnieder 2018, S. 137; Kirchhoff 2002, S. 154].

Der Dienstplan, der anonyme Dienste enthält, wird in Bezug auf die oben genannten Zielgrößen optimiert [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 138–140; Farina 2018, S. 19; Hartl 2020, S. 62f.]. Eine Lösung kann durch algorithmische Ansätze, z. B. durch Borndörfer et al., errechnet werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Hartl 2020, S. 63; Borndörfer et al. 2008b, S. 127–141]. Das Problem der Dienstplanung kann als ein Set-Partitioning-Problem aufgefasst werden, bei dem die Kosten eines Dienstes (c_j) mit der Leistung eines Dienstes (x_j) multipliziert und über alle Dienste j summiert werden (siehe Formel 5) [Borndörfer et al. 2008b, S. 137].

$$(5) \quad \min \sum_{j \in J} c_j x_j$$

Formel 5: Set-Partitioning-Problem der Dienstplanung [Borndörfer et al. 2008b, S. 137]

Am Ende der Dienstplangestaltung können unterschiedliche Kennzahlen wie bspw. Dienstplanzeit, Fahrzeugumlaufzeit, technologisch bedingte Dienstplanzeit, Lohnstunden oder der Dienstplanwirkungsgrad ausgewertet werden [Schnieder 2018, S. 138–140].

Das Verkehrsunternehmen bietet in der Regel eine Betriebsleistung an sieben Tagen in der Woche an. Da die Mitarbeiter jedoch nur an fünf Tagen in der Woche arbeiten dürfen, wird im zweiten Schritt eine Dienstreihenfolge mit persönlichen Wochendiensten geplant, damit die Arbeitszeiten der Mitarbeiter am Wochenende und in der Woche gleichmäßig verteilt werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 140–143; Farina 2018, S. 19; Guihaire und Hao 2008, S. 1255]. Zu diesem Zweck wird ein Diensturnus festgelegt, welcher als Turnusplan in einen Kalender übertragen wird [Schnieder 2018, S. 141; Kirchhoff 2002, S. 155f.]. Beim Übergang zwischen Früh-, Spät- und Nachtschichten wird zwischen Vorwärtsrollierung (Früh \rightarrow Spät) oder Rückwärtsrollierung (Spät \rightarrow Früh) differenziert, welche in diesem Schritt festgelegt wird [Schnieder 2018, S. 142]. Es existieren drei Arten von Dienstreihenfolgeplänen: Feste Dienstreihenfolgepläne, Wahldienstpläne und Wunschdienstpläne [Schnieder 2018, S. 142f.].

Im dritten Schritt wird die Personalpräsenz pro Schicht an die Nachfrage der Bevölkerung angepasst [Schnieder 2018, S. 144–148]. Dies kann einerseits erreicht werden, indem der Dienstplan in Bezug auf die Arbeitstage (z. B. höhere Personalpräsenz unter der Woche als am Wochenende) oder in Bezug auf die Dienstzeit (z. B. höhere Personalpräsenz am Morgen als am Mittag) variiert wird, um Spitzen im Arbeitsverkehr auszugleichen [Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 144–146]. Als zweite Möglichkeit kann die Personalpräsenz durch Überlagerung verschiedener Turnusmuster, zu denen die Mitarbeiter unterschiedlich zugeteilt werden, angeglichen werden [Schnieder 2018, S. 147f.].

Zuletzt wird das stationäre Personal für die Instandhaltung festgelegt [Desaulniers und Hickman 2007, S. 111–117; Schnieder 2018, S. 148–152]. Für die Berechnung

des Personaleinsatzes wird der anfallende Aufwand auf Basis von Beobachtungen oder Benchmarks ermittelt und anschließend in einen Ressourcen- und Zeitplan übertragen [Desaulniers und Hickman 2007, S. 111–117; Schnieder 2018, S. 148–152]. Daraus wird der qualitative und quantitative Personalbedarf berechnet [Desaulniers und Hickman 2007, S. 111–117; Schnieder 2018, S. 148–152]. Zusammenfassend zeigt Tabelle 29 die Eingangsdaten und Ergebnisse der Personaleinsatzplanung.

Tabelle 29: Eingangsdaten und Ergebnisse der Personaleinsatzplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Ceder und Wilson 1986, S. 331–335; Desaulniers und Hickman 2007, S. 100–109; Schnieder 2018, S. 129–152; Farina 2018, S. 19; Guihaire und Hao 2008, S. 1251–1255; Hartl 2020, S. 62f.; Kirchhoff 2002, S. 151–156]

Personaleinsatzplanung	
Eingangsdaten	Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrpläne • Umlaufpläne / Wagenlaufpläne • Anzahl der Fahrzeuge • Rechtliche Rahmenbedingungen für Arbeits-, Lenk- und Pausenzeiten • Rechtliche Rahmenbedingungen zum Einsatz automatisierter Busse • Vorgaben an Wechsel- und Fahrtunterbrechungen • Personalkostensatz • Abschätzung des Arbeitsaufwands für die Überwachung automatisierter Busse 	<ul style="list-style-type: none"> • Personalkosten pro Betriebstag • Dienstplan für das Fahrpersonal • Turnusplan für das Fahrpersonal • Dienstreihenfolgeplan für das Fahrpersonal • Dienstplan für das stationäre Personal (Instandhaltung und Leitstelle) • Turnusplan für das stationäre Personal (Instandhaltung und Leitstelle) • Dienstreihenfolgeplan für das stationäre Personal (Instandhaltung und Leitstelle)

Bei der Personaleinsatzplanung existiert ein großer Unterschied zwischen automatisierten und konventionellen Bussen. Die ersten drei Arbeitsschritte werden ausschließlich für konventionelle Busse durchgeführt, da automatisierte Busse keine Fahrer benötigen. Aus diesem Grund werden keine Dienste und keine Dienstreihenfolgen geplant. Formel 5 von Borndörfer et al. zeigt dabei, dass keine Kosten für Fahrer (ggf. aber für stationäres Personal in der Leitstelle) anfallen und dass die mathematische Optimierung dadurch minimiert wird [Borndörfer et al. 2008b, S. 137].

Hinsichtlich des Einsatzes automatisierter Busse werden in der Literatur keine Aussagen getätigt, die darauf hindeuten, dass häufigere Reparaturen und Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind. Nichtsdestotrotz können Reparaturen und Instandhaltungsmaßnahmen den Bordcomputer oder die Sensoren betreffen, weshalb speziell geschultes Personal erforderlich ist. In diesem Fall verändert sich demnach nicht die quantitative aber die qualitative Personalanforderung für das stationäre Personal in der Instandhaltung (vierter Arbeitsschritt).

Als neuer fünfter Arbeitsschritt wird die Personaleinsatzplanung von stationärem Personal für die Leitstelle durchgeführt, da sich dort durch den Betrieb

automatisierter Busse die Arbeitsbelastung verändert und höhere Personalkapazitäten benötigt werden [Desaulniers und Hickman 2007, S. 111–117; Schnieder 2018, S. 129–131; Kettwich und Dreßler 2020, S. 69–72; Zhang 2020, S. 11347–11354]. Für die Berechnung des stationären Personals in der Leitstelle wird das gleiche dreistufige Vorgehen wie für das Fahrpersonal konventioneller Busse verwendet. Jedoch erfolgt die Dienstplanung nicht in Bezug auf einzelne Fahrumläufe, sondern in Bezug auf den Arbeitsaufwand über den gesamten Betriebszeitraum. Dieser muss vom Leitstellenpersonal abgedeckt werden, damit die Fahrzeuge jederzeit überwacht werden. Dies ist besonders beim Einsatz automatisierter Busse ein wichtiger Aspekt, da diese Fahrzeuge zu jeder Tages- und Nachtzeit eingesetzt werden können. Der anfallende Arbeitsaufwand wird entweder während des Betriebs erfasst oder auf Basis von Erfahrungswerten, ggf. von anderen Projekten, geschätzt. Auf dieser Basis werden die Dienste gebildet und anhand der fünf genannten Zielgrößen (Effizienz des Personaleinsatzes, Minimierung von Störungen im Betriebsablauf, Zuordnung des geeigneten Personals zu den Dienstplänen, Schaffung eines geeigneten Arbeitsumfelds und Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen) optimiert. Die Dienstreihenfolgeplanung und die Anpassung der Personalpräsenz an die Umlaufmasse werden analog zum Fahrpersonal für konventionelle Busse durchgeführt.

5.3.6 Abschätzung der Auswirkungen und Variantenbewertung

Zu Beginn von Abschnitt 5.3 wurde, analog zu den Ausführungen der FGSV, erwähnt, dass im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung mehrere Handlungskonzepte entwickelt werden [FGSV 2018a, S. 25–33]. Ein Handlungskonzept besteht dabei jeweils aus einem Maßnahmenplan mit Liniennetzplan, Kapazitätsplan, Fahrplan, Fahrzeugeinsatzplan und Personaleinsatzplan. Auf Basis der Maßnahmenpläne werden im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung die Auswirkungen abgeschätzt und die Varianten bewertet. Diese beide Aspekte werden im Folgenden erläutert.

Für jeden Maßnahmenplan werden im zweiten Schritt der Maßnahmenuntersuchung die verkehrlichen, sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen bestimmt [FGSV 2018a, S. 29–31; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 3]. Die Beschreibung der einzelnen Schritte (Abschnitt 5.3.1 bis 5.3.5) der Angebotsplanung zeigt, dass in jedem Schritt eine Optimierung hinsichtlich der jeweiligen Zielgrößen erfolgt. Dadurch werden die Auswirkungen kontinuierlich abgeschätzt und bewertet. Tabelle 30 zeigt zur besseren Übersicht alle Zielgrößen, nach denen sich in den einzelnen Schritten orientiert wird. Dabei wird ersichtlich, dass teilweise in den einzelnen Arbeitsschritten, aber vor allem über alle Schritte der Angebotsplanung hinweg, betriebswirtschaftliche Zielgrößen, die Zuverlässigkeit der Betriebsabwicklung, die Verbesserung des Angebots für die Fahrgäste und die Randbedingungen gegeneinander abgewogen werden müssen. Eine weitere Darstellung mit den Bestandteilen der Zielgrößen ist in Anhang A.6 dargestellt.

Tabelle 30: Übersicht der Zielgrößen des Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse

Zielgrößen				
Schritte	Betriebswirtschaftlich	Zuverlässigkeit der Betriebsabwicklung	Verbesserung des Angebots für Fahrgäste	Betriebliche, techn. und gesetzl. Randbedingungen
Netzplanung (Haltestellenplanung)	<ul style="list-style-type: none"> Erschließungskosten 		<ul style="list-style-type: none"> Erschließungsqualität Reisezeit 	
Netzplanung (Linienplanung)	<ul style="list-style-type: none"> Wirtschaftlichkeit der Betriebsführung 		<ul style="list-style-type: none"> Verbessertes Verkehrsangebot Steigerung Betriebsqualität 	
Netzplanung (Linienetzplanung)	<ul style="list-style-type: none"> Wagenkilometer Dienstplanstunden 		<ul style="list-style-type: none"> Flächen-Erschließungswirkung Mittlere Umsteigehäufigkeit 	
Kapazitätsplanung	<ul style="list-style-type: none"> Betriebsmitteleinsatz 		<ul style="list-style-type: none"> Fahrgastkomfort Sicherheit 	
Fahrlagenplanung (Fahrplan)	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeuganzahl Kapazitätsmaximierung 	<ul style="list-style-type: none"> Fahrplanstabilität 	<ul style="list-style-type: none"> Reisezeit / Fahrzeit Merkfähigkeit des Fahrplans 	<ul style="list-style-type: none"> Energiemanagement
Fahrlagenplanung (Anschlusspl.)		<ul style="list-style-type: none"> Zuverlässigkeit der Betriebsabwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> Gesamtreisezeit Umsteigewege 	<ul style="list-style-type: none"> Berücksichtigung betrieblicher Randbedingungen
Fahrzeugeinsatzplanung	<ul style="list-style-type: none"> Wirtschaftliche Optimierung 	<ul style="list-style-type: none"> Stabilität des Betriebs 		
Personaleinsatzplanung	<ul style="list-style-type: none"> Effizienz des Personaleinsatzes 	<ul style="list-style-type: none"> Störungen des Betriebsablaufs 		<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung geeigneten Personals zu den Umläufen Schaffung einer geeigneten Arbeitsumgebung Einhaltung gesetzlicher Vorschriften

Im vorgestellten Prozess der Angebotsplanung eignen sich drei Meilensteine, um Ergebnisse und Auswirkungen aufzulisten und diese mit politischen Entscheidungsträgern zu diskutieren. Der Abschluss der Netzplanung (Schritt 1) bietet sich für ein Zwischenfazit an, da das gesamte Liniennetz vorhanden ist. Ein zweites Zwischenfazit wird zudem nach der Erstellung des Fahrplan gezogen (Schritt 3). Eine Gesamtbetrachtung der Ergebnisse und Zielgrößen erfolgt nach Abschluss der Personaleinsatzplanung (Schritt 5), welcher den dritten Meilenstein darstellt.

Abschließend werden im dritten Schritt Handlungskonzepte, Planfälle und Szenarien bewertet. Die Aufgabe der Variantenbewertung besteht darin, die unterschiedlichen Handlungskonzepte mit ihren teilweise gegenläufigen Auswirkungen auf Basis der Ziele des Verkehrsplanungsprozesses (Abschnitt 5.2) zu vergleichen, zu bewerten und zu priorisieren. In Abhängigkeit des Zielsystems werden die Handlungskonzepte hinsichtlich Aufwand, Dringlichkeit, zeitlicher Kriterien oder Realisierung priorisiert. Hierfür werden unterschiedliche Bewertungsverfahren (nicht-formalisiert, teil-formalisiert und formalisiert) angewendet. In diesem Zusammenhang wird der Fokus auf den Vergleich monetärer und nicht-monetärer Auswirkungen gelegt, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können (Abschnitt 5.4). [FGSV 2018a, S. 31–33; Pas 1995, S. 70–72; Meyer 2016, S. 4f.]

In Abschnitt 4.2.2 wurde dargestellt, dass Rückkopplungen zwischen den einzelnen Schritten der Angebotsplanung existieren. Beispielsweise besteht eine Rückkopplung zwischen der Haltestellen- und der Linienplanung. Es existieren aber auch Rückkopplungen in den einzelnen Schritten. Ein Beispiel ist die Kapazitätsplanung, die wiederholt durchgeführt wird, bis die Transportqualität und die Kapazität den vorgegebenen Zielen des Verkehrsplanungsprozesses entsprechen. Aus diesem Grund wird der gesamte Planungsprozess iterativ durchgeführt und alle Schritte ggf. häufige wiederholt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Berücksichtigung automatisierter Busses einen Einfluss auf die Abschätzung der Auswirkungen, aber keinen Einfluss auf die Variantenbewertung ausübt.

5.4 Abwägung und Entscheidung

Entscheidungslegitimierte Akteure aus der Politik, aus Gremien oder zuständigen Verwaltungsbehörden treffen auf Basis der erarbeiteten Konzepte eine Entscheidung. Diese Planungsphase wird in drei Schritten durchgeführt. Zuerst wird eine Einordnung vorgenommen, danach folgen Abwägung und Entscheidung. [FGSV 2018a, S. 34–36]

In Deutschland wird die Verkehrsplanung in verschiedene Ebenen (Bundesebene, Landesebene, Regionalebene und Kommunalebene) eingeteilt (siehe Abschnitt 4.1.2) [FGSV 2018a, S. 34]. Aufgrund dieser Abhängigkeiten wird das Vorhaben im ersten Schritt in der entsprechenden Ebene eingeordnet und über- bzw. untergeordnete Ebenen identifiziert [FGSV 2018a, S. 34]. Die Angebotsplanung im ÖPNV ist ein integraler Bestandteil der kommunalen Planung und wird durch den Nahverkehrsplan, den regionalen Verkehrsplan sowie den Landesverkehrsplan determiniert (siehe Abschnitt 4.1.2).

Im Rahmen der Abwägung wird zuerst überprüft, ob Eingriffe in grundgesetzlich geschützte Rechtsgüter, Eingriffe in die Natur oder das Klima sowie Belastungen durch die Umsetzung gerechtfertigt sind. Danach werden die zuvor erarbeiteten Handlungskonzepte und Variantenbewertungen zueinander in Beziehung gesetzt. Das bedeutet, dass die einzelnen Zielgrößen der Handlungskonzepte miteinander verglichen werden und geprüft wird, ob eine absolute oder relative Vorteilhaftigkeit gegenüber einer anderen oder allen Alternativen besteht. Weiterhin wird geprüft, ob Mindeststandards, wie die Erschließungsqualität oder die Reisezeit entsprechend der Vorgaben des VDV oder der FGSV eingehalten, und ob rechtliche Rahmenbedingungen (u. a. Arbeitszeit) berücksichtigt werden. Politische Institutionen und Akteure binden in dieser Phase die Öffentlichkeit ein, damit Transparenz über die Auswirkungen und Bewertungen gewährleistet wird. [FGSV 2018a, S. 34–36]

Anschließend wird die Entscheidung über die Umsetzung der Angebotsplanung getroffen, wobei auch eine Ablehnung oder eine Nachjustierung ein Ergebnis des Entscheidungsprozesses sein können. Die Entscheidung wird letztlich von der übergeordneten Genehmigungsbehörde geprüft und die Linienkonzession vergeben. [FGSV 2018a, S. 36]

Die Berücksichtigung automatisierter Busse hat keinen Einfluss auf den Ansatz der Entscheidungsfindung für diese Phase. Lediglich bei der Abwägung können neben den quantitativen Kriterien auch qualitative Kriterien in Bezug auf Technologieaffinität oder Marketingwirkungen berücksichtigt werden.

5.5 Umsetzung der Konzepte

Wenn der Einsatz einer oder mehrerer Linien mit konventionellen, in diesem Zusammenhang aber vor allem automatisierten Bussen genehmigt wird, erfolgt in der fünften Phase die Umsetzung. Umsetzung ist „die bauliche, betriebliche, organisatorische ... Realisierung des beschlossenen Handlungsprogramms“ [FGSV 2018a, S. 37]. Für eine erfolgreiche Umsetzung muss die Finanzierung gesichert sein. Dies ist im gesamten Verkehrsplanungsprozess zu berücksichtigen, vor allem da in zahlreichen Infrastrukturprojekten die Kosten unterschätzt werden. Weiterhin ist eine Zusammenarbeit zwischen der Projektorganisation und der zuständigen Verwaltung essenziell, da letztere über langjährige Erfahrung in Bezug auf die verkehrspolitischen Prozesse verfügen. Während der Umsetzungsphase ist es möglich, dass die ursprünglichen Ziele und Handlungsmaßnahmen modifiziert werden, da das Projektteam aber auch betroffene Bürger häufig nicht am vorherigen Planungsprozess beteiligt waren. Somit werden in der Umsetzungsphase ggf. neue Konzepte erarbeitet oder bestehende angepasst. Aus diesem Grund ist auch ein Scheitern des Projekts möglich. Um dies zu verhindern sollte das Projektteam möglichst nicht verändert und die Personen, die sich an den Planungsphasen beteiligt haben, eingebunden werden. [FGSV 2018a, S. 37f.; Pas 1995, S. 73; Meyer 2016, S. 5]

Die Umsetzung von Projekten zur Einführung automatisierter Busse wurde bereits in Abschnitt 4.2.3 durch unterschiedliche Projektberichte oder den Leitfaden von Beckmann und Zadek erläutert [Beckmann und Zadek 2022, S. 54–90]. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt nur kurz darauf eingegangen. Zunächst wird die

Planung durch die Zusammenstellung eines Projektteams und die Festlegung von Projektzielen und eines Zeit- und Ressourcenplans eingeleitet. Anschließend werden die Fahrzeuge im Rahmen einer öffentlichen Ausschreibung beschafft, sofern keine automatisierten Busse vorhanden sind. Parallel dazu werden die Strecke und die Infrastruktur auf Basis der Eignung (Bewertungsverfahren der Verkehrswegeplanung) und den verkehrsorganisatorischen sowie infrastrukturellen Maßnahmen für den Einsatz der automatisierten Busse vorbereitet. Bei der Streckenertüchtigung wird eng mit dem Hersteller der automatisierte Busse zusammengearbeitet, damit alle Anforderungen berücksichtigt werden. Zeitgleich zur Fahrzeugbeschaffung und Streckenertüchtigung werden Genehmigung und Zulassung für den Betrieb des automatisierten Busses im öffentlichen Raum eingeholt. Nach der Auslieferung des Fahrzeugs wird die Strecke in den automatisierten Bus einprogrammiert. Dieser Schritt endet mit mehreren Testfahrten, bei denen auch die Fahrzeit gemessen werden kann. Außerdem erfolgt eine Schulung der Mitarbeiter, damit die Busse aus der Ferne oder auch Vorort gesteuert werden können und die Mitarbeiter auf Notsituationen vorbereitet werden. Anschließend werden die Betriebsdauer, die Taktzeiten und der Fahrplan überarbeitet und ggf. angepasst. Im Rahmen der operativen Planung werden der Fahrzeugeinsatz und der Fahrereinsatz (in Bezug auf das stationäre Personal in der Leitstelle) aktualisiert und der Betrieb aufgenommen. Im Vergleich zum konventionellen Bus ist der Aufwand für die Einrichtung der Strecke, die Zulassung, die Programmierung der Strecke und die Schulung der Mitarbeiter beim automatisierten Bus höher. Grund hierfür sind die verschiedenen notwendigen verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Maßnahmen (siehe Abschnitt 3.3.2). Jedoch wird sich der Aufwand mit der Verbreitung der Technologie zukünftig reduzieren. Während der Umsetzung ist eine kontinuierliche Information und der Dialog mit der Bürgerschaft essenziell, damit das Projektvorhaben nicht scheitert.

5.6 Aufgaben über alle Phasen

Der Erfolg des Verkehrsplanungsprozesses hängt zum Großteil von der schrittweisen Durchführung der einzelnen Phasen ab [Gertz 2021, S. 43]. Neben diesem funktionalen Verständnis ist aber essenziell, alle relevanten Akteure einzubinden [Gertz 2021, S. 43f.; Holz-Rau 2018b, S. 123–125; Schwedes und Rammert 2020a, S. 21–25; Schwedes und Rammert 2020b, S. 25]. Deshalb werden im Weiteren die beiden begleitenden Arbeitsschritte des ganzheitlichen Planungsprozesses beschrieben.

Information, Öffentlichkeitsarbeit, Beteiligung und Kooperation:

Der Verkehrsplanungsprozess wird parallel durch Information und Beteiligung begleitet. Mit der Information, Öffentlichkeitsarbeit, Beteiligung und Kooperation wird sichergestellt, dass einerseits die Belange der Öffentlichkeit berücksichtigt werden und andererseits die Akzeptanz der Bevölkerung vorhanden ist. Letzteres ist essenziell damit das Ergebnis der Angebotsplanung auch umgesetzt werden kann. In Abhängigkeit der Planungsaufgabe werden unterschiedliche Stakeholder einbezogen. Beispielsweise zählen politische Gremien, Kreise und Landesämter, Verbände, interne Fachbehörden, externe Beratungsunternehmen, Gebietskörperschaften oder private Unternehmen zu den Stakeholdern. Aufgrund dieser Heterogenität werden die Stakeholder in unterschiedliche Zielgruppen geclustert. Zusätzlich ist ein Prozess-

management zu etablieren, damit die jeweiligen Stakeholder an den richtigen Stellen im Verkehrsplanungsprozess eingebunden und mit den für ihre Belange wichtigen Informationen versorgt werden. [FGSV 2018a, S. 39–41; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 5; Beckmann 2021, S. 457–460]

Für den Einsatz eines automatisierten Busses ist der Informations- und Beteiligungsprozess essenziell, da für diese Art der Technologie zuerst das Vertrauen in der Bevölkerung aufgebaut werden muss. Gegebenenfalls müssen an diese Stelle die Bemühungen intensiviert werden und Angebote geschaffen werden, damit die Bevölkerung die Technik ausprobieren und erste Erfahrungen sammeln kann, bevor die Busse im ÖV unterwegs sind.

Monitoring, Evaluation und Qualitätsmanagement:

Kontinuierliches Monitoring, Evaluation und Qualitätsmanagement wird nicht nur während der Maßnahmenuntersuchung, sondern über alle Phasen durchgeführt. Im Rahmen des Monitorings werden zu festgelegten Zeitpunkten und mit den gleichen Methoden der Zustand und die Entwicklung des Verkehrsplanungsprozesses beobachtet. Beispielhafte Kennzahlen, die zu verschiedenen Zeitpunkten erhoben werden, sind u. a. die Anzahl der Unfallopfer, Kennzahlen zur Verkehrsnachfrage oder verursachte Emissionen. In der Evaluation werden anschließend die Informationen systematisch analysiert und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufgezeigt. Des Weiteren werden Maßnahmen abgeleitet, um den Verkehrsplanungsprozess anzupassen und die gesteckten Ziele zu erreichen (Ist-Soll-Abgleich). Letztlich sorgt das Qualitätsmanagement dafür, dass Ziele, Abläufe und Verantwortlichkeiten eindeutig definiert sind, transparent kommuniziert werden und über den gesamten Verkehrsplanungsprozess eingehalten werden. [FGSV 2018a, S. 43–45]

Im Anhang A.7 werden die begleitenden Prozesse vertiefend zu dieser Darstellung beschrieben.

5.7 Zusammenfassung und Zwischenfazit zum Planungsprozess

Der ganzheitliche Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse ist grundsätzlich analog des Verkehrsplanungsprozesses der FGSV in fünf Phasen aufgeteilt (Orientierung, Problemanalyse, Maßnahmenuntersuchung, Abwägung und Entscheidung sowie Umsetzung). Die fünf Schritte der Angebotsplanung (Netz-, Kapazitäts-, Fahrlagen-, Fahrzeugeinsatz- und Personaleinsatzplanung) werden im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung durchgeführt. Der Einsatz automatisierter Busse beeinflusst insbesondere die Problemanalyse, da zusätzliche Informationen zu dieser Technologie und den Auswirkungen recherchiert werden. In der Orientierungsphase, bei der Abwägung und Entscheidung sowie bei der Umsetzung sind weitere Anpassungen in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse notwendig. Der Fokus des Planungsprozesses liegt auf der Maßnahmenuntersuchung und der Angebotsplanung. Aus diesem Grund werden im Weiteren die Veränderungen innerhalb der Angebotsplanung durch die Berücksichtigung automatisierter Busse erläutert. Zur besseren Übersicht fasst Abbildung 39 diese Änderungen zusammen.

	Änderung in der Vorgehensweise	Änderung im Ergebnis
1. Netzwerkplanung	Neue Eingangsdaten, Arbeitsschritte und Methoden	Neue Ziele, Einfluss auf bestehende Ziele
2. Kapazitätsplanung	Neue Eingangsdaten	Einfluss auf bestehende Ziele
3. Fahrlagenplanung	Neue Eingangsdaten	Einfluss auf bestehende Ziele
4. Fahrzeugeinsatzplanung	Neue Eingangsdaten, Änderung der Arbeitsschritte	Einfluss auf bestehende Ziele
5. Personaleinsatzplanung	Neue Eingangsdaten, Arbeitsschritte und Methoden	Neue Ziele, Einfluss auf bestehende Ziele

Abbildung 39: Änderung der Angebotsplanung durch automatisierte Busse

In der ursprünglichen Verkehrswegeplanung kann der Großteil der Verkehrswege von konventionellen Busse befahren werden [Schnieder 2018, S. 113–116]. Für automatisierte Busse ist eine aufwändigere Bewertung der Straßen und der vorhandenen Infrastruktur erforderlich. Hierfür wird ein separates Bewertungsverfahren eingesetzt. Im Rahmen der Verkehrswegeplanung werden neue Eingangsgrößen (Fahrzeugtechnik, Infrastrukturkosten und gesetzliche Rahmenbedingungen) einbezogen und Arbeitsschritte und Methoden angepasst. Die verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Maßnahmen verursachen Kosten. Bei der Haltestellenplanung werden neue Eingangsparameter hinzugefügt. Des Weiteren wird die Bedienungsform für die automatisierten Busse festgelegt (neuer Arbeitsschritt). Innerhalb der Linienetzplanung werden die einzelnen Arbeitsschritte nicht verändert. Jedoch werden neue Eingangsparameter berücksichtigt. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Berechnung der Zielgrößen. Zusammenfassend verändert die Einbeziehung automatisierter Busse den Prozess der Netzplanung, da neue Eingangsdaten, Arbeitsschritte und Methoden berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich werden bestehende Zielgrößen beeinflusst und neue Zielgrößen (bspw. Infrastrukturkosten) hinzugefügt. Dadurch verändert sich das Ergebnis im Vergleich zu konventionellen Bussen signifikant. Daher ist festzuhalten, dass die automatisierten Busse einen signifikanten Einfluss auf die Netzplanung ausüben.

Die Arbeitsschritte der Kapazitäts- und Fahrlagenplanung werden durch die Berücksichtigung automatisierter Busse nicht verändert. Es werden jedoch neue Eingangswerte einbezogen, welche die bestehenden Zielgrößen beeinflussen. Aus diesem Grund wird der Einfluss in diesen beiden Schritten als niedrig bewertet.

Durch die Tatsache, dass bei der Fahrzeugeinsatzplanung kein Fahrpersonal berücksichtigt werden muss, ändert sich die quantitative Fahrzeugeinsatzplanung signifikant. Zudem werden durch die Infrastrukturkosten die Zielgrößen umgestaltet. Aus diesem Grund hat die Berücksichtigung automatisierter Busse auf diesen Schritt einen mittleren Einfluss.

Im Gegensatz zu den ursprünglichen Verfahren der Personaleinsatzplanung entfällt für den Einsatz automatisierter Busse die Einsatzplanung der Fahrer. Außerdem verändert sich der Arbeitsumfang der Betriebsleitstelle durch die neuen Aufgaben der Fernüberwachung. Deshalb wird die Personaleinsatzplanung in der Leitstelle neu berechnet und in den Zielgrößen zusätzlich berücksichtigt. Aus diesem Grund wird der Einfluss der automatisierten Busse auf diesen Schritt als hoch eingestuft.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass alle Anforderungen der automatisierten Busse in das bestehende Verfahren der Angebotsplanung integriert werden können und dass dies einen essenziellen Einfluss auf das Verfahren und das Ergebnis hat. Aus diesem Grund ist der Autor überzeugt, dass der entwickelte Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse einen wichtigen Beitrag zur Angebotsplanung im ÖPNV leistet. Der Planungsprozess bezieht sich auf den Einsatz von hochautomatisierten Bussen (Stufe 4 ÖV) und wurde so entwickelt, dass die zukünftige Entwicklung der Fahrzeuge einbezogen wird. Dies gilt jedoch nur bis die vollständige Autonomie der Busse (Stufe 5) erreicht wird, da die Fahrzeuge dann auf allen Straßen und in sämtlichen Verkehrssituationen eingesetzt werden können.

Mithilfe dieses Planungsprozesses ist es zudem möglich, nicht nur den Einsatz automatisierter, sondern auch konventioneller Busse in einem Streckennetz zu berücksichtigen und zu bewerten. Auf diese Weise können die beiden Verkehrsmittel miteinander verglichen werden. Zentraler Bestandteil dieses Planungsprozesses ist das Bewertungsverfahren, welches im Rahmen der Verkehrswegeplanung die Eignung, die Kosten und die gesellschaftlichen Konsequenzen für den Einsatz automatisierter Busse ermittelt. Diese Eingangsgrößen verändern das Ergebnis der weiteren Schritten der Angebotsplanung (Linienplanung, Kapazitätsplanung, Fahrlagenplanung, Fahrzeugeinsatzplanung und Personaleinsatzplanung) signifikant. Deshalb wird im folgenden Kapitel dargelegt, wie das Bewertungsverfahren zu konzipieren ist und wie die betriebliche Eignung automatisierter Busse auf Straßen zu beurteilen ist.

6 Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse

Ziel des sechsten Kapitels ist es, ein Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse zu entwickeln, das im Rahmen des ganzheitlichen Planungsprozesses eingesetzt werden kann. Dafür werden zunächst die Anforderungen, die der ganzheitliche Planungsprozess an das Bewertungsverfahren stellt, ermittelt (Abschnitt 6.1). Auf dieser Basis wird der Stand der Forschung untersucht und geprüft, inwieweit bereits Bewertungsverfahren in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse existieren (Abschnitt 6.2). Anschließend wird der methodische Rahmen und der Ablauf des Bewertungsverfahrens entwickelt (Abschnitt 6.3). Die inhaltliche Ausgestaltung des Bewertungsverfahrens in Bezug auf die zu verwendenden Kriterien wird in Abschnitt 6.4 beschrieben. Eine Zusammenfassung inklusive Zwischenfazit beschließt dieses Kapitel.

6.1 Anforderungen an das Bewertungsverfahren

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.7 stellt das Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse ein Kernelement im ganzheitlichen Planungsprozess dar. Aus diesem Grund resultieren die Anforderungen an das Bewertungsverfahren aus den für den Planungsprozess notwendigen Daten. Das Bewertungsverfahren ist der Verkehrswegeplanung zugeordnet, mit dem Ziel festzustellen, welche Straßen für den Einsatz automatisierter Busse geeignet sind und welche Infrastrukturkosten daraus resultieren. Denn im Gegensatz zu konventionellen Bussen, werden automatisierte Busse für fest definierte Betriebsbereiche, die von verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Gegebenheiten abhängig sind, zugelassen (siehe Abschnitte 3.3 bis 3.5). Die Eignung bzw. die Kosten einer Straße werden im weiteren Verlauf der Angebotsplanung insbesondere bei der Liniennetzplanung und Fahrzeuginsatzplanung benötigt.

Dementsprechend ist die vordergründige Anforderung an das Bewertungsverfahren, dass die Möglichkeit bestehen sollte, festzustellen, ob eine Straße für den Einsatz automatisierter Busse geeignet ist. Bei dieser Bewertung wird der Fall eintreten, dass eine Straße nicht die erforderlichen Voraussetzungen für den Einsatz automatisierter Busse aufweist. Jedoch kann durch verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen (bspw. Implementierung eines Halteverbots), die Eignung einer Straße für den Einsatz automatisierter Busse hergestellt werden. Die entsprechenden Kosten für die Ertüchtigung einer Straße zu bestimmen und die Auswirkungen auf die Eignung festzustellen, ist deshalb eine weitere Anforderung an das Bewertungsverfahren. In diesem Zusammenhang sollten auch gesellschaftliche Konsequenzen, die aus der Umsetzung der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Maßnahmen resultieren (bspw. Verärgerung der Anwohner über Parkverbote) im Bewertungsverfahren berücksichtigt werden. Die Kosten und gesellschaftlichen Konsequenzen werden gemäß Abschnitt 5.3.1 im Planungsprozess benötigt und in den weiteren Schritten der Angebotsplanung einbezogen. Eine Strecke, die hohe Kosten aufweist, sollte jedoch nicht generell aus der Betrachtung ausgeschlossen werden, da diese ggf. einen großen Nutzen für das Verkehrsunternehmen und den Aufgabenträger generieren kann. Zwar wird der Nutzen nicht im Rahmen der

Verkehrswegeplanung betrachtet, jedoch ist dieser für die Gesamtbewertung des Ergebnisses der Angebotsplanung sowie für die Liniennetzplanung relevant (siehe Tabelle 30 in Abschnitt 5.3.6). Daraus resultiert die Anforderung an das Bewertungsverfahren, dass neben den Kosten auch der Nutzen einzelner Straßen ermittelt und bewertet werden muss. Darüber hinaus wird durch diese Vorgehensweise eine zusätzliche Facette in die Bewertung der Straßeneignung integriert. Zusammenfassend sollte das Bewertungsverfahren folgende drei Bewertungsstufen enthalten:

1. Bewertung der Eignung
2. Bewertung von Kosten und Eignung
3. Bewertung von Kosten und Nutzen

Gemäß den Ausführungen in den Abschnitten 3.3 und 3.5 sollten sowohl infrastrukturelle (u. a. Fahrbahnbreite und Untergrund) als auch verkehrsorganisatorische Kriterien (u. a. Geschwindigkeitsbegrenzung und Parkverbote) erhoben und gewichtet werden, um die Eignung einer Straße zu bewerten. Als Ergebnis dieser Bewertungsstufe soll eine Darstellung entstehen, welche auf Basis aller relevanten Kriterien die Eignung einer Straße visualisiert.

Die Bewertung der Eignung bildet zugleich die Grundlage für die zweite Bewertungsstufe, welche Kosten und Eignung einer Straße vergleichen soll. Auf Basis der Infrastrukturanalyse sollen Maßnahmen entwickelt werden, welche den Einsatz automatisierter Busse ermöglichen. Diese Maßnahmen verursachen Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen, welche gegen die Eignung abgewogen werden sollten.

In der dritten Bewertungsstufe erfolgt eine Gegenüberstellung der Kosten und der gesellschaftlichen Konsequenzen mit verschiedenen Nutzenkriterien. Die Nutzenkriterien für eine Straße resultieren daraus, dass ein ÖPNV-Angebot durch automatisierte Busse etabliert wird.

Damit das Bewertungsverfahren aussagekräftige Daten hervorbringt, mit denen eindeutig festgestellt werden kann, ob ein automatisierter Bus in einer Straße eingesetzt werden kann, ist eine quantitative Bewertung zwingend erforderlich. Dafür sollte gewährleistet werden, dass die Kosten und Nutzenkriterien monetarisiert werden können.

Zusätzlich zu den bisherigen Ausführungen, sollte das Bewertungsverfahren speziell auf die Anforderungen automatisierter Busse ausgelegt sein. Durch die zukünftige Entwicklung der automatisierten Busse, besteht die Möglichkeit, dass sich Betriebsbereiche verändern und neue Strecken erschlossen werden. Aus diesem Grund sollte eine Anpassungsfähigkeit in Bezug auf die zukünftige technologische Entwicklung in diesem Bereich berücksichtigt werden. Da ein Bus innerhalb einer Straße nicht wenden kann, sollten immer ganze Straßen bzw. Straßenabschnitte (wenn die Möglichkeit zum Abbiegen existiert) bewertet werden. Abschließend sollte die Ergebnisdarstellung in Form einer Rangfolge gestaltet sein, damit für die weitere Planung eine Priorisierung der Straßen erfolgen kann. Tabelle 31 zeigt zusammenfassend die Anforderungen an das Bewertungsverfahren.

Tabelle 31: Anforderungen an das Bewertungsverfahren

Bewertungsstufe	Anforderungen an das Bewertungsverfahren
Bewertung der Eignung	<ul style="list-style-type: none">• Infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien inkl. Gewichtung berücksichtigen
Bewertung der Kosten	<ul style="list-style-type: none">• Infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Maßnahmen inkl. Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen berücksichtigen
Bewertung des Nutzens	<ul style="list-style-type: none">• Den Nutzen einer Straße berücksichtigen
Übergeordnete Elemente	<ul style="list-style-type: none">• Die Bewertung mit Fokus auf die technologischen Ausprägungen von automatisierten Bussen konzipieren• Die Bewertung anpassungsfähig gegenüber technologischen Veränderungen und neuen Kriterien gestalten• Die Bewertung auf Straßen u. Straßenabschnitte beziehen• Die Ergebnisse pro Straße als Rangfolge in einer Tabelle oder auf einer Karte darstellen

6.2 Stand der Forschung

Den Ausführungen aus Abschnitt 6.1 zufolge soll das Bewertungsverfahren geeignete Straßen für automatisierte Busse identifizieren. Artverwand hierzu ist das Forschungsthema „Walkability“. Walkability kann als Fußgängerfreundlichkeit übersetzt werden [Krambeck 2006, S. 13]. Dabei kann die Fußgängerfreundlichkeit von Fußwegen aus verschiedenen Perspektiven bspw. Schutz, Sicherheit, Dichte, Zugänglichkeit, Attraktivität, Entfernungen sowie politische Unterstützung betrachtet und bewertet werden [Krambeck 2006, S. 15–17; Dovey und Pafka 2020, S. 94; Shields et al. 2023, S. 32]. Aus diesem Grund existieren zahlreiche Untersuchungen und Indizes, die sich mit der Fußgängerfreundlichkeit beschäftigen, wie eine Übersicht von Maghelal und Capp zeigt [Maghelal und Capp 2011, S. 9]. Einer Studie von Shields et al. folgend existieren über 85 Kriterien, um die Fußgängerfreundlichkeit zu beschreiben [Shields et al. 2023, S. 19]. Zu den Kriterien zählen u. a. die Distanz zur Schule, das Vorhandensein eines Fußwegs, die Breite und die Steigung eines Fußwegs, die Größe von Kreuzungen, die Geschwindigkeit von Fahrzeugen, die Beleuchtung oder das Wetter [Shields et al. 2023, S. 32]. Um den Walkability-Index für eine Straße zu ermitteln, werden zuerst die ausgewählten Kriterien erfasst, danach gewichtet sowie bewertet und abschließend in dem Index zusammengefasst [Lam et al. 2022, S. 12; Shields et al. 2023, S. 29–31]. Das Ergebnis kann als Karte mittels einer Geoinformationssystem-Software (GIS-Software) dargestellt werden (siehe Abbildung 40) [Lam et al. 2022, S. 5f.; Shields et al. 2023, S. 30]. Grüne Gebiete sind fußgängerfreundlich, während rote Gebiete weniger für den Fußverkehr geeignet sind [Lam et al. 2022, S. 5f.].



Abbildung 40: Walkability-Index am Beispiel der Niederlanden [Lam et al. 2022, S. 6]

Analog dazu existiert der Bikeability-Index, welcher die Fahrradfreundlichkeit beschreibt und eine Bewertung des gesamten Radwegenetzes hinsichtlich des Komforts, der Bequemlichkeit sowie der Zugänglichkeit von wichtigen Zielen beinhaltet [Lowry et al. 2012, S. 41]. Lowry et al. sowie Kellstedt et al. zeigen, dass auch in diesem Forschungsfeld eine Vielzahl von Veröffentlichungen existieren [Lowry et al. 2012, S. 42; Kellstedt et al. 2021, S. 216f.]. Die Vorgehensweise bei der Bestimmung des Bikeability-Indexes gliedert sich analog zum Walkability-Index und enthält die Erhebung der Kriterien der einzelnen Straßen, die Gewichtung, die Bewertung und abschließend die Verrechnung der Kriterien [Lowry et al. 2012, S. 42–44; Winters et al. 2013, S. 870–873]. Zu den Kriterien zählen u. a. Breite des Radwegs, Breite des Seitenstreifens, Verkehrsaufkommen, Geschwindigkeiten, Anteil schwerer Fahrzeuge, Zustand des Straßenbelags, Fahrradunfälle und Vorhandensein von Bordsteinen [Lowry et al. 2012, S. 43f.; Winters et al. 2013, S. 869; Castañón und Ribeiro 2021, S. 8–15]. Das Ergebnis wird analog zum Walkability-Index mit einer GIS-Software als Kartendarstellung visualisiert [Winters et al. 2013, S. 872–874].

In Bezug auf konventionelle Fahrzeuge werden Veröffentlichungen zur Befahrbarkeit (in engl. Driveability) von Straßen, bei denen Gelände- und Geodaten analysiert werden, identifiziert [Lantz et al. 2005, 1264]. Dabei werden u. a. Fahrzeugtyp, Boden, Wetter, Gefälle und Straßensperrungen als Kriterien betrachtet. Weitere Veröffentlichungen zum Thema „Driveability“ beziehen sich vorwiegend auf das Fahrverhalten, wie bspw. die Motordrehzahl, die Pedalstellung, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder die Fahrtauglichkeit der Fahrer [Shin et al. 2014, S. 1616f.; Machmudi Isa et al. 2014, S. 784; Addanki et al. 2020, S. 278f.].

Emami et al. haben, wie bereits in Abschnitt 4.2.3 geschildert, einen Ansatz zur Priorisierung von Buslinien entwickelt, die in einem Bedienungsgebiet elektrifiziert werden können. Die Vorgehensweise dieser Arbeit gestaltet sich analog zum Walkability- und Bikeability-Index und enthält folgende Schritte: Identifizierung von Faktoren, Datensammlung, Gewichtung, Bildung einer Reihenfolge und die Visualisierung mit

einer GIS-Software. Als Kriterien werden u. a. Streckencharakteristika (Länge und Taktfrequenz), Umweltbedingungen (Schadstoffemission und Luftqualität), demografische und sozioökonomische Daten (Bevölkerungszahl und Einkommen) sowie Landnutzung und Stromversorgung berücksichtigt. [Emami et al. 2022, S. 13–19]

Die folgenden Ansätze beziehen sich direkt auf den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen und automatisierten Bussen.

Die BASt hat im Rahmen eines Projekts den möglichen Infrastrukturbedarf für das automatisierte Fahren erarbeitet. Die Ausgestaltung der Ergebnisse basiert auf den beiden Szenarien des Autobahnchauffeurs und des Pendlerchauffeurs (Ergänzung des Autobahnchauffeurs um weitere Bundes- und Landstraßen). Für diese beiden Szenarien werden verschiedene Anwendungsfälle abgeleitet. Ein Hindernis im Fahrstreifen, fehlende Seitenstreifen oder eine Baustelle auf der Richtungsfahrbahn sind die Unterszenarien des Autobahnchauffeurs. Beim Pendlerchauffeur bilden die Fahrt auf einer einbahnigen Kraftfahrstraße, der Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen, Überholvorgänge auf einbahniger Straße und eine Baustelle auf einbahniger Straße die vier Unterszenarien. Zu den Unterszenarien werden spezifische Herausforderungen wie bspw. die Verschmutzung der Verkehrszeichen, Witterungsbedingungen, hohe Geschwindigkeitsdifferenzen, die Wahrnehmung von Lichtsignalanlagen oder Personen auf der Fahrbahn aufgelistet. Auf dieser Basis werden die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen für alle Unterszenarien ermittelt. Dazu zählen bspw. für den Pendlerchauffeur auf Landstraßen die Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit, Informationen über Rad- und Fußwege sowie die Nutzung von V2X-Kommunikation. Abschließend werden die Maßnahmen hinsichtlich Notwendigkeit, Wirksamkeit, technischer / organisatorischer / zeitlicher Realisierbarkeit und Aufwand / Kosten bewertet. [Dierkes et al. 2019, S. 55–72]

Das britische Normungsinstitut hat 2020 eine Norm für die Spezifikation der ODD veröffentlicht (PAS 1883:2020). Die Norm, welche auf der SAE J3016 basiert, enthält Anforderungen für die Spezifikation der ODD, um den sicheren Einsatz eines automatisierten Fahrsystems zu ermöglichen. Alle Kriterien, welche die ODD beeinflussen, sind in die drei Kategorien Umgebung, Umweltbedingungen und dynamische Elemente eingeteilt. Zur Umgebung zählen u. a. Straßenstrukturen, Spezifikationen der Fahrbahn, Fahrbahnoberfläche und Anzahl der Fahrbahnen. Umweltbedingungen beziehen sich auf das Wetter, Lichtverhältnisse und Konnektivität (GPS und V2X-Kommunikation). Dynamische Elemente beinhalten u. a. das Verkehrsaufkommen, die Dichte des Verkehrs und das Vorhandensein von Sonderfahrzeugen, wie Krankenwagen oder Polizeiwagen. [The British Standards Institution 2020, S. 1–11]

Guo et al. beschreiben, dass bisher kein einheitliches Konzept zur Bewertung der Fahrbarkeit im Bereich des automatisierten Fahrens existiert. Deshalb werden basierend auf einer Literaturanalyse sieben Kriterien zur Umgebung (Wetter, Lichtverhältnisse, Straßenabmessungen, Straßenzustand, Fahrbahnmarkierungen, Verkehrssituation und Objekte) sowie vier Kriterien zum Verhalten (Verhalten von Fahrzeugen, Fußgängern, Pkw-Fahrern und Fahrrädern) ausgearbeitet. Da sich das Verhalten der Pkw-Fahrer u. a. durch den Straßenzustand determiniert, wird zudem die Wechselbeziehung der Kriterien analysiert. Die Kriterien werden letztlich dazu

verwendet, um Datensätze für das Training von Algorithmen des maschinellen Lernens zu clustern. [Guo et al. 2020, S. 3135–3144]

Auf Basis einer Literaturanalyse zum aktuellen Entwicklungsstand automatisierter Fahrzeuge und zukünftigen Herausforderungen haben Soteropoulos et al. Kriterien ermittelt, welche einen Einfluss auf die Fahrbarkeit von automatisierten Fahrzeugen besitzen [Soteropoulos et al. 2020, S. 68–70]. Diese Kriterien sind in fünf Oberkategorien eingeteilt:

- Anzahl der Objekte im Straßenraum (bspw. Anzahl Verkehrsteilnehmer, Anzahl Verkehrszeichen)
- Vielfalt der Objekte im Straßenraum (bspw. Diversität der Verkehrsteilnehmer, Diversität der Verkehrszeichen)
- Zustand und Beschaffenheit der Straßeninfrastruktur (bspw. Fahrbahnoberfläche und Straßenbreite)
- Geschwindigkeitsbegrenzung
- Stabilität der ODD (bspw. Baustellen, Witterungsbedingungen und Krankenwagenverkehr) [Soteropoulos et al. 2020, S. 68–70]

Für jedes Kriterium werden Indikatoren formuliert. Zur Oberkategorie „Anzahl der Objekte im Straßenraum“ zählt bspw. der Indikator „Anzahl der Lichtsignalanlagen“. Zu jedem Indikator wird der Einfluss (direkt oder indirekt) und die Datenquelle ermittelt. Die Bewertung der Indikatoren wird am Beispiel der Stadt Wien durchgeführt. Von den 48 Indikatoren werden aufgrund der Datenverfügbarkeit für die Bewertung 20 Indikatoren ausgewählt. Für numerische Indikatoren (z. B. Anzahl der Lichtsignalanlagen) wird der tatsächliche Wert für jede Straßenverbindung ermittelt. Binäre Indikatoren (z. B. Vorhandensein von Fußgängerzonen oder Begegnungszonen) werden mit einer „eins“ oder einer „null“ bewertet, je nachdem ob das Kriterium vorhanden ist oder nicht. Bei kategorischen Indikatoren (z. B. vorherrschender Alterstyp des Gebiets) werden die Indikatoren ebenfalls zwischen „null“ und „eins“ eingestuft. Nach der Erhebung werden die Indikatoren normiert und anschließend mit der Gewichtung verrechnet. Die Gewichtung erfolgt auf Basis von Tendenzen aus der Literatur. Anhand einer Kartendarstellung mit der Software ArcGIS werden die Ergebnisse für die gesamte Stadt Wien visualisiert. Dabei ist farblich markiert, welche Straßen für automatisierte Fahrzeuge geeignet sind. [Soteropoulos et al. 2020, S. 70–80]

Madadi et al. führen eine mathematische Modellierung zur Optimierung des Straßennetzes für automatisierte Fahrzeuge durch, indem gleichzeitig Teilnetze für gemischten Verkehr mit automatisierten Fahrzeugen, dedizierte Verbindungen und dedizierte Spuren für automatisierte Fahrzeuge eingerichtet werden. Der Anwendungsfall in Amsterdam dient der Evaluierung des Modellierungsprozesses. Als Resultat wird eine Kartendarstellung generiert, die die Eignung spezifischer Bereiche für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge visualisiert. Zu den möglichen Bereichen zählen Autobahnen, regionale Hauptverkehrsstraßen und städtische Hauptverkehrsstraßen, da komplexe Interaktionen zwischen automatisierten Fahrzeugen und ungeschützten Verkehrsteilnehmern vermieden werden. [Madadi et al. 2021, S. 1–11]

Holst (2022) beschreibt, dass der Einsatz automatisierter Busse von der ODD und diese wiederum von der physischen und digitalen Infrastruktur der Straße beeinflusst

wird [Holst 2022, S. 17]. Analog zu der Veröffentlichung der BASt listet Holst Infrastrukturmaßnahmen für automatisierte Pkw und automatisierte Busse auf Basis einer Marktanalyse, einer Testfeldanalyse und einer empirischen Untersuchung auf [Holst 2022, S. 3–6]. Es wird dabei zwischen physischer (Baukörper Straße und verkehrstechnische Infrastruktur) und digitaler Infrastruktur (u. a. Telekommunikation, HD-Karten, RSUs oder Satellitennavigation) unterschieden [Holst 2022, S. 86f.]. Untersucht werden innerhalb der Analyse die Auswirkungen der jeweiligen Fahrzeugart auf u. a. die Kategorien Geschwindigkeit, Fahrbahnbreite, Trajektorie, Topologie der Straße, Mobilfunknetzabdeckung, GPS, Landmarker und Witterungseinflüsse [Holst 2022, S. 148–152]. Zusammenfassend werden die benötigten infrastrukturellen Voraussetzungen für den aktuellen Stand und zukünftige Entwicklungen des MIV und ÖPNV aufgelistet [Holst 2022, S. 193–199]. Für den ÖPNV beziehen sich die Voraussetzungen u. a. auf Höchstgeschwindigkeit, Fahrspurbreite, Markierungen, Steigung, Landmarker, V2X-Kommunikation, Mobilfunknetzabdeckung und Satellitenempfang [Holst 2022, S. 198f.]. Zusätzlich werden auch Grenzwerte für die einzelnen Elemente (bspw. eine maximale Steigung von 15 %) aufgelistet [Holst 2022, S. 198f.]. Zum Abschluss wird im Untersuchungsgebiet im Landkreis Ostprignitz-Ruppin die gesamte Infrastruktur allgemein hinsichtlich ihrer Eignung in Bezug auf Mobilfunk, Straßennetz, Fahrbahnbreite und Baumbestand untersucht [Holst 2022, S. 201–208].

Analog zur PAS 1883:2020 hat die International Organization for Standardization die ISO 34503:2023 veröffentlicht, welche die Spezifikation der ODD für automatisierte Fahrzeuge beschreibt. Die Norm bezieht sich dabei vor allem auf die dritte und vierte Automatisierungsstufe und teilt die Attribute der ODD in die drei Kategorien Umgebung, Umweltbedingungen und dynamische Elemente ein [International Organization for Standardization 2023, S. 1–7]. Die Kategorien enthalten folgende Kriterien:

- Umgebung
 - Zonen (bspw. Schulen oder Gewerbegebiete)
 - befahrbare Fläche (bspw. Fahrbahnoberfläche)
 - Kreuzungspunkte (bspw. Kreisverkehr, Kreuzungen)
 - besondere Strukturen (bspw. Brücken oder Tunnel)
 - grundlegende Straßenstrukturen (bspw. Vegetation)
 - temporäre befahrbare Strukturen (bspw. Baustellenumleitungen)
- Umweltbedingungen
 - Wetter (bspw. Wind oder Regen)
 - Partikel (bspw. Sand oder Staub)
 - Lichtverhältnisse (bspw. Natürliche Beleuchtung und Straßenbeleuchtung)
 - Konnektivität (bspw. V2X und GPS)
- Dynamische Elemente
 - Verkehrsteilnehmer (bspw. Anzahl oder Dichte der Verkehrsteilnehmer)
 - betroffenes Fahrzeug (bspw. die eigene Geschwindigkeit des Fahrzeugs) [International Organization for Standardization 2023, S. 7–20]

Zusätzlich werden für einige Kriterien auch Grenzwerte in der Norm aufgeführt (u. a. Regenmenge oder Windgeschwindigkeiten) [International Organization for Standardization 2023, S. 7–20].

Die Projektfamilie von Gaia-X 4 Future Mobility hat einen ODD-Klassifikator entwickelt. Das Ziel dieses Klassifikators ist es, in einem Gebiet einzuordnen, auf welchen Strecken automatisierte Fahrzeuge eingesetzt werden können und welche infrastrukturellen Maßnahmen erforderlich sind. Die jeweilige ODD eines Fahrzeugs basiert auf dem technologischen Entwicklungsstand desselben und beschreibt den Betriebsbereich und die Bedingungen unter denen es eingesetzt werden kann. Mithilfe des ODD-Klassifikators werden die Infrastrukturdaten eines Gebiets mit der ODD des jeweiligen Fahrzeugtyps verglichen. Als Ergebnis konnte der Autor dieser Arbeit eine Kartendarstellung begutachten, in der farblich markiert ist, welche Straßen vom jeweiligen automatisierten Fahrzeug befahren werden können. Auf dieser Basis kann eine Stadt den Einsatz automatisierter Fahrzeuge planen. Die Kriterien, welche die ODD des jeweiligen Fahrzeugs definieren, werden nicht genannt. Städte können den ODD-Klassifikator auch zur Planung notwendiger infrastruktureller und verkehrsorganisatorischer Anpassungen nutzen. Darüber hinaus bietet das Tool auch Anwendungsmöglichkeiten für Anbieter von automatisierten Fahrzeugen und Infrastruktur-lösungen. [Gaia-X 4 Future Mobility 2024]

In der Tabelle 32 werden die acht zuvor vorgestellten Ansätze mit den Anforderungen an das Bewertungsverfahren (Abschnitt 6.1) verglichen. Im Ansatz der BASt werden infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien und Maßnahmen genannt. Eine Gewichtung der Kriterien sowie eine Bewertung der Maßnahmen in Bezug auf die Kosten erfolgen nicht. Bei den Normen des britischen Normeninstituts und der ISO werden ebenfalls nur infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien zur Beschreibung der ODD aufgeführt. Diese Aussage trifft ebenfalls auf die Arbeit von Guo et al. zu, welche lediglich eine geringe Anzahl an Kriterien behandelt. Die weiteren Anforderungen werden in diesen vier Ansätzen nicht berücksichtigt.

Soteropoulos et al. definieren und gewichten infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien. Infrastrukturmaßnahmen und der Nutzen einer Straße werden jedoch nicht behandelt. Weiterhin bezieht sich das entwickelte Modell allgemein auf automatisierte Fahrzeuge. Bezüglich der Anpassungsfähigkeit des Modells auf zukünftige technologische Entwicklungen wird nicht eingegangen. Die Straßen werden für die Bewertung in Abschnitte von 100 m eingeteilt [Soteropoulos et al. 2020, S. 74]. Eine Kartendarstellung in der die Rangfolge farblich gekennzeichnet ist, visualisiert das Ergebnis der Bewertung.

Madadi et al. verwenden infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien ohne Gewichtung. Die Verwertung erfolgt als Kartendarstellung, in welcher die einzelnen Straßen bewertet werden und eine Rangfolge gebildet wird.

Holst stellt infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien und Maßnahmen dar. Eine Gewichtung oder Nennung der Kosten erfolgt nicht. Die Kriterien werden zwar in einer Kartendarstellung verarbeitet, jedoch nur für Bereiche und nicht für einzelne Straßen. Außerdem wird keine Rangfolge gebildet.

Der Ansatz von Gaia-X weist Ähnlichkeiten mit dem hier zu entwickelnden Bewertungsverfahren auf. Im ODD-Klassifikator werden die Kriterien abgebildet. Inwieweit jedoch eine Gewichtung erfolgt, wird nicht erläutert. Infrastrukturmaßnahmen sollen aus dem Tool ableitbar sein, Kosten und Nutzen dieser werden jedoch nicht erwähnt. Das Tool ist für automatisierte Busse konzipiert. Die Bewertung und Visualisierung der einzelnen Straßen erfolgt mit einer Kartendarstellung. Aus dieser ist ableitbar, welche Strecken für automatisierte Busse geeignet sind. Eine Rangfolge wird, soweit bekannt, nicht gebildet. Des Weiteren wird auch nicht auf die Anpassungsfähigkeit des ODD-Klassifikators eingegangen.

Tabelle 32: Gegenüberstellung der Anforderungen eines Bewertungsverfahrens und den existierenden Ansätzen

Kriterien Verfahren	Infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien inkl. Gewichtung berücksichtigen	Infrastrukturelle u. verkehrsorganisatorische Maßnahmen inkl. Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen berücksichtigen	Den Nutzen einer Straße berücksichtigen	Die Bewertung mit Fokus auf die technologischen Ausprägungen von automatisierten Bussen konzipieren	Die Bewertung anpassungsfähig gegenüber technologischen Veränderungen und neuen Kriterien gestalten	Die Bewertung auf Straßen u. Straßenabschnitte beziehen	Die Ergebnisse pro Straße als Rangfolge in einer Tabelle oder auf einer Karte darstellen
BAST (2019)	(X)	(X)					
PAS 1883:2020	(X)						
Guo et al (2020)	(X)						
Soteropoulos et al. (2020)	X			(X)		X	X
Madadi et al (2021)	(X)					X	X
Holst (2022)	(X)	(X)				(X)	(X)
ISO 34503:2023	(X)						
Gaia-X (2024)	(X)	(X)		X		X	(X)

Legende: X: Anforderungen erfüllt | (X): Anforderungen teilweise erfüllt | Leer: Anforderungen nicht erfüllt

Tabelle 32 zeigt, dass keiner der bestehenden Ansätze die Anforderungen erfüllt, welche der ganzheitliche Planungsprozess an das Bewertungsverfahren stellt. Jedoch besitzen die Ansätze von Soteropoulos et al. und Gaia-X die meisten Überschneidungen, weshalb im Folgenden zusätzlich auf Spezifika dieser beiden Arbeiten eingegangen wird. Soteropoulos et al. ermitteln die Kriterien und die Gewichtung auf Basis einer Literaturrecherche. Aus Sicht des Autors ist jedoch die Erfahrung aus

praktischen Einsätzen automatisierter Busse im öffentlichen Raum zwingend zu berücksichtigen. Für die Bewertung der binären Indikatoren werden die Werte „eins“ oder „null“ ausgegeben. Beispielsweise wird das Kriterium „Vorhandensein einer nicht baulich getrennten Fahrradinfrastruktur“ von Soteropoulos et al. als binäre Variable aufgefasst, die entweder vorhanden ist oder nicht [Soteropoulos et al. 2020, S. 77]. Aus der Sicht des Autors ist es jedoch möglich, dass die Fahrradinfrastruktur gar nicht, einseitig oder beidseitig vorhanden sein kann und demnach nicht binär zur interpretieren ist. Zuletzt werden von Soteropoulos et al. die beiden Indikatoren „Vorherrschende Landnutzungsart des Gebiets“ und „Vorherrschendes Alter des Gebiets“ mit in die Bewertung aufgenommen [Soteropoulos et al. 2020, S. 77]. Beide Indikatoren bilden aus der Sicht des Autors übergeordnete Kategorien, die spezifische Indikatoren, wie bspw. Breite der Fahrbahn oder Fahrbahnoberfläche enthalten.

Der Ansatz von Gaia-X visualisiert die möglichen Strecken eines automatisierten Fahrzeuges auf Basis der ODD. Jedoch ist speziell im ÖPNV eine Priorisierung von Strecken unerlässlich. Dieser Aspekt wird im vorliegenden Ansatz nicht berücksichtigt. Außerdem ist aus Sicht des Autors eine Rangfolge essenziell, da zwar mehrere Straßen die ODD erfüllen können, diese allerdings eine unterschiedliche Komplexität aufweisen und eine differenzierte Ertüchtigung benötigen.

6.3 Entwicklung des Bewertungsverfahrens zur Einführung automatisierter Busse

Die Analyse des aktuellen Forschungsstandes in Abschnitt 6.2 zeigt, dass keine der existierenden Ansätze die Anforderungen an ein für den ganzheitlichen Planungsprozess notwendiges Bewertungsverfahren erfüllen. Aus diesem Grund wird ein eigenes Bewertungsverfahren für die Einführung automatisierter Busse entwickelt. Zu diesem Zweck werden im Folgenden grundlegende Bewertungsmethoden dargestellt (Abschnitt 6.3.1). Da gemäß der Ausführungen in Abschnitt 6.1 das Bewertungsverfahren dreigeteilt ist, werden in den Abschnitten 6.3.2 bis 6.3.4 die jeweiligen Bewertungsmethoden für die unterschiedlichen Betrachtungen vorgestellt. Die Bewertungsmethoden werden dabei auf Basis der Anforderungen gemäß Abschnitt 6.1 ausgewählt. Abschließend wird in Abschnitt 6.3.5 die gesamthafte Darstellung des Bewertungsverfahrens präsentiert. Die inhaltliche Ausgestaltung der Bewertungsmethoden (u. a. Kriterien, Gewichtung, Skalen) erfolgt in Abschnitt 6.4.

6.3.1 Bewertungsmethoden im Überblick

In der Literatur existieren unterschiedliche Übersichten von Bewertungsmethoden. Nach Wahren sind Bewertungsmethoden in vier Oberkategorien (klassische Methoden, vergleichende Methoden, ideenerweiternde Methoden und finanzwissenschaftliche Methoden) eingeteilt. Beispiele für die klassischen Methoden sind Pro- und Contra-Methoden, Checklisten und die SWOT-Analyse. Die Nutzwertanalyse, die Kreativitäts-Innovations-Matrix und Portfolio-Methoden ermöglichen den Vergleich zwischen verschiedenen Handlungsalternativen. Um bestehende Ideen zu erweitern, werden u. a. die Quintessenz-Technik sowie die Kundennutzenmatrix verwendet. Zu

den finanzwissenschaftlichen Methoden zählen bspw. die statische und dynamische Investitionsrechnung sowie die Kosten-Nutzen-Analyse. [Wahren 2004, S. 172–190]

Illés et al. gliedern Bewertungsmethoden in die Kategorien Argumente, Zeit, Klassen, Zielvorgaben, Nutzen / Kosten, Risiko, Empfindlichkeit und Kausalität. Tabelle 33 zeigt einen Auszug der verschiedenen Methoden für die ersten fünf Einteilungsaspekte. [Illés et al. 2007, S. 193f.]

Tabelle 33: Übersicht von Bewertungsmethoden nach Illés et al., eigene Darstellung i. A. a. [Illés et al. 2007, S. 193f.]

Einteilungsaspekte		Methoden
Bewertung argumentativer Aspekte (Argumente)		<ul style="list-style-type: none"> • Vorteile / Nachteile • Delphi-Methode • SWOT-Matrix
Bewertung zeitabhängiger Aspekte (Zeit)		<ul style="list-style-type: none"> • S-Kurve • Trendprognose • Exponentielle Glättung • Szenario-Technik
Bewertung von Zusammenhängen (Klassen)		<ul style="list-style-type: none"> • Pareto-Methoden • Portfolio • Clusteranalyse • Morphologischer Kasten
Bewertung von Zielvorgaben (Soll-Ist)		<ul style="list-style-type: none"> • Checklisten • Benchmarking • Balanced Scorecard
Bewertung quantifizierbarer Aspekte (Nutzen, Kosten)	Nutzen / Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzwertanalyse • Nützlichkeitsanalyse • Nutzwert-Kosten-Analyse
	Dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung	<ul style="list-style-type: none"> • Kapitalwertmethode • Annuitätenmethode • Kalkulationsprinzip • Nutzungsdauer
	Statische Wirtschaftlichkeitsrechnung	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenvergleichsrechnung • Gewinnvergleichsrechnung • Break-Even-Analyse • Erlösrechnung
	Unternehmensbewertung	<ul style="list-style-type: none"> • Zukunftserfolgswertmethode • Ertragswertmethode • Übergewinnabgeltung
	Bewertung von Umweltaspekten	<ul style="list-style-type: none"> • Abfallbilanz • Rohstoffbilanz • Schadstoffbilanz

Weitere Übersichten bezüglich Bewertungsmethoden werden u. a. von Sandau und Bruun dargestellt [Sandau 2009, S. 67; Bruun und Vanderschuren 2017, S. 107–124].

Im Bereich der Verkehrsplanung hat sich eine Dreiteilung der Bewertungsmethoden etabliert, die von mehreren Autoren, aber vor allem auf Basis der FGSV vorgeschlagen werden: nicht-formalisierte Verfahren, teil-formalisierte Verfahren und formalisierte Verfahren [FGSV 2010b, S. 15; FGSV 2018a, S. 32f.; Kühne et al. 2005, S. 16; Schönharting 2021, S. 426; Adams 2008, S. 5f.; Beckmann 2000, S. 56–60; Scheiner 2003, S. 1–9; Kirchhoff 2002, S. 66].

Anhand des Einsatzgebiets, der eingesetzten Verfahren und der Hinweise zur Anwendung werden die Bewertungsmethoden im Folgenden erläutert. Mit nicht-formalisierten Verfahren werden unterschiedliche Maßnahmen auf verbaler Ebene abgewogen, wobei optional quantifizierbare Angaben eingebracht werden können (siehe Tabelle 34). Nicht-formalisierte Verfahren werden entweder als Vorscreening vor teil-formalisierten oder formalisierten Verfahren oder im Anschluss an diese Verfahren zur ganzheitlichen Bewertung eingesetzt. Aufgrund der verbalen Bewertung erfolgt eine oberflächliche Diskussion der Maßnahmen hinsichtlich ihrer jeweiligen Vorteilhaftigkeit. Dementsprechend werden die Auswirkungen auf Basis argumentativer Begründungen abgeschätzt. Dies ist der Grund dafür, dass die Verfahren hauptsächlich bei nicht quantifizierbaren Wirkungen angewendet werden. Als Verfahren werden vorwiegend Befragungen von Einzelpersonen oder Expertengruppen eingesetzt. Dadurch, dass keine quantifizierbaren Wirkungen erhoben werden, ist die Anwendung dieser Verfahren kostengünstig und einfach. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Prüfung, inwieweit eine Variante vorteilhaft ist, erschwert wird. [FGSV 2010b, S. 15; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5; Scheiner 2003, S. 1; Kirchhoff 2002, S. 67]

Tabelle 34: Übersicht der nicht-formalisierten Verfahren, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 15; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5; Kirchhoff 2002, S. 67]

Nicht-formalisierte Verfahren	
Einsatzgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • Im Vorfeld der Planungen (Vor-Screening) • Zur Eliminierung von „eindeutig“ unzulässigen oder unvorteilhaften Maßnahmen • Zur Ergänzung von nicht quantifizierbaren Wirkungen • Zur ganzheitlichen Bewertung der Ergebnisse
Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Intuitive Verfahren (Befragung Einzelpersonen) • Common Sense-begründete Verfahren (Expertengruppen) • Expertenurteile, Delphi-Methode (mehrfache Expertenbefragung) • Öffentliche Diskussion und Abstimmung
Hinweise zur Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach und kostengünstig • Keine hohen Anforderungen an die Datenqualität • Berücksichtigung von Wirkungsvermutungen bzw. –vorerfahrungen • Eingeschränkte Kontrollmöglichkeit der Zulässigkeits- und Vorteilhaftigkeitsprüfungen

Bei teil-formalisierten Verfahren (siehe Tabelle 35) werden möglichst sämtliche relevanten Kriterien für die Bewertung einbezogen. Da die verschiedenen Wirkungen nicht miteinander verrechnet werden, ist die Dimension des Kriteriums vernachlässigbar. Dennoch werden überwiegend quantifizierbare Wirkungen verwendet. Die Verfahren werden im frühen Planungsstadium eingesetzt und dienen dazu, Maßnahmen einzuordnen, unzulässige Maßnahmen auszuschließen oder eine Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen darzustellen. Als Verfahren dieser Kategorie sind die multi-kriterielle Wirkungsanalyse, die Verträglichkeitsanalyse, das Eliminationsverfahren und das formalisierte Abwägungs- und Rangordnungsverfahren (FAR) zu nennen. Bis auf das FAR sind die Verfahren flexibel und frei gestaltbar. Hinsichtlich des Aufwands existieren Unterschiede, sodass das Eliminationsverfahren und das FAR einen hohen Aufwand verursachen. [FGSV 2010b, S. 16–23; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5f.; Kirchhoff 2002, S. 67f.]

Tabelle 35: Übersicht der teil-formalisierten Verfahren, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 16–23; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5f.; Kirchhoff 2002, S. 67f.]

Teil-formalisierte Verfahren	
Einsatzgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • Im frühen Planungsstadium / Grobbewertung • Einordnung von Maßnahmen nach ihrer Vorteilhaftigkeit • Abgrenzung von zulässigen und unzulässigen Maßnahmen / Varianten • Bewertung Mit-/Ohne-Fall-Prinzip • Von der Fachebene zur Vorbereitung von Entscheidungen
Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Multikriterielle Wirkungsanalyse: Vorgehen für Machbarkeitsstudien • Verträglichkeitsanalyse: Vergleich zwischen Anforderungsprofil und Auswirkungen. Festlegung auf Basis von Gesetzen • Eliminationsverfahren: Verschärfung oder Lockerung von Standards auf Basis von Trade-offs um Varianten einzugrenzen • FAR: Vergleich zweier Varianten mit Vor- und Nachteilen
Hinweise zur Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsanalyse und Verträglichkeitsanalyse: Anwendung frei gestaltbar, Verwendung von verschiedenen Skalen möglich, Einzelwirkungen bleiben erkennbar, qualitative und quantitative Bewertung möglich • Eliminationsverfahren: Hohe Flexibilität, hoher Aufwand, Einbeziehung von Verfahrensbeteiligten, qualitative, quantitative und monetäre Wirkungsbeschreibung möglich • FAR: Rangordnung und Grobbewertung ist möglich, sehr aufwändig und beschränkt die Anzahl der zu untersuchenden Varianten, nicht vergleichbare Kriterien werden kompensiert

Formalisierte Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass Wirkungen verrechnet werden, da die Ergebnisse der Indikatoren zu Nutzenpunkten monetarisiert, bzw. transformiert werden können. Dafür wird eine hohe Datenverfügbarkeit benötigt. Originalskalierte Werte werden in der Regel ergänzend ausgewiesen. Ausgeschlossen werden zunächst Wirkungselemente, die nicht monetarisiert werden können. Zu den formalisierten Verfahren zählen die Kosten-Nutzen-Analyse, die Nutzwertanalyse und

die Kosten-Wirksamkeits-Analyse. Diese Verfahren besitzen gemäß der Bundeshaushaltsordnung eine hohe Praxisrelevanz und entsprechen den Anforderungen der öffentlichen Hand (siehe Tabelle 36). [FGSV 2010b, S. 24–30; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 6–10; Scheiner 2003, S. 1f.; Kirchhoff 2002, S. 59f.]

Tabelle 36: Übersicht der formalisierten Verfahren, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 24–30; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 6–10]

Formalisierte Verfahren	
Einsatzgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • Für Infrastrukturmaßnahmen (Verkehrsanlagen und Fahrzeuge) • Beurteilung von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündel • Rangreihung und Vergleich von Varianten • Standardverfahren bei großen Investitionsmaßnahmen
Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten-Nutzen-Analyse: Kosten und Nutzen werden in Geldeinheiten ausgedrückt und auf den Bezugszeitpunkt diskontiert. • Nutzwertanalyse: Vergleichende Bewertung unter Verwendung eines Zielsystems. Alle Wirkungen inkl. Kosten werden in einer Zielwertfunktion in dimensionslose Punkte transformiert. • Kosten-Wirksamkeits-Analyse: Kosten werden der dimensionslosen Größe Wirksamkeit gegenübergestellt.
Hinweise zur Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten-Nutzen-Analyse: Rangreihung ist möglich, nur monetäre und monetarisierte Größen können berücksichtigt werden, Kompensation der Wirkungen, Gewichtung der Indikatoren über standardisierte Kostensätze • Nutzwertanalyse: Es können auch nicht quantifizierbare Effekte berücksichtigt werden, Rangreihung ist möglich, Gewichtung hat subjektiven Charakter, Kompensation der Wirkungen • Kosten-Wirksamkeits-Analyse: Es können auch nicht quantifizierbare Effekte berücksichtigt werden, Kosten werden explizit betrachtet. Gewichtung hat subjektiven Charakter, Kompensation von Wirkungen

6.3.2 Bewertung der Eignung

Gemäß Abschnitt 6.1 sollen infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien einer Straße bewertet werden, um die Eignung zu bestimmen. Bei diesen Kriterien handelt es sich um quantitative Kriterien, die eindeutig beschrieben werden können. Die Kriterien werden jedoch in dieser Bewertung nicht monetarisiert.

Nicht-formalisierte Verfahren sind für diese Form der Bewertung nicht geeignet, da diese auf öffentliche Diskussionen oder Experten ausgelegt sind und nur bei nicht quantifizierbaren Wirkungen eingesetzt werden [FGSV 2010b, S. 15; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5]. Teil-formalisierte Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass quantitative und qualitative Wirkungen einbezogen, aber nicht miteinander verrechnet werden [FGSV 2010b, S. 16]. Das Ziel des Bewertungsverfahrens ist es, die Kriterien miteinander zu verrechnen, um somit Straßen für den Einsatz automatisierter Busse zu priorisieren. Sofern eine Verrechnung nicht durchführbar ist, können teilformalisierte Verfahren Anwendung finden, um unzulässige Maßnahmen auszuschließen oder die Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen darzustellen. Aus diesem Grund

wird ein teil-formalisiertes Verfahren in dieser Bewertungsstufe eingesetzt. Das Eliminationsverfahren und das FAR sind sehr aufwändig [FGSV 2010b, S. 20–23]. Ein Nachteil der Verträglichkeitsanalyse besteht darin, dass keine Rangreihung der Alternativen vorgenommen wird [FGSV 2010b, S. 18f.]. Dies ist jedoch eine Anforderung an die Bewertung (siehe Abschnitt 6.1). Da gemäß Beckmann die Wirkungsanalyse in allen Planungsstufen eingesetzt werden kann, wird diese als Bewertungsmethode ausgewählt [FGSV 2010b, S. 16f.; Beckmann 2000, S. 44]. Außerdem ist diese Methode für Machbarkeitsanalysen prädestiniert [FGSV 2010b, S. 16f.]. Für die Wirkungsanalyse spricht zudem, dass diese frei gestaltbar ist, unterschiedliche Skalen verwenden werden können und eine qualitative sowie quantitative Bewertung durchgeführt werden kann [FGSV 2010b, S. 16f.].

Formalisierte Verfahren verwenden quantitative Kriterien und sind für den Themenbereich der Infrastrukturmaßnahmen vorgesehen, weshalb diese Verfahren für die Bewertung der Eignung prädestiniert sind [FGSV 2010b, S. 24f.; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 6]. Für die Kosten-Nutzen-Analyse sowie für die Kosten-Wirksamkeits-Analyse sind die Auswirkungen hinsichtlich Kosten und Nutzen zu bestimmen [FGSV 2010b, S. 24–30]. Da dies nicht Teil dieser Bewertungsstufe ist, werden beide Verfahren ausgeschlossen. Die Nutzwertanalyse eignet sich deshalb für diesen Anwendungsfall, weil keine Monetarisierung der Kriterien durchgeführt und die Zielerreichung dimensionslos bewertet wird [FGSV 2010b, S. 27f.; Adams 2008, S. 8–10].

In der Literatur wird ein Mix von mehreren Methoden empfohlen, weshalb für die Bewertung der Eignung die Wirkungsanalyse und die Nutzwertanalyse angewendet werden [Beckmann 2000, S. 53]. Im Folgenden wird die Vorgehensweise beider Verfahren erläutert. Dabei werden der ganzheitliche Planungsprozess (Kapitel 5) und die Anforderungen des Planungsprozesses (Abschnitt 6.1) in die Beschreibung eingebunden. Die Schritte der Wirkungsanalyse werden in Abbildung 41 dargestellt.

Vorgehensweise der Wirkungsanalyse
1. Untersuchungsanlass / Definition der Aufgabe
2. Festlegung von Zielen + Kriterien zur Wirkungsermittlung
3. Darstellung des Ohne-Falls und Auswahl und Beschreibung der Varianten
4. Ermittlung der Wirkungen
5. Ableitung der Wirkungsprofile (Stärken-Schwächen-Profil)
6. Ergebnisdarstellung als vergleichende Gegenüberstellung

Abbildung 41: Vorgehensweise der Wirkungsanalyse, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 17]

Der Untersuchungsanlass bzw. die Ziele für die Wirkungsanalyse werden bereits im Planungsprozess festgelegt. Als Kriterien werden infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien verwendet, die einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse besitzen. Eine Darstellung des Ohne-Falls kann optional in die Bewertung mit einbezogen werden. Da mit dieser Methode sämtliche Straßen in einem Bedienungsgebiet bewertet werden, entfällt dieser Schritt. Für die Ermittlung der Wirkungen werden alle zuvor ausgewählten Kriterien / Daten erhoben. Um die Wirkungen

einzuordnen, können ordinale und nominale Skalen ausgewählt werden. Die Wirkungen werden anschließend zusammengefasst und Wirkungsprofile erstellt. Zum Abschluss werden die Einzelergebnisse jedes Wirkungskriteriums nicht aggregiert, sondern bspw. in einem Stärke-Schwächen-Profil dar- und einander gegenübergestellt. [FGSV 2010b, S. 17]

Eine Nutzwertanalyse ist in neun Schritte aufgeteilt, wie Abbildung 42 zeigt. Die Schritte der Nutzwertanalyse weisen eine Ähnlichkeit zum Vorgehen der Wirkungsanalyse auf. Der Untersuchungsanlass bzw. die Ziele dieser Bewertung werden wie bereits geschildert im ganzheitlichen Planungsprozess festgelegt. Innerhalb der Bewertungsmethode werden infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien (nicht monetarisiert) verarbeitet. Zusätzlich werden die Kriterien gewichtet und in einer Nutzenfunktion verarbeitet. Um die Nutzenfunktion festzulegen, wird die Zielerreichung jedes Kriteriums von 0 % bis 100 % definiert. Eine Darstellung des Ohne-Falls entfällt als Bearbeitungsschritt, da sämtliche Straßen in einem Bedienungsgebiet bewertet werden. Auf Basis der Datenerhebung von infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Daten (siehe Wirkungsanalyse) werden der Zielerreichungsgrad und der Teilnutzen für jedes Kriterium bestimmt. Anschließend wird der Teilnutzen mit der Gewichtung multipliziert, um die Teilnutzwerte zu erzeugen. Diese werden im siebten Schritt zu einem Gesamtnutzwert addiert, woraus die Reihenfolge der Varianten ableitbar ist. Eine Sensitivitätsanalyse dient dazu, die Empfindlichkeit der Ergebnisse auf Veränderungen der Gewichtung oder Ausprägungen der Kriterien zu überprüfen. Abschließend werden die Gesamtergebnisse dargestellt und die Variante mit dem höchsten Gesamtnutzwert priorisiert. [FGSV 2010b, S. 28; Adams 2008, S. 8–10; Scheiner 2003, S. 6f.; Liedtke et al. 2020, S. 42–44; Westermann 2012, S. 38–49]

Vorgehensweise der Nutzwertanalyse
1. Untersuchungsanlass / Definition der Aufgabe
2. Festlegung von Zielen und Bestimmung von Indikatoren/Messgrößen
3. Festlegung der Gewichtung
4. Festlegung der Nutzenfunktion / Skalierung aller Kriterien
5. Auswahl und Darstellung von Ohne-Fall / Varianten (Optional)
6. Ermittlung der Zielerreichungsgrade der Teilnutzenwerte
7. Aggregation der Teilnutzwerte zu einem Gesamtnutzwert
8. Sensitivitätsanalyse
9. Ergebnisdarstellung

Abbildung 42: Vorgehensweise der Nutzwertanalyse, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 28; Adams 2008, S. 8–10; Scheiner 2003, S. 6f.; Liedtke et al. 2020, S. 42–44; Westermann 2012, S. 38–49; Rinza und Schmitz 1992, S. 38–40]

Bei beiden Verfahren (Wirkungsanalyse und Nutzwertanalyse) können Kriterien mit unterschiedlichen Dimensionen verarbeitet werden [FGSV 2010b, S. 16–28; Liedtke et al. 2020, S. 42–44]. Außerdem können die Verfahren flexibel gestaltet werden, sodass die Anzahl der Kriterien und die Auswirkungen angepasst werden können [FGSV 2010b, S. 16–28; Beckmann 2000, S. 58; Liedtke et al. 2020, S. 42f.;

Westermann 2012, S. 38–49]. Dementsprechend besteht bei beiden Verfahren die Möglichkeit, die Anzahl der Kriterien sowie die Ausprägungen der einzelnen Kriterien in Abhängigkeit der zukünftigen technologischen Entwicklung im Bereich des automatisierten Fahrens zu verändern.

6.3.3 Bewertung von Kosten und Eignung

In der zweiten Bewertungsstufe werden die Kosten dargestellt, die benötigt werden, um eine Straße für den Einsatz automatisierter Busse zu ertüchtigen. Dementsprechend werden in der zweiten Bewertungsstufe die Eignung einer Straße mit den Kosten verglichen. Wie bereits in Abschnitt 6.3.2 dargestellt, handelt es sich bei den infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien um quantitative, nicht-monetäre Kriterien. Die Kosten resultieren aus Maßnahmen, die für die Herrichtung der Straße benötigt werden, um die Eignung einer Straße zu verbessern. Eine Maßnahme könnte z. B. die Einführung eines Parkverbots sein, wofür Kosten für die Genehmigung und die Beschaffung der Schilder anfallen. Kosten können demnach mit Geldwerten unterlegt und monetarisiert werden. Neben den Kosten kann eine Maßnahme zu einer Ablehnung in der Bevölkerung führen, weil diese ggf. durch das Parkverbot eingeschränkt wird. Diese Ablehnung (gesellschaftliche Konsequenzen) kann nicht quantifiziert werden. Dennoch wird dieses Kriterium berücksichtigt, um die quantitative Bewertung zu ergänzen.

Gemäß der Vorherigen Ausführungen werden in dieser Bewertungsstufe hauptsächlich quantifizierbare Kriterien betrachtet. Aus diesem Grund werden nicht-formalisierte Verfahren für diese Bewertungsstufe ausgeschlossen [FGSV 2010b, S. 15; FGSV 2018a, S. 32f.; Adams 2008, S. 5]. Die gesellschaftlichen Konsequenzen sind zwar nicht das Hauptmerkmal dieser Betrachtung, werden aber dennoch berücksichtigt. Teil-formalisierte Verfahren eignen sich bei quantitativen und qualitativen Kriterien, weshalb aus den bereits in Abschnitt 6.3.2 genannten Gründen, die Wirkungsanalyse als Verfahren ausgewählt wird [FGSV 2010b, S. 16; Adams 2008, S. 5f.].

Für den Vergleich von Kosten und Eignung sind jedoch formalisierte Bewertungsverfahren prädestiniert, weil quantitative Kriterien miteinander verrechnet werden [FGSV 2010b, S. 24]. Passend zur Betrachtung in dieser Bewertungsstufe wird die Kosten-Wirksamkeits-Analyse als Methodik ausgewählt. Grund hierfür ist, dass mithilfe dieser Methodik die Kosten einer dimensionslosen Größe gegenübergestellt werden können [FGSV 2010b, S. 29f.; Adams 2008, S. 10; Liedtke et al. 2020, S. 47]. Dabei kann der Zielerreichungsgrad festgestellt werden [FGSV 2010b, S. 29f.]. Dieser stellt dar, welche Kosten für die Eignung einer Straße in Bezug zum Einsatz automatisierter Busse notwendig sind. Zudem ermöglicht dieses Verfahren, mehrere Varianten (in diesem Fall Straßen) zu vergleichen und eine Rangfolge aufzustellen [FGSV 2010b, S. 29f.; Liedtke et al. 2020, S. 47].

Für die Bewertung von Kosten, gesellschaftlichen Konsequenzen und der Eignung werden deshalb die Wirkungsanalyse und die Kosten-Wirksamkeits-Analyse angewendet. Das Vorgehen der Wirkungsanalyse wurde bereits in Abschnitt 6.3.2 erläutert, weshalb an dieser Stelle kurz auf die Änderungen in dieser Bewertungsstufe eingegangen wird. Die Wirkungsanalyse stellt die Kategorien Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen (basierend auf den Maßnahmen) sowie die Eignung

(basierend auf infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien) gegenüber. Dies bedeutet für das Vorgehen, dass neben den bisherigen infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien auch die Infrastrukturmaßnahmen festgelegt werden müssen. Im fünften Schritt des Verfahrens werden die Wirkungen ermittelt. Dabei werden jeder Maßnahme die entsprechenden Kosten sowie mögliche gesellschaftliche Konsequenzen zugeordnet. Die Ableitung der Wirkungsprofile und die Ergebnisdarstellung erfolgen unverändert, aber in Bezug auf die drei Kategorien Kosten, gesellschaftliche Konsequenzen und Eignung.

Eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse gliedert sich gemäß Abbildung 43 in neun Arbeitsschritte, welche eine hohe Ähnlichkeit zur Nutzwertanalyse aufweisen. Untersuchungsanlass und Ziele werden im ganzheitlichen Planungsprozess festgelegt. Neben den infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien werden im zweiten Schritt auch die Kosten und die gesellschaftlichen Konsequenzen der Maßnahmen als Indikatoren festgelegt. Die Gewichtung der Kriterien und die Festlegung der Nutzenfunktion folgen analog der Ausarbeitung in Abschnitt 6.3.2. Im fünften Schritt werden die zu untersuchenden Varianten ausgewählt. Gemäß der vorliegenden Aufgabenstellung werden sämtliche Straßen in einem Bedienungsgebiet betrachtet. Anschließend werden parallel der Teilnutzen jeder Variante auf Basis der Gewichtung sowie die Kosten jeder Variante errechnet. Mittels der Sensitivitätsanalyse wird überprüft, wie empfindlich die Ergebnisse bspw. auf Veränderungen der Gewichtung oder Kosten reagieren. Das Gesamtergebnis wird abschließend dargestellt, indem die Teilnutzwerte zu einem Gesamtnutzen aggregiert und mit den Kosten verglichen werden. Dafür wird der Kosten-Wirksamkeits-Index gebildet, welcher die Kosten je Wirksamkeitspunkt angibt. Auf dieser Basis kann die Variante mit der höchsten Kosten-Wirksamkeit ausgewählt werden. Bei dieser Bewertung werden ausschließlich Kosten und Eignung miteinander verglichen. Die gesellschaftlichen Konsequenzen können dabei berücksichtigt werden, jedoch nicht in die Kalkulation einbezogen werden. [FGSV 2010b, S. 30; Schönharting 2021, S. 433f.; Adams 2008, S. 10; Scheiner 2003, S. 7f.; Liedtke et al. 2020, S. 47]

Vorgehen Kosten-Wirksamkeits-Analyse
1. Untersuchungsanlass / Definition der Aufgabe
2. Festlegung von Zielen und Bestimmung von Indikatoren/Messgrößen
3. Festlegung der Gewichtung
4. Festlegung der Nutzenfunktion / Skalierung aller Kriterien
5. Auswahl und Darstellung der Varianten
6. Wirkungsermittlung der Zielerreichung in Nutzwertpunkten
7. Ermittlung der Kosten
8. Sensitivitätsanalyse
9. Ergebnisdarstellung

Abbildung 43: Vorgehensweise der Kosten-Wirksamkeits-Analyse, eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 30; Adams 2008, S. 10; Liedtke et al. 2020, S. 47]

Beide Verfahren, die zur Bewertung der Kosten und Eignung verwendet werden (Wirkungsanalyse und Kosten-Wirksamkeits-Analyse), können flexibel gestaltet werden,

sodass Kriterien und Auswirkungen angepasst werden können. Dadurch können die Verfahren auch zukünftig bei Veränderungen der Leistungsfähigkeit von automatisierten Bussen eingesetzt werden. [FGSV 2010b, S. 16–30; Beckmann 2000, S. 58]

6.3.4 Bewertung von Kosten und Nutzen

Auf Basis der vorherigen Bewertung, stellt diese Bewertungsstufe die Kosten dem möglichen Nutzen einer Straße gegenüber. Die Kosten sind ein monetäres quantitatives Kriterium basierend auf den Maßnahmen zur Ertüchtigung einer Straße (siehe Abschnitt 6.3.3). In Anlehnung an die vorangegangene Analyse werden im Folgenden zudem die gesellschaftlichen Konsequenzen auf der „Kostenseite“ berücksichtigt. Der Nutzen bezieht sich auf positive Auswirkungen, die durch den Einsatz eines automatisierten Busses in der jeweiligen Straße erreicht werden können. Um die Zielgrößen miteinander verrechnen zu können, wird der Nutzen ebenfalls als monetäres, quantitatives Kriterium dargestellt.

Das Hauptaugenmerk der Bewertung gilt dem Vergleich von Kosten und Nutzen der Straßen in Bezug auf den Einsatz automatisierter Busse. Demnach wird die Kosten-Nutzen-Analyse als formalisiertes Bewertungsverfahren für diese Bewertungsstufe ausgewählt [FGSV 2010b, S. 24–26; Adams 2008, S. 6–8; Liedtke et al. 2020, S. 58]. Mit der Kosten-Nutzen-Analyse können gesamtwirtschaftliche Kosten dem monetären Nutzen (beides in Geldeinheiten) gegenübergestellt werden [FGSV 2010b, S. 24–26; Adams 2008, S. 6–8; Scheiner 2003, S. 2f.]. Weiterhin bietet die Kosten-Nutzen-Analyse den Vorteil, dass mehrere Varianten beurteilt werden können und auf Basis einer Entscheidungsgröße eine Rangfolge gebildet werden kann [FGSV 2010b, S. 24–26; Adams 2008, S. 6–8; Scheiner 2003, S. 2f.]. Da auch gesellschaftliche Konsequenzen mitbetrachtet werden sollen, wird die Wirkungsanalyse als ergänzendes Verfahren eingesetzt [FGSV 2010b, S. 16f.]. Nicht-formalisierte Bewertungsverfahren finden für diese Bewertungsstufe keine Anwendung [FGSV 2010b, S. 15; Adams 2008, S. 5]. Zusammenfassend werden die Wirkungsanalyse und die Kosten-Nutzen-Analyse für die Bewertung von Kosten und Nutzen eingesetzt.

Das Vorgehen der Wirkungsanalyse wurde bereits in den Abschnitten 6.3.2 und 6.3.3 erläutert, weshalb an dieser Stelle kurz auf die Änderungen in dieser Bewertungsstufe eingegangen wird. Es erfolgt eine Anpassung der Kriterien, die sich in die Kategorien Kosten der Infrastrukturmaßnahmen, gesellschaftliche Konsequenzen und Nutzenkriterien unterteilen. Während die Kosten sowie die gesellschaftlichen Konsequenzen bereits in der vorherigen Bewertungsstufe ermittelt worden sind, werden die Nutzenkriterien in dieser Bewertungsstufe erhoben. Dabei werden Nutzenkriterien ausgewählt, welche in der frühen Planungsphase der Verkehrswegeplanung mit geringem Aufwand ermittelt werden können und möglichst unabhängig von der Ausgestaltung des Liniennetzes und des Fahrplans sind. Abschließend werden die Daten der Kriterien (hauptsächlich der Nutzenkriterien) erhoben, in einem Wirkungsprofil verarbeitet und die Ergebnisse visualisiert.

Die Vorgehensweise der Kosten-Nutzen-Analyse wird in Abbildung 44 dargestellt. Die ersten beiden Schritte sind mit dem Vorgehen der Nutzwert- sowie Kosten-Wirkungsanalyse identisch. Im zweiten Schritt werden zusätzlich zu den Kosten und gesellschaftlichen Konsequenzen auch die Nutzenkriterien als Indikatoren

festgelegt. Anschließend werden die Rahmenbedingungen in Bezug auf vertragliche Verpflichtungen, finanzielle Möglichkeiten und technische Grenzen überprüft. Auf die Auswahl des Ohne-Falls wird in diesem Zusammenhang verzichtet, da sämtliche Straßen in einem Bedienungsgebiet analysiert werden. Danach werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten im Hinblick auf die Ziele aufgelistet. Im sechsten Schritt werden die monetären Größen (Kosten und Nutzen) für sämtliche Varianten (Straßen) ermittelt. Dabei werden ausschließlich die Kosten der Maßnahmen und die monetarisierten Nutzenkriterien in die Berechnung einbezogen. Die Kosten teilen sich vorwiegend in Investitionskosten, welche einmalig anfallen, und Betriebskosten, welche jährlich anfallen, auf. Um eine Vergleichbarkeit der monetären Größen zu ermöglichen, werden die Kostenarten zu einem Bezugszeitpunkt (bspw. jährliche Kosten) diskontiert. Analog erfolgt eine Diskontierung des Nutzens, der ebenfalls pro Jahr angegeben wird. Wie in den vorangegangenen Bewertungen wird anschließend die Sensitivitätsanalyse eingesetzt. Zum Abschluss zeigt die Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen bzw. das Kosten-Nutzen-Verhältnis, inwieweit eine Variante vorteilhaft ist und welche Varianten priorisiert werden sollten. Bei einem Kosten-Nutzen-Verhältnis > 1 resultiert je investierter Euro ein Nutzen größer einem Euro. [FGSV 2010b, S. 26; Schönharting 2021, S. 427–429; Adams 2008, S. 6–8; Scheiner 2003, S. 2f.; Westermann 2012, S. 10–15]

Vorgehen Kosten-Nutzen-Analyse
1. Untersuchungsanlass / Definition der Aufgabe
2. Festlegung von Zielen und Bestimmung von Indikatoren/Messgrößen
3. Überprüfung von Randbedingungen
4. Auswahl und Darstellung von Ohne-Fall / Varianten (Optional)
5. Erfassung der Vor- und Nachteile
6. Bewertung der Auswirkungen
7. Diskontierung
8. Sensitivitätsanalysen
9. Ermittlung Nutzen-Kosten-Verhältnis
10. Ergebnisdarstellung

Abbildung 44: Vorgehensweise der Kosten-Nutzen-Analyse eigene Darstellung i. A. a. [FGSV 2010b, S. 26; Adams 2008, S. 6–8; Scheiner 2003, S. 2f.; Westermann 2012, S. 10–15]

Sowohl die Wirkungsanalyse als auch die Kosten-Nutzen-Analyse können flexibel gestaltet werden, sodass die Nutzenkriterien und Kosten angepasst werden können. Dadurch können die Verfahren auch zukünftig bei Veränderungen der Leistungsfähigkeit von automatisierten Bussen eingesetzt werden. [FGSV 2010b, S. 16–26; Beckmann 2000, S. 58]

6.3.5 Gesamthafte Darstellung des Bewertungsverfahrens

Zusammenfassend wird das gesamte Bewertungsverfahren in Abbildung 45 dargestellt. Auf Basis der Anforderungen aus Abschnitt 6.1 ist das Bewertungsverfahren in drei Stufen aufgeteilt. Dadurch können Eignung, Kosten und Nutzen einzeln nacheinander und in Kombination miteinander berechnet und ins Verhältnis gesetzt werden. Diese Ergebnisse sind für die weiteren Schritte der Angebotsplanung essenziell. Die

Verwendung von drei Bewertungsstufen bietet zudem die Möglichkeit, verschiedene Blickwinkel auf die Ergebnisse zur Bewertung des Einsatzes automatisierter Busse zu erhalten.

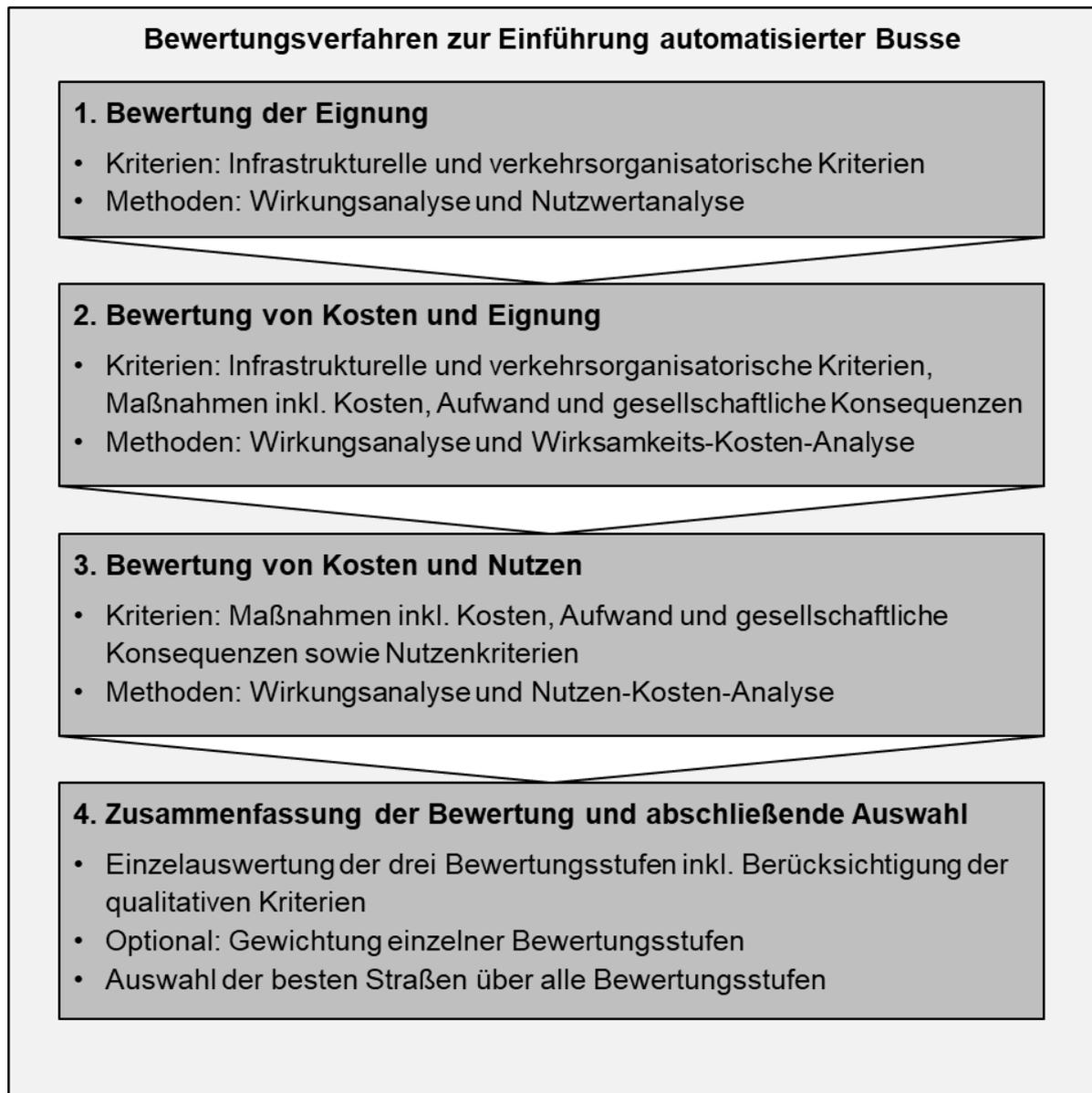


Abbildung 45: Aufbau des Bewertungsverfahrens zur Einführung automatisierter Busse

Innerhalb des Bewertungsverfahrens werden die drei wichtigsten formalisierten Bewertungsverfahren (Nutzwertanalyse, Kosten-Wirksamkeits-Analyse und Kosten-Nutzen-Analyse) eingesetzt. Ergänzt werden die formalisierten Bewertungsverfahren durch die Wirkungsanalyse. Diese gewährleistet eine ganzheitliche Bewertung, da zusätzlich auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden.

Die drei Bewertungsstufen werden nacheinander bearbeitet. Dabei wird die Bewertung der Eignung zuerst durchgeführt, da diese Bewertung den geringsten Aufwand verursacht. Des Weiteren bildet die Nutzwertanalyse die Grundlage, um darauf aufbauend die Kosten zu bestimmen und die Kosten-Wirksamkeits-Analyse anzuwenden. Diese wiederum bildet die Grundlage für die abschließende Kosten-Nutzen-Analyse, für die zusätzlich die Nutzenkriterien bestimmt werden. Aus diesem Grund

wird die Kosten-Nutzen-Analyse, die ggf. das umfassendste Ergebnis generieren kann, zuletzt eingesetzt.

Der jeweilige Nutzer, der das Bewertungsverfahren einsetzt, kann selber entscheiden, welche Bewertungsstufen durchgeführt werden sollen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Bewertungsverfahren aufeinander aufbauen. Deshalb sollte mindestens die Bewertung der Eignung durchgeführt werden. Theoretisch wäre es auch möglich weitere Bewertungsmethoden und Bewertungsstufen einzusetzen. Aus Sicht des Autors würde dies jedoch keinen Mehrwert bieten, da die wichtigsten formalisierten Bewertungsverfahren bereits berücksichtigt werden.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse der einzelnen Bewertungsstufen zusammengefasst, um die Straßen oder Strecken zu identifizieren, welche am ehesten für den Einsatz automatisierter Busse geeignet sind. Bei der Zusammenfassung der Ergebnisse sind verschiedene Betrachtungsweisen möglich. Es könnte bspw. ein Mittelwert über alle drei Bewertungsstufen gebildet und die Varianten mit dem höchsten Mittelwert ausgewählt werden. Dies wird jedoch nicht empfohlen, da die Ergebnisse der monetären Bewertungsmethoden (Kosten-Wirksamkeits- und Kosten-Nutzen-Analyse) nicht ohne Normierung mit den Ergebnissen der Nutzwertanalyse verrechnet werden können. Als weiterer Lösungsansatz werden die drei Bewertungsstufen als einzelne Layer betrachtet. Auf diese Weise werden Straßen ausgewählt, welche bei allen drei Bewertungsstufen zu den besten Straßen zählen. Dabei ist zu diskutieren, ob die Ergebnisse der drei Bewertungsstufen gleich oder unterschiedlich gewichtet werden. Eine unterschiedliche Gewichtung wäre ggf. sinnvoll, wenn bspw. die Ermittlungen der Kosten oder der Nutzenkriterien auf vielen Annahmen beruhen und Unsicherheiten unterliegen. In diesem Fall könnte das Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse geringer gewichtet werden. Die Gewichtung einzelner Stufen kann jedoch auch von der Zielsetzung des Planungsprozesses beeinflusst werden. Falls bspw. die Wirtschaftlichkeit als Zielgröße im Planungsprozess definiert wurde, kann das Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse höher gewichtet werden. Sofern das Ziel des Planungsprozesses darin besteht, einen neuen Stadtteil zu erschließen oder erste Erfahrungen mit der Technologie automatisierter Busse zu gewinnen, wäre das Ergebnis der Nutzwertanalyse höher zu priorisieren.

Zur Berechnung der einzelnen Bewertungsstufen eignet sich eine Rechensoftware, wie bspw. Microsoft Excel. Um die Ergebnisse für eine eventuelle Diskussion adäquat aufzubereiten, empfiehlt sich die Verwendung einer Kartendarstellung. Mithilfe einer GIS-Software können die Berechnungsergebnisse als Karte dargestellt und die einzelnen Straßen farblich hervorgehoben werden.

6.4 Inhaltliche Ausgestaltung des Bewertungsverfahrens

In den folgenden Unterkapiteln werden nacheinander die Inhalte der drei Bewertungsstufen gemäß Abschnitt 6.3 beschrieben. Für jede Bewertungsstufe werden demnach die Kriterien, die Gewichtung und die Skalierung definiert. Darüber hinaus wird jeweils dargelegt, inwiefern die Bewertung anpassungsfähig und flexibel gestaltet werden kann.

6.4.1 Ausgestaltung der Bewertung der Eignung

Die infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien für die Bewertung der Eignung mittels Wirkungsanalyse und Nutzwertanalyse werden in vier Stufen ermittelt. Eine erste Übersicht der Kriterien wird aus der eigenen Projekterfahrung durch zwei Praxisprojekte mit automatisierten Bussen generiert. Durch eine Best-Practice-Analyse von weiteren Projekten wird die Liste erweitert, bzw. verfeinert. Im dritten Schritt werden mittels einer Literaturanalyse weitere Kriterien identifiziert. Dafür wird vor allem die Veröffentlichung von Soteropoulos et al. genutzt [Soteropoulos et al. 2020, S. 68–70]. Im vierten Schritt werden durch eine Expertenbefragung die bereits identifizierten infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien sowie deren Einfluss auf den Einsatz eines automatisierten Busses ermittelt [Beckmann et al. 2025, S. 6–8].

Die jeweiligen Experteninterviews sind derart aufgebaut, dass die Experten den Einfluss der vorher recherchierten Kriterien bewerten können. Zusätzlich können von den Experten auch neue Kriterien genannt werden. Insgesamt wurden von den Experten 53 Kriterien identifiziert, die einen Einfluss auf den Einsatz eines automatisierten Busses besitzen (siehe Tabelle 37) [Beckmann et al. 2025, S. 10].

Insgesamt wurden 13 Experteninterviews durchgeführt, wobei die Experten aus unterschiedlichen Bereichen stammen. Zu den Bereichen zählen Forschung, Verkehrsunternehmen, Zulassungsbehörden, Hersteller automatisierter Fahrzeuge und Industrie. Dadurch werden verschiedene Blickwinkel auf den Einsatz automatisierter Busse berücksichtigt. Die Kriterien, die in Tabelle 37 dunkelgrün markiert sind, wurden von allen 13 Experten genannt. Muss-Kriterien (hellgrün markiert) wurden von über 75 % der Experten genannt, während Soll-Kriterien (orange markiert) von über 50 % der Experten aufgeführt wurden. Kriterien, die von weniger als 50 % der Experten genannt wurden, werden als Kann-Kriterien (gelb markiert) bezeichnet. Zur besseren Übersicht werden die Kriterien in fünf Kategorien eingeteilt. Kriterien der Straßeninfrastruktur beziehen sich auf sämtliche bauliche Aspekte der Straße. Zu den kreuzenden Situationen zählen insbesondere Verkehrssituationen, in denen sich zwei oder mehrere Fahrzeuge kreuzen können, sowie Situationen, in denen Fußgänger involviert sind. Die Menge, die Diversität sowie die Geschwindigkeit der Objekte und Hindernisse werden in der dritten Kategorie zusammengefasst. Technologien zur Lokalisierung und Kommunikation bilden die vierte Kategorie. Kriterien, welche die ODD bei der Genehmigung aber auch im laufenden Betrieb beeinflussen, werden abschließend in der fünften Kategorie eingeordnet. [Beckmann et al. 2025, S. 6–11]

Tabelle 37: Übersicht der Kriterien für die Nutzwertanalyse, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 10]

Straßeninfrastruktur	Kreuzende Situationen	Objekte	Lokalisierung und Kommunikation	Stabilität und Genehmigung der ODD
Steigung	Kreuzungen	Parkende Fahrzeuge	Mobile Datenverbindung	Baustellen
Unterführungen	Lichtsignalanlagen	Fußgängerzone	Satellitenanzahl	Rettungsdienststellen
Fahrbahnmarkierung	Kreisverkehre	Höchstgeschwindigkeit	Vegetation / Häuser	Vegetation / Bäume
Fahrbahnbreite	T-Kreuzungen	Verkehrsaufkommen (Menge)		Nebel
Fahrradweg	Fußgängerüberwege	Statische Hindernisse		Regen
Anzahl Fahrspuren	Straßenbevorrechtigung	Verkehrsschilder kreuzende Tiere		Schnee
ÖPNV-Haltestellen	Kreuzende Eisenbahnübergänge	Einbahnstraße		Straßenbeleuchtung
Straßenbahnschienen		Parkverbote		Anzahl Unfälle
Fußweg		Halteverbote		Raumordnung
Durchgängigkeit der Straße		Verkehrsaufkommen (Diversität)		Gewichtsbeschränkung
Fahrbahnoberfläche		Parallele Buslinien		Temperatur
Kurven		Verkehrsschilder Splitt, Schotte		Wind
Anlieferbereiche		Bereiche mit viel Personenverkehr		Flüsse / Gräben / Gewässer
				Denkmalschutzgebiet
				Staub
				Verschmutzte Fahrbahn
				Tiefstehende Sonne

Legende: dunkelgrün = Einstimmige Kriterien (von allen 13 Experten genannt); grün = Muss-Kriterien (von >= 75 % der Experten genannt); orange = Soll-Kriterien (von >= 50 % der Experten genannt); gelb = Kann-Kriterien (von < 50 % der Experten genannt)

Zur Bestimmung der Gewichtung der einzelnen Kriterien wird die in der Literatur empfohlene Methode der absoluten Gewichtung angewendet [Rinza und Schmitz 1992, S. 178–182; Kühnapfel 2021, S. 38–48; Schönharting 2021, S. 419–426]. Im Rahmen des Experteninterviews wurde der Einfluss der Kriterien auf den Einsatz eines automatisierten Busses auf einer Skala von „null“ bis „drei“ (keine Angabe, niedrig, mittel, hoch) bewertet. Das Ergebnis wurde anschließend in eine prozentuale Gewichtung umgewandelt. Beispielsweise wird das Kriterium „Steigung“ mit 2,74 % gewichtet. Die Steigung wirkt direkt negativ auf den Einsatz automatisierter Busse und ist ein Ausschlusskriterium. Im Anhang A.8 werden die Kriterien des Experteninterviews inklusive Gewichtung und Wirkungsrichtung vollständig dargestellt [Beckmann et al. 2025, S. 6–12]

In der Nutzwertanalyse wird der Teilnutzen jedes Kriteriums definiert. Aus diesem Grund werden für jedes Kriterium mögliche Ausprägungen und eine adäquate Skalierung erarbeitet. Für die Nutzwertanalyse wird bezüglich der Skala der einzelnen Kriterien eine Kardinalskala mit einer Länge von fünf bis zehn Punkten empfohlen [Rinza und Schmitz 1992, S. 193–199; Kühnapfel 2021, S. 56–76]. Auf Basis der Ausprägungen der einzelnen Kriterien wird eine Skala von „null“ bis „sechs“ im umgekehrten Schulnotensystem ausgewählt [Rinza und Schmitz 1992, S. 69–73; Kühnapfel 2021, S. 56–76]. Die Skalierung der Kriterien basiert vorwiegend auf den Einschätzungen aus den Experteninterviews. Weiterhin werden die Ergebnisse einer Internetrecherche sowie eigene Annahmen für die Erarbeitung der Skalierung verwendet. Um eine allgemeingültige Skalierung für Deutschland zu entwickeln, wird sich bei der Festlegung der Ausprägungen vorwiegend an Werten orientiert, die für ganz Deutschland repräsentativ sind. Tabelle 38 zeigt exemplarisch die Skalierung der Fahrbahnbreite und Steigung. Auf Autobahnen weist eine Fahrspur eine Breite von bis zu 3,75 m auf [Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011]. Aus diesem Grund wird eine Fahrbahnbreite bei zwei Spuren von über 8 m als Höchstwert angenommen und mit einer „sechs“ bewertet.

Tabelle 38: Exemplarische Darstellung der Skalierung von Fahrbahnbreite und Steigung

Nutzwert	Fahrbahnbreite (zweispurig)	Steigung
6	≥ 8 m	≤ 1 %
5	≥ 7 m	≤ 5 %
4	≥ 6 m	≤ 10 %
3	≥ 5 m	≤ 15 %
2	≥ 4 m	≤ 20 %
1	< 4 m	≤ 25 %
0	Keine Bewertung	> 25 %

Auf Basis des Höchstwertes erfolgt die Abstufung der weiteren Ausprägungen. Da durch infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Maßnahmen die Fahrbahnbreite für den Einsatz automatisierter Busse ertüchtigt werden kann, erhält der Teilnutzen „null“ keine Bewertung. Aufgrund dessen, dass die Steigung negativ auf den Einsatz automatisierter Busse wirkt, werden geringere Steigungen mit einem höheren Teilnutzen bewertet. Auf dieser Grundlage werden Steigungen unter 1 % mit einer „sechs“ bewertet. Davon ausgehend werden die weiteren Ausprägungen zugeordnet. Die Steigung kann nicht durch infrastrukturelle oder verkehrsorganisatorische

Maßnahmen verändert werden. Daher wird ein Steigungswert dem Teilnutzen „null“ zugewiesen. In Deutschland weist die steilste Straße eine Steigung von 25,3 % auf, weshalb eine Steigung von über 25 % mit „null“ bewertet wird [Trefz 2016]. Im Anhang A.9 wird die Gesamtübersicht der Skalierung für jedes Kriterium inkl. der verwendeten Quellen dargestellt.

Die Ermittlung infrastruktureller und verkehrsorganisatorischer Kriterien für einzelne Straßen kann unter Verwendung öffentlicher Datenquellen wie Google Maps, Apple Maps und OpenStreetMap erfolgen. Um die Daten zu validieren, werden die Werte mit Daten der Kommune sowie einer stichprobenartigen Vorort-Begehung verglichen. Kommunen, die bereits über eine umfassende Datenbasis verfügen, profitieren in hohem Maße hiervon, da der Erhebungsprozess einen hohen zeitlichen Aufwand erfordert.

Es ist anzunehmen, dass im Rahmen der zukünftigen technologischen Entwicklung im Bereich automatisierter Busse Kriterien aus dem Bewertungsverfahren eliminiert werden, da diese den Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse verlieren. In diesem Fall wird die Gewichtung der verbleibenden Kriterien wieder auf 100 % angepasst. Somit wird in diesem Fall die Gewichtung des ausscheidenden Kriteriums (bspw. 3 %) auf alle verbleibenden Kriterien (bspw. 52 Kriterien) gleichverteilt. Sollte ein neues Kriterium in das Bewertungsverfahren aufgenommen werden, kann die Gewichtung des neuen Kriteriums auf Basis eines paarweisen Vergleichs mit den bestehenden Kriterien oder mittels Experteninterviews erfolgen. Analog zur vorherigen Anpassung würde die Gewichtung der gesamten Kriterien wieder auf 100 % angepasst werden, sodass das neue Kriterium dann gleichermaßen die Prozentpunkte von sämtlichen bereits vorhandenen Kriterien erhält.

Die technologische Weiterentwicklung hat zudem einen Einfluss auf die Skalierung. Sollten sich die maximal möglichen Grenzwerte der automatisierten Busse (bspw. die Steigung von max. 25 % auf 35 %) verändern, ist die Skala dementsprechend anzupassen. In diesem Fall könnte bspw. der neue untere Grenzwert (35 %) mit dem oberen Grenzwert (1 %) subtrahiert und die Wertungsstufen dazwischen gleichverteilt definiert werden² (34 % geteilt durch fünf Wertungsstufen = 6,8% pro Wertungsstufe). Tabelle 39 verdeutlicht diese Berechnung, indem die Anpassung der Skala visualisiert wird. Führt eine neue technologische Entwicklung (bspw. 6G als Mobilfunkverbindung) dazu, dass sich der obere Grenzwert ändert, wird die Skala nach unten analog angepasst.

Tabelle 39: Anpassung der Skalierung am Beispiel der Steigung

Steigung (Skala alt)	Steigung (Skala neu)
6: <= 1 %	6: <= 1 %
5: <= 5 %	5: <= 8 %
4: <= 10 %	4: <= 15 %
3: <= 15 %	3: <= 12 %
2: <= 20 %	2: <= 28 %
1: <= 25 %	1: <= 35 %
0: > 25 %	0: > 35 %

² Die Berechnung lautet wie folgt: 34 % geteilt durch fünf Wertungsstufen ergeben 6,8 % pro Wertungsstufe)

6.4.2 Ausgestaltung der Bewertung von Kosten und Eignung

Innerhalb der zweiten Bewertungsstufe werden infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Kriterien sowie Maßnahmen zur Anpassung der Straße inklusive Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen verarbeitet. Die infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien inkl. Gewichtung und Skalierung wurden bereits in Abschnitt 6.4.1 beschrieben. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass für jedes Kriterium ein Mindest- und ein Maximalwert existiert. Der Maximalwert ist der Höchstwert eines Kriteriums, bspw. die Fahrbahnbreite von 8 m (siehe Anhang A.9). Der Mindestwert orientiert sich an den Anforderungen der einzusetzenden Fahrzeugtechnologie (bspw. eine Mindestfahrbahnbreite von 6 m für Busse von EasyMile). In Bezug auf die Umsetzung der Maßnahmen wird deshalb in dieser Bewertungsstufe unterschieden, ob bei der Ertüchtigung der Mindest- oder Maximalwert erreicht werden soll.

Durch die Umsetzung der Infrastrukturmaßnahmen wird der Teilnutzen der einzelnen Kriterien in der jeweiligen Straße verändert. Parken in einer Straße bspw. beidseitig Fahrzeuge, wird die Straße mit dem Teilnutzen „eins“ bewertet. Durch die Einführung eines beidseitigen Parkverbots wird der Teilnutzen auf den Wert „sechs“ erhöht (siehe Anhang A.9). Dadurch verändern sich der Zielerreichungsgrad und die Nutzenfunktion in der Wirkungsanalyse und der Kosten-Wirksamkeits-Analyse.

Auf Grundlage der Erfahrungen, die in zwei Pilotprojekten mit automatisierten Bussen gesammelt wurden, wird eine erste Übersicht der Maßnahmen erstellt, die im Hinblick auf die Anpassung der Straße für den Einsatz automatisierter Busse anfallen würden. Durch eine Best-Practice-Analyse von weiteren Projekten mit automatisierten Bussen sowie eine darauf aufbauende Literaturrecherche (u. a. die Veröffentlichung der BAST in Abschnitt 6.2) werden die Maßnahmen ergänzt. Dieses Vorgehen ermöglicht die Ermittlung von Maßnahmen für nahezu sämtliche Kriterien. Einzig bei Ausschlusskriterien, wie bspw. die Steigung einer Straße, ist es nicht möglich oder zu aufwändig, die Eignung der Straße für automatisierte Busse herzustellen. Ein Ausschnitt der möglichen Maßnahmen pro Kriterium wird in der folgenden Tabelle 40 dargestellt. Die vollständige Übersicht der Maßnahmen pro Kriterium wird in Anhang A.10 dargestellt.

Auf Grundlage des eigenen Erfahrungswissen von früheren Projekten mit automatisierten Bussen, einer Internetrecherche und der Kontaktaufnahme zu Infrastrukturanbietern werden die Kosten der einzelnen Maßnahmen ermittelt. Konkrete Angebote werden nicht eingeholt. Das Bewertungsverfahren wird jedoch in einem frühen Stadium des Planungsprozesses (Verkehrswegeplanung) eingesetzt und soll Tendenzen für geeignete Straßen darstellen, weshalb der Detailgrad für die Kostenermittlung als ausreichend erachtet wird. Zusätzlich zu den Kosten werden auch die gesellschaftlichen Konsequenzen je Maßnahme bestimmt. Beispielsweise kann die Bevölkerung durch ein neues Parkverbot eingeschränkt werden (gesellschaftliche Konsequenz). Die Kosten und die gesellschaftlichen Konsequenzen je Maßnahme werden im Anhang A.10 aufgelistet.

Tabelle 40: Auszug der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen für den Einsatz automatisierter Busse, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–71; Beckmann et al. 2020, S. 8–12; Holst 2022, S. 147–161; Bundesanstalt für Straßenwesen 2021, S. 63–71; Völzow et al. 2018, S. 3f.]

Kriterium	Maßnahmen
Fahrbahnbreite	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrbahn verbreitern • Parkverbote / Halteverbote aufstellen • Zur Einbahnstraße umwidmen
Steigung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, da die Steigung nicht verändert werden kann
Unterführungen	<ul style="list-style-type: none"> • Brückenneubau / Brückenanpassung
Durchgängigkeit der Straße	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Fahrradweg	<ul style="list-style-type: none"> • Bau / Erweiterung eines Radwegs • Installation eines Pop-Up-Radwegs
Fußweg	<ul style="list-style-type: none"> • Bau / Erweiterung eines Fußwegs
ÖPNV-Haltestellen	<ul style="list-style-type: none"> • Bau von ÖPNV-Haltestellen
Fahrbahnmarkierung	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelstreifen auftragen • Seitenstreifen auftragen • Bordsteine / Gehweg bauen • Hochgenaue Digitale Karten
Anzahl Fahrspuren	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Implementierung von Kameras zur Detektion
Fahrbahnoberfläche	<ul style="list-style-type: none"> • (Teil-)Asphaltierung der Straße
Straßenbahnschienen	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Kurven	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Anlieferbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Nothaltebuchten einrichten • Schild mit Hinweis der Entfernung zur nächsten Haltebucht
Kreuzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Installation von Vorfahrtsregelungen • Implementierung einer Lichtsignalanlage
Lichtsignalanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Kreisverkehre	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Fußgängerüberwege	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Straßenbevorrechtigung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, außer Regelung der Kreuzung und T-Kreuzung
Kreuzende Eisenbahnübergänge	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung einer technischen Sicherungsanlage (Schranke oder Lichtsignalanlage)
Verkehrsaufkommen (Menge)	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, da sonst eine andere Straße mehr Verkehr hätte

Die Gesamtkosten einer Straße resultieren abschließend aus den Kosten der einzelnen Maßnahmen. Dafür werden die Investitions- und Betriebskosten der einzelnen

Maßnahmen auf jährliche Kosten diskontiert. Aufgrund dessen, dass die Bewertung pro Straße durchgeführt wird und die Straßen unterschiedliche Längen aufweisen, wird empfohlen, die Kosten pro Meter anzugeben.

Hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit und Flexibilität dieser Bewertungsstufe ist festzuhalten, dass bei der Kosten-Wirksamkeits-Analyse die Maßnahmen sowie die Kosten und die gesellschaftlichen Konsequenzen verändert, entfernt oder neu hinzugefügt werden können. Die Anpassung der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Kriterien wurde bereits in Abschnitt 6.4.1 erläutert.

6.4.3 Ausgestaltung der Bewertung von Kosten und Nutzen

In der dritten Bewertungsstufe werden die Kosten der Maßnahmen mit dem Nutzen, der aus der Erschließung einer Straße resultiert, verglichen. Auf die Ermittlung der Kosten wurde bereits in Abschnitt 6.4.2 eingegangen, weshalb dies an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt wird. Um den Nutzen einer Straße zu bestimmen, wird sich anhand der Zielgrößen des ganzheitlichen Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse orientiert. Die Zielgrößen werden gesamtheitlich in Anhang A.6 dargestellt. Da das Bewertungsverfahren innerhalb der Verkehrswegeplanung am Anfang des Planungsprozesses eingesetzt wird, sollten Nutzenkriterien verwendet werden, die mit geringem Aufwand ermittelt werden können. Zusätzlich werden die Nutzenkriterien mit den Kosten verglichen, weshalb Kriterien ausgewählt werden sollten, die monetarisiert werden können.

Aufgrund dessen, dass zu diesem Planungszeitpunkt das gesamte Verkehrsnetz und das ÖPNV-Angebot unbekannt sind, werden Nutzenkriterien gewählt, welche möglichst unabhängig von der Ausgestaltung des Liniennetzes und des Fahrplans sind. Die Zielgrößen Erschließungsqualität, mittlere Reisezeit, mittlere Umsteigehäufigkeit, Fahrgastkomfort, Sicherheit oder Merkbarkeit des Fahrplans können nicht trivial erhoben und monetarisiert werden. Aus diesem Grund werden diese Zielgrößen als Nutzenkriterien ausgeschlossen. Im Rahmen der Verkehrswegeplanung können die Zielgrößen der Betriebsabwicklung, wie bspw. störanfällige Streckenabschnitte, Anschlusssicherheit oder Wiederholbarkeit der betrieblichen Abläufe, nicht erhoben und nicht trivial monetarisiert werden. Deshalb können auch diese Zielgrößen nicht als Nutzenkriterien verwendet werden.

Die betriebswirtschaftlichen Zielgrößen können am ehesten monetarisiert werden, weshalb diese generell als Nutzenkriterien geeignet sind. Durch den Bau von Haltestellen, die Anschaffung und Unterhaltung der Fahrzeuge und das eingesetzte Personal entstehen Kosten, weshalb diese Zielgrößen nicht als Nutzenkriterien verwendet werden können. Unabhängig davon können diese Zielgrößen zum Zeitpunkt der Verkehrswegeplanung nicht bestimmt werden. Fahrgeldeinnahmen sind die einzige positive betriebswirtschaftliche Zielgröße des Planungsprozesses, weshalb diese Zielgröße als Nutzenkriterium ausgewählt wird. Dadurch, dass automatisierte Busse vorwiegend elektrisch betrieben werden, können Kraftstoffkosten und eine Reduzierung der THG-Emissionen für die einzelnen Straßen festgelegt werden. Die THG-Emissionen können mit dem derzeitigen CO₂-Preis verrechnet werden, wodurch dieses Kriterium monetarisiert werden kann. Aus diesem Grund werden Kraftstoff-

einsparungen und Einsparungen von THG-Emissionen als weitere Nutzenkriterien ausgewählt.

Um die Fahrgeldeinnahmen sowie die Einsparungen von Kraftstoffen und THG-Emissionen zu ermitteln, wird das Verkehrsaufkommen in sämtlichen Straßen benötigt. Sollte keine Verkehrszählung im betrachteten Gebiet vorliegen, welche das Verkehrsaufkommen pro Straße angibt, kann das Verkehrsaufkommen mit verschiedenen Methoden und Rahmenwerken geschätzt werden [FGSV 2006, S. 12–32]. Das gesamte Verkehrsaufkommen kann anschließend mit dem Modal-Split verrechnet werden, um den Anteil an ÖPNV-Fahrten zu bestimmen. Die Anzahl der ÖPNV-Fahrten wird mit dem Preis pro Fahrschein multipliziert, um die Fahrgeldeinnahmen pro Tag und pro Jahr zu bestimmen. Durch den Vergleich der einzusetzenden automatisierten Busse mit vergleichbaren Dieselnissen können die Kraftstoff- und Emissionseinsparungen pro Kilometer bestimmt werden. Sofern die Fahrzeugtechnologie nicht bekannt ist, können Werte aus der Literatur verwendet werden. Auf Basis des Verkehrsaufkommens, der Länge einer Straße und des Modal-Splits werden die zu fahrenden Kilometer der Busse pro Straße errechnet. Dieser Wert wird mit der Kraftstoff- und Emissionseinsparung pro Kilometer multipliziert und damit monetarisiert. Der Nutzen für jede Straße wird abschließend aus den drei monetarisierten Nutzenkriterien ermittelt und als Nutzen pro Jahr angegeben. Da die Straßen eine unterschiedliche Länge aufweisen, wird analog zu den Kosten der Nutzen pro Meter bestimmt.

Hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit und Flexibilität der Bewertungsstufe ist festzuhalten, dass analog zu den Kosten auch die Nutzenkriterien verändert, entfernt oder neue Kriterien hinzugefügt werden können.

6.5 Zusammenfassung und Zwischenfazit zum Bewertungsverfahren

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Streckenbewertung von automatisierten Fahrzeugen und automatisierten Bussen. Allerdings zeigt die Konzeptmatrix (Abschnitt 6.2), dass derzeit keiner dieser Ansätze sämtliche Anforderungen erfüllt, die aus dem ganzheitlichen Planungsprozess resultieren. Aus diesem Grund wird ein Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse entwickelt. Das Bewertungsverfahren ist in drei Stufen eingeteilt. In der ersten Bewertungsstufe wird anhand von 53 verschiedenen verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien (bspw. Fahrbahnbreite, Steigung und Geschwindigkeit) die Eignung einer Straße in Bezug auf den Einsatz eines automatisierten Busses bewertet. Dafür werden eine Wirkungsanalyse und eine Nutzwertanalyse verwendet.

Die zweite Bewertungsstufe stellt Kosten für verkehrsorganisatorische und infrastrukturelle Maßnahmen der Eignung einer Straße gegenüber. Die Implementierung der Maßnahmen resultiert in einer Modifikation der Nutzwerte der betreffenden Straßen. Neben den Kosten werden zudem auch gesellschaftliche Konsequenzen durch die Einführung der Maßnahmen berücksichtigt. Als Bewertungsverfahren werden in dieser Stufe die Wirkungsanalyse und die Kosten-Wirksamkeits-Analyse eingesetzt.

Innerhalb der dritten Bewertungsstufe werden Kosten und Nutzen einer Straße miteinander verglichen. Dafür werden die Kosten aus der vorherigen Bewertungsstufe genutzt. Als Nutzenkriterien werden Fahrgeldeinnahmen, Kraftstoffeinsparungen und Einsparungen von THG-Emissionen ausgewählt. Die Berechnung erfolgt mithilfe der Wirkungsanalyse und der Kosten-Nutzen-Analyse.

Aufgrund des frühen Planungsstadiums in dem das Bewertungsverfahren eingesetzt wird, kann nur eine oberflächliche Betrachtung der Nutzenkriterien und Kosten erfolgen. Dennoch werden durch diese Bewertungsstufen Tendenzen hinsichtlich Kosten und Nutzen erkennbar.

7 Validierung von Planungsprozess und Bewertungsverfahren

Der in Kapitel 5 entworfene ganzheitliche Planungsprozess wurde mit der Zielstellung entwickelt, den Einsatz automatisierter Busse in die ÖPNV-Planung zu integrieren. Ergänzend hierzu wird u. a. das in Kapitel 6 entwickelte Bewertungsverfahren verwendet, welches die Streckentauglichkeit für automatisierte Busse darstellt. Im Folgenden wird anhand einer Fallstudie veranschaulicht, inwieweit der konzipierte Planungsprozess und das entwickelte Bewertungsverfahren in der praktischen ÖPNV-Planung eingesetzt werden können. Zudem werden anhand der Fallstudie potenzielle Strecken für automatisierte Busse identifiziert.

Die Validierung wird im Rahmen des Förderprojekts „Be_automated“ anhand der Stadt Köthen durchgeführt [Beckmann 2022]. In der Stadt Köthen leben annähernd 26.000 Einwohner [Stadt Köthen 2024b]. Als Kleinstadt verbindet die Stadt Köthen sowohl städtische als auch ländliche Strukturen (siehe Abbildung 46) [Google Maps 2025; Stadt Köthen 2024a]. Neben der Kernstadt zählen auch die Ortschaften Arensdorf, Baasdorf, Dohndorf, Elsdorf, Löbnitz an der Linde, Merzien und Wülknitz zur Stadt Köthen [Stadt Köthen 2024a]. Daher wird die Stadt Köthen als geeignet für die Fallstudie erachtet.



Abbildung 46: Kartenausschnitt der Stadt Köthen [Google Maps 2025]

Innerhalb dieser Fallstudie wird zuerst der ganzheitliche Planungsprozess evaluiert (Abschnitt 7.1). Anschließend folgt die Validierung des Bewertungsverfahrens

(Abschnitt 7.2). Die Stadt Köthen und die Vetter GmbH als lokales Verkehrsunternehmen werden in das Vorgehen eingebunden. Zum Abschluss wird das Vorgehen zur Entwicklung des ganzheitlichen Planungsprozesses und des Bewertungsverfahrens kritisch reflektiert (Abschnitt 7.3). Darüber hinaus werden die Allgemeingültigkeit, die Grenzen, die Übertragbarkeit und die praktische Anwendungsmöglichkeiten verdeutlicht (Abschnitt 7.4).

7.1 Validierung des ganzheitlichen Planungsprozesses

Zur Validierung des in Kapitel 5 entwickelten ganzheitlichen Planungsprozesses werden die Phasen Orientierung, Problemanalyse und Maßnahmenuntersuchung bis hin zum Bewertungsverfahren innerhalb der Verkehrswegeplanung betrachtet. Grund hierfür ist, dass es im Rahmen des Projektes „Be_automateD“ nicht umfassend möglich war, alle Schritte der Angebotsplanung zu untersuchen. Das Grundgerüst des ganzheitlichen Planungsprozesses wird aus den bereits existierenden Ansätzen der Angebotsplanung gebildet. Diese Ansätze wurden in verschiedenen Veröffentlichungen der Literatur beschrieben und gelten somit als validiert (siehe Abschnitt 4.2.2) [Ceder und Wilson 1986, S. 332; Schnieder 2018, S. 16f.; Hartl 2020, S. 29–31]. Darüber hinaus wird in Kapitel 5 beschrieben, dass das Bewertungsverfahren ein wesentliches Element des ganzheitlichen Planungsprozesses zur Einführung automatisierter Busse darstellt. Dieses Element wird in der Validierung berücksichtigt. Aus diesem Grund wird der Umfang dieser Validierung als ausreichend erachtet. In den folgenden Abschnitten wird dementsprechend das Vorgehen in den Phasen der Orientierung, der Problemanalyse und der Maßnahmenuntersuchung erläutert.

7.1.1 Orientierung

Im Fall der Stadt Köthen werden verschiedene externe Auslöser als Ausgangspunkt für den Verkehrsplanungsprozess angesehen. Einerseits ist der technologische Fortschritt im Bereich der automatisierten Busse ein Auslöser für den Planungsprozess. Andererseits fokussiert sich die Stadt Köthen zunehmend auf eine nachhaltige Entwicklung, die in Form eines Stadtentwicklungskonzeptes manifestiert werden soll. In Vorgesprächen mit der Stadt Köthen und der Vetter GmbH werden die Technologie und die Leistungsfähigkeit der automatisierten Busse anhand praktischer Einsätze im öffentlichen Raum erläutert. Aus den Gesprächen mit diesen Stakeholdern wird erkennbar, dass eine Verbesserung des ÖPNV-Angebots gewünscht und der Einsatz automatisierter Busse als sinnvoll erachtet wird. Zudem soll in Zukunft ein neues Gewerbegebiet entstehen, welches an den ÖPNV angeschlossen werden soll. Aus diesen Aussagen wird abgeleitet, dass im Untersuchungsgebiet ein verkehrsplanerischer Handlungsbedarf besteht.

Als Aufgabenstellung für den Planungsprozess wird das Ziel formuliert, geeignete Strecken für den Einsatz automatisierter Busse zu identifizieren. Konkret beinhaltet dies eine Analyse des ÖPNV-Angebots, der gesamten Straßeninfrastruktur und der Erschließungswirkung inkl. Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der THG-Emissionen. Die Stadt Köthen verfolgt mit dem Projekt das Ziel, Kompetenz für den Einsatz automatisierter Busse im Bereich der Verkehrs- und Infrastrukturplanung aufzubauen. Als verantwortliche Institution für die Planung und Durchführung des

ÖPNV-Angebots profitiert auch die Vetter GmbH von der Untersuchung, da Erkenntnisse über die spezifischen Anforderungen automatisierter Busse gewonnen werden. Neben dieser Zielsetzung werden ein Zeitplan, eine Kostenschätzung und der Personalbedarf ermittelt. Auf dieser Grundlage wird die politische Entscheidung der Stadt Köthen zur Durchführung des Planungsprozesses getroffen.

7.1.2 Problemanalyse

Bevor der aktuelle Ist-Zustand im Gebiet der Stadt Köthen analysiert wird, werden zunächst Leitlinien und Zielvorstellungen für den Planungsprozess erarbeitet. Aus dem IVS-Rahmenplan und dem ÖPNV-Plan, die für das gesamte Land Sachsen-Anhalt gelten, sowie aus dem Stadtentwicklungskonzept der Stadt Köthen (aus 2011) und dem Nahverkehrsplan des Landkreises Anhalt-Bitterfeld (aus 2017) werden die Leitlinien und Zielvorstellungen abgeleitet (siehe Abbildung 47) [Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt 2019, S. 20–27; Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt und NASA GmbH 2019, S. 41–54; Stadt Köthen 2024a, S. 10–12; ISUP Ingenieurbüro für Systemberatung und Planung GmbH 2016, S. 45–63].

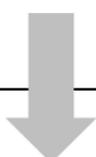
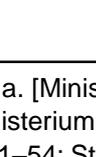
Leitlinien und Zielvorstellungen der Stadt Köthen	
<p>1. Leitbilder und Visionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mobilität für alle Bevölkerungsgruppen • Ökologisch nachhaltige/klimafreundliche Stadt • Barrierefreie Stadt • Wirtschaftlich wettbewerbsfähige Stadt • Eine Stadt mit Lebensqualität für alle sozialen Gruppen 	
<p>2. Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausweitung des ÖPNV • Anlage eines stadtweiten Radwegenetzes • Intelligente Verkehrssysteme integrieren • Anwendungsfälle für automatisiertes und autonomes Fahren schaffen • Bis 2030 CO₂-Emissionen des Verkehrs um knapp 50% reduzieren 	
<p>3. Strategien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Neue Buslinien im Stadtgebiet integrieren • Neue / mehr Fahrzeuge für den ÖPNV anschaffen und einsetzen • Innovative Mobilitätsangebote im Stadtgebiet testen • Neue Haltestellen installieren 	

Abbildung 47: Leitlinien und Zielvorstellungen der Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt 2019, S. 20–27; Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt und NASA GmbH 2019, S. 41–54; Stadt Köthen 2024a, S. 10–12; ISUP Ingenieurbüro für Systemberatung und Planung GmbH 2016, S. 45–63]

Die Zielvorstellungen bestätigen, dass die Aufgabenstellung, Strecken für automatisierte Busse zu identifizieren, zu den Leitbildern, Zielen und Strategien der Stadt Köthen kongruent ist.

Auf dieser Basis wird die aktuelle verkehrliche Situation im Untersuchungsgebiet analysiert. Analog zur Tabelle 13 in Abschnitt 5.2 wird die Siedlungsstruktur und das Wegenetz analysiert. Die notwendigen Daten werden von der Stadt Köthen bereitgestellt. Der Großteil der Analyse fokussiert sich auf das derzeitige ÖPNV-Angebot. Zu diesem Zweck werden analog des Nahverkehrsplans des Landkreises Anhalt-Bitterfeld folgende Elemente untersucht:

- Anbieter
- Erschließungsqualität (u. a. Linien, Haltestellen und Einzugsgebiete)
- Bedienungsqualität (u. a. Betriebszeiten und Taktfrequenzen)
- Verbindungsqualität (u. a. Schnittstellen zum Landesnetz, Umsteigezeiten und intermodale Verknüpfungen)
- Tarife (u. a. Tarifzongestaltung und Tarifstruktur)
- Ausrüstungsqualität (u. a. Barrierefreiheit und Ausrüstung der Haltestellen)
- Verkehrsmiteinsatz (u. a. Fahrzeuganzahl und Fahrzeugtypen)

Abbildung 48 veranschaulicht exemplarisch, welche Bereiche der Stadt sich innerhalb eines Einzugsgebiets von 300 m um eine Haltestelle befinden. Die Haltestellen sind farblich kodiert: Dunkelgrün markierte Haltestellen werden von einer Vielzahl von Linien regelmäßig bedient während rot markierte Haltestellen nur selten und ausschließlich nach vorheriger Anmeldung angefahren werden.

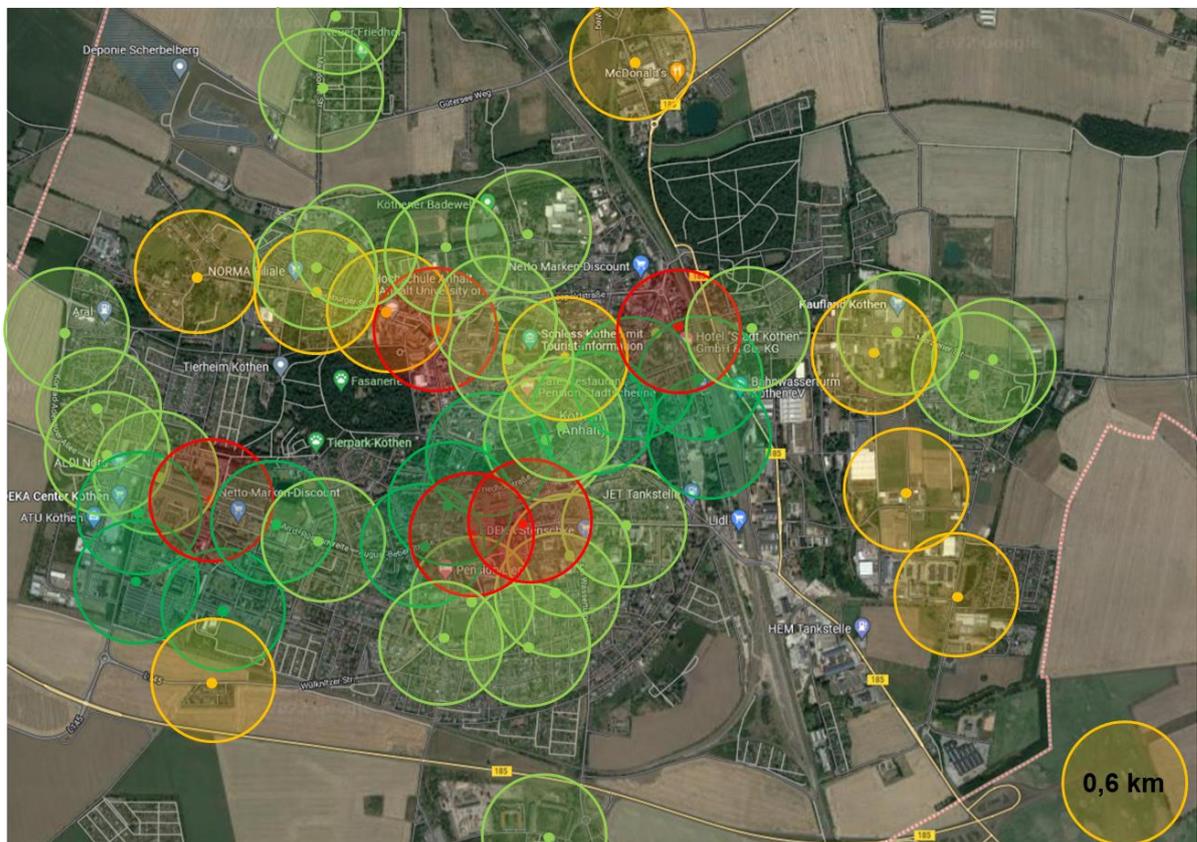


Abbildung 48: Einzugsbereiche der Haltestellen in der Innenstadt von Köthen [Google Maps 2025]

Für die vorliegende Aufgabenstellung, die darauf abzielt, die Erschließungswirkung einzelner Straßen zu ermitteln, ist es zunächst essenziell, das Verkehrsaufkommen zu quantifizieren. Dies wird im Bewertungsverfahren weiterverarbeitet. Hierzu werden von der Stadt Köthen die Ergebnisse einer Verkehrszählung aus dem Jahr 2010 zur Verfügung gestellt, die auf das Jahr 2020 hochgerechnet wurden. Diese Daten enthalten Angaben zum Gesamtverkehrsaufkommen auf Straßenabschnittsebene (siehe Anhang A.11). Als ergänzende Methodik kann das Verkehrsaufkommen auf Basis der Siedlungsstruktur, der Anzahl der Unternehmen, der Beschäftigten, der Freizeitaktivitäten sowie der Bildungseinrichtungen abgeschätzt werden. In diesem Zusammenhang kann z. B. die Berechnungsvorschrift „Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen“ der FGSV angewendet werden [FGSV 2006, S. 12–32]. Diese Methodik bezieht sich jedoch primär auf Stadtteile und nicht auf einzelne Straßenzüge.

Da automatisierte Busse in der Regel elektrisch angetrieben werden (siehe Abschnitt 3.3), erfordert die Aufgabenstellung auch eine Untersuchung der Einsparpotenziale beim Kraftstoffverbrauch und den THG-Emissionen. Für die Analyse des Kraftstoffverbrauchs werden Daten zu Stromkosten und Dieselpreisen des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz verwendet [BMWK 2024]. Anhand der Daten von zwei Bussen des Herstellers IVECO wird ein Einsparpotenzial der Kraftstoffkosten von rund 15 Euro pro 100 km ermittelt [BMWK 2024; IVECO Magirus AG 2021]. Zusätzlich ergibt sich auf Basis der Daten des Umweltbundesamtes (siehe Abschnitt 2.2.1) bei einem Vergleich von Diesel- und Elektrobussen ein Einsparpotenzial von 24 gCO_{2e}/pkm zugunsten des Elektrobusses [Umweltbundesamt 2024b]. Zusätzlich können der Kraftstoffverbrauch und die THG-Emissionen auch durch den Einsatz einer Verkehrsflusssimulation analysiert werden, welche das entsprechende Untersuchungsgebiet abbildet.

In Bezug auf die automatisierten Busse werden technische Daten zu Fahrzeugleistung, Fahrzeiten und Fahrzeugkosten erhoben. Ergänzt wird diese Datenbasis durch Informationen zur Akzeptanz der Technologie, zu rechtlichen Rahmenbedingungen sowie zum Arbeitsaufwand in der Leitstelle. Im vorliegenden Fall erfolgt die Datenerhebung auf Basis der Erfahrungen aus zwei bereits durchgeführten Pilotprojekten mit automatisierten Bussen. Darüber hinaus werden als zusätzliche Referenz zwei weitere Betriebe mit automatisierten Bussen in Leipzig und Rackwitz besucht und analysiert.

Insbesondere für die Validierung des Bewertungsverfahrens ist eine umfassende Analyse der Infrastruktur sämtlicher Straßen im Untersuchungsgebiet erforderlich. Hierzu stellt die Stadt Köthen eine Übersicht mit insgesamt 341 Straßen zur Verfügung. Für alle Straßen werden die in Abschnitt 6.4.1 beschriebenen 53 Kriterien erhoben. Während ein Teil der benötigten Daten von der Stadt Köthen zur Verfügung gestellt wird, werden die Informationen aus öffentlich zugänglichen Quellen wie Google Maps, Apple Maps und OpenStreetMap erhoben. Die verwendeten Quellen pro Kriterium sind in Anhang A.12 aufgelistet. Während die meisten Kriterien in hoher Qualität erhoben werden konnten (siehe Anhang A.12), zeigt die Datenerhebung auch, dass einige Kriterien aufgrund unzureichender Verfügbarkeit nicht ermittelt werden können. Dazu zählen die Diversität des Verkehrsaufkommens, die Anzahl

der Unfälle sowie meteorologische Daten wie die Anzahl der Tage mit Nebel, Staub und tiefstehender Sonne. Darüber hinaus wäre es zwar prinzipiell möglich, den Zustand der Fahrbahnen hinsichtlich der Verschmutzung mit Hilfe von Google Maps oder Apple Maps zu beurteilen, jedoch werden diese Daten nicht täglich aktualisiert. Aus diesem Grund werden die sechs genannten Kriterien von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Des Weiteren können die Kriterien Anzahl der Satelliten, Regen, Temperatur, Wind und Schnee nur auf Stadtebene und nicht auf Straßenebene erhoben werden. Daher wird anhand dieser Kriterien eine übergeordnete Bewertung der Stadt durchgeführt, die der straßenbezogenen Routenbewertung vorgeschaltet wird. Der Kriterienkatalog sowie die ursprünglich auf Basis der Experteninterviews ermittelten Gewichtungen der Kriterien werden daher für diese Fallstudie angepasst. Die Übersicht zu den Kriterien und die neuen Gewichtungen werden in Anhang A.13 aufgelistet.

Im Rahmen der Infrastrukturanalyse werden für jede Straße der Stadt Köthen die definierten Kriterien erfasst und systematisch digitalisiert, bspw. in einer Excel-Tabelle. Tabelle 41 zeigt einen Ausschnitt der Datenerhebung, indem exemplarisch die Kriterien Mobilfunkverbindung, Fahrbahnbreite und Höchstgeschwindigkeit für zehn Straßen dargestellt werden. Ändert sich die Ausprägung eines Kriteriums innerhalb einer Straße (z. B. „Alte Straße“), wird die entsprechende Straße in Abschnitte unterteilt. Dadurch erhöht sich die Anzahl der untersuchten Straßen auf insgesamt 546 Stück. Zur Veranschaulichung sind weitere Ausschnitte der Excel-Tabelle in Anhang A.14 dargestellt. Ergänzend zur Infrastrukturanalyse werden für jedes Kriterium potenzielle Infrastrukturmaßnahmen definiert und die zugehörigen Kosten recherchiert. Die in diesem Kapitel dargestellten Maßnahmen und deren Kosten basieren auf den Ausführungen in Abschnitt 6.4.2 (Tabelle 40) sowie in Anhang A.10.

Tabelle 41: Ausschnitt aus der Infrastrukturanalyse der Stadt Köthen

Straßenname	Mobile Datenverbindung	Fahrbahnbreite	Höchstgeschwindigkeit
Ackerstraße	5G	4,8 m	30 km/h
Adolf-Kolping-	4G	4,4 m	30 km/h
Akazienstraße	5G	7,5 m	50 km/h
Albertstraße	4G	5,9 m	Verkehrsberuhigter Bereich
Albrechtstraße	5G	6,6 m	30 km/h
Alexanderstraße	5G	7,5 m	50 km/h
Alte Straße	5G	6 m	50 km/h
Alte Straße	5G	6 m	30 km/h
Alte Straße	5G	6 m	30 km/h
Am Dreieckel	5G	6 m	50 km/h

Für die abschließende Zustandsbewertung in dieser Phase wird eine SWOT-Analyse angewendet, welche die Ergebnisse der Problemanalyse den Zielen gegenüberstellt. Das Ergebnis der SWOT-Analyse ist in Anhang A. 15 visualisiert.

7.1.3 Maßnahmenuntersuchung

Im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung wird ein Handlungsprogramm mit verschiedenen Maßnahmen entwickelt. Dazu werden in einem ersten Schritt Strukturszenarien für das Untersuchungsgebiet erstellt. Aus der Problemanalyse sind die Siedlungs- und Bevölkerungsstruktur bekannt. Nach Angaben des Statistischen Landesamtes ist die Bevölkerung in Köthen rückläufig, so dass für das Jahr 2035 eine Bevölkerungszahl von knapp 22 000 Einwohnern prognostiziert wird [Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt 2022]. Diese Prognose wird als Basisszenario verwendet. Sie wird ergänzt durch ein Best-Case-Szenario (Bevölkerung 2035: 24 000 Einwohner) und ein Worst-Case-Szenario (Bevölkerung 2035: 20 000 Einwohner). Weitere Szenarien werden auf Basis der technologischen Entwicklung automatisierter Busse abgeleitet. Gemäß Abschnitt 3.5 könnten automatisierte Fahrzeuge im Jahr 2030 flächendeckend eingesetzt werden (Basisszenario). Für das Best-Case-Szenario wird ein flächendeckender Einsatz ab 2026 und für das Worst-Case-Szenario ein flächendeckender Einsatz ab 2035 angenommen.

Die in der zweiten Stufe zu erstellenden Handlungskonzepte enthalten hinsichtlich der Angebotsplanung jeweils einen Maßnahmenplan mit Liniennetzplan, Kapazitätsplan, Fahrplan, Fahrzeugeinsatzplan und Personaleinsatzplan. Wie bereits erläutert werden nicht alle Elemente der Angebotsplanung evaluiert. Lediglich das im Rahmen der Netzplanung angewandte Bewertungsverfahren für die Verkehrswegeplanung wird in Abschnitt 7.2 näher erläutert.

Anschließend werden die Handlungskonzepte mit den Strukturszenarien zu Planfällen verknüpft. In diesem Schritt werden bereits einige Kombinationen ausgeschlossen. Sieht ein Handlungskonzept z. B. den umfassenden Einsatz automatisierter Busse vor, ist eine Kombination mit einem Strukturszenario, das für 2035 einen flächendeckenden Einsatz dieser Fahrzeugtechnologie prognostiziert, nicht sinnvoll. Gleiches gilt umgekehrt, wenn ein Handlungskonzept keinen Einsatz automatisierter Bussen präferiert, der flächendeckende Einsatz aber bereits für 2026 prognostiziert wird.

Abschließend werden in der Maßnahmenuntersuchung die Auswirkungen abgeschätzt und die verschiedenen Varianten bewertet. Da die Angebotsplanung nicht vollständig durchgeführt wird, werden diese beiden Aspekte nicht weiter erläutert.

7.2 Validierung des Bewertungsverfahrens

Basierend auf den Anforderungen an das Bewertungsverfahren (Abschnitt 6.1) wurde das Bewertungsverfahren in drei Bewertungsstufen unterteilt (Abschnitt 6.3). Diese drei Bewertungsstufen werden in den folgenden Abschnitten 7.2.1 bis 7.2.3 nacheinander validiert.

Zur Validierung des Bewertungsverfahrens werden die in Abschnitt 7.1.2 ermittelten Ergebnisse herangezogen. Dazu zählen die Infrastruktur der Stadt Köthen, Infrastrukturmaßnahmen und -kosten, die Ergebnisse zum Verkehrsaufkommen sowie die Einsparpotenziale beim Kraftstoffverbrauch und den THG-Emissionen. Um zu ermitteln, inwieweit die eigene Infrastruktur für automatisierte Fahrzeuge geeignet ist,

werden an dieser Stelle zudem eine oder mehrere Fahrzeugtechnologien ausgewählt. Für diese Fallstudie wird der automatisierte Bus EZ10 Gen 3 der Firma EasyMile als einzusetzende Fahrzeugtechnologie definiert.

Bevor die einzelnen Straßenabschnitte bewertet werden, erfolgt eine Gesamtbewertung des Stadtgebietes anhand der fünf Kriterien Anzahl der Satelliten, Regen, Temperatur, Schnee und Wind. Dabei wird die Methodik der Nutzwertanalyse angewendet (siehe Abschnitt 6.3.2). Der Untersuchungsgegenstand bzw. die Aufgabenstellung (die Identifikation geeigneter Strecken für den Einsatz automatisierter Busse im Stadtgebiet Köthen) wurde bereits in Abschnitt 7.1.1 definiert (erster Schritt). Die Ziele sowie die Kriterien zur Bewertung der Eignung des Gesamtgebietes wurden im Rahmen der Problemanalyse (Abschnitt 7.1.2) festgelegt (zweiter Schritt). Die Gewichtung der Kriterien (dritter Schritt) basiert auf den Ergebnissen der Experteninterviews und wird aufgrund der Datenverfügbarkeit in dieser Studie angepasst (siehe Anhang A.13). Dabei wird die Anpassungsfähigkeit des Bewertungsverfahrens bestätigt. Zur Bestimmung der Nutzenfunktion werden die Infrastrukturmerkmale einer Straße in einen Teilnutzen umgerechnet (vierter Schritt). Dafür wird die Skalierung für alle Kriterien verwendet, die in Anhang A.9 aufgelistet ist. Wie bereits in Abschnitt 6.4.1 dargelegt, wird eine Skala von „null“ bis „sechs“ im umgekehrten Schulnotensystem verwendet. Über die Skalierung wird der Teilnutzen ermittelt, der anschließend mit der Gewichtung multipliziert wird (sechster Schritt). Die resultierenden Teilnutzenwerte werden anschließend zu einem Gesamtnutzenwert addiert (siehe Tabelle 42).

Tabelle 42: Übergeordnete Bewertung der Stadt Köthen

Kriterien	Ausprägung	Teilnutzen	Gewichtung	Teilnutzenwerte
Satellitenanzahl	35 bis 43 Satelliten	6	32,71 %	1,96
Regen	330 Tage (90,4 %) wenig Regen ³	6	24,30 %	1,46
Temperatur	275 Tage (75 %) > 3 °C und < 25 °C	4	10,28 %	0,41
Wind	354 Tage (97 %) schwacher Wind ⁴	6	10,28 %	0,62
Schnee	343,7 Tage (94 %) ohne Schnee ⁵	6	22,43 %	1,34
Gesamt				5,79

Mit Ausnahme der Temperatur, die vor allem im Januar, Februar und Dezember im Mittel unter 3 °C liegt, kann der Bus bei allen anderen Kriterien zu mindestens 90 % eingesetzt werden. Aus diesem Grund wird die Stadt Köthen insgesamt als geeignetes Einsatzgebiet für automatisierte Busse eingestuft.

³ „wenig Regen“ wird in Anhang A.9 erläutert

⁴ „schwacher Wind“ wird in Anhang A.9 erläutert

⁵ „ohne Schnee“ wird in Anhang A.9 erläutert

7.2.1 Bewertungsverfahren Eignung

Die Eignung eines Straßenabschnitts für den Einsatz automatisierter Busse kann gemäß Abschnitt 6.3.2 mit den Methoden der Wirkungsanalyse und der Nutzwertanalyse ermittelt werden. Da durch die Experteninterviews Daten zur Gewichtung der Kriterien vorliegen, wird in dieser Fallstudie die Nutzwertanalyse eingesetzt. In der folgenden Beschreibung wird jedoch auch auf die Vorgehensweise bei der Wirkungsanalyse eingegangen.

Analog zur vorangegangenen Darstellung in Abschnitt 7.2 wurden bereits im Rahmen der Orientierung (Abschnitt 7.1.1) und der Problemanalyse (Abschnitt 7.1.2) der Untersuchungsanlass, die Ziele und die Kriterien zur Bewertung der Eignung einer Straße festgelegt. Diese Schritte sind in der Wirkungsanalyse identisch. Dort werden nach der Wirkungsermittlung Stärken-Schwächen-Profile erstellt und die Werte der einzelnen Kriterien gegenübergestellt, aber nicht verrechnet. Entsprechend den Ergebnissen der Experteninterviews und der Infrastrukturanalyse der Stadt Köthen werden die Kriterien im dritten Schritt der Nutzwertanalyse gewichtet (siehe Anhang A.13). Anschließend erfolgt auf Basis von Anhang A.9 die Skalierung der Kriterien, die in Tabelle 43 exemplarisch für die Kriterien mobile Datenverbindung, Fahrbahnbreite und Höchstgeschwindigkeit dargestellt ist.

Tabelle 43: Skalierung der einzelnen Kriterien zur Straßenbewertung (Auszug)

Nutzwert	Mobile Datenverbindung	Fahrbahnbreite	Höchstgeschwindigkeit
6	5G DSS	≥ 4 m	Verkehrsberuhigter Bereich
5	5G	$\geq 3,5$ m	≤ 30 km/h
4	4G	≥ 3 m	≤ 50 km/h
3	3G	$\geq 2,5$ m	≤ 70 km/h
2	2G	≥ 2 m	≤ 100 km/h
1	1G	< 2 m	> 100 km/h
0	Keine Bewertung	Keine Bewertung	Keine Bewertung

Analog zur inhaltlichen Ausgestaltung in Abschnitt 6.4.1 wird der Nutzwert „null“ nur dann definiert, wenn für ein Kriterium keine Infrastrukturmaßnahmen eingesetzt werden können.

Darauf aufbauend werden im sechsten Schritt die Ausprägungen der Straße in den Teilnutzen umgerechnet. Als Beispiel dienen die drei oben genannten Kriterien (siehe Tabelle 44). Weitere Auszüge aus der Excel-Tabelle sind in Anhang A.16 dargestellt.

Tabelle 44: Teilnutzen für die Kriterien der Infrastrukturanalyse der Stadt Köthen (Auszug)

Straßenname	Mobile Datenverbindung	Fahrbahnbreite	Höchstgeschwindigkeit
Ackerstraße	5	2	5
Adolf-Kolping-Straße	4	2	5
Akazienstraße	5	5	4
Albertstraße	4	1	6
Albrechtstraße	5	2	5
Alexanderstraße	5	1	4
Alte Straße	5	4	4
Alte Straße	5	4	5
Alte Straße	5	4	5
Am Dreieckel	5	4	4

Anschließend wird der Teilnutzen mit der jeweiligen Gewichtung multipliziert und sämtliche Teilnutzwerte zum Gesamtnutzwert addiert (siebter Schritt). Für die Sensitivitätsanalyse wird ein weiterer Nutzwert berechnet, indem alle Kriterien gleich gewichtet werden (Nutzwert 2). Zusätzlich wird der notwendige Nutzwert für die einzusetzende Fahrzeugtechnologie und der maximal mögliche Nutzwert („sechs“) ermittelt. Die Teilnutzwerte für den EZ10 Gen 3 von EasyMile werden in Anhang A.17 dargestellt. Für Straßen, die bei mindestens einem Kriterium einen Teilnutzwert von „null“ aufweisen (z. B. Sackgassen oder Straßen mit einer Steigung > 25 %), beträgt auch der Gesamtnutzwert „null“, da diese Straßen nicht geeignet sind. Tabelle 45 zeigt die zehn Straßen mit der höchsten Eignung für den Einsatz automatisierter Busse nach der Nutzwertanalyse mit der Gewichtung aus den Experteninterviews. Weitere Auszüge zu den Ergebnissen der Nutzwertanalyse sind in Anhang A.18 dargestellt.

Tabelle 45: Top 10 Straßen nach der Nutzwertanalyse

Straßenname	Nutzwert (Experten)	Nutzwert 2	Nutzwert EasyMile	Maximaler Nutzwert
Holzmarkt	5,04	4,88	4,13	6
Diesdorfer Weg	4,95	5,00	4,13	6
Dr.-Krause-Straße	4,95	4,95	4,13	6
Gartenstraße	4,95	4,83	4,13	6
Siebenbrünnnenpromenade	4,94	4,97	4,13	6
Langenfelder Straße	4,94	4,97	4,13	6
Bärteichpromenade	4,94	4,95	4,13	6
Magdeburger Straße	4,93	4,88	4,13	6
Weintraubenstraße	4,93	4,97	4,13	6
Buttermarkt	4,93	4,78	4,13	6

Die Ergebnisse in Tabelle 45 zeigen, dass ein Unterschied zwischen der eigenen Gewichtung auf Basis des Experteninterviews und einer gleichverteilten Gewichtung besteht. Dies unterstreicht die Bedeutung der eigenen Gewichtung auf Basis der Experteninterviews. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Nutzwert der zehn besten Straßen über dem Nutzwert liegt, der für die Nutzung der EZ10 von EasyMile notwendig ist. Dies bedeutet jedoch nicht, dass für diese Straßen keine Maßnahmen erforderlich sind. Tatsächlich kann die Übererfüllung einiger Kriterien die Nicht- bzw. Untererfüllung anderer Kriterien ausgleichen. Beispielsweise ist die Steigung einer Straße für die Anwendung von EZ10 Gen 3 auf maximal 15 % limitiert (Teilnutzen „drei“). Straßen mit einer Steigung von 1 % werden jedoch mit dem Teilnutzen „sechs“ bewertet, so dass dieses Kriterium übererfüllt ist. Dies kann die Bewertung von anderen Kriterien dementsprechend ausgleichen. In der folgenden Bewertungsstufe wird deshalb überprüft, ob sämtliche Kriterien erfüllt werden und keine verkehrsorganisatorischen bzw. infrastrukturellen Maßnahmen notwendig sind (Abschnitt 7.2.2).

Wie bereits in Abschnitt 6.3.5 erwähnt, eignet sich eine Kartendarstellung zur Präsentation der Ergebnisse. Mit der Software QGIS wird auf Basis der Excel-Tabelle die Kartendarstellung erzeugt (siehe Abbildung 49). Dabei werden Straßen mit hohem Nutzwert grün und Straßen mit niedrigem Nutzwert rot markiert. Auf dieser Basis können zusammenhängende Routen abgeleitet werden. Die abschließende Routenwahl wird in Abschnitt 7.2.4 gesondert beschrieben. Mit Hilfe von QGIS besteht zudem die Möglichkeit, die Straßen farblich hervorzuheben, sobald sie den Nutzwert der Firma EasyMile überschreiten. Diese Auswertung ist in Anhang A.18 dargestellt.

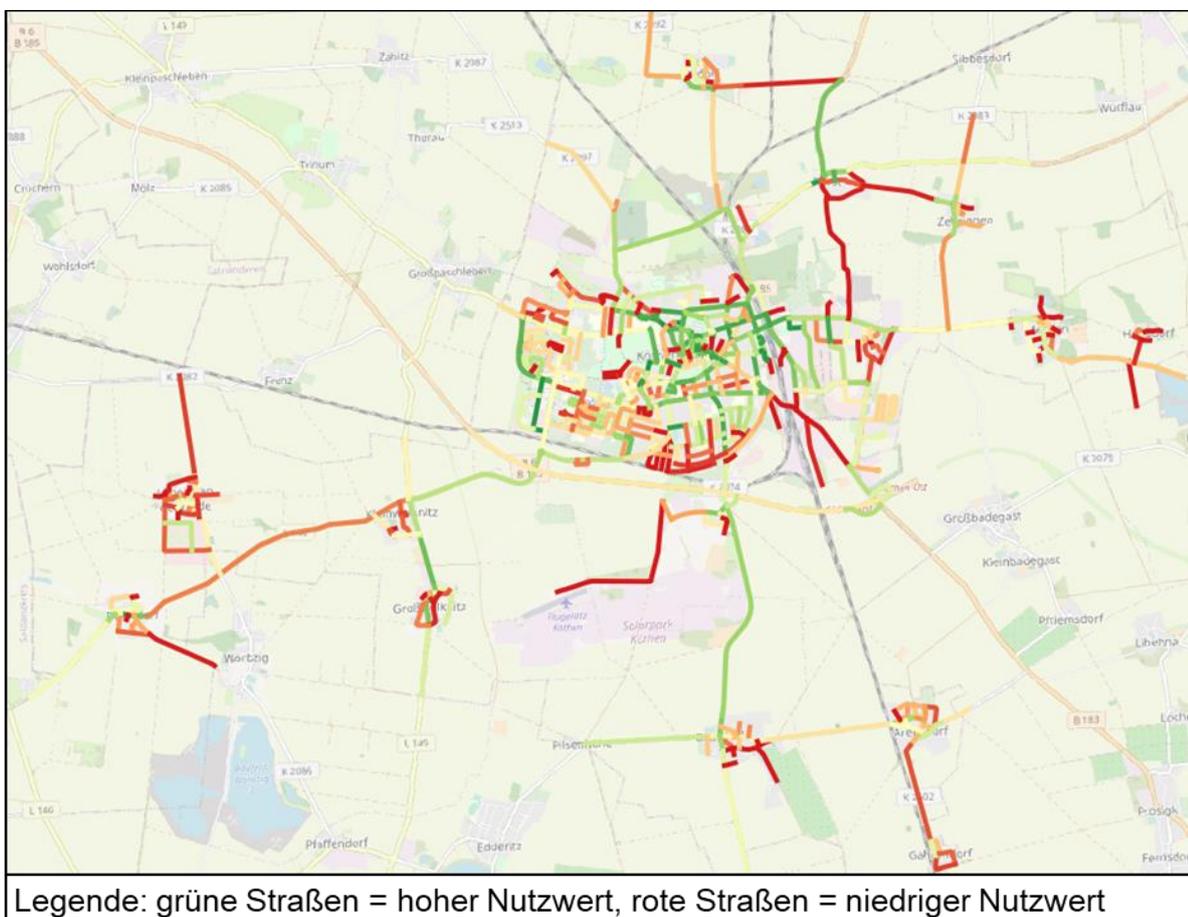


Abbildung 49: Ergebnis der Nutzwertanalyse als Kartendarstellung

7.2.2 Bewertungsverfahren Kosten und Eignung

In der zweiten Bewertungsstufe werden gemäß Abschnitt 6.3.3 die Kosten für die Ertüchtigung einer Straße mit der Eignung der Straße gegenübergestellt. Hierzu können die Methoden der Wirkungsanalyse und der Kosten-Wirksamkeits-Analyse eingesetzt werden. Da Informationen zu den Infrastrukturkosten der einzelnen Maßnahmen vorliegen (siehe Anhang A.10), wird im vorliegenden Fall die Kosten-Wirksamkeits-Analyse gewählt.

Das Vorgehen bei der Kosten-Wirksamkeits-Analyse gliedert sich in neun Schritte (siehe Abschnitt 6.3.3). Auf den Anlass der Untersuchung sowie die Ziele und Kriterien wurde bereits eingegangen (Abschnitte 7.1.1 und 7.1.2). Gleiches gilt für die folgenden drei Schritte, welche die Gewichtung, die Nutzenfunktion und die Darstellung der Varianten (in diesem Fall sämtliche Straßen des Untersuchungsgebietes) beinhalten. Diese Aspekte wurden bereits in der ersten Bewertungsstufe festgelegt. Die erste Modifikation erfolgt im sechsten Schritt, der Wirkungsabschätzung. Es wird geprüft, inwieweit eine Straße die Kriterien erfüllt oder ob verkehrsorganisatorische oder infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich sind. Als Vergleich dient das zu verwendende Fahrzeug der Firma EasyMile. Konkret bedeutet dies z. B. für das Kriterium „Vegetation / Bäume“ folgendes:

- In der Akazienstraße befinden sich viele überhängende Bäume, weshalb die Straße gemäß der Skala mit dem Teilnutzen „zwei“ bewertet wird.
- Der Einsatz der automatisierten Busse von EasyMile erfordert, dass keine überhängenden Bäume das Fahrzeug behindern (Teilnutzen „sechs“)
- Aus diesem Grund wird das Zurückschneiden der Bäume als Maßnahme für die Akazienstraße ausgewählt, woraus Infrastrukturkosten resultieren.
- Dadurch erhöht sich der Teilnutzen der Akazienstraße für das Kriterium „Vegetation / Bäume“ von „zwei“ auf „sechs“.

Für die bereits in Abschnitt 7.2.1 exemplarisch ausgewählten zehn Straßen ergeben sich somit teilweise veränderte Teilnutzen bezüglich der Kriterien mobile Datenverbindung, Fahrbahnbreite und Höchstgeschwindigkeit (siehe Tabelle 46). Weitere Auszüge aus der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens sind im Anhang A.19 dargestellt.

Tabelle 46: Veränderung des Teilnutzens im Rahmen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse (Auszug)

Straßenname	Mobile Datenverbindung	Fahrbahnbreite	Höchstgeschwindigkeit
Ackerstraße	5	4 (zuvor 2)	5
Adolf-Kolping-Straße	4	4 (zuvor 2)	5
Akazienstraße	5	5	5 (zuvor 4)
Albertstraße	4	4 (zuvor 1)	6
Albrechtstraße	5	4 (zuvor 2)	5
Alexanderstraße	5	4 (zuvor 1)	5 (zuvor 4)
Alte Straße	5	4	5 (zuvor 4)
Alte Straße	5	4	5
Alte Straße	5	4	5
Am Dreieck	5	4	5 (zuvor 4)

Parallel dazu werden die Kosten der einzelnen Infrastrukturmaßnahmen je Kriterium und Straße berechnet (siehe Tabelle 47).

Tabelle 47: Infrastrukturkosten je Straßenabschnitt in der Stadt Köthen (Auszug)

Straßenname	Mobile Datenverbindung	Fahrbahnbreite	Höchstgeschwindigkeit
Ackerstraße	- €	1.860,00 €	- €
Adolf-Kolping-Straße	- €	465,00 €	- €
Akazienstraße	- €	- €	1.860,00 €
Albertstraße	- €	1.395,00 €	- €
Albrechtstraße	- €	930,00 €	- €
Alexanderstraße	- €	1.395,00 €	1.860,00 €
Alte Straße	- €	- €	1.860,00 €
Alte Straße	- €	- €	- €
Alte Straße	- €	- €	- €
Am Dreiangel	- €	- €	1.860,00 €

Für die Kostenberechnung werden die Anschaffungskosten auf jährliche Kosten umgerechnet und zu den laufenden Kosten eines Jahres addiert, so dass die Kosten als jährliche Kosten ausgewiesen werden. Die Annahmen für die Berechnung sowie die Kosten sind in Anhang A.10 aufgeführt. Weitere Auszüge aus der gesamten Kostentabelle finden sich in Anhang A.20. Da einige Infrastrukturmaßnahmen wie z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen, Parkverbote oder Einbahnstraßenregelungen auf gesellschaftliche Ablehnung stoßen können, werden bei diesen Kriterien die gesellschaftlichen Konsequenzen ergänzt (siehe Anhang A.20). Diese können jedoch nicht im Rahmen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse berücksichtigt werden, da sich diese nicht monetarisieren lassen. Im Rahmen einer Wirkungsanalyse könnten die gesellschaftlichen Konsequenzen jedoch betrachtet werden.

Wie bei der Nutzwertanalyse wird nach dieser Umrechnung der neue Teilnutzen mit der entsprechenden Gewichtung multipliziert und zu einem Gesamtnutzwert addiert. Ebenso werden die Kosten der einzelnen Kriterien zu den Gesamtkosten pro Straße addiert. Die Gesamtkosten einer Straße werden anschließend durch die Länge der Straße dividiert, um wie bereits in Abschnitt 6.4.2 geschildert, die Kosten pro Meter zu ermitteln. Auf dieser Grundlage werden die Kosten mit der Eignung der Straßen in Beziehung gesetzt werden, indem die Kosten pro Meter durch den Gesamtnutzwert dividiert werden. Um die Sensitivität der Ergebnisse zu testen, wird eine zweite Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt. In dieser werden die Nutzwerte für jedes Kriterium an den Maximalwert angepasst. Für sämtliche Kriterien, bei denen infrastrukturelle und verkehrsorganisatorische Maßnahmen notwendig sind, ergibt sich ein Teilnutzen von „sechs“. Kriterien, bei denen die Eignung nicht durch Maßnahmen verbessert werden kann, bleiben unverändert. Analog zur vorangegangenen Nutzwertanalyse werden Straßen ausgeschlossen, die bei mindestens einem Kriterium einen Teilnutzen von „null“ aufweisen. Tabelle 48 zeigt die zehn Straßen mit dem geringsten Kosten pro Eignungspunkt (Kosten-Wirksamkeits-Index) für den Einsatz des EasyMile EZ10 (Wirkungsindex Min.). Weitere Auszüge zu den Ergebnissen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse sind in Anhang A.21 dargestellt. Die Analyse ergibt, dass der Wirkungsindex der zehn Straßen mit der höchsten Bewertung überwiegend

durch Außerortsstraßen charakterisiert ist. Außerdem ist festzustellen, dass keine der zehn besten Straßen aus der Nutzwertanalyse hier enthalten ist. Dies verdeutlicht, dass die Auswahl der Straßen nicht anhand einer Bewertungsstufe erfolgen sollte. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Wirkungsindex der Maximalbewertung (Wirkungsindex Max.) eine andere Reihenfolge ergibt.

Tabelle 48: Top 10 Straßen nach der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Straßenname	Wirkungsindex Min. [pro Eignungspunkt]	Wirkungsindex Max. [pro Eignungspunkt]
Kreisstraße K2074 (1)	4,58 €	13,17 €
Kreisstraße 2075 (1)	6,06 €	10,84 €
Kreisstraße K2074 (2)	6,47 €	11,35 €
Kreisstraße 2075 (2)	6,50 €	24,17 €
Bundesstraße B187a	6,73 €	16,36 €
Landstraße L145 (1)	7,23 €	15,07 €
Bundesstraße B185 (1)	7,35 €	16,63 €
Bundesstraße B185 (2)	8,20 €	11,91 €
Kreisstraße 2075 (3)	9,40 €	24,97 €
Landstraße L148 (1)	9,43 €	13,59 €

Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse in Kartenform. Straßen mit einem niedrigen Kosten-Wirksamkeitsindex sind grün und Straßen mit einem hohen Kosten-Wirksamkeitsindex rot markiert.

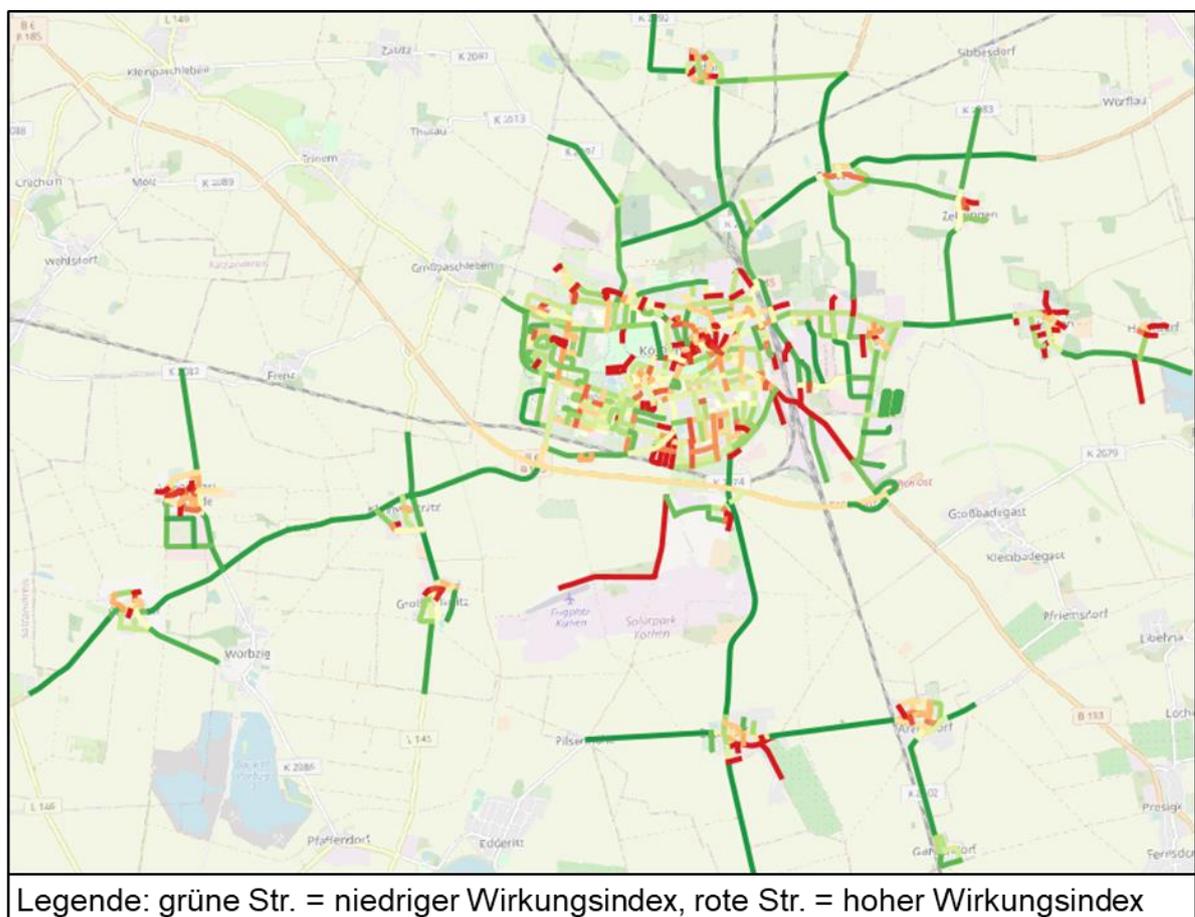


Abbildung 50: Ergebnis der Kosten-Wirksamkeits-Analyse als Kartendarstellung

Analog zur Nutzwertanalyse kann auch bei dieser Darstellung nach bestimmten Kosten-Wirksamkeits-Indizes gefiltert werden. So können z. B. alle Straßen mit einem Kosten-Wirksamkeits-Index unter 30 Euro pro Eignungspunkt dargestellt werden. Diese Visualisierung wird im Anhang A.21 dargestellt. Abschließend ist festzuhalten, dass aufgrund zu hoher Kosten keine Straße per se ausgeschlossen werden sollte, da die Möglichkeit besteht, dass diese Straßen einen hohen Nutzen generieren. Dieser Aspekt wird in der folgenden Bewertungsstufe untersucht (Abschnitt 7.2.3).

7.2.3 Bewertungsverfahren Kosten und Nutzen

Im dritten und letzten Bewertungsstufe werden gemäß Abschnitt 6.3.4 die Kosten des Ausbaus einer Straße dem Nutzen gegenübergestellt, weshalb die Methoden der Wirkungsanalyse und der Kosten-Nutzen-Analyse zur Anwendung kommen. Da sowohl die Kosten als auch der Nutzen monetär bewertet werden können (siehe Abschnitt 7.1.2), wird für das weitere Vorgehen die Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse gewählt.

Die Kosten-Nutzen-Analyse gliedert sich analog zu Abschnitt 6.3.4 in zehn Schritte. Die ersten vier Schritte (Untersuchungsanlass, Zieldefinition, Überprüfung der Randbedingungen und Variantenauswahl) wurden durch die vorangegangenen Bewertungsstufen und die Voruntersuchungen im Rahmen der Problemanalyse bereits bearbeitet. Zusätzlich wurden die Vor- und Nachteile bereits in Abschnitt 6.4.3 und Abschnitt 7.1.2 genannt. Zu den Vorteilen zählen neue Fahrgasteinnahmen durch neu erschlossene Straßen sowie Einsparungen von Kraftstoffen und THG-Emissionen durch den elektrischen Antrieb. Nachteile ergeben sich aus den Kosten der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen.

Im sechsten Schritt werden die Vor- und Nachteile monetarisiert (siehe Tabelle 49). Für die Kosten der Infrastrukturmaßnahmen wurde dies bereits in Abschnitt 7.2.2 erläutert, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird. Die gesellschaftlichen Konsequenzen können nicht monetarisiert werden und werden aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen (Berücksichtigung in der Wirkungsanalyse möglich).

Tabelle 49: Monetarisierte Nutzenkriterien für die Kosten-Nutzen-Analyse (Auszug)

Straßenname	Fahrgeldeinnahmen	Einsparung THG-Emissionen	Kraftstoffeinsparung
Ackerstraße	8.409,60 €	10,79 €	1.255,80 €
Adolf-Kolping-Straße	2.628,00 €	1,73 €	201,83 €
Akazienstraße	74.635,20 €	109,46 €	12.737,41 €
Albertstraße	2.628,00 €	3,37 €	392,44 €
Albrechtstraße	6.307,20 €	2,78 €	322,92 €
Alexanderstraße	9.986,40 €	6,22 €	724,33 €
Alte Straße	2.102,40 €	3,31 €	385,71 €
Alte Straße	1.576,80 €	0,98 €	114,37 €
Alte Straße	1.576,80 €	1,45 €	168,19 €
Am Dreiangel	13.140,00 €	16,86 €	1.962,19 €

Hinsichtlich des Nutzens werden die möglichen Fahrgeldeinnahmen, die Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch sowie die monetären Einsparungen durch die

Reduktion der THG-Emissionen getrennt für jeden Streckenabschnitt berechnet. Anschließend werden diese Werte auf jährliche Einnahmen diskontiert und zu einer Gesamteinnahme je Straßenabschnitt addiert (siebter Schritt). Die Berechnungen für die einzelnen Nutzenkriterien werden im Anhang A.22 dargestellt.

Gemäß Abschnitt 7.2.2 werden die Infrastrukturkosten in Kosten pro Meter angegeben. Daher werden auch die Gesamteinnahmen pro Straße durch die Länge einer Straße dividiert. Analog zur Kosten-Wirksamkeits-Analyse wird eine zweite Kosten-Nutzen-Analyse mit den maximalen Kosten für den Ausbau der Straßen auf den Höchstwert je Kriterium durchgeführt. Auf diese Weise kann die Sensitivität der Ergebnisse untersucht werden (achter Schritt). Abschließend wird der Gesamtnutzen von den minimalen (für EZ10) bzw. den maximalen Kosten (für den Höchstwert) je Straße abgezogen und das Kosten-Nutzen-Verhältnis gebildet. Tabelle 50 zeigt die zehn Straßen mit dem höchsten Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Nutzung des EZ10 (Kosten-Nutzen-Verhältnis Min.). Weitere Auszüge zu den Ergebnissen der Kosten-Nutzen-Analyse befinden sich in Anhang A.23.

Tabelle 50: Top 10 Straßen nach der Kosten-Nutzen-Analyse

Straßenname	Kosten-Nutzen-Verhältnis Min.	Kosten-Nutzen-Verhältnis Max.
Bärplatz	1.186,68 €	1.110,96 €
Weintraubenstraße	926,13 €	811,94 €
Mühlenstraße	888,82 €	811,81 €
Am Galgenberg	716,14 €	641,62 €
Lohmannstraße	648,80 €	596,25 €
Dorfstraße (Porst)	462,54 €	419,07 €
Mühlenstraße	438,98 €	364,73 €
Heinrichsplatz	408,89 €	375,53 €
Schloßplatz (1)	381,94 €	252,99 €
Schloßplatz (2)	362,95 €	230,12 €

Im Gegensatz zur Kosten-Wirksamkeits-Analyse liegen die zehn Straßen mit dem höchsten Kosten-Nutzen-Verhältnis im Stadtgebiet von Köthen. Mit Ausnahme der Weintraubenstraße ist in den anderen Bewertungsstufen keine Straße unter den Top 10 vertreten. Aus diesem Grund ist die in Abschnitt 7.2.4 vorgenommene Zusammenfassung der Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass einige Straßen ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. In Abbildung 51 werden die Ergebnisse ergänzend auch kartographisch dargestellt.

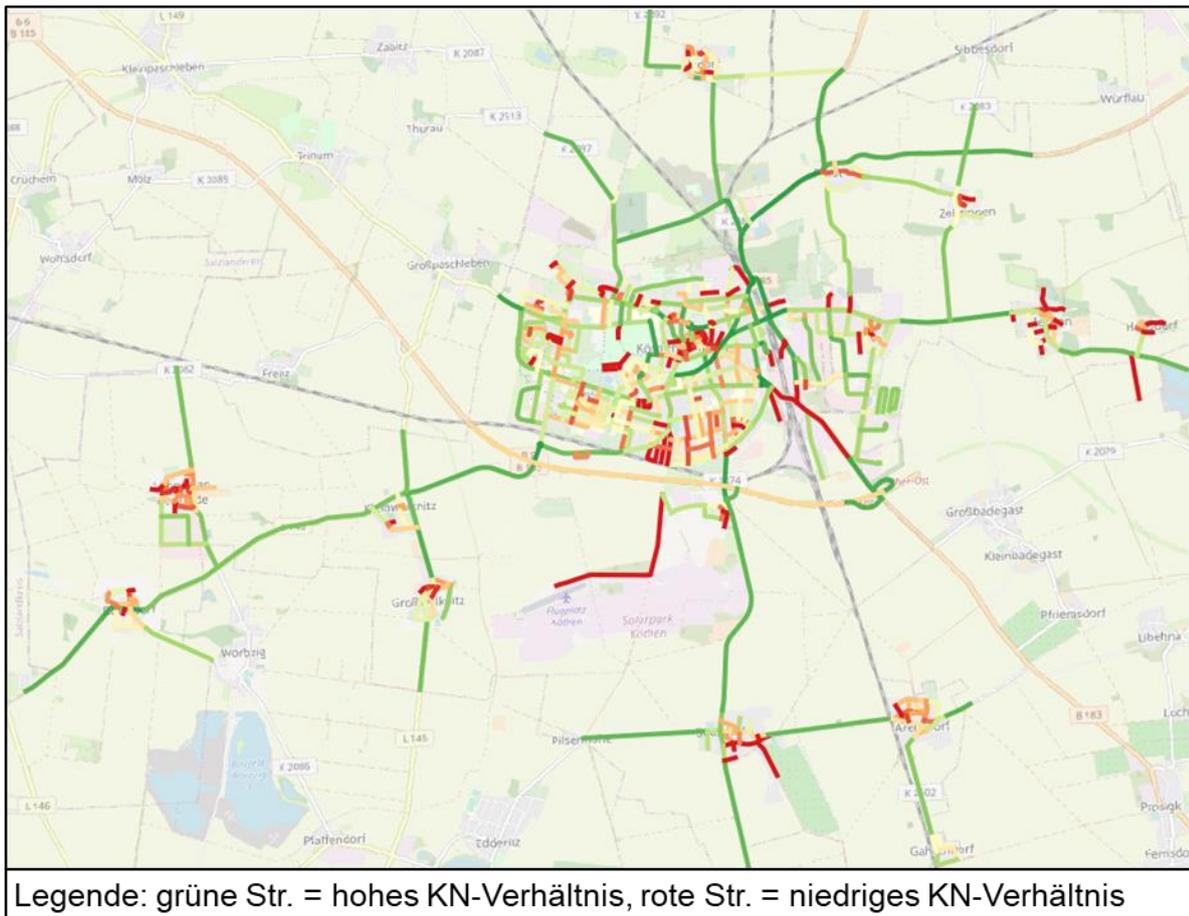


Abbildung 51: Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse als Kartendarstellung

Durch die Verwendung von QGIS sind weitere Auswertungen möglich. Beispielsweise können sämtliche Straßen mit einem positiven Kosten-Nutzen-Verhältnis angezeigt werden. Diese Auswertung wird in Anhang A.23 visualisiert.

7.2.4 Zusammenfassung der Bewertung und abschließendes Fazit

Die Gesamtbewertung der Stadt Köthen anhand der Kriterien Anzahl der Satelliten, Regen, Temperatur, Schnee und Wind zeigt, dass automatisierte Busse mit Ausnahme der witterungsbedingten Einschränkungen bei niedrigen Temperaturen in mindestens 90 % der Fälle einsatzfähig wären. Somit ist das Gebiet der Stadt Köthen grundsätzlich für den Einsatz automatisierter Busse geeignet.

Wie in Abschnitt 6.3.5 erläutert wird, sollen die Ergebnisse der drei Bewertungsstufen am Ende des Bewertungsverfahrens zusammengeführt werden, um Straßen zu identifizieren, die für den Einsatz automatisierter Busse besonders geeignet sind. Da die Ergebnisse der Nutzwertanalyse nicht monetarisiert werden können, ist eine Mittelwertbildung über die drei Bewertungsstufen nicht möglich. Eine Präferenz für eine Bewertungsstufe existiert ebenfalls nicht, da in jeder Stufe eine Kombination aus Literaturdaten, Expertenmeinungen und getroffenen Annahmen verwendet wurde. Daher wird analysiert, welche Straßen in allen drei Bewertungsstufen eine hohe Bewertung erhalten haben. Zu diesem Zweck empfiehlt sich die Verwendung von QGIS, da mit dieser Software die Ergebnisse der einzelnen Bewertungsstufen als separate Layer dargestellt werden können. Abbildung 52 zeigt einen Ausschnitt des Stadtzentrums mit den Ergebnissen der drei Bewertungsstufen.

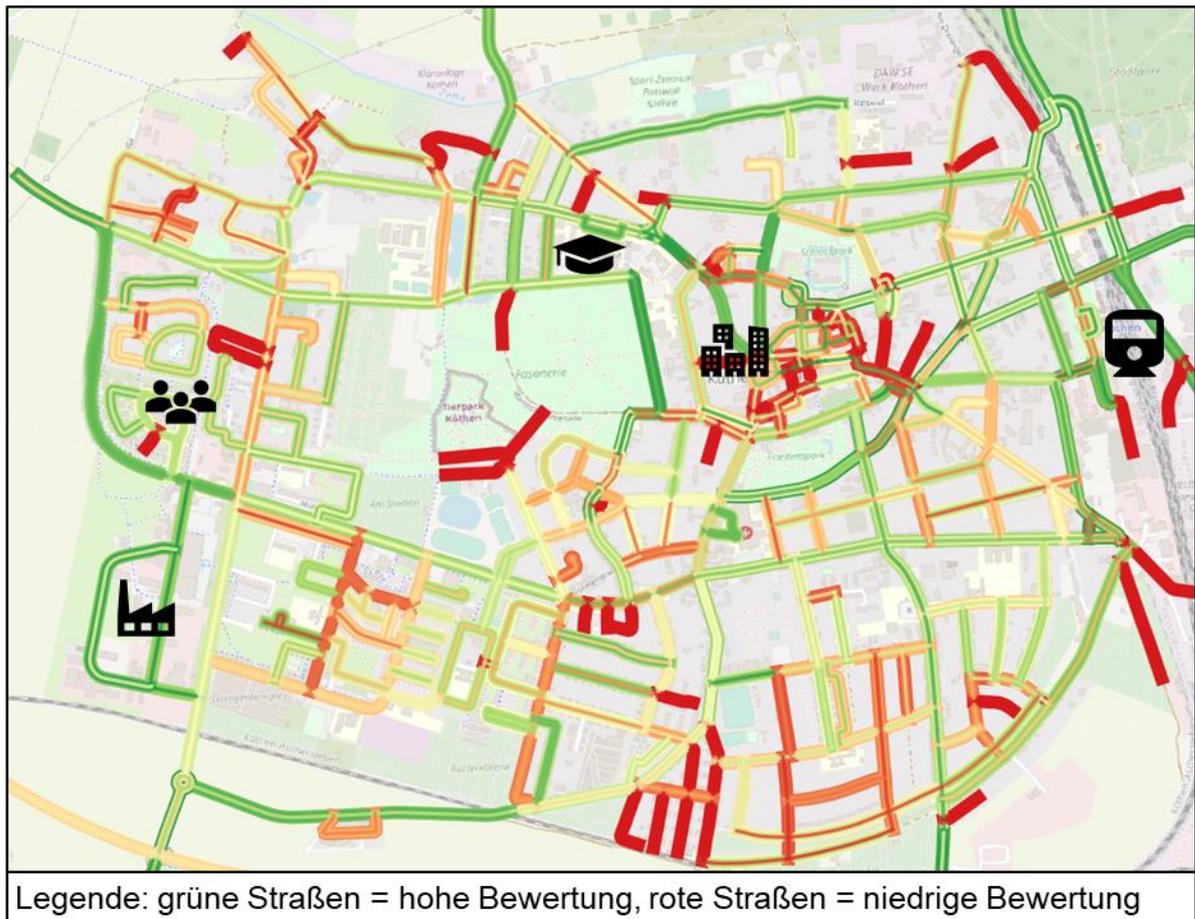


Abbildung 52: Auswertung über alle Bewertungsstufen (Ausschnitt der Stadtmitte in Köthen)

Anhand der Ergebnisse wird erkennbar, dass Streckenverbindungen zwischen dem Bahnhof, dem Innenstadtbereich und der Hochschule hauptsächlich aus dunkel- und hellgrün markierten Straßen bestehen. Aus diesem Grund sind diese Strecken für den Einsatz automatisierter Busse geeignet. Darüber hinaus könnte ein Wohngebiet am linken Bildrand durch den Einsatz automatisierter Busse mit einem angrenzenden Gewerbegebiet verbunden werden.

Zusammenfassend zeigt diese Darstellung, dass mit Hilfe des entwickelten Bewertungsverfahrens spezifische Straßenabschnitte und Routen identifiziert werden können, die für den Einsatz automatisierter Busse geeignet sind. Zur Validierung der Ergebnisse können ergänzend Ortsbegehungen durchgeführt werden. Der hierfür erforderliche Aufwand hält sich durch diese Voruntersuchung in einem vertretbaren Rahmen, da sich auf wenige ausgewählte Strecken konzentriert werden kann. Im weiteren Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse dienen die Ergebnisse als Grundlage für die Netzplanung, insbesondere für die Festlegung von Haltestellen und Linienführungen. Darüber hinaus ermöglicht das Bewertungsverfahren, Linien gezielt zu priorisieren oder von vornherein für den Einsatz automatisierter Busse auszuschließen und damit den Planungsprozess effizienter zu gestalten.

7.3 Kritische Reflexion des Forschungsvorgehens

Die folgende kritische Reflexion bezieht sich auf die Vorgehensweise, die verwendeten Methoden und die Validierung dieser Arbeit. Dies erfolgt getrennt für den ganzheitlichen Planungsprozess und das Bewertungsverfahren.

Der ganzheitliche Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse bezieht sich auf die drei Forschungsbereiche Mobilität, automatisiertes Fahren und Verkehrsplanung. Um die Anforderungen an den Planungsprozess zu ermitteln, werden diese drei Forschungsfelder im Rahmen der Literaturanalyse untersucht (Kapitel 2 – Abschnitt 4.2). Insbesondere die Bestandteile und verwendeten Daten der bestehenden Planungsprozesse zur Angebotsplanung im ÖPNV (siehe Abschnitt 4.2.2) zeigen, dass die Anforderungen automatisierter Busse derzeit nicht durch die konventionelle Angebotsplanung abgebildet werden (siehe Abschnitt 4.3.3).

In Kapitel 5 wird der ganzheitliche Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse entwickelt. Durch die Literaturanalyse, die Verwendung eines standardisierten Vorgehens und die theoretische Durchführung des gesamten Planungsprozesses wird sichergestellt, dass alle Anforderungen an den richtigen Stellen im Planungsprozess berücksichtigt werden. Ergänzend hierzu konnte im Rahmen dieser Arbeit die praktische Evaluierung für die Orientierungsphase, die Problemanalyse und Teile der Maßnahmenuntersuchung durchgeführt werden. Da es sich hierbei um ein in seiner Struktur standardisiertes Verfahren handelt, wird die Validierung als ausreichend erachtet. Um diese Einschätzung zu bestätigen und die Ergebnisse abzusichern, wäre jedoch eine vollständige Durchführung des ganzheitlichen Planungsprozesses an einem praktischen Beispiel vorteilhaft. Eine weitere Möglichkeit, die auch ergänzend zur praktischen Evaluierung des Planungsprozesses eingesetzt werden könnte, wären Experteninterviews mit Verkehrsplanern. In diesen Interviews würden der Planungsprozess theoretisch erörtert und spezielle Anforderungen an automatisierte Busse diskutiert werden.

Aus dem Ablauf des ganzheitlichen Planungsprozesses werden die Anforderungen an das Bewertungsverfahren abgeleitet. Neben der Bewertung der Strecke im Hinblick auf den Einsatz automatisierter Busse werden auch Kosten für den weiteren Planungsprozess benötigt. Zusätzlich wird auch der Nutzen, der aus dem Einsatz automatisierter Busse resultiert, im Bewertungsverfahren berücksichtigt. Aus diesem Grund wird das Bewertungsverfahren in drei Bewertungsstufen unterteilt, die aufeinander aufbauen. Der Einsatz unterschiedlicher Bewertungsverfahren wird auch in der Literatur empfohlen [Beckmann 2000, S. 53]. Durch die flexible Struktur des Bewertungsverfahrens (Abschnitt 6.3), die für die einzelnen Stufen unterschiedliche Bewertungsmethoden vorschlägt, wird den Anforderungen des Planungsprozesses Rechnung getragen.

Die Bewertung der Eignung basiert auf 53 Streckenkriterien, die in mehreren Experteninterviews erhoben wurden. Die Expertengespräche wurden jeweils einzeln mit einem Experten durchgeführt. Ein gemeinsamer Workshop mit allen Experten, die am Ende den gesamten Kriterienkatalog inklusive der Gewichtung überprüfen und mit paarweisen Vergleichsmethoden verfeinern, würde das Ergebnis der Experteninterviews verbessern. Unter anderem aus diesem Grund wird das

Bewertungsverfahren flexibel gestaltet, so dass neue Kriterien hinzugefügt oder bestehende Kriterien gestrichen werden können. Diese Anpassungsfähigkeit ist von entscheidender Bedeutung, da Änderungen aufgrund der technologischen Entwicklung von automatisierten Bussen wahrscheinlich sind. Infrastrukturmaßnahmen und Infrastrukturkosten werden auf Basis eigener Projekterfahrungen, einer Best-Practice-Analyse und einer Literaturrecherche ermittelt. In Abschnitt 5.3.6 werden die verschiedenen Zielgrößen der Angebotsplanung für automatisierte Busse aus der Literatur visualisiert. Aus dieser Übersicht werden die Nutzenkriterien für das Bewertungsverfahren abgeleitet.

Im Rahmen der Validierung (Abschnitt 7.2) wird das gesamte Bewertungsverfahren an einem praktischen Beispiel getestet. Dabei werden alle drei Bewertungsstufen überprüft. Als Ergebnis können Straßenabschnitte und mögliche Routen für den Einsatz automatisierter Busse priorisiert werden. Die Datenerhebung der Straßeninfrastruktur erfolgt durch die Nutzung öffentlicher Datenquellen. Aus diesem Grund werden die Daten für jede Straße fast ausschließlich manuell erhoben. Eine automatisierte Datenerhebung oder ein bereits vorhandener Datensatz der jeweiligen Stadt oder des Landkreises würde nicht nur den Zeitaufwand für die Auswertung minimieren, sondern auch Übertragungsfehler ausschließen.

Auf Basis der Experteninterviews und der Literatur werden die einzelnen Kriterien skaliert (siehe Anhang A.15). Die umgekehrte Schulnotenskala wird u. a. deshalb gewählt, weil so jeder Ausprägung ein Skalenwert zugeordnet werden kann. Zusätzlich werden durch den Skalenwert „null“ Straßen ausgeschlossen, bei denen keine Infrastrukturmaßnahmen die Eignung der Straße für automatisierte Busse herstellen. Im Rahmen der Validierung wird die Anwendbarkeit der Skala bestätigt. Dennoch könnte eine Anpassung der Skalen für den Einsatz im Bewertungsverfahren von Vorteil sein. Es empfiehlt sich, diese Thematik in zukünftigen Untersuchungen zu erörtern. Dies betrifft vor allem die Abstufungen der Ausprägungen, die in dieser Arbeit nur auf qualitativen Beurteilungen beruhen. Inwieweit z. B. die Ausprägungen „kein Parkverbot“, „einseitiges Parkverbot“ oder „beidseitiges Parkverbot“ den Einsatz von automatisierten Bussen beeinflussen und wie diese Ausprägungen auf einer Skala bewertet werden können, wäre in zukünftigen Untersuchungen zu erheben.

7.4 Allgemeingültigkeit, Übertragbarkeit und praktischer Einsatz

Die Zielsetzung dieser Arbeit bezieht sich gemäß Abschnitt 1.2 auch aufgrund der unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen auf den Einsatz automatisierter Busse in Deutschland. Die Analyse der verschiedenen Planungsprozesse der Verkehrs- und Angebotsplanung zeigt jedoch, dass trotz unterschiedlicher Vorgehensweisen die Inhalte der Planungsprozesse eine hohe Ähnlichkeit aufweisen (siehe Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2). Da diese standardisierten Vorgehensweisen als Grundlage für den ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse verwendet werden, ist dieser Prozess auch auf andere Länder übertragbar (siehe Abbildung 53).

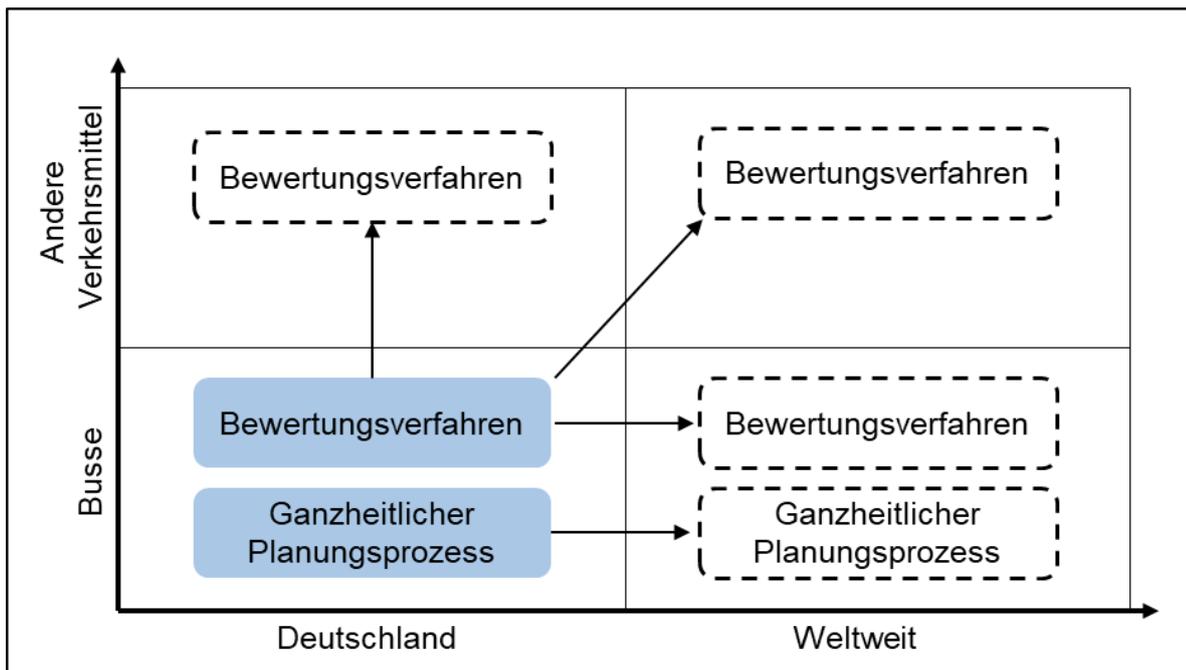


Abbildung 53: Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse

Dies wird durch die Tatsache gestützt, dass die in den Kapiteln 2 und 3 beschriebenen Grundlagen zur Mobilität und zum automatisierten Fahren nicht nur für Deutschland, sondern auch für andere Länder in Europa und weltweit Gültigkeit besitzen. Es unterscheiden sich zwar die gesetzlichen Rahmenbedingungen, z. B. in Bezug auf automatisierte Busse und Arbeitszeiten, in anderen Ländern von denen in Deutschland. Dies ändert jedoch nichts daran, dass diese Elemente im Planungsprozess berücksichtigt werden müssen. Der ganzheitliche Planungsprozess orientiert sich, wie bereits beschrieben, an der Angebotsplanung im ÖPNV. Aus diesem Grund ist dieser Prozess insbesondere für den Einsatz automatisierter Busse konzipiert. Eine Übertragbarkeit auf andere Verkehrsmittel ist mit dieser Struktur nicht möglich.

Der ganzheitliche Planungsprozess ist auf den Einsatz von hochautomatisierten Bussen ohne Fahrer im Fahrzeug (Stufe 4 ÖV) ausgelegt. Der Prozess beinhaltet sämtliche Elemente der klassischen Angebotsplanung und ist somit auch für die erste und zweite Automatisierungsstufe anwendbar. Für den Einsatz von bedingt automatisierten Bussen wäre der in dieser Arbeit entwickelte Planungsprozess ebenfalls nutzbar. Es sind jedoch einige Anpassungen zu berücksichtigen, da sich weiterhin ein Sicherheitsfahrer im Bus befindet, der im Bedarfsfall die Steuerung übernehmen muss. Dies hat Auswirkungen auf die Routenwahl und die Aufgaben der Leitstelle (Netzplanung, Fahrzeugeinsatzplanung und Personaleinsatzplanung). Der Einsatz vollautomatisierter Busse (Stufe 5) würde den Planungsprozess wiederum verändern, da diese Fahrzeuge auf allen Linien eingesetzt werden können (Netzplanung). Zudem müssten in diesem Fall die Fahrzeugeinsatzplanung und die Personaleinsatzplanung angepasst werden, da ausschließlich Personal für die Leitstelle und für Instandhaltungsmaßnahmen benötigt wird. Der ganzheitliche Planungsprozess ist somit für teil- und hochautomatisierte Busse geeignet und mit geringen Anpassungen auch für bedingt automatisierte Busse anwendbar.

Analog zum Planungsprozess wird auch das Bewertungsverfahren für die Anwendung in Deutschland konzipiert (siehe Abschnitt 1.2) und am Beispiel der Stadt Köthen erprobt. Bei der Beurteilung der Allgemeingültigkeit ist zwischen der Vorgehensweise und der inhaltlichen Ausgestaltung des Bewertungsverfahrens zu unterscheiden. Die Vorgehensweise des Bewertungsverfahrens beinhaltet die Anwendung verschiedener Bewertungsverfahren, die weltweit bekannt sind [Bruun und Vanderschuren 2017, S. 107–124]. Da die Grundstruktur des Bewertungsverfahrens flexibel und anpassbar ist, kann es auch auf andere Städte und Länder übertragen werden. Grundsätzlich könnte das hier angewandte Verfahren auch auf andere Anwendungsfälle übertragen werden, die ein festes Einzugsgebiet mit wiederkehrenden Routen bedienen (siehe Abbildung 53). Beispiele hierfür sind Taxidienste, Müllabfuhr, Straßenreinigung, Lieferdienste, Schienenfahrzeuge oder Schiffe [Pitzen und Schippl 2024, S. 92].

Die inhaltliche Ausgestaltung des Bewertungsverfahrens ist im Wesentlichen auf Deutschland ausgerichtet und wird am Beispiel der Stadt Köthen validiert. Im Rahmen der Validierung können sechs Kriterien (Verkehrsvielfalt, Unfallzahlen, Nebel- und Staubtage sowie Informationen zu tiefstehender Sonne und Fahrbahnverschmutzung) nicht erhoben werden. Die Stadt Köthen stellt hier als Kleinstadt eher den Worst Case dar. In größeren Städten sind diese Daten unter Umständen vorhanden und könnten im Bewertungsverfahren berücksichtigt werden. Bezüglich der Skalierung ist es theoretisch möglich, dass die Ausprägungen in anderen Städten abweichen. Es wurde jedoch versucht, die Maximalwerte in Deutschland (z. B. in Bezug auf Steigung und Verkehrsaufkommen) zu berücksichtigen, so dass auch die inhaltliche Ausgestaltung des Bewertungsverfahrens auf alle Städte in Deutschland übertragbar ist. Darüber hinaus können auch automatisierte Busse anderer Hersteller in das Bewertungsverfahren einbezogen werden.

Die verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Streckenkriterien, basieren auf einer weltweiten Literaturrecherche. Im Rahmen der Experteninterviews wurden jedoch ausschließlich Experten aus Deutschland. Dennoch dürften sich die technologischen Anforderungen an automatisierte Busse weltweit nur geringfügig unterscheiden, so dass ein Großteil der Streckenkriterien auch weltweit anwendbar ist. Da die StVO in anderen Ländern ggf. abweichend ausgelegt wird, sollte der Kriterienkatalog für jedes Land überprüft und ggf. angepasst werden. Gleiches gilt für die Kosten und den Nutzen der Fahrzeuge. Zusammenfassend wird festgehalten, dass das Bewertungsverfahren auf andere Länder und auch andere Verkehrsmittel übertragbar ist. Die inhaltliche Ausgestaltung muss jedoch immer an die Gegebenheiten des Landes bzw. des Verkehrsmittels angepasst werden.

Das Bewertungsverfahren wird mit dem Fokus auf hochautomatisierte Busse konzipiert. Zusätzlich ist das Bewertungsverfahrens inkl. der Kriterien zur Streckenbewertung auch für bedingt automatisierte Busse (Stufe 3) einsetzbar. Für die anderen Automatisierungsstufen ist das Verfahren nicht geeignet, da beim vollautomatisierten Fahren keine Streckeneinschränkungen existieren und beim assistierten und teilautomatisierten Fahren nur Einschränkungen hinsichtlich des Gewichts, der Breite oder des öffentlichen Zugangs zu einer Straße berücksichtigt werden müssen [Schneider 2018, S. 113–116].

Sowohl der ganzheitliche Planungsprozess als auch das Bewertungsverfahren sind speziell für den Einsatz in der ÖPNV-Planung konzipiert. Daher können beide Elemente von den Verkehrsplanern der Kommunen (Aufgabenträger) oder der lokalen Verkehrsunternehmen zur Erstellung des Nahverkehrsplans eingesetzt werden. Dabei kann der ganzheitliche Planungsprozess von der Orientierung bis zur Umsetzung, bzw. im Rahmen der Angebotsplanung von der Netzplanung bis zur Personaleinsatzplanung, genutzt werden. Ein weiterer Vorteil des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes besteht darin, dass nicht nur konventionelle Busse betrachtet werden, sondern auch der Einsatz automatisierter Busse in einem bestehenden oder neuen Liniennetz bewertet werden kann. Darüber hinaus können beide Verkehrsmittel miteinander verglichen werden. Insbesondere kann das Bewertungsverfahren von Kommunen und lokalen Verkehrsunternehmen genutzt werden, um geeignete Linien für den Einsatz automatisierter Busse zu identifizieren. Dies ist der erste Schritt, um automatisierte Busse sinnvoll in ein Liniennetz zu integrieren. Neben der strategischen Planung kann insbesondere das Bewertungsverfahren auch für die kurzfristige Betriebsplanung und sogar für die Planung von Ausweichrouten bei kurzfristigen Störungen eingesetzt werden.

Eine weitere Zielgruppe in Bezug auf die Ergebnisse dieser Arbeit sind politische Entscheidungsträger (siehe Abschnitt 1.2). Mithilfe der Ergebnisse des Planungs- und Bewertungsprozesses können politische Entscheidungen über die Einführung neuer oder die Änderung bestehender (automatisierter) Buslinien vorbereitet werden.

Nicht zuletzt bieten die Ergebnisse auch einen Mehrwert für die Hersteller von automatisierten Bussen. Denn aus der Infrastrukturanalyse können zukünftige Entwicklungsschritte abgeleitet werden, die notwendig sind, um das Einsatzgebiet der eigenen automatisierten Fahrzeuge zu erweitern und weitere Anwendungsfälle abzudecken. Abschließend kann das Ergebnis der Infrastrukturanalyse und des Bewertungsverfahrens auch für die Stadtplanung von Kommunen genutzt werden.

Es ist vorgesehen, Verkehrsunternehmen und Kommunen den ganzheitlichen Planungsprozess und das Bewertungsverfahren vorzustellen. Dabei werden gezielt betreffende Verkehrsunternehmen und Kommunen kontaktiert. Darüber hinaus ist eine Verbreitung der Ergebnisse mittels Konferenzen vorgesehen.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung und Diskussion

Zur Bewältigung aktueller Herausforderungen im Bereich der Mobilität, wie Klimawandel, Fachkräftemangel, Sicherheit, Flexibilisierung und Kostendruck, ist der Einsatz intelligenter Verkehrsangebote, wie automatisierter Busse, im ÖPNV unerlässlich. Motiviert durch den Umstand, dass geeignete Linien den Einsatz automatisierter Busse beschleunigen können, jedoch ein Planungsvorgehen hierfür nicht existiert, wurde im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit ein ganzheitlicher Planungsprozess und ein Bewertungsverfahren zur Einführung automatisierter Busse entwickelt. Das Forschungsdesign erfolgte in Anlehnung an Blessing und Chakrabarti und gliederte sich in vier Schritte (Forschungsziel, erste deskriptive Studie, präskriptive Studie, zweite deskriptive Studie).

Innerhalb des Grundlagenkapitels zum Bereich von Mobilität und Verkehr wurden die aktuelle Situation und die zukünftigen Herausforderungen konkretisiert. Darauf aufbauend wurden zukünftige Lösungsansätze zur Erreichung der Mobilitätswende dargestellt. Die zentrale Erkenntnis aus Kapitel 2 war, dass dem automatisierten Fahren eine Schlüsselrolle bei der Gestaltung der zukünftigen Mobilität zukommt. Des Weiteren trägt die Automatisierung des Fahrens zur Verbreitung und Gestaltung von Geschäftsmodellen im Bereich der Elektromobilität sowie im Bereich der flexiblen Bedarfsverkehre bei. Abschließend wurden in Kapitel 2 Anforderungen aus dem Bereich von Mobilität und Verkehr an den Planungsprozess formuliert (→ SF 1).

Im Grundlagenkapitel zum automatisierten Fahren wurden die Funktionsweise dieser Technologie erläutert, verschiedene technologische Ansätze vorgestellt und eingeordnet sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen analysiert. Darauf aufbauend wurde die zukünftige Entwicklung inklusive Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens beschrieben. Abschließend wurden die Anforderungen des automatisierten Fahrens und insbesondere der automatisierten Busse an den Planungsprozess abgeleitet (→ SF 1).

Nach einer kurzen Definition des Forschungsgebiets der Verkehrsplanung wurden in Kapitel 4 bereits existierende Planungsprozesse der Verkehrs- und Angebotsplanung im ÖPNV vorgestellt. Diese Literaturrecherche diente anschließend der Überprüfung der Hypothese dieser Arbeit, indem die zuvor identifizierten Anforderungen mit den bestehenden Planungsprozessen verglichen wurden. Dabei zeigte sich, dass derzeit kein Planungsprozess existiert, der die spezifischen Anforderungen des Einsatzes automatisierter Busse berücksichtigt (→ SF 2).

Das fünfte Kapitel widmete sich daher dieser Forschungslücke. Aufbauend auf der Grundstruktur des Verkehrsplanungsprozesses und den Elementen der Angebotsplanung wurde ein ganzheitlicher Planungsprozess für den Einsatz automatisierter Busse entwickelt (→ PF 1). Die Schritte der Angebotsplanung wurden um die für den automatisierten Bus relevanten Eingangsdaten, Arbeitsschritte und Methoden ergänzt. Es zeigte sich, dass die einzelnen Schritte der Angebotsplanung unterschiedlich beeinflusst werden. Während innerhalb der Kapazitäts- und Fahrlagenplanung

lediglich neue Eingangsdaten berücksichtigt werden müssen, ändern sich in der Netz-, Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung die Arbeitsschritte und Methoden. Insbesondere bei der Personaleinsatzplanung ist die Veränderung durch den Einsatz automatisierter Busse signifikant, da keine Fahrer für die Fahrzeuge, jedoch zusätzliches Personal für die Leitstelle eingeplant werden muss. Der Fahrzeugeinsatz hängt insbesondere von den Streckenbedingungen ab, weshalb im Rahmen der Netzplanung ein Bewertungsverfahren zur Identifikation geeigneter Strecken eingesetzt werden muss.

Dieses Bewertungsverfahren, welches ein zentrales Element in der Angebotsplanung für automatisierte Busse darstellt, wurde in Kapitel 6 thematisch behandelt. Die Anforderungen an das Bewertungsverfahren wurden in Abschnitt 6.1 aus dem ganzheitlichen Planungsprozess abgeleitet (→ SF 3). Eine Analyse der aktuellen Fachliteratur verdeutlichte, dass derzeit kein Bewertungsverfahren existiert, welches die Eignung sowie die potenziellen Kosten von Linien für automatisierte Busse quantifiziert (→ SF 4). Daher wurde ein separates Bewertungsverfahren entwickelt. Dieses Bewertungsverfahren ist in drei Stufen gegliedert und betrachtet nacheinander Eignung, Kosten und Eignung sowie Kosten und Nutzen sämtlicher Straßen eines Untersuchungsgebiets. Innerhalb des Verfahrens werden die Wirkungsanalyse, die Nutzwertanalyse, die Kosten-Wirksamkeits-Analyse und die Kosten-Nutzen-Analyse als Bewertungsmethoden eingesetzt. Zum Abschluss dieses Kapitels wurden die im Verfahren zu berücksichtigenden Streckenkriterien, Infrastrukturmaßnahmen und -kosten, gesellschaftliche Konsequenzen sowie Nutzenkriterien erarbeitet (→ PF 2).

Anhand einer Fallstudie zur Stadt Köthen wurden der ganzheitliche Planungsprozess und das Bewertungsverfahren validiert. Der Planungsprozess konnte im Rahmen einer Teilvalidierung bestätigt werden. Das Bewertungsverfahren hingegen konnte vollständig evaluiert werden. Hierbei zeigte sich, dass es mit dem Bewertungsverfahren möglich ist, ein großflächiges Gebiet hinsichtlich Eignung, Kosten und Nutzen für den Einsatz automatisierter Busse zu bewerten. Besonders hervorzuheben ist, dass für die Bewertung ausschließlich öffentliche Daten verwendet wurden. Durch die Visualisierung der Ergebnisse mittels QGIS bestand zudem die Möglichkeit, die Ergebnisse sämtlicher Straßen gesamtheitlich und filterbar auf einer Karte darzustellen. Mit Hilfe dieser Darstellung konnten geeignete Routen für automatisierte Busse abgeleitet werden. Dies unterstreicht die Praxistauglichkeit der Methodik, die vor allem von Kommunen und lokalen Verkehrsunternehmen für die ÖPNV-Planung genutzt werden kann. Obwohl sowohl der ganzheitliche Planungsprozess als auch das Bewertungsverfahren für den Einsatz in Deutschland mit automatisierten Bussen konzipiert wurden, ist eine Übertragbarkeit auf andere Länder oder auch andere Verkehrsmittel mit Anpassungen möglich.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 51, dass die in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen innerhalb dieser Arbeit beantwortet wurden.

Tabelle 51: Beantwortung der Forschungsfragen aus Abschnitt 1.2

Forschungsfragen	Antwort in Abschnitt
PF1: Welche Gestaltungsmerkmale sind in einem ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse zu berücksichtigen und wie sind diese zu konzipieren?	5 5.3
SF1: Welche Anforderungen werden an einen ganzheitlichen Planungsprozess zur Einführung automatisierter Busse gestellt?	2.5, 3.6, 4.2.4
SF2: Welche Planungsprozesse existieren bereits und können diese für den Einsatz automatisierter Busse genutzt werden?	4.2 4.3
PF2: Welche Gestaltungsmerkmale sind in einem Bewertungsverfahren zur Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse zu berücksichtigen und welche Einflussparameter müssen einbezogen werden?	6.3 6.4
SF3: Welche Anforderungen ergeben sich aus dem Planungsprozess an ein Bewertungsverfahren zur Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse?	6.1
SF4: Welche Bewertungsfahren zur Identifikation geeigneter Strecken für automatisierte Busse existieren bereits und erfüllen diese die Anforderungen des Planungsprozesses?	6.2

Dennoch ergaben sich während der Bearbeitung weitere Forschungsbedarfe, die im Ausblick skizziert werden.

8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Bislang haben automatisierte Busse in Europa noch nicht die Marktreife erreicht, die einen flächendeckenden Einsatz dieser Fahrzeuge im ÖPNV ermöglicht. Dies wird sich in Zukunft ändern. Automatisierte Busse werden Teil des ÖPNV und können von sämtlichen Bevölkerungsgruppen genutzt werden. Damit diese Technologie die Mobilität verändern und das Verkehrsaufkommen reduzieren kann, ist eine geeignete Einsatzplanung dieser Fahrzeuge unabdingbar. Aus diesem Grund müssen die besonderen Eigenschaften dieser Fahrzeugtechnologie in der Angebotsplanung des ÖPNV berücksichtigt werden, so dass insbesondere in Übergangszeiten konventionelle und automatisierte Busse gemeinsam und sich ergänzend eingesetzt werden können. Darüber hinaus kann die Identifizierung geeigneter Strecken für automatisierte Busse dazu führen, dass diese Fahrzeuge frühzeitig fahrerlos im öffentlichen Raum verkehren.

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit bezieht sich zum einen auf einen ganzheitlichen Planungsprozess, der bereits existierende Planungsprozesse der Verkehrs- und Angebotsplanung miteinander kombiniert und um die spezifischen Anforderungen automatisierter Busse erweitert. Da die Technologie des automatisierten Fahrens eng mit der Elektromobilität und dem flexiblen Bedarfsverkehr verknüpft ist, sollten diese beiden Technologieansätze in den Planungsprozess integriert werden. Dies wurde in dieser Arbeit nur oberflächlich betrachtet und bedarf einer weiteren wissenschaftlichen Vertiefung. Darüber hinaus

konnte der Planungsprozess nicht vollständig validiert werden. Die Überprüfung der gesamten Methodik an einem Praxisbeispiel stellt daher einen weiteren zukünftigen Forschungsbedarf dar. Aufbauend auf der Angebotsplanung folgt die Umsetzung eines Projektes zur Implementierung eines hochautomatisierten Busses im öffentlichen Raum. In der Literatur wurden verschiedene Leitfäden zur Umsetzung solcher Projekte identifiziert, die sich jedoch überwiegend auf den Betrieb mit Fahrpersonal im Fahrzeug konzentrieren oder theoretische Betrachtungen darstellen. Ein konkreter Leitfaden für die Umsetzung eines hochautomatisierten Busses kann aus Sicht des Verfassers nur im Zusammenhang mit einem derartigen Betrieb im öffentlichen Raum erstellt werden. Der Betrieb mit einem hochautomatisierten Fahrzeug im öffentlichen Raum ist in Europa bislang noch ausstehend, weshalb an dieser Stelle zukünftiger Forschungsbedarf besteht.

Zum anderen bezieht sich der wissenschaftliche Beitrag auf ein Bewertungsverfahren, mit dem geeignete Strecken für den Einsatz automatisierter Busse identifiziert werden können. Hinsichtlich des Bewertungsverfahrens würden weitere länderübergreifende Untersuchungen zu den Streckenkriterien und deren Gewichtung das Verfahren bereichern. Wie bereits in Abschnitt 7.4 angedeutet, sollte insbesondere die Skala mit den Ausprägungen der einzelnen Kriterien tiefergehend untersucht werden. Inwieweit die Ausprägung eines Kriteriums (z. B. Fahrbahnbreite von 3 m oder 4 m) den Einsatz automatisierter Busse begünstigt oder verhindert, wurde in dieser Arbeit und der damit verbundenen Expertenbefragung nur qualitativ untersucht. Dies quantitativ und messbar zu untersuchen ist eine weitere Aufgabe für zukünftige Forschungsaktivitäten.

Die Infrastrukturdaten in dieser Arbeit wurden fast ausschließlich manuell erhoben. Diese Daten in Zukunft automatisiert über GoogleMaps oder OpenStreetMap einzulesen, würde viel Aufwand sparen und die Genauigkeit der Daten verbessern. Hierfür sind KI-Tools zur Bildverarbeitung sowie Programmierungen für die Datenschnittstellen von z. B. OpenStreetMap (u. a. über Python) notwendig. Zusätzlich ist die Erhebung der Daten auch von der Existenz und der Pflege digitaler Infrastrukturdaten in den Kommunen abhängig. Die Befähigung der Kommunen hierzu und ggf. der Aufbau eines digitalen Zwillinges der Straßeninfrastruktur sind entscheidende Faktoren für den Erfolg des Bewertungsverfahrens.

Schließlich könnte das Bewertungsverfahren zu einer interaktiven Anwendung ausgebaut werden, die es z. B. ermöglicht, die direkten Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen auf die Befahrbarkeit von Straßenabschnitten in Bezug zu automatisierten Bussen darzustellen.

Literatur

123fahrschule Holding GmbH (2020): Teilnehmer am Straßenverkehr. Online verfügbar unter: https://media.123fahrschule.de/wp-content/uploads/2023/05/31095748/Lernbuch_Lektion-7_Teilnehmer_am_Strassenverkehr.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

2getthere (2024a): 2getthere. Online verfügbar unter: <https://www.2getthere.eu/> (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

2getthere (2024b): Company. Online verfügbar unter: <https://www.2getthere.eu/company-profile/> (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

2getthere (2024c): GRT Vehicle. Online verfügbar unter: <https://www.2getthere.eu/technology/vehicle-types/grt-vehicle-automated-minibus/> (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

2getthere (2024d): Perception Systems: Sense and Understanding. Online verfügbar unter: <https://www.2getthere.eu/technology/perception-systems/> (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

2getthere (2024e): Projects. Online verfügbar unter: <https://www.2getthere.eu/projects/> (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

A. Sosunova, L.; V. Noskov, S.; A. Goryacheva, I.; V. Astafieva, N.; A. Kalashnikov, S. (2018): Improving the management technique of logistics planning in the supply chain. In: *Problems and Perspectives in Management* 16, 3, S. 48–62. doi:10.21511/ppm.16(3).2018.05.

Aberle, C. (2019): Mobility as a Service: Ein Angebot auch für Einkommensarme? GIS-basierte Betrachtung vierer Ridepooling-Angebote in Hamburg. In: *Technology Stiftung Berlin, HafenCity Universität Hamburg, DGFK (Hrsg.): Urban Mobility Symposium*, S. 19–23.

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2024): Mobilitätsmonitor: Alle Ergebnisse. Online verfügbar unter: <https://www.acatech.de/mobilitaetsmonitor/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ackerman, E. (2021): What Full Autonomy Means for the Waymo Driver. Online verfügbar unter: <https://spectrum.ieee.org/full-autonomy-waymo-driver> (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

ADAC e.V. (2023a): ADAC Mobilitätsindex: Wird der Verkehr in Deutschland nachhaltiger? Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/standpunkte-studien/mobilitaets-trends/mobilitaetsindex/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

ADAC e.V. (2023b): ADAC Staubilanz 2022: 333.000 Stunden Stillstand. Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/verkehrsinformationen/staubilanz/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

ADAC e.V. (2023c): Höhenkontrollen vor Tunneln: Wann das System ausgelöst wird. Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/verkehrssicherheit/unterwegs/hoehenkontrolle-tunnel/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Adams, C. (2008): Bewertungsverfahren für verschiedene intermodale Straßenverkehrsmaßnahmen. Berlin: Technischen Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation.

Addanki, S. C.; Jaswanth, N.; Assfalg, R.; Venkataraman, H. (2020): Analysis of Traffic Related Factors and Vehicle Environment in Monitoring Driver's Driveability. In: International Journal of Intelligent Transportation Systems Research 18, 2, S. 277–287. doi:10.1007/s13177-019-00198-x.

ADFC Landesverband Hamburg e.V. (2019): ADFC-Position: Umgang mit Pflasterstraßen. Online verfügbar unter: <https://hamburg.adfc.de/artikel/adfc-position-umgang-mit-pflasterstrassen> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Agora Verkehrswende (2017): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern; 12 Thesen zur Verkehrswende. Online verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf (Datum des Zugriffs: 13. Dezember 2024).

Agora Verkehrswende (2019): Neue Wege in die Verkehrswende; Impulse für Kommunikationskampagnen zum Behaviour Change. Online verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Kommunikation_Behavior_Change/21_Neue-Wege-in-der-Verkehrswende_Agora-Verkehrswende_WEB.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Agora Verkehrswende (2020a): Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen; Chancen und Risiken selbstfahrender Fahrzeuge für nachhaltige Mobilität. Online verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2020/Automatisierung_des_Automobils/Agora_Verkehrswende_Automatisierung_des_Automobils_und_ihre_Folgen.pdf (Datum des Zugriffs: 13. Dezember 2024).

Agora Verkehrswende (2020b): Ein anderer Stadtverkehr ist möglich; Neue Chancen für eine krisenfeste und klimagerechte Mobilität. Online verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2020/Covid19_Stadtverkehr/Agora-Verkehrswende_Ein-anderer-Stadtverkehr-ist-moeglich_1-1.pdf (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

Agora Verkehrswende (2023): Kosten der Mobilität. Online verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2023/Kosten_der_Mobilitaet/99_Faktenblatt-Mobilitaetskosten.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Agora Verkehrswende (2024a): Deutschlands CO₂-Ausstoß sinkt auf Rekordtief und legt zugleich Lücken in der Klimapolitik offen. Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/aktuelles/deutschlands-co2-ausstoss-sinkt-auf-rekordtief-und-legt-zugleich-luecken-in-der-klimapolitik-offen> (Datum des Zugriffs: 29. Januar 2024).

Agora Verkehrswende (2024b): Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2024. Online verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-35_DE_JAW23/A-EW_317_JAW23_WEB.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ainsalu, J.; Arffman, V.; Bellone, M.; Ellner, M.; Haapamäki, T.; Haavisto, N.; Josefson, E.; Ismailogullari, A.; Lee, B.; Madland, O.; Madžulis, R.; Mür, J.; Mäkinen, S.; Nousiainen, V.; Pilli-Sihvola, E.; Rutanen, E.; Sahala, S.; Schønfeldt, B.; Smolnicki, P. M.; Soe, R.-M.; Sääsäki, J.; Szymańska, M.; Vaskinn, I.; Aman, M. (2018): State of the Art of Automated Buses. In: Sustainability 10, 3118, S. 1–34. doi:10.3390/su10093118.

Air-Bavarian GmbH (2025): Was kostet eine Baustellenüberwachung. Online verfügbar unter: <https://air-bavarian.com/baustellenueberwachung-mit-kamera/baustelleneueberwachung-kosten/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Aleksa, M.; Krenn, W.; Pitzen, C.; Yen, R. (2024): Anforderungen des avF an den Infrastrukturbedarf. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 93–99.

Allianz pro Schiene e. V. (2020): Flächenverbrauch: Platzsparend mobil auf der Schiene. Online verfügbar unter: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/flaechenverbrauch/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ammoser, H.; Hoppe, M. (2006): Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften; Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens. Online verfügbar unter: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivw/ressourcen/dateien/diskuss/2006_2_diskusbr_ivw.pdf?lang=de (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

Anger, J. (2021): Wenn die KI irritiert ist. Online verfügbar unter: <https://safe-intelligence.fraunhofer.de/artikel/wenn-die-ki-irritiert-ist> (Datum des Zugriffs: 22. Februar 2025).

Aquagart Trading GmbH (2025): 450m Wildzaun Forstzaun Weidezaun Drahtzaun 160/20/15. Online verfügbar unter: https://www.aquagart.de/450m-wildzaun-forstzaun-weidezaun-drahtzaun-160-20-15/1000497471?_gl=1*1pnv7tb*_up*MQ.*_gs*MQ.&gclid=Cj0KQCQiAs5i8BhDmARIsAGE4xHw5gCmjA3bXjkq59GJrK5-P6ecKQfXC0jRe9lem7_vH52xVuU2r05oaAtB4EALw_wcB (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Arthur D. Little (2018): Prognostiziertes Aufkommen von urbanen Mobilitätsleistungen weltweit in den Jahren 2010 bis 2050. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1084696/umfrage/prognose-der-nachfrage-nach-urbanen-mobilitaetsleistungen-weltweit/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

atene KOM GmbH (2021): Aktuelle Breitbandverfügbarkeit in Deutschland (Stand Mitte 2021). Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/breitband-verfuegbarkeit-mitte-2021.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

AUDI AG (2021): &Audi SocAlty Studie; Autonomes Fahren auf dem Weg zur gesellschaftlichen Akzeptanz. Online verfügbar unter: https://www.audi.com/content/dam/gbp2/innovation/research/initiatives/and-audi/audi-autonomous-vehicles-society-study-2021-summary/AUDI_SocAlty_Studie_dglt_1206_Deutsch_small.pdf (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

- Avotra, A. A. R. N.; Nawaz, A. (2023): Asymmetric impact of transportation on carbon emissions influencing SDGs of climate change. In: *Chemosphere* 324, S. 1–12. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.138301.
- Azad, M.; Hoseinzadeh, N.; Brakewood, C.; Cherry, C. R.; Han, L. D. (2019): Fully Autonomous Buses: A Literature Review and Future Research Directions. In: *Journal of Advanced Transportation* 2019, 3, S. 1–16. doi:10.1155/2019/4603548.
- Bachmann, F. R.; Briem, L.; Busch, F.; Vortisch, P. (2022): Dynamics and Processes in Operations Control Centers in Urban Public Transport: Potentials for Improvement. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 23, 10, S. 17819–17834. doi:10.1109/TITS.2022.3158821.
- Barrillère-Scholz, M.; Büttner, C.; Becker, A. (2020): Mobilität 4.0: Deutschlands erste autonome Buslinie in Bad Birnbach als Pionierleistung für neue Verkehrskonzepte. In: Riener A., Appel A., Dorner W., Huber T., Kolb J. C., Wagner H. (Hrsg.): *Autonome Shuttlebusse im ÖPNV*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 15–22.
- Baumeister, H.; Meier-Berberich, J. (2018): Chancen für den ÖPNV im ländlichen Raum durch Digitalisierung. In: *Verkehr und Technik*, S. 289–292.
- Becker, U. J. (2001): Was ist nachhaltige Mobilität? Online verfügbar unter: https://moodle.studiumdigitale.uni-frankfurt.de/moodle/pluginfile.php/318072/mod_folder/content/0/Becker%202001.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Becker, U. J. (2018): Verkehr und Umwelt. In: Schwedes O. (Hrsg.): *Verkehrspolitik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 71–88.
- Beckmann, K. J. (2000): Bewertungsverfahren weiter auf dem bisherigen Weg? – Erfordernisse eines Methoden Mix. In: Martens S., Brenner J. (Hrsg.): *Bewertungsverfahren im Verkehrswesen: Rechenstift gegen Argumente? Ergebnisse der Veranstaltung Nr. XII der Workshop-Reihe im Themenbereich Verkehr und Raumstruktur*. Stuttgart: Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, S. 37–74.
- Beckmann, K. J. (2018): Digitalisierung und Mobilität - Chancen und Risiken für eine Verkehrswende. In: *Nachrichten der ARL*, 02, S. 12–16.
- Beckmann, K. J. (2021): Partizipative Methoden in der (Stadt-)Verkehrsplanung. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): *Stadtverkehrsplanung Band 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 449–471.
- Beckmann, S. (2022): Bewertungsmodell für den Einsatz automatisierter Shuttlebusse auf Basis von Open Data – Be_automateD. Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/be_automated.html (Datum des Zugriffs: 20. Januar 2025).
- Beckmann, S.; Biletska, O.; Zadek, H. (2020): Requirements for Pilot Routes and Infrastructure for the Introduction of Automated Shuttle Buses in Public Areas. In: *Logistics Journal: Proceedings*. doi:10.2195/LJ_PROC_BECKMANN_EN_202012_01.

- Beckmann, S.; Zadek, H. (2022): Leitfaden zur Einführung automatisierter Busse. Magdeburg: Zadek Management & Strategy GmbH.
- Beckmann, S.; Zadek, H.; Trojahn, S. (2025): Criteria for Route Evaluation of Automated Buses. In: Applied Sciences 15, 4, S. 1–31. doi:10.3390/app15041683.
- Beiker, S. (2015): Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge. In: Maurer M., Gerdes J. C., Lenz B., Winner H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 197–218.
- Bergner, K.; Frieß, M.; Fuchs, W.; Kaiser, H.-C.; May, A.; Schäfer, F.; Sutara, H.; Wiegand, N. (2015): VDV-Schrift 731. Köln: Beka GmbH.
- Bernhart, W. (2021): “M.A.D.E.”-Trends und Implikationen – Deutschland im internationalen Vergleich. In: Siebenpfeiffer W. (Hrsg.): Mobilität der Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–56.
- Berschin, F.; Holzhey, M.; Petersen, T.; Thalhofer, C.; Voll, J. (2023): Ermittlung des Finanzbedarfs für den ÖPNV bis 2031 - Kurzbericht. Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/update-oepnv-finanzierung-bmdv-summary.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 20. Februar 2025).
- Bertram, M.; Bongard, S. (2014): Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr; Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Biedermann, W.; Kirner, K.; Kissel, M.; Langer, S.; Münzberg, C.; Wickel, M. (2013): Forschungsmethodik in den Ingenieurwissenschaften (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C.; Müller, J. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehrs Forschungsberichts. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Biletska, O.; Beckmann, S.; Glimm, T.; Zadek, H. (2021): Key Requirements and Concept For the Future Operations Control Center. In: Schmidt T., Furmans K., Freitag M., Hellingrath B., de Koster R., Lange A. (Hrsg.): 2021 International Scientific Symposium on Logistics: Conference Volume: Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., S. 57–68.
- Biletska, O.; Kurtz, G. L.; Zadek, H. (2022): Operation control center for automated vehicles: conceptual design. In: Kersten, Wolfgang Jahn, Carlos Blecker, Thorsten Ringle, Christian M. (Hrsg.): Changing Tides: The New Role of Resilience and Sustainability in Logistics and Supply Chain Management – Innovative Approaches for the Shift to a New Era. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), S. 731–752.

- Biletska, O.; Beckmann, S.; Zadek, H. (2023): Tasks of an Operations Control Center for Automated Buses and its Impact on the Economic Efficiency of a Public Transport Service. In: Logistics Journal: Proceedings. doi:10.2195/LJ_PROC_BILETSKA_EN_202310_01.
- Blechtschmidt, A. (2011): „Mobilität ist Kultur“?; Die Beteiligung der Bevölkerung an der Entwicklung der Mobilitätskultur in Zürich und Frankfurt am Main im Vergleich. Frankfurt am Main: Inst. für Humangeographie.
- Blessing, L. T.M.; Chakrabarti, A. (2009): DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London.
- Bloomberg IP Holdings LLC; The Aspen Institute (2017): Global Atlas of Autonomous Vehicles in Cities. Online verfügbar unter: <https://d1zwuo9w5ygmym.cloudfront.net/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- BMW AG (2023a): Ab Frühjahr: Hochautomatisiertes Fahren auf Level 3 im neuen BMW 7er. Online verfügbar unter: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0438214DE/ab-fruehjahr:-hochautomatisiertes-fahren-auf-level-3-im-neuen-bmw-7er?language=de> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- BMW AG (2023b): Ab März 2024: Hochautomatisiertes Fahren auf Level 3 im neuen BMW 7er. Online verfügbar unter: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90531332/Ab-M%C3%A4rz-2024-Hochautomatisiertes-Fahren-auf-Level-3-im-neuen-BMW-7er-Zus%C3%A4tzlich-zu-den-Kameras> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Bock, S. (2025): Nutzungsdauer des Gegenstands: Zaun. Online verfügbar unter: <https://www.waldlandwelt.de/cgi-bin/afa-tabellen.pl?Zaun> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Böhler, S.; Jansen, U.; Koska, T.; Schäfer-Sparenberg, C.; Kindl, A.; Klinger, D. (2009): Handbuch zur Planung flexibler Bedienungsformen im ÖPNV: Deutschland. Online verfügbar unter: <http://d-nb.info/1000660818/34> (Datum des Zugriffs: 24. Februar 2025).
- Bohmeyer & Schuster GmbH (2024): 5m Fahrbahnmarkierung / Wegemarkierung PROline Thermo Spar-Set. Online verfügbar unter: <https://www.schilder-versand.com/p/thermoplastische-fahrbahnmarkierung-wegemarkierung-proline-thermo-21022> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Boksch, R. (2022): Öffis spielen in den USA keine Rolle. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/infografik/24923/anteil-der-pendler-die-den-oepnv-fuer-den-arbeitsweg-nutzen/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Bormann, R.; Fink, P.; Holzapfel, H.; Rammler, S.; Sauter-Servaes, T.; Tiemann, H.; Waschke, T.; Weirauch, B. (2018): Die Zukunft der deutschen Automobilindustrie; Transformation by Disaster or by Design? Online verfügbar unter: <https://library.fes.de/pdf-files/wiso/14086-20180205.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Borndörfer, R.; Neumann, M.; Pfetsch, M. (2008a): Angebotsplanung im öffentlichen Verkehr. Online verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://opus4.kobv.de/opus4-zib/files/1055/ZR_08_04.pdf&ved=2ahUKEwjHvq6D9LqHAX-WncvEDHa_1AIQQFnoECBoQAQ&usg=AOvVaw0xbjB8_55EI-FzAPcl5ked (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Borndörfer, R.; Grötschel, M.; Jaeger, U. (2008b): Planung von öffentlichem Personenverkehr. In: Produktionsfaktor Mathematik – Wie Mathematik Technik und Wirtschaft, S. 127–153.
- Bösch, P. M.; Becker, F.; Becker, H.; Axhausen, K. W. (2018): Cost-based analysis of autonomous mobility services. In: Transport Policy 64, S. 76–91. doi:10.1016/j.tranpol.2017.09.005.
- Bosetti, S.; di Bartolo, C.; malgieri, P.; sitran, a.; Brůhová-Foltýnová, h.; Jordová, r.; Kurfürst, p.; smutková, d. (2014): Policy Recommendations; For EU Sustainable Mobility Concepts based on CIVITAS experience. Online verfügbar unter: http://www.trt.it/wp/wp-content/uploads/2014/07/CIVITAS_Policy-Recommendations-for-EU-sustainable-mobility-concepts-based-on-the-CIVITAS-experience.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Bout, M.; Brenden, A. P.; Klingegård, M.; Habibovic, A.; Böckle, M.-P. (2017): A Head-Mounted Display to Support Teleoperations of Shared Automated Vehicles. In: Boll S., Löcken A., Schroeter R., Baumann M., Alvarez I., Chuang L., Feuerstack S., Jeon M., Broy N., van Huysduynen H. H., Osswald S., Politis I., Large D. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct. New York, NY, USA: ACM, S. 62–66.
- Bracher, T.; Eichmann, V.; Kühn, G.; Lehmbrock, M. (2004): ÖPNV im Wettbewerb: Managementplanspiel in der Region Berlin. In: Difu-Beiträge zur Stadtforschung.
- Braun, M.; Gudd, C.; Rohs, M.; Seyfferth, J.; Teichmann, G. (2020): Autonome Busse im ÖPNV. Online verfügbar unter: <https://www.pwc.de/de/im-fokus/autonome-busse-im-oepnv.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Braun Binder, N.; Fasler, R. (2024): Rechtsgrundlagen für automatisiertes Fahren in der Schweiz. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 244–256.
- Brodmann, U.; Spillmann, W. (2000): Verkehr - Umwelt - Nachhaltigkeit: Standortbestimmung und Perspektiven; Teilsynthese des NFP 41 aus Sicht der Umweltpolitik mit Schwerpunkt Modul C.
- Brosius, H.-B.; Haas, A.; Koschel, F. (2016): Methoden der empirischen Kommunikationsforschung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Bruun, E.; Vanderschuren, M. (2017): Assessment Methods from Around the World Potentially Useful for Public Transport Projects. In: Journal of Public Transportation, Volume 20, No. 2, S. 103–130.

Bundesamt für Straßen ASTRA (2022a): Rechtliche Situation. Online verfügbar unter: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/rechtliche-situation.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesamt für Straßen ASTRA (2022b): SVG Revision - automatisiertes Fahren. Online verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/faq-automatisiertes-fahren.pdf.download.pdf/FAQ%20automatisiertes%20Fahren%20%E2%80%93%20Rechtliche%20Aspekte.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2021): Auswirkungen der Luftverschmutzung. Online verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/auswirkungen-der-luftverschmutzung.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesanstalt für Straßenwesen (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung; Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe; Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.5409013.01. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.

Bundesanstalt für Straßenwesen (2021): Selbstfahrende Autos – assistiert, automatisiert oder autonom? Online verfügbar unter: <https://www.bast.de/DE/Presse/Mitteilungen/2021/06-2021.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2024): Bundesraumordnung. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/themen/raumentwicklung/bundesraumordnung/_node.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium der Finanzen (2025a): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Fernmeldedienste“. Online verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Fernmeldedienste.html%20Linearer%20AFA-Satz (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium der Finanzen (2025b): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)“. Online verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Personen-und-Gueterbefoerderung.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium der Finanzen (2025c): AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle „AV“). Online verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2021): Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html> (Datum des Zugriffs: 22. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2022a): Bundesrat verabschiedet Verordnung zum Autonomen Fahren. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2022/022-bundesrat-verabschiedet-verordnung-zum-autonomen-fahren.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2022b): Deutsches Mobilitätspanel (MOP). Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/deutsches-mobilitaetspanel.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2022c): Verordnung des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften. Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/008-verordnung-automatisierte-autonome-fahrfunktion.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2023a): BMDV fördert selbstfahrende Fahrzeuge in München. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2023/035-wissing-selbstfahrende-fahrzeuge-muenchen.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2023b): Elektrokleinstfahrzeuge – Fragen und Antworten. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/elektrokleinstfahrzeuge-verordnung-faq.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2023c): Mobilität in Deutschland (MiD). Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2024a): Ländliche Mobilität: ÖPNV setzt auf On-Demand-Angebote. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mFUND/Aktuell/laendliche-mobilitaet.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2024b): Mobilitätserhebungen des BMDV und seiner nachgeordneten Behörden im Überblick. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaetserhebungen-im-ueberblick.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2024c): Nachhaltige Stadt- und Verkehrsplanung: Eine Mammutaufgabe für Städte und Kommunen. Online verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mFUND/Aktuell/stadt-und-verkehrsplanung.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015a): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015b): Verfolgung und Kosten der Siedlungsentwicklung (VerKos). Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVI/BMVIOnline/2016/anhaenge/verkos-v1-beispiel.xlsx?__blob=publicationFile&v=3 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016a): Bundesverkehrswegeplan 2030. Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016b): Mobilitäts- und Angebotsstrategien in ländlichen Räumen. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/mobilitaets-und-angebotsstrategien-in-laendlichen-raeumen-neu.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): Bundesautobahn A7. Online verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.strassenbau.niedersachsen.de/download/59420/Faltblatt_Sechsstreifiger_Ausbau_der_A_7_vom_AD_Salzgitter_bis_suedlich_der_AS_Bockenem_.pdf&ved=2ahUKEwj5x7m_s96LAXPevEDHUNrD-BcQFnoECBMQAw&usq=AOvVaw0oiZTdzIzjYRBRPdkWs1M_ (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024): Energiekostenvergleich für Pkw. Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/2021-08-pkw-energiekostenvergleich.html> (Datum des Zugriffs: 20. Januar 2025).

Bundesverband CarSharing e.V. (2024): Das Carsharing-Wachstum beschleunigt sich. Online verfügbar unter: <https://www.carsharing.de/carsharing-statistik> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Bunte, S.; Kliewer, N. (2009): An overview on vehicle scheduling models. In: Public Transport 1, 4, S. 299–317. doi:10.1007/s12469-010-0018-5.

Business Insider Deutschland GmbH (2023): Der Bau einer E-Auto-Ladestation ist in Deutschland dreimal so teuer wie in Skandinavien – das sind die Gründe. Online verfügbar unter: <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/elektromobilitaet-warum-ladestationen-in-deutschland-so-teuer-sind/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Butcher, L. (2022): Navya to supply autonomous shuttle in US city of White Bear. Online verfügbar unter: <https://www.autonomousvehicleinternational.com/news/mobility-solutions/navya-to-supply-autonomous-shuttle-in-us-city-of-white-bear.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Canzler, W.; Knie, A. (2007): Demographie und Verkehrspolitik. Online verfügbar unter: <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/30348/demographie-und-verkehrspolitik/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Canzler, W.; Knie, A. (2021): Die Digitalisierung ändert alles: Mobilität nach dem Privatauto. In: Siebenpfeiffer W. (Hrsg.): *Mobilität der Zukunft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 291–301.
- Castañón, U. N.; Ribeiro, P. J. G. (2021): Bikeability and Emerging Phenomena in Cycling: Exploratory Analysis and Review. In: *Sustainability* 13, 4. doi:10.3390/su13042394.
- Ceder, A.; Wilson, N. H. M. (1986): Bus Network Design. In: *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 20, Issue 4, S. 331–344.
- Chai, Z.; Nie, T.; Becker, J. (2021): *Autonomous driving changes the future*. Singapore, Beijing, China: Springer; China Machine Press.
- Chang, A.; Cong, Y.; Wang, C.; Bie, Y. (2024): Optimal Vehicle Scheduling and Charging Infrastructure Planning for Autonomous Modular Transit System. In: *Sustainability* 16, 8. doi:10.3390/su16083316.
- Chen, X.; Chen, X.; Zheng, H.; Xiao, F. (2021): Efficient dispatching for on-demand ride services: Systematic optimization via Monte-Carlo tree search. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 127, (103156). doi:10.1016/j.trc.2021.103156.
- Claßen, T. (2013): Lärm mach krank - Gesundheitliche Wirkungen von Lärmbelastung in Städten. In: *Information zur Raumentwicklung*, 3, S. 223–234.
- Clausen, U.; Klingner, M. (2018): Automatisiertes Fahren; Computer greifen zum Steuer. In: Neugebauer R. (Hrsg.): *Digitalisierung. Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 385–411.
- Computerbase (2023): Waymo One - Unterwegs im autonomen Robotaxi ohne Fahrer. Online verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=sEUrjzdm5JI> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Condurache, A. P.; Treptow, A. (2024): Sensordatenfusion. In: Robert Bosch GmbH (Hrsg.): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1860–1871.
- Coppola, R.; Morisio, M. (2016): Connected Car. In: *ACM Comput. Surv.* 49, 3, S. 1–36. doi:10.1145/2971482.
- Daduna, J. R. (1995): Organisationsstrukturen des öffentlichen Personennahverkehrs und ihre Einbindung in den kommunalen Bereich. In: *Zeitschrift für Verkehrswissenschaften* 66, S. 187–206.

Dakic, I.; Yang, K.; Menendez, M.; Chow, J. Y.J. (2021): On the design of an optimal flexible bus dispatching system with modular bus units: Using the three-dimensional macroscopic fundamental diagram. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 148, S. 38–59. doi:10.1016/j.trb.2021.04.005.

Dehne, P. (2019): Perspektivwechsel in der Regionalpolitik: Daseinsvorsorge als gesellschaftliche Aufgabe. In: *Wirtschaftsdienst* 99, S1, S. 56–64. doi:10.1007/s10273-019-2433-9.

Der Bundesrat (2023): Der Bundesrat will automatisiertes Fahren ermöglichen. Online verfügbar unter: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-98234.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Derer, M.; Geis, F. (2020): Entwicklungen im ÖPNV. In: Riener A., Appel A., Dorner W., Huber T., Kolb J. C., Wagner H. (Hrsg.): *Autonome Shuttlebusse im ÖPNV*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 3–14.

Desaulniers, G.; Hickman, M. D. (2007): Public Transit. In: Laporte G., Barnhart C. (Hrsg.): *Transportation*. Amsterdam: Elsevier, S. 69–127.

Deublein, M.; Schaarschmidt, E.; Aleksa, M. (2024): Auswirkung auf die Verkehrssicherheit im Mischverkehr. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): *Automatisierter ÖPNV*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 104–116.

Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT) (2024): DAT Report 2024; Kurzbericht. Online verfügbar unter: https://www.dat.de/fileadmin/de/images/produkte/DAT_Report/DAT_Report_NEW/2024/DAT_Report2024_Pressemitteilung.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutsche Bahn AG (2024): Pionierprojekt KIRA startet mit autonomen Fahrzeugen für den ÖPNV. Online verfügbar unter: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Pionierprojekt-KIRA-startet-mit-autonomen-Fahrzeugen-fuer-den-OePNV--12926526 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutsche Bahn Connect GmbH (2024): Flinkster - das Carsharing in über 250 Städten. Online verfügbar unter: <https://www.flinkster.de/index.php?id=333&> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutscher Bundestag (2016): Kosten für die technische Aufrüstung von Verkehrsinfrastruktur zur Nutzung kooperativer Systeme für automatisiertes und vernetztes Fahren im Straßenverkehr. Online verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/477600/7332d4be9d5e7a7eda915ae572c0fae6/WD-5-070-16-pdf-data.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutscher Bundestag (2021a): Drucksache 19/27439. Online verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/274/1927439.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutscher Bundestag (2021b): Drucksache 19/28800. Online verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/288/1928800.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutscher Bundestag (2022a): Drucksache 86/22. Online verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/brd/2022/0086-22.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutscher Bundestag (2022b): Wissing: Investitionen in Verkehrsinfrastruktur „Generationenvertrag“. Online verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw12-de-verkehr-884200> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (2024): Infrastruktur und Daseinsvorsorge. Online verfügbar unter: <https://kommunen-innovativ.de/infrastruktur-und-daseinsvorsorge.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e.V. (DIW); Kraftfahrt Bundesamt (2023): Verkehr in Zahlen 2023/2024. Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehr-in-zahlen23-24-pdf.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Die Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Schlaglichter/Nachhaltigkeitsstrategie/klimaschutzprogramm-2030-der-bundesregierung-zur-umsetzung-des-klimaschutzplans-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Datum des Zugriffs: 16. Februar 2025).

Die Bundesregierung (2025): CO₂-Preis beträgt jetzt 55 Euro. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Dierkes, F.; Friedrich, B.; Heinrich, T.; Hoffmann, S.; Maurer, M.; Reschka, A.; Schendzielorz, T.; Ungureanu, T. (2019): Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens - Grundlagenprojekt. Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.

Dietmeyer, K. (2015): Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: Maurer M., Gerdes J. C., Lenz B., Winner H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 419–438.

Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission) (2024): EU Transport in Figures: Statistical Pocketbook 2024: Publications Office.

Dovey, K.; Pafka, E. (2020): What is walkability? The urban DMA. In: Urban Studies 57, 1, S. 93–108. doi:10.1177/0042098018819727.

Duisberg, A.; Mauroschat, A. (2023): Warum die USA uns bei Robotaxis voraus sind. Online verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/unternehmen---institutionen/warum-die-usa-uns-bei-robotaxis-voraus-sind/26075206> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EasyMile (2021): EasyMile and Continental to Offer Autonomous Shuttle Service for the Lindau Garden Show. Online verfügbar unter: <https://www.easymile.com/news/easymile-and-continental-offer-autonomous-shuttle-service-lindau-garden-show> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EasyMile (2023): Safety Report. Online verfügbar unter: https://easymile.com/sites/default/files/easymile_safety_report_2023_1.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EasyMile (2024a): EZ10 Personen-Shuttle. Online verfügbar unter: <https://www.easymile.com/de/vehicle-solutions/ez10-passenger-shuttle> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EasyMile (2024b): Fully Driverless Shuttle Service on Medical Campus. Online verfügbar unter: <https://easymile.com/success-stories/oncopole> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EasyMile (2024c): Wegweisend für eine autonome Zukunft. Online verfügbar unter: <https://www.easymile.com/de/about-us> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ecke, L.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Eisenmann, C.; Hilgert, T.; Vortisch, P. (2019): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2017/2018: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Online verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_17_18.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ecke, L.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Hilgert, T.; Vortisch, P. (2020a): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung Bericht 2018/2019: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Online verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_18_19.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ecke, L.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Vortisch, P. (2020b): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2019/2020: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Online verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_19_20.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ecke, L.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Vallée, J.; Vortisch, P. (2021): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2020/2021: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Online verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_20_21.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ecke, L.; Vallee, J.; Chlond, B.; Vortisch, P. (2023): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2022/2023: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Online verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_22_23.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Eckhardt, J.; Nykänen, L.; Aapaoja, A.; Niemi, P. (2018): MaaS in rural areas - case Finland. In: *Research in Transportation Business & Management* 27, 2, S. 75–83. doi:10.1016/j.rtbm.2018.09.005.

EDGAR/JRC (2024): Global carbon dioxide emissions from 1970 to 2023, by sector (in million metric tons of carbon dioxide). Online verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/276480/world-carbon-dioxide-emissions-by-sector/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Effer, S. (2025): Gesetzliche Grundlagen: Bahnübergänge. Online verfügbar unter: <https://blog.lapid.de/bahnuebergang-funktion> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Egger, R. (2024): Fahren unsere Autos schon bald autonom? Online verfügbar unter: <https://automobilrevue.ch/aktuell/fahren-unsere-autos-schon-bald-autonom> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EHL AG (2021): Baunebenkosten für Außenanlagen beim Neubau – das kosten Garten, Garage, Einfahrt und Terrasse. Online verfügbar unter: <https://www.ehl.de/hausbesitzer/news-ratgeber/baunebenkosten-fuer-aussenanlagen-beim-neubau-das-kosten-garten-garage-einfahrt-und-terrasse-32/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

EIA (2023): Carbon dioxide emissions from energy consumption in the United States from 1975 to 2023, by end-use sector. Online verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/204879/us-carbon-dioxide-emissions-by-sector-since-1950/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Eichmann, V.; Berschin, F.; Bracher, T.; Winter, M. (2005): Umweltfreundlicher, attraktiver und leistungsfähiger ÖPNV – ein Handbuch. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/480/publikationen/koepnv-kf.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Emami, B. D.; Song, Y.; Khani, A. (2022): Prioritizing Bus Routes for Electrification: GIS-Based Multi-Criteria Analysis Considering Operational, Environmental, and Social Benefits and Costs. In: *Transportation Research Record* 2676, 8, S. 10–23. doi:10.1177/03611981221082565.

Engel, B. (2021): Verkehr und Stadtgestalt – Städtebauliche Anforderungen und Lösungsansätze. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): *Stadtverkehrsplanung Band 3*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 49–95.

ERTRAC (2019): Connected Automated Driving Roadmap. Online verfügbar unter: <https://www.ertrac.org/wp-content/uploads/2022/07/ERTRAC-CAD-Roadmap-2019.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

ERTRAC (2021): Connected, Cooperative and Automated Mobility Roadmap. Online verfügbar unter: <https://www.ertrac.org/wp-content/uploads/2022/07/Draft-ERTRAC-CCAM-Roadmap-V9-30-09-2021.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

ERTRAC (2024): Connected, Cooperative and Automated Mobility Roadmap; Update of Chapter 2 “Agenda 2030” on Innovation Use Cases. Online verfügbar unter: <https://www.ertrac.org/wp-content/uploads/2023/12/ERTRAC-CCAM-Roadmap-Chapter-2-Update-2024.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Eßlinger, M.; Schwarz, C.; Dujmovic, S. (2024): Video-Sensorik. In: Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Krafffahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1838–1859.

Europäische Kommission (2020): Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen. Online verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Europäische Kommission (2024): Anzahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in der Europäischen Union nach Ländern in den Jahren 2022 und 2023. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/30164/umfrage/verkehrstote-in-europa/> (Datum des Zugriffs: 21. Februar 2025).

Europäisches Parlament (2023): Reduktion von CO₂-Emissionen: Ziele und Maßnahmen der EU. Online verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20180305STO99003/reduktion-von-co2-emissionen-ziele-und-massnahmen-der-eu> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

European Environment Agency (2023): Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Online verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

European Environment Agency (2024): CO₂ emissions performance of new passenger cars in Europe. Online verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

European Wilderness Society Gemeinnütziger Verein (2021): Straßenbau verändert Waldzustand und beschleunigt Klimawandel. Online verfügbar unter: <https://biodiv-im-wald.online/strassenbau-veraendert-waldzustand-und-beschleunigt-klimawandel> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Eurostat (2024a): Key Figures of European Transport - 2023 Edition. Online verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/15216629/18384997/KS-HE-23-001-EN-N.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Eurostat (2024b): Passengers transported (detailed reporting only) - (quarterly data). Online verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_pa_quartal/default/table?lang=de (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

eVehicle for you GmbH (2024): e-Cargo Bike Sharing in München. Online verfügbar unter: <https://evhcle.com/lastenrad-sharing-in-muenchen> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Eymann, G. (2019): Automatisiertes Fahren: Sensortechniken im Check. Online verfügbar unter: <https://www.vdi.de/news/detail/automatisiertes-fahren-sensortechniken-im-check> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Falck, O.; Ebnet, M.; Koenen, J.; Dieler, J.; Wackerbauer, J. (2017): Auswirkungen eines Zulassungsverbots für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor. München: ifo Institut.
- Farina, F. (2018): Optimization of Operations in Public Transportation. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark, Doctoral Thesis.
- Fasse, M.; Hubik, F. (2023): BMW wagt einen besonderen Schritt. Online verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autonomes-fahren-bmw-wagt-einen-besonderen-schritt/29405572.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Federal Highway Administration; Federal Transit Administration (2018): The Transportation Planning Process Briefing Book. Online verfügbar unter: <https://northfloridatpo.com/uploads/FHWA-The-Transportation-Planning-Process.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Fernride GmbH (2024a): Fernride. Online verfügbar unter: <https://www.fernride.com/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Fernride GmbH (2024b): Human-Assisted Autonomy. Online verfügbar unter: <https://www.fernride.com/system> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Fischer, A. (21.03.2023): Telefoninterview vom 21.03.2023 zum Einsatz automatisierter Busse in Köthen.
- Flade, A. (2013): Der rastlose Mensch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Fleischer, T.; Schippl, J. (2024): Gesellschaftliche Aspekte des automatisierten Fahrens. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 128–145.
- Fluhr, D. (2019): Neuer EZ10 von EasyMile. Online verfügbar unter: <https://www.autonomes-fahren.de/neuer-ez10-von-easymile/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Fokusgruppe Intelligente Mobilität (2017): Roadmap Intelligente Mobilität. Online verfügbar unter: https://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2017/06/Roadmap_Intelligente_Mobilitaet.pdf (Datum des Zugriffs: 07. Oktober 2022).
- Follmer, R. (2020): Mobilitätsreport 01, Ergebnisse aus Beobachtungen per repräsentativer Befragung und ergänzendem Mobilitätstracking bis Ende Mai. Online verfügbar unter: https://www.infas.de/wp-content/uploads/2023/01/infas_Mobilitaetsreport_01.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2004): Merkblatt über den Finanzbedarf der Straßenerhaltung in den Kommunen. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2008): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung; RIN. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010a): Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010b): Hinweise zu Einsatzbereichen von Verfahren zur Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): Begriffsbestimmungen. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2013): Hinweise zur Verkehrsentwicklungsplanung. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2015): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen; HBS 2015. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2018a): Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2018b): Empfehlungen zur Anwendung von Mobilitätsmanagement. Köln: FGSV Verlag GmbH.

Foulser, B. (2017): Reimagine Places: Mobility as a Service. Online verfügbar unter: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/uk/pdf/2017/08/reimagine_places_maas.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Fraedrich, E.; Lenz, B. (2014): Autonomes Fahren – Mobilität und Auto in der Welt von morgen. In: TATuP 23, 1, S. 46–53. doi:10.14512/tatup.23.1.46.

Fraunhofer IKS (2024): Autonomes Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/autonomes-fahren.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Free2move Deutschland GmbH (2024): Free2move. Online verfügbar unter: <https://www.free2move.com/de/de/car-sharing/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Freudendal-Pedersen, M.; Kesselring, S.; Servou, E. (2019): What is Smart for the Future City? Mobilities and Automation. In: Sustainability 11, 1, S. 1–21. doi:10.3390/su11010221.

Friedrich, M. (1994): Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum. München: Technische Universität München, Dissertation.

- Fuchs, H.; Hofmann, F.; Löhr, H.; Schaaf, G. (2015): Car-2-X. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 525–540.
- Funke, J. (2018): Mobilität als Bewegung im physischen, sozialen und geistigen Raum. In: Funke J., Wink M. (Hrsg.): Perspektiven der Mobilität. Heidelberg: HEIDELBERG UNIVERSITY PUBLISHING, S. 5–19.
- Furth, P. G.; Rahbee, A. B. (2000): Optimal Bus Stop Spacing Through Dynamic Programming and Geographic Modeling. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1, S. 15–22. doi:10.3141/1731-03.
- Gaia-X 4 Future Mobility (2024): Autonomes Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.gaia-x4futuremobility.de/de/usecases/autonomes-fahren> (Datum des Zugriffs: 04. November 2024).
- Gather, M.; Kagermeier, A.; Lanzendorf, M. (2008): Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Stuttgart, Berlin: Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung.
- Gattermann, P.; Harbering, J.; Schöbel, A. (2017): Line pool generation. In: Public Transp 9, 1-2, S. 7–32. doi:10.1007/s12469-016-0127-x.
- Gerd Kommer GmbH (2021): Instandhaltungs-kosten – wie man Immobilien-invest-ments schönrechnet. Online verfügbar unter: <https://gerd-kommer.de/instandhaltungskosten-von-immobilien/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Gerike, R. (2005): Wie kann das Leitbild nachhaltiger Verkehrsentwicklung konkretisiert werden?; Ableitung grundlegender Aufgabenbereiche. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften, Dissertation.
- Gerike, R.; Vallée, D. (2021): Netzplanung und Netzgestaltung. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 97–124.
- Gertz, C. (2021): Planungsgrundlagen. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–45.
- Gertz, C.; Maaß, J. B.; Grote, M.; Diebold, T.; Mantel, R.; Röntgen, O.; Stargardt, J.; Werner, L.; Wolf, J. (2021): Endbericht des Projektes TaBuLa. Online verfügbar unter: https://tore.tuhh.de/bitstream/11420/9807/1/Endbericht%20des%20Projektes%20TaBuLa_2021_TUHH_W8.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Gipp, C. (2015): Barrierefreie öffentliche Mobilität im ländlichen Raum. In: Ländlicher Raum, 1, S. 31–33.
- Glaser, M. (2023a): Automatisierte, elektrische MAN-Busse ab 2025 im Einsatz. Online verfügbar unter: <https://autonomes-fahren.net/news/automatisierte-elektrische-man-busse-ab-2025> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Glaser, M. (2023b): Berlin plant selbstfahrende Kleinbusse. Online verfügbar unter: <https://autonomes-fahren.net/news/berlin-plant-selbstfahrende-kleinbusse> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Glaser, M. (2023c): USA: Neue Vorschriften für autonomes Fahren. Online verfügbar unter: <https://autonomes-fahren.net/news/usa-neue-vorschriften> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Glaser, M. (2023d): Zulassung autonomer Fahrzeuge zu kompliziert. Online verfügbar unter: <https://autonomes-fahren.net/news/zulassung-autonomer-fahrzeuge-zu-kompliziert> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Glistau, E.; Trojahn, S.; Dittrich, I.; Müller, M.; Rolf, B.; Reggelin, T. (2022): Planung logistischer Systeme. In: Trojahn S., Dittrich I., Frindik R. (Hrsg.): Grundlagen der Logistik. Theorie und Praxis logistischer Systeme. München: Huss-Verlag GmbH, S. 109–164.

Gontscharow, M.; Schotschneider, A.; Orf, S.; Fleck, T.; Zofka, M.; Zöllner, J. M. (2023): Survey and Design Concept for Control Centers of Automated Vehicle Fleets. In: IEEE (Hrsg.): 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC): IEEE, S. 4319–4326.

Google Maps (2025): Stadt Köthen auf Google Maps. Online verfügbar unter: [https://www.google.de/maps/place/K%C3%B6then+\(Anhalt\)/@51.7358997,11.9855342,14627m/data=!3m1!1e3!4m10!1m2!2m1!1sStadt+k%C3%B6then!3m6!1s0x47a67359334cc38f:0x4208ec174343850!8m2!3d51.7505762!4d11.9802357!15sCg1TdGFkdCBw7Z0aGVukgElbG9jYWxpdiHn-gAQA!16zL20vMDFzY3Yw!5m1!1e1?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDExNC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.de/maps/place/K%C3%B6then+(Anhalt)/@51.7358997,11.9855342,14627m/data=!3m1!1e3!4m10!1m2!2m1!1sStadt+k%C3%B6then!3m6!1s0x47a67359334cc38f:0x4208ec174343850!8m2!3d51.7505762!4d11.9802357!15sCg1TdGFkdCBw7Z0aGVukgElbG9jYWxpdiHn-gAQA!16zL20vMDFzY3Yw!5m1!1e1?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDExNC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D) (Datum des Zugriffs: 20. Januar 2025).

Gotzig, H.; Geduld, G. (2015): LIDAR-Sensorik. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 317–334.

gpaNRW (2023): Kalkulatorischer Zinssatz 2024 (Stand: März 2023). Online verfügbar unter: https://gpanrw.de/sites/default/files/2023-03/Kalkulatorischer%20Zinssatz%202024%20Ver%C3%B6ffentlichung%20Stand%202023_03.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Greifenstein, M.; Güthner, H.; Kuhnert, F.; Herrmann, A. (2024): Vom Testgelände auf die Straße - Ein Blick auf den weltweiten Stand der Shared Autonomous Vehicles. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 126, 2-3, S. 60–64. doi:10.1007/s35148-023-1709-y.

Guidemaps-Konsortium (2004): Successful Transport Decision Making (2004); A project management and stakeholder engagement handbook. Online verfügbar unter: https://civitas.eu/sites/default/files/guidemapshandbook_web.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Guihaire, V.; Hao, J.-K. (2008): Transit network design and scheduling: A global review. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 42, 10, S. 1251–1273. doi:10.1016/j.tra.2008.03.011.

- Guo, J.; Kurup, U.; Shah, M. (2020): Is it Safe to Drive? An Overview of Factors, Metrics, and Datasets for Driveability Assessment in Autonomous Driving. In: IEEE Trans. Intell. Transport. Syst. 21, 8, S. 3135–3151. doi:10.1109/TITS.2019.2926042.
- Häll, C. H. (2011): Modeling and Simulation of Dial-a-Ride and Integrated Public Transport Services. Norköpping: Linköping University, Doctoral thesis, comprehensive summary.
- Hamburger Hochbahn AG (2021): Das Projekt HEAT. Online verfügbar unter: <https://www.hochbahn.de/de/projekte/das-projekt-heat> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Hammerich, P. (2025): Autonomes Fahren durch selbstfahrende Autos. Online verfügbar unter: <https://www.bussgeldkatalog.org/autonomes-fahren/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Hannon, E.; McKerracher, C.; Orlandi, I.; Ramkumar, S. (2016): An Integrated Perspective on the Future of Mobility. Online verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/an%20integrated%20perspective%20on%20the%20future%20of%20mobility/an-integrated-perspective-on-the-future-of-mobility.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Hartl, M. (2020): Integrierte ÖV Planung– Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Dissertation.
- Hartleb, J.; Friedrich, M.; Richter, E. (2022): Vehicle scheduling for on-demand vehicle fleets in macroscopic travel demand models. In: Transportation 49, 4, S. 1133–1155. doi:10.1007/s11116-021-10205-4.
- Hartwig, M. (2020): Autonomes Fahren; Chancen für eine sichere, effiziente und nachhaltige Mobilität für alle? Online verfügbar unter: https://www.bmw.com/content/dam/bmw/marketBMWCOM/bmw_com/categories/Innovation/ebook-self-driving-cars/pdf/e-book-self-driving-cars_de.pdf.asset.1578326483949.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Hatzenbühler, J.; Cats, O.; Jenelius, E. (2022): Network design for line-based autonomous bus services. In: Transportation 49, 2, S. 467–502. doi:10.1007/s11116-021-10183-7.
- Haufe-Lexware GmbH & Co. KG (2025): Abschreibung Straßenbeleuchtung. Online verfügbar unter: <https://office.lexware.de/wissenswelt/abschreibungstabelle/strasenbeleuchtung/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Hebermehl, G.; Baumann, U. (2022): Drive Pilot kostet wenigstens 5.950 Euro. Online verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mercedes-autonom-level-3-drive-pilot-haftung-unfall/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Heggenberger, R.; Mayer, C. (2018): Predictive Analytics in der Mobilitätsbranche. In: Wagner H., Kabel S. (Hrsg.): Mobilität 4.0 – neue Geschäftsmodelle für Produkt- und Dienstleistungsinnovationen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1–28.

Heinrich-Böll-Stiftung; VCD Verkehrsclub Deutschland e. V. (2020): Mobilitätsatlas; Daten und Fakten für die Verkehrswende: Heinrich-Böll-Stiftung; VCD Verkehrsclub Deutschland e. V. Online verfügbar unter: https://www.boell-bw.de/sites/default/files/importedFiles/2024/03/27/boell_mobilitaetsatlas2019_ii_v01_kommentierbar.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Helms, S.; Marcen, J.; Kettner, M.; Herr, N.; Senger, M. (2022): Ausgewählte Versuche mit Fahrrad und Pedelec auf einem Scheitelrollenprüfstand. In: Eckart J., Hupfer C., Kriesten R., Nenninger P., Riel J. (Hrsg.): Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe, S. 65–75.

Herget, M. (2016): Mobilität von Familien im ländlichen Raum. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Herget, M.; Hunsicher, F.; Koch, J.; Chlond, B.; Minster, C.; Soyly, T. (2019): Ökologische und ökonomische Potenziale von Mobilitätskonzepten in Klein- und Mittelzentren sowie dem ländlichen Raum vor dem Hintergrund des demographischen Wandels.

Hermann, W. (2018): Für eine neue Kultur der Mobilität. In: Ökologisches Wirtschaften, 2, S. 21–22.

Herzberger, N.; Wasser, J.; Flemisch, F. (2022): Control Centers for Maneuver-based Teleoperation of Highly Automated and Autonomous Vehicles: System Model and Requirements. In: Plant K., Praetorius G. (Hrsg.): Human Factors in Transportation: AHFE International, S. 501–507.

Hey, T. (2019): Die außervertragliche Haftung des Herstellers autonomer Fahrzeuge bei Unfällen im Straßenverkehr. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Hillmann, K.-H. (2007): Wörterbuch der Soziologie. Stuttgart: Alfred Kröner Verlag.

Holst, A. (2022): Voraussetzung an die Infrastruktur für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge im ländlichen Raum. Berlin: Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation.

Holz-Rau, C. (2018a): Motorisierter Individualverkehr. In: ARL - Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, S. 1577–1584.

Holz-Rau, C. (2018b): Verkehr und Verkehrswissenschaft. In: Schwedes O. (Hrsg.): Verkehrspolitik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 115–139.

Hömberg, K.; Jodin, D.; Leppin, M. (2005): Methoden der Informations- und Datenerhebung. Online verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Kay-Hoemberg/publication/28355543_Methoden_der_Informations-_und_Datenerhebung/links/00b49529c2c42b5e3a000000/Methoden-der-Informations-und-Datenerhebung.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Hoor, M. (2020): Mobilitätskulturen: Über die Notwendigkeit einer kulturellen Perspektive der integrierten Verkehrsplanung. In: IVP-Discussion Paper, 1.

- Hoor, M. (2021): Öffentliche Mobilität und eine neue Mobilitätskultur – Grundlagen, Entwicklungen und Wege zur kulturellen Verkehrswende. In: Schwedes O. (Hrsg.): Öffentliche Mobilität. Voraussetzungen für eine menschengerechte Verkehrsplanung. Wiesbaden: Springer VS, S. 165–194.
- Hornberg, C.; Claßen, T.; Steckling, N.; Samson, R.; McCall, T.; Tobollik, M.; Mekel, O.; Terschüren, C.; Schillmöller, Z.; Popp, J.; Paetzelt, G.; Schümann, M. (2013): Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Umweltbelastungen auf die Gesundheit der Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung der bevölkerungsbezogenen Expositionsermittlung. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/umwelt_und_gesundheit_01_2013_conrad_expositionsermittlung.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- HP-Fahrbahnmarkierung Götsch e.K. (2025): Eigenschaften. Online verfügbar unter: <https://www.hp-fahrbahnmarkierung.de/index.php/fahrbahn-markierung/eigenschaften> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Huber, W. (2020): Automated Driving: Vision versus Reality. Online verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=FKYjch-IJA4> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Huber, A. S. (2017): Automatisiertes Fahren in den USA. In: Eisenberger I., Lachmayer K., Eisenberger G. (Hrsg.): Autonomes Fahren und Recht. Wien: MANZ'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung, S. 221–242.
- Hyundai Motor Deutschland GmbH (2016): Hyundai stellt autonom fahrenden IONIQ als Konzeptfahrzeug vor. Online verfügbar unter: <https://www.hyundai.news/de/articles/press-releases/hyundai-stellt-autonom-fahrenden-ioniq-als-konzeptfahrzeug-vor.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- IAV GmbH (2024): Automated Driving & Intelligent Transport Systems (ITS). Online verfügbar unter: https://www.iav.com/INT_de/kompetenzen/vehicle-solutions/automated-driving-and-intelligent-transport-systems-its (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Iclodean, C.; Cordos, N.; Varga, B. O. (2020): Autonomous Shuttle Bus for Public Transportation: A Review. In: *Energies* 13, 11. doi:10.3390/en13112917.
- IEA (2023a): Global CO2 emissions by sector, 2019-2022. Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019-2022> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Ignatious, H. A.; Sayed, H.-E.; Khan, M. (2022): An overview of sensors in Autonomous Vehicles. In: *Procedia Computer Science* 198, S. 736–741. doi:10.1016/j.procs.2021.12.315.
- Illés, B.; Glistau, E.; Coello Machado, N. I. (2007): Logistik und Qualitätsmanagement. Miskolc

Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); IVT Research GmbH; infas 360 GmbH (2018): Mobilität in Deutschland - MID; Ergebnisbericht. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); IVT Research GmbH; infas360 GmbH (2019): Mobilität in Deutschland; Kurzreport: Verkehrsaufkommen - Struktur - Trends. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-2017-kurzreport.pdf?__blob=publicationFile (Datum des Zugriffs: 24. Februar 2025).

Ingenieurgruppe für Verkehrswesen und Verfahrensentwicklung (IVV); Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB) (2003): Mobilitätsmanagement-Handbuch. Online verfügbar unter: https://infoportal.mobil.nrw/fileadmin/02_Wiki_Seite/03_Projekte/09_Mobilitaetsmanagement/Mobilitaetsmanagement_Handbuch_2003.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

INRIX (2021): Staukosten pro Stadt in Deutschland nach ausgewählten Städten im Jahr 2020. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/984697/umfrage/staedte-mit-den-hoechsten-staukosten-in-deutschland/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Institut für Raumplanung (TU Wien); Institut für Verkehrswissenschaften (TU Wien); Institut für Höhere Studien (IHS); Kuratorium für Verkehrssicherheit; Wiender Lokalbahnen GmbH (2019): SAFiP - Systemszenarien Automatisiertes Fahren in der Personenmobilität. Online verfügbar unter: https://projekte.fgg.at/anhang/5cee1b11a1eb7_SAFiP_Ergebnisbericht.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

International Energy Agency (IEA) (2023b): Transport. Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/energy-system/transport> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

International Organization for Standardization (2023): ISO 34503:2023 - Road Vehicles - Test scenarios for automated driving systems - Specification for operational design domain. Genf, Schweiz: Iso Copyright Office.

International Transport Forum (2017): ITF Transport Statistics. Online verfügbar unter: https://www.oecd-ilibrary.org/transport/data/itf-transport-statistics/passenger-transport_g2g5557f-en?parentId=http%3A%2F%2Finstance.metastore.ingenta.com%2Fcontent%2Fcollection%2Ftrsprt-data-en (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

International Transport Forum (2019): ITF Transport Outlook 2019; Executive Summary. Online verfügbar unter: https://www.oecd.org/en/publications/itf-transport-outlook-2019_transp_outlook-en-2019-en.html (Datum des Zugriffs: 21. Februar 2025).

International Transport Forum (2022): Road Safety Annual Report 2022. Online verfügbar unter: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2022.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzel K., Lonnoy L., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfeld T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (Hrsg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, S. 3–32.

IPCC (2023): Summary for Policymakers. In: IPCC (Hrsg.): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf, Schweiz, S. 1–34.

ISUP Ingenieurbüro für Systemberatung und Planung GmbH (2016): Nahverkehrsplan für den Landkreis Anhalt-Bitterfeld 2017 - 2026. Online verfügbar unter: https://www.anhalt-bitterfeld.de/de/datei/download/id/25863,1247/nahverkehrsplan_des_landkreises_anhalt_bitterfeld.pdf (Datum des Zugriffs: 20. Januar 2025).

IVECO Magirus AG (2021): Elektro vs. Diesel – IVECO BUS vergleicht. Online verfügbar unter: <https://blog.iveco.de/elektro-vs-diesel/> (Datum des Zugriffs: 20. Januar 2025).

Jacobs, S. (2016): Fahrradstraßen gibt's schon für 11 Euro pro Meter. Online verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/berlin/fahrradstrassen-gibts-schon-fur-11-euro-pro-meter-2704225.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Janecke, J.; Dobe, A.; Pilz, A.; Jaeschke, A. (2005): Wirkung und Bewertung eines RBL in der Region (Teil 2). In: V+T, 5, S. 167–174. doi:10.37307/j.1868-7911.2005.05.02.

Jaquet, D.; Korte, G. (2024a): Es besteht kein Platz für reservierte ÖPNV-Spuren – Optionen zur Neugestaltung des Straßenraums. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 214–219.

Jaquet, D.; Korte, G. (2024b): Herausforderung der Planung der Integration automatisierten Fahrens angesichts fehlender Normen. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 198–204.

Jensch, T.; Wagner, F. (08.03.2022): Telefoninterview vom 08.03.2022 zum Einsatz automatisierter Busse.

Jessen, J. (2021): Städtebauliche Leitbilder – Entwicklungstendenzen. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 93–118.

Johanning, V.; Mildner, R. (2015): Car IT kompakt. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Jonuschat, H.; Heine, S.; van Tongern, S.; Dorsten, R.; Monte, N.; Twele, H.; Onnen-Weber, U.; Sauerländer-Biebl, A.; Klinge, A.; Eickelmann, E. (2021): Leitfaden für den Betrieb von On-Demand-Bussen im suburbanen und ländlichen Raum; Erkenntnisse aus dem Hub Chain-Reallabor für Forschung und Praxis. Online verfügbar unter: https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/IKT-EM/ikt4-Leitfaden-HubChain.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Datum des Zugriffs: 19. Februar 2025).

Jürgens, L. (2020): Konnektivitätsveränderungen im ÖPNV-Netz durch die Einführung eines autonomen Shuttlebusses. In: Riener A., Appel A., Dorner W., Huber T., Kolb J. C., Wagner H. (Hrsg.): Autonome Shuttlebusse im ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 39–56.

Kaas, H.-W.; Mohr, D.; Gao, P.; Müller, N.; Wee, D.; Hensley, R.; Guan, M.; Möller, T.; Eckhard, G.; Bray, G.; Beiker, S.; Brotschi, A.; Kohler, D. (2016): Automotive revolution – perspective towards 2030; How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry. Online verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/disruptive%20trends%20that%20will%20transform%20the%20auto%20industry/auto%202030%20report%20jan%202016.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Kagermann, H. (2017): Die Mobilitätswende: Die Zukunft der Mobilität ist elektrisch, vernetzt und automatisiert. In: Hildebrandt A., Landhäußer W. (Hrsg.): CSR und Digitalisierung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, S. 357–371.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2024): Deutsches Mobilitäts-panel. Online verfügbar unter: <https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/index.php> (Datum des Zugriffs: 05. April 2024).

Kellstedt, D. K.; Spengler, J. O.; Foster, M.; Lee, C.; Maddock, J. E. (2021): A Scoping Review of Bikeability Assessment Methods. In: *Journal of community health* 46, 1, S. 211–224. doi:10.1007/s10900-020-00846-4.

Kepaptsoglou, K.; Karlaftis, M. (2009): Transit Route Network Design Problem: Review. In: *Journal of Transportation Engineering* 135, 8, S. 491–505. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:8(491).

Kettwich, C.; Dreßler, A. (2020): Requirements of Future Control Centers in Public Transport. In: *AutomotiveUI '20* (Hrsg.): 12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. New York, NY, USA: ACM, S. 69–73.

Khan, M. A.; Sayed, H. E.; Malik, S.; Zia, T.; Khan, J.; Alkaabi, N.; Ignatious, H. (2023): Level-5 Autonomous Driving—Are We There Yet? A Review of Research Literature. In: *ACM Comput. Surv.* 55, 2, S. 1–38. doi:10.1145/3485767.

Khondaker, B.; Wirasinghe, S. C. (2013): Bus Stop Spacing and Location for a Corridor with Multiple Bus Routes. In: *Master Compendium - Conference Technical Papers*, S. 1–13.

- Kielhauser, C.; Adey, B. T. (2018): Ein Weg zu automatisiertem Infrastrukturmanagement. In: Zentrum für Bau- und Infrastrukturmanagement (Hrsg.): Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen - Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik: Zentrum für Bau- und Infrastrukturmanagement, S. 115–127.
- Kilinc, M. (2025): LKW-Arten: Verschiedene Fahrzeuge für unterschiedliche Aufgaben. Online verfügbar unter: <https://www.bussgeldkatalog.org/lkw-arten/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Kirchhoff, P. (2002): Städtische Verkehrsplanung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kitchenham, B.; Charters, S.; Budgen, D.; Brereton, P.; Turner, M.; Linkman, S.; Jørgensen, M.; Mendes, E.; Visaggio, G. (2007): Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering; Version 2.3. Keele University: Keele, UK, University of Durham: Durham, UK, EBSE Technical Report.
- Kleine-Besten, T.; Kersken, U.; Pöchmüller, W.; Schepers, H.; Mlasko, T.; Behrens, R.; Engelsberg, A. (2015): Navigation und Verkehrstelematik. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1047–1082.
- Knie, A. Prof. Dr.; Canzler, W. Dr. habil.; Ruhrort, L. Dr. (2019): Autonomes Fahren im Öffentlichen Verkehr – Chancen, Risiken und politischer Handlungsbedarf. Online verfügbar unter: https://www.gruene-hamburg.de/wp-content/uploads/2019/04/Autonomes_Fahren_Gutachten_030419.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Knoll, P. (2024): Ultraschall-Sensorik. In: Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1812–1815.
- Kolb, J. C.; Wech, L.; Schwabe, M.; Ruzok, C.; Trost, C. (2020): Technische Aspekte des automatisierten Fahrens am Projekt des autonomen Shuttlebusses in Bad Birnbach. In: Riener A., Appel A., Dorner W., Huber T., Kolb J. C., Wagner H. (Hrsg.): Autonome Shuttlebusse im ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 57–94.
- Köllner, C. (2022): Wie Teslas Verzicht auf Radar einzuschätzen ist. Online verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/sensorik/automatisiertes-fahren/wie-teslas-verzicht-auf-radar-einzuschaetzen-ist/20091688> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Kostorz, N.; Hilgert, T.; Kagerbauer, M. (2019): Automatisierte Kleinbusse im Öffentlichen Personennahverkehr – Akzeptanz und Nutzungsintentionen in Deutschland. In: Journal für Mobilität und Verkehr, 2, S. 23–32.
- Kraftfahrt Bundesamt (2024a): Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2024. Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/2024/2024_b_ueberblick_pdf.jsessionid=E92AB5E5B1D591D774644EE55F4BDB65.live11312?__blob=publication-File&v=3 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Kraftfahrt Bundesamt (2024b): Jahresbilanz 2024. Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html?yearFilter=2024 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Krambeck, H. V. (2006): The global walkability index. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Urban Studies and Planning; Department of Civil and Environmental Engineering, Master Thesis.
- Krampe, H.; Lucke, H.-J.; Ziems, D. (2002): Grundlagen der Planung logistischer Systeme. In: Krampe H., Lucke H.-J. (Hrsg.): Grundlagen der Logistik. Einführung in Theorie und Praxis logistischer System. München: Huss-Verlag GmbH, S. 56–90.
- Krcmar, H.; Wolf, M.; Hoberg, P.; Kessel, T.; Neuburger, R.; Riasanow, T.; Wiemann, B. (2017): Zur Zukunft der Mobilität 2025+. Online verfügbar unter: <https://www.muenchner-kreis.de/wp-content/uploads/download/zukunftsstudie7.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Kreis Soest (2022): SOfia unterwegs: Wo und wann fährt SOfia? Online verfügbar unter: <https://ride4all.nrw/sofia-unterwegs> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Krys, C.; Born, D.; Geering, S. (2023): Trend Compendium 2050; Six megatrends that will shape the world. Online verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_trend_compendium_2050_compact_version.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Kühnapfel, J. B. (2021): Scoring und Nutzwertanalysen; Ein Leitfaden Für Die Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Kühne, H. D.; Steierwald, G.; Vogt, W. (2005): Planungsgrundlagen. In: Steierwald G., Kühne H. D., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 3–17.
- Lalli, M. (2019): Autonomes Fahren und die Zukunft der Mobilität. Heidelberg: sociotrend.
- Lam, T. M.; Wang, Z.; Vaartjes, I.; Karssenberg, D.; Ettema, D.; Helbich, M.; Timmermans, E. J.; Frank, L. D.; den Braver, N. R.; Wagtendonk, A. J.; Beulens, J. W. J.; Lakerveld, J. (2022): Development of an objectively measured walkability index for the Netherlands. In: The international journal of behavioral nutrition and physical activity 19, 1. doi:10.1186/s12966-022-01270-8.
- Lamb, W. F.; Wiedmann, T.; Pongratz, J.; Andrew, R.; Crippa, M.; Olivier, J. G. J.; Wiedenhofer, D.; Mattioli, G.; Khourdajie, A. A.; House, J.; Pachauri, S.; Figueroa, M.; Saheb, Y.; Slade, R.; Hubacek, K.; Sun, L.; Ribeiro, S. K.; Khennas, S.; La Rue Can, S. de; Chapungu, L.; Davis, S. J.; Bashmakov, I.; Dai, H.; Dhakal, S.; Tan, X.; Geng, Y.; Gu, B.; Minx, J. (2021): A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. In: Environ. Res. Lett. 16, 7. doi:10.1088/1748-9326/abee4e.
- Landeshauptstadt Hannover (2025): Genehmigungsverfahren. Online verfügbar unter: <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Planen,-Bauen,-Wohnen/Bauen-Denkmalpflege/Denkmalerschutz-Denkmalpflege/Genehmigungsverfahren> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Landratsamt Nordsachsen (2023): Test bestanden: 5G-Leitstelle überwacht selbstfahrenden Bus FLASH. Online verfügbar unter: <https://www.landkreis-nordsachsen.de/landratsamt/aktuelles/nachrichten/artikel/test-bestanden-5g-leitstelle-ueberwacht-selbstfahrenden-bus-flash> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Lantz, F.; Edlund, S.; Jungert, E. (2005): Context fusion for driveability analysis. In: IEEE (Hrsg.): 2005 7th International Conference on Information Fusion: IEEE, 1264-1271.

Laporte, G.; Marín, Á.; Mesa, J. A.; Ortega, F. A. (2007): An Integrated Methodology for the Rapid Transit Network Design Problem. In: Geraets F., Kroon L., Schoebel A., Wagner D., Zaroliagiis C. (Hrsg.): Algorithmic Methods for Railway Optimization. International Dagstuhl Workshop, Railway Optimization 2004, Dagstuhl Castle, Germany, June 20-25, 2004, Bergen, Norway, September 16-17, 2004, Revised Selected Papers. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, S. 187–199.

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH (2024): Arbeitspaket Infrastruktur. Online verfügbar unter: <https://absolut-projekt.de/historie/arbeitspakete/infrastruktur> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Lemmer, K. (2019): Neue autoMobilität II; Kooperativer Straßenverkehr und intelligente Verkehrssteuerung für die Mobilität der Zukunft (acatech Studie). München: utzverlag GmbH.

Lennert, F.; Schönduwe, R. (2017): Disrupting Mobility: Decarbonising Transport? In: Meyer G., Shaheen S. (Hrsg.): Disrupting Mobility. Cham: Springer International Publishing, S. 213–237.

Leonetti, E. (2021): Autonomes Fahren im ÖPNV – Rechtsrahmen und offene Regulierungsfragen für die Integration autonomer Verkehrsangebote in den ÖPNV. In: Hermann M., Knauff M. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Ethische, rechtliche und politische Perspektiven. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, S. 79–112.

Leonetti, E. (2023): Autonomes Fahren im ÖPNV – Zum neuen Rechtsrahmen für autonome öffentliche Verkehrsangebote, den offenen Regulierungsfragen und dem Beitrag zum Klimaschutz. In: Valentiner D.-S. (Hrsg.): Klimaschutz und Städte. Herausforderungen und Potentiale des öffentlichen Rechts. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, S. 167–188.

Leonetti, E. (2024): Betriebliche, wirtschaftliche und rechtliche Aspekte des automatisierten Fahrens aus Sicht der Verkehrsunternehmen. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 116–128.

Leonetti, E.; Ackermann, T.; Schmitz, M. (2020): Eckpunkte zum Rechtsrahmen für einen vollautomatisierten und fahrerlosen Level 4 Betrieb im öffentlichen Verkehr. Online verfügbar unter: <https://www.vdv.de/20201016-vdv-positionspapier-eckpunktepapier-fuer-rechtsrahmen-zum-autonomen-fahren-im-oev.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Leonhardt, A. (2021): Verkehrsmanagement in Städten und deren Umland. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 507–533.
- Liebchen, C.; Möhring, R. H. (2007): The Modeling Power of the Periodic Event Scheduling Problem: Railway Timetables — and Beyond. In: Geraets F., Kroon L., Schoebel A., Wagner D., Zaroliagis C. (Hrsg.): Algorithmic Methods for Railway Optimization. International Dagstuhl Workshop, Railway Optimization 2004, Dagstuhl Castle, Germany, June 20-25, 2004, Bergen, Norway, September 16-17, 2004, Revised Selected Papers. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, S. 3–40.
- Liedtke, G.; Lütjens, K.; Piendl, R.; Bircke, F. B.; Grimme, W.; Hedemann, L.; Maertens, S.; O’Sullivan, M.; Scheelhaase, J.; Scheier, B.; Viergutz, K.; Schöpfer, A.; Winkler, C.; Frieske, B.; Österle, I. (2020): Leitfaden zur Entscheidungsfindung und Bewertung von Maßnahmen und Technologien im Verkehr; ÖKONVER – Ökonomisch fundierte Bewertung neuer Technologien und Maßnahmen im europäischen Verkehrssystem, TP 1000 Bewertungsmethoden. Online verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/140664/1/%C3%96KONVER%20Bewertungsleitfaden%202020-11-05.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Limbourg, M.; Flade, A.; Schönharting, J. (2000): Mobilität im Kindes- und Jugendalter. Opladen: Leske + Budrich.
- Link, H. (2018): Verkehr und Wirtschaft. In: Schwedes O. (Hrsg.): Verkehrspolitik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 89–114.
- Linthorst, J.; de Waal, A. (2020): Megatrends and Disruptors and Their Postulated Impact on Organizations. In: Sustainability 12, 20. doi:10.3390/su12208740.
- Liu, R.; Wang, J.; Zhang, B. (2020): High Definition Map for Automated Driving: Overview and Analysis. In: J. Navigation 73, 2, S. 324–341. doi:10.1017/S0373463319000638.
- Liu, T.; Cats, O.; Gkiotsalitis, K. (2021): A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 133, 4 (103450). doi:10.1016/j.trc.2021.103450.
- Liu, H.; Xie, C. (2022): Allocating exclusive and intermittent transit lanes in dynamic traffic networks with connected and automated vehicles. In: International Journal of Transportation Science and Technology 11, 2, S. 310–327. doi:10.1016/j.ijtst.2021.04.007.
- Liu, Y.; Chen, Z.; Wang, X. (2024): Alleviating bus bunching via modular vehicles. In: Transportation Research Part B: Methodological 189, 4. doi:10.1016/j.trb.2024.103051.
- Louen, C. (2021): Mobilitätsmanagement. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 161–178.
- Lowry, M. B.; Callister, D.; Gresham, M.; Moore, B. (2012): Assessment of Communitywide Bikeability with Bicycle Level of Service. In: Transportation Research Record 2314, 1, S. 41–48. doi:10.3141/2314-06.

- Luchmann, I.; Dahl, A.; Reuter, C.; Stegemann, T.; Bans, R.; Niemann, J.; Knoch, E.-M.; Geenen, V.; Knebel, R.; Zimmermann, F.; Sternberger, J.; Riedl, M. (2024): Autonomes Fahren im öffentlichen Verkehr; Ein Handbuch mit Vorschlägen für die Umsetzung in der kommunalen Praxis. Online verfügbar unter: https://fops.de/wp-content/uploads/2024/11/BMDV_Handbuch_Autonomes_Fahren_Im_Oeffentlichen_Verkehr.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Lück, M. (2023): Kosten eines Haltestellenumbaus. Online verfügbar unter: <https://fliessbaden.de/2023/10/26/hintergruende-kosten-des-haltestellenumbaus/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Lücke, N. (2022): Bosch übernimmt Atlatec: Entwicklungspower für autonomes Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/bosch-uebernimmt-atlatec-entwicklungspower-fuer-autonomes-fahren/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Lutz, L. S. (2017): Automatisiertes Fahren - rechtliche Herausforderungen aus deutscher Perspektive. In: Eisenberger I., Lachmayer K., Eisenberger G. (Hrsg.): Autonomes Fahren und Recht. Wien: MANZ'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung, S. 211–220.
- Machmudi Isa, I. Y. A.; Zainul Abidin, M. A.; Mansor, S. (2014): Objective Driveability: Integration of Vehicle Behavior and Subjective Feeling into Objective Assessments. In: J MECH ENG SCI 6, S. 782–792. doi:10.15282/jmes.6.2014.6.0076.
- Madadi, B.; van Nes, R.; Snelder, M.; van Arem, B. (2021): Optimizing Road Networks for Automated Vehicles with Dedicated Links, Dedicated Lanes, and Mixed-Traffic Subnetworks. In: Journal of Advanced Transportation 2021, S. 1–17. doi:10.1155/2021/8853583.
- Maghelal, P. K.; Capp, C. J. (2011): Walkability: A review of Existing Pedestrian Indices. In: Journal of the Urban & Regional Information Systems Association 23, 2, S. 5–19.
- Mahmud, S.; Shen, H.; Foutz, Y. N. Z.; Anton, J. (2022): Reinforcement Learning Based Route And Stop Planning For Autonomous Vehicle Shuttle Service. In: IEEE (Hrsg.): 2022 IEEE 19th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS): IEEE, S. 668–674.
- Manager-Magazin (2021): Diese Firmen führen beim autonomen Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/tech/autonomes-fahren-ranking-der-fuehrenden-firmen-von-waymo-bis-tesla-a-2389923d-2611-4e5a-88f1-04f0e7515654> (Datum des Zugriffs: 22. Februar 2025).
- Marnier, T. (2006): Die Modellierung innerstädtischer Staus und die Wirkungsweise ausgewählter wirtschaftspolitischer Maßnahmen – eine spieltheoretische Analyse. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaften 77, 3, S. 199–225.
- Maslow, A. H. (1954): Motivation and Personality: Harper & Row, Publishers, Inc.

Matousek, M. (2020): Tesla has released 'full self-driving' in beta — here's how experts rank it, Waymo and 16 other power players in the world of self-driving cars. Online verfügbar unter: <https://www.businessinsider.com/experts-rank-tesla-waymo-other-self-driving-car-power-players-2020-6#18-tesla-1> (Datum des Zugriffs: 22. Februar 2025).

Matthaei, R.; Reschka, A.; Rieken, J.; Dierkes, F.; Ulbrich, S.; Winkle, T.; Maurer, M. (2015): Autonomes Fahren. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1139–1165.

Mauch, U.; North, N.; Pulli, R. (2001): Between efficiency and sufficiency. The optimal combination of policy instruments in the mobility sector towards sustainable development. In: Kaufmann-Hayoz R., Gutscher H. (Hrsg.): Changing Things — Moving People. Strategies for Promoting Sustainable Development at the Local Level. Basel: Birkhäuser Verlag, S. 133–150.

MEDIA CONSULTA Deutschland GmbH (2011): Daseinsvorsorge im demografischen Wandel zukunftsfähig gestalten. Online verfügbar unter: https://demografie.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLV/Demografieportal/Dokumente/Handlungskonzept_2011.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mehlert, C. (2018): Ridepooling: Hype oder Disruption?: KCW GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.vvo-online.de/doc/7.VVO-Fachtagung-2018-Christian-Mehlert-KCW.pdf> (Datum des Zugriffs: 17. April 2024).

Melillo, J. M.; Richmond, T.; Yohe, G. W. (2014): Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment: U.S. Global Change Research Program.

Menon, N.; Barbour, N.; Zhang, Y.; Pinjari, A. R.; Mannering, F. (2019): Shared autonomous vehicles and their potential impacts on household vehicle ownership: An exploratory empirical assessment. In: International Journal of Sustainable Transportation 13, 2, S. 111–122. doi:10.1080/15568318.2018.1443178.

Mercedes-Benz Group AG (2024a): Auf dem Weg zum autonomen Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/technology/autonomous-driving.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mercedes-Benz Group AG (2024b): Mercedes-Benz DRIVE PILOT. Online verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/technology/drive-pilot.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mercedes-Benz Group AG (2024c): Vorreiter bei automatisierten Fahr- und Sicherheitstechnologien. Online verfügbar unter: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/drive-pilot.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Meyer, S. (2023): Digital und innovativ – Die Zukunft unserer Mobilität. Online verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/03/EMKON23_Digital-und-innovativ-%E2%80%93-Die-Zukunft-unserer-Mobilitaet_Meyer-MOIA.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Meyer, M. D. (2016): Transportation Planning Handbook. Hoboken New Jersey: John Wiley & Sons.

MILES Mobility GmbH (2024): MILES Mobility GmbH. Online verfügbar unter: <https://miles-mobility.com/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt (2019): IVS-Rahmenplan Sachsen-Anhalt; Rahmenplan für die Einführung und Nutzung Intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und öffentlichen Personennahverkehr in Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter: https://mlv.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLV/MLV/Service/Publikationen/IVS-Rahmenplan_Sachsen-Anhalt.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt; NASA GmbH (2019): ÖPNV-Plan 2020 – 2030 - Plan des öffentlichen Personennahverkehrs des Landes Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter: https://mlv.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLV/MLV/Service/Publikationen/Plan_fuer_den_oeffentlichen_Personennahverkehr_des_Landes_Sachsen-Anhalt_2020-2030.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (2024): Sharing – Teilen statt besitzen. Online verfügbar unter: <https://www.neue-mobilitaet-bw.de/sharing> (Datum des Zugriffs: 14. Dezember 2024).

MIRA GmbH (2024): MIRA Mobility. Online verfügbar unter: <https://mira-mobility.com/#home> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH (2021): Autonomes Fahren – mit FLASH in die Zukunft der Mobilität. Online verfügbar unter: <https://www.mdv.de/magazin/autonomes-fahren-in-nordsachsen-mit-flash-in-die-zukunft-der-mobilitaet/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH (2024): FLASH - Fahrerloses automatisiertes Shuttle. Online verfügbar unter: <https://www.mdv.de/projekte/nordsachsen-bewegt/flash/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mitteregger, M.; Bruck, E. M.; Soteropoulos, A.; Stickler, A.; Berger, M.; Dangschat, J. S.; Scheuven, R.; Banerjee, I. (2020): AVENUE21. Automatisierter und vernetzter Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Miyamoto, T.; Nakatyou, K.; Kumagai, S. (2003): Agent-based planning method for an on-demand transportation system. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control ISIC-03: IEEE, S. 620–625.

mobilezone GmbH (2025): Mobilfunkstandards 2G, 3G, 4G und 5G - Alle Infos zu den Generationen. Online verfügbar unter: <https://www.sparhandy.de/info/ratgeber/mobilfunkstandards#5g> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mobility Center GmbH (2024): Autoteilen im Überblick. Online verfügbar unter: <https://teilauto.net/carsharing> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

MOIA GmbH (2021): Volkswagen Nutzfahrzeuge, MOIA und Argo AI stellen Roadmap für autonomes Ridepooling in Hamburg vor. Online verfügbar unter: <https://www.moia.io/de-DE/news/vwn-moia-und-argo-ai-stellen-roadmap-fuer-autonomes-ridepooling-in-hamburg-vor> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

MOIA GmbH (2024): Autonomes Fahren in Europa: Die rechtlichen Rahmenbedingungen. Online verfügbar unter: <https://www.moia.io/de-DE/blog/gesetzgebung-autonomes-fahren-europa> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Monheim, H.; Pitzen, C. (2024): Was ist verkehrs- und raumplanerisch bei der Implementierung eines automatisierten ÖPNV zu beachten und welche der vorgestellten Methoden können wie zur Anwendung gebracht werden? In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): *Automatisierter ÖPNV*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 275–285.

Motzer, N. (2023): Andere Länder, andere Lösungen – Herausforderungen für die nachhaltige Mobilität in Europa. Online verfügbar unter: <https://blog.iao.fraunhofer.de/andere-laender-andere-loesungen-herausforderungen-fuer-die-nachhaltige-mobilitaet-in-europa/> (Datum des Zugriffs: 09. November 2024).

Moulin, M. (2018): À Meyrin, le bus XA n’a pas de pilote et s’en porte bien. Online verfügbar unter: <https://www.tdg.ch/geneve/meyrin-bus-xa-pilote-sen-porte/story/23622481> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Mounce, R.; Nelson, J. D. (2019): On the potential for one-way electric vehicle car-sharing in future mobility systems. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 120, 29, S. 17–30. doi:10.1016/j.tra.2018.12.003.

Naisbitt, J.; Aburdene, P. (1990): *Megatrends 2000: Ten New Directions for the 1990’s*. New York: Morrow.

NavVis GmbH (2022): Was ist SLAM? Online verfügbar unter: <https://www.navvis.com/de/technology/slam> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Navya SAS (2022a): *Autonom® Shuttle Evo*. Online verfügbar unter: <https://navya.tech/wp-content/uploads/documents/Brochure-Autonom-Shuttle-Evo-EN.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Navya SAS (2022b): NAVYA’s technology is ready for the commercialization of Level 4 remotely supervised driverless fleets. Online verfügbar unter: <https://www.navya.tech/en/navyas-technology-is-ready-for-the-commercialization-of-level-4-remotely-supervised-driverless-fleets/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Navya SAS (2024a): *Self-Driving Shuttle for Passenger Transportation*. Online verfügbar unter: <https://www.navya.tech/en/solutions/moving-people/self-driving-shuttle-for-passenger-transportation/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Navya SAS (2024b): *Self-driving solutions for passenger transportation*. Online verfügbar unter: <https://www.navya.tech/en/solutions/moving-people/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Navya SAS (2024c): The company. Online verfügbar unter: <https://navya.tech/en/team/vision/> (Datum des Zugriffs: 22. Februar 2025).
- Neißendorfer, M. (2021): Wie es um EasyMiles autonomes Elektro-Shuttle EZ10 steht. Online verfügbar unter: <https://www.elektroauto-news.net/news/wie-es-um-easymiles-autonomes-elektro-shuttle-ez10-steht> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Niedersächsisches Vorschrifteninformationssystem (2023): Abschreibungstabelle und Konten in der Kommunalverwaltung. Online verfügbar unter: https://resources-eu-prd.wk-omega.com/docmedia/attach/WKDE-LTR-DOCS-PHC/g_ni_1356_as_19.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Nitsche, B.; Straube, F. (2023): Current State and Future of International Logistics Networks—The Role of Digitalization and Sustainability in a Globalized World. In: *Logistics* 7, 4, S. 1–9. doi:10.3390/logistics7040083.
- Noll, M.; Rapps, P. (2015): Ultraschallsensorik. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 243–258.
- Nordenbeck, K. (2023): Selbstfahrende Kleinbusse in Berlin: Die BVG macht den Test. Online verfügbar unter: <https://t3n.de/news/bvg-test-selbstfahrende-bus-berlin-1556509/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Nuhn, H.; Hesse, M. (2006): *Verkehrsgeographie*. Paderborn, München, Wien, Zürich: Ferdinand Schöningh.
- Nuzzolo, A.; Comi, A. (2014): City Logistics Planning: Demand Modelling Requirements for Direct Effect Forecasting. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 125, S. 239–250. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.1470.
- OECD (2016): *OECD Factbook 2015-2016; Economic, Environmental and Social Statistics*. Online verfügbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/04/oecd-factbook-2015-2016_g1g63c47/factbook-2015-en.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Oexler, P. (2001): *RegensburgMobil – Handbuch Verkehr und Umwelt Regensburg*.
- O’Flaherty, C. A. (1997): Transport administration and planning. In: O’Flaherty C. A. (Hrsg.): *Transport planning and traffic engineering*. London: Arnold.
- Ognjenović, S.; Zafirovski, Z.; Vatin, N. (2015): Planning of the Traffic System in Urban Environments. In: *Procedia Engineering* 117, S. 574–579. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.216.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES GmbH; Thünen-Institut (2023): *Projektionsbericht 2023 für Deutschland*. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/2023_08_21_climate_change_39_2023_projektionsbericht_2023_0.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Oppermann, B. H.; Stender-Vorwachs, J. (2020): *Autonomes Fahren; Rechtsprobleme, Rechtsfolgen, technische Grundlagen*. München: C.H.Beck oHG.

Ottopia Technologies (2024a): *Products*. Online verfügbar unter: <https://www.ottopia.tech/products> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ottopia Technologies (2024b): *Universal Teleoperation*. Online verfügbar unter: <https://ottopia.tech/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Pangbourne, K.; Stead, D.; Mladenović, M.; Milakis, D. (2018): *The Case of Mobility as a Service: A Critical Reflection on Challenges for Urban Transport and Mobility Governance*. In: Marsden G., Reardon L. (Hrsg.): *Governance of the Smart Mobility Transition*: Emerald Publishing Limited, S. 33–48.

Pas, E. I. (1995): *The Urban Transportation Planning Process*. In: Hanson S. (Hrsg.): *The Geography of Urban Transportation*. New York, London, UK: The Guilford Press, S. 53–77.

Pätzold, J.; Schiewe, A.; Schiewe, P.; Schöbel, A. (2017): *Look-Ahead Approaches for Integrated Planning in Public Transportation*. In: D'Angelo G., Dollevoet T. (Hrsg.): *17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017)*. Wadern/Saarbruecken, Germany: Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum fuer Informatik, Dagstuhl Publishing, 17:1–17:16.

Paulsen, T. (2021): *Autonomes Fahren: Die 5 Stufen zum selbst fahrenden Auto*. Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/grundlagen/autonomes-fahren-5-stufen/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Pertschy, F. (2021): *Welcher Autobauer hat beim autonomen Fahren die Nase vorn?* Online verfügbar unter: <https://www.automotiveit.eu/technology/autonomes-fahren/welcher-autobauer-hat-beim-autonomen-fahren-die-nase-vorn-124.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Petereit, D. (2022): *Bundesrat winkt Erleichterungen für autonomes Fahren durch*. Online verfügbar unter: <https://t3n.de/news/bundesrat-autonomes-fahren-1474313/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Petersen, T. (2016): *Watching the Swiss: A network approach to rural and exurban public transport*. In: *Transport Policy* 52, 2, S. 175–185. doi:10.1016/j.tranpol.2016.07.012.

Pipp, T.; Reiners, P.-A.; von Roesgen, J. (2018): *Driverless Vehicles: Stand der Technik und Anwendung am Fallbeispiel Flughafen*. In: Wagner H., Kabel S. (Hrsg.): *Mobilität 4.0 – neue Geschäftsmodelle für Produkt- und Dienstleistungsinnovationen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 203–244.

Pitzen, C.; Schippl, J. (2024): *Verkehrliche Auswirkungen von avF: Risiken und Ansatzpunkte für deren Vermeidung*. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): *Automatisierter ÖPNV*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 83–93.

Planungsbüro für Verkehr Bornkessel & Markgraf; Ingenieurbüro für Tourismus und Verkehr Claudia Hinrichs; Fachhochschule Potsdam; Agentur für clevere Städte UG (2017): Städtische Mobilität in Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-positionen-lang-januar-2017-rz-klein.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Prawitz, S. (2022): Teleoperation: Hamburg erlaubt ferngesteuerte Pkws ohne Testfahrer. Online verfügbar unter: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/vay-teleoperation-hamburg-ferngesteuerte-autos-a-cc00fdd801d132652206de8c3bf677f4/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Prigge, M.; von Steuber, L. (2021): Alles über die Geschichte, die Strecke und das Kaffee fett-Desaster der A7. Online verfügbar unter: <https://www.kreiszeitung.de/lokales/niedersachsen/autobahn-a7-geschichte-niedersachsen-verlauf-streckenabschnitt-niedersachsen-hamburg-hannover-91117235.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Projektkonsortium NAF-BUS (2021): Abschlussbericht. Online verfügbar unter: https://www.naf-bus.de/app/download/14636868129/BMVI_16AVF2018A_NAF-Bus_Abschlussbericht.pdf?t=1636027571 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Projektteam FLASH (10.07.2024): Persönliches Interview vom 10.07.2024 zum Projekt FLASH.

PTV Group; Karlsruher Institut für Technologie; Rödl & Partner (2019a): Erforschung der Voraussetzungen und Einsatzmöglichkeiten von automatisiert und elektrisch fahrenden (Klein-)Bussen im ÖPNV; Teil 2 Projektsteckbriefe Testbetriebe im Ausland. Online verfügbar unter: [https://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/BMVI_70.941_LEA-\(Klein-\)Bus_Anlage_2.pdf](https://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/BMVI_70.941_LEA-(Klein-)Bus_Anlage_2.pdf) (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

PTV Group; Karlsruher Institut für Technologie; Rödl & Partner (2019b): Erforschung der Voraussetzungen und Einsatzmöglichkeiten von automatisiert und elektrisch fahrenden (Klein-)Bussen im ÖPNV; Teil 1 Projektsteckbriefe Testbetriebe in Deutschland. Online verfügbar unter: [https://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/BMVI_70.941_LEA-\(Klein-\)Bus_Anlage_1.pdf](https://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/BMVI_70.941_LEA-(Klein-)Bus_Anlage_1.pdf) (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

PTV Group; Karlsruher Institut für Technologie; Rödl & Partner (2019c): Voraussetzungen & Einsatzmöglichkeiten von automatisiert und elektrisch fahrenden (Klein-)Bussen im ÖPNV; Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben LEA (Klein-) Bus. Online verfügbar unter: https://fops.de/wp-content/uploads/2020/07/70.941_Schlussbericht.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Punke, M.; Menzel, S.; Werthessen, B.; Stache, N.; Höpfl, M. (2015): Kamera-Hardware. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 347–368.

Reddit Netherlands B.V. (2021): HD Maps cost \$5000/km? Online verfügbar unter: https://www.reddit.com/r/SelfDrivingCars/comments/nqf7ky/hd_maps_cost_5000km/?rdt=48089 (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Rees, D. (2018): Digitalisierung in Mobilität und Verkehr; Schiene und öffentlicher Verkehr. Bingen: PMC Media House.

Reesas, G.; Wohltmann, H.; Schäfer, T.; Kindl, A.; Luchmann, I. (2015): Neue Mobilitätsformen, Mobilitätsstationen und Stadtgestalt; Kommunale Handlungsansätze zur Unterstützung neuer Mobilitätsformen durch die Berücksichtigung gestalterischer Aspekte. Online verfügbar unter: <https://d-nb.info/1081663294/34> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Regierungspräsidien Baden-Württemberg (2014): Neubau der B 31 Breisach-Freiburg, 2. BA Breisach-Gottenheim. Online verfügbar unter: https://rp.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/RP-Internet/Freiburg/Abteilung_4/Referat_44/B31-West/13_09_01_AKVS-Variante_9.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Regierungspräsidien Baden-Württemberg (2019): Kosteneinschätzungen auf Basis von Erfahrungswerten / Kostenkennwerten. Online verfügbar unter: https://rp.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/RP-Internet/Stuttgart/Abteilung_4/Referat_44/B27_AS_Neckarsulm_B27_L1095/Planunterlagen/U1_2_Anh_2_Kosteneinschaetzung.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Regionale Planungsgemeinschaft Magdeburg (2024): Regionalplanung. Online verfügbar unter: <https://www.regionmagdeburg.de/Regionalplanung/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Reichel, J. (2020): Navya fährt auf Level 4 autonom. Online verfügbar unter: <https://vision-mobility.de/news/navya-faehrt-auf-level-4-autonom-53919.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Reyer, F. (2023): Klimaschutz: Deutschland verfehlt laut Expertenrat Klimaziele. Online verfügbar unter: <https://www.ndr.de/nachrichten/ndrdata/Klimaschutz-Deutschland-verfehlt-laut-Expertenrat-Klimaziele,emissionen126.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH (2024): Die Zukunft fährt vor. Online verfügbar unter: <https://kira-autonom.de/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH (2021): Automatisierte Shuttles: Ein Markt-Überblick. Online verfügbar unter: <https://www.rms-consult.de/news/automatisierte-shuttles-ein-markt-ueberblick/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Richter, T.; Brenck, A.; Böckler, L.; Egoldt, A. (2020): AutoNV_OPR - Autonomer Öffentlicher Nahverkehr im ländlichen Raum (Landkreis Ostprignitz-Ruppin). Online verfügbar unter: https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIB-KAT%3A1795015837&cHash=d961d1c54066b94a1d72069ffde9090e#download-mark (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Rinza, P.; Schmitz, H. (1992): Nutzwert-Kosten-Analyse; Eine Entscheidungshilfe. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

Ritchie, H. (2023): Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from? In: Our World in Data.

Ritz, J. (2018): Mobilitätswende – autonome Autos erobern unsere Straßen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Robert Bosch GmbH (2022a): Steer-by-Wire. Online verfügbar unter: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/lenkung/steer-by-wire/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Robert Bosch GmbH (2022b): Weltpremiere: Fahrerloses Parksystem von Bosch und Mercedes-Benz erhält Genehmigung für Serieneinsatz. Online verfügbar unter: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/weltpremiere-fahrerloses-parksystem-von-bosch-und-mercedes-benz-erhaelt-genehmigung-fuer-serieneinsatz-248960.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Robert Bosch GmbH (2024): Der Weg zur voll automatisierten Mobilität. Online verfügbar unter: <https://www.bosch.com/de/forschung/forschungsschwerpunkte/automatisierung/forschung-zu-automatisiertem-fahren/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Roland Berger (2017a): Roland Berger Trend Compendium 2030; Megatrend 4 Climate change and ecosystem at risk. Online verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_trend_compendium_2030___trend_4_climate_change_and_ecosystem_at_ri.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Roland Berger (2017b): Roland Berger Trend Compendium 2030; Megatrend 5 Dynamic technology & innovation. Online verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_trend_compendium_2030___trend_5_dynamic_technology_and_innovation.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Roland Berger (2017c): Roland Berger Trend Compendium 2030; Megatrend 1 Demographic dynamics. Online verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_trend_compendium_2030___trend_1_demographic_dynamics_1.pdf&ved=2ahUKEwiKhN2Q_tLAXUy9gIHHSnjHykQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw0oxDDVVV1LNnNbvnoN_Skr (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Roland Berger (2017d): Roland Berger Trend Compendium 2030; Megatrend 3 Scarcity of resources. Online verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_trend_compendium_2030__trend_3_scarcity_of_resources_1.pdf&ved=2ahUKEwjw5cCe_tLAXI7QIHHUV0HNwQFnoECBkQAQ&usq=AOvVaw2-d6gUs_IGVDWpvE0-41tS (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Rosenkranz, P.; Rudloff, C. (2024): Herausforderung der Planung angesichts eines veränderten Mobilitätsverhaltens bzw. einer noch nicht bekannten Verkehrsnachfrage. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 204–213.

Rudolph, F.; Koska, T.; Schneider, C. (2017): Studie: Verkehrswende für Deutschland; Der Weg zu CO2-freier Mobilität bis 2035. Online verfügbar unter: https://e-pub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6812/file/6812_Verkehrswende.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Rudschies, W.; Kroher, T. (2024): Autonomes Fahren: So fahren wir in Zukunft. Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/aktuelle-technik/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Saar, D.; Marggraf, A.-K. (2021): Klimaschutz geht nicht ohne Verkehrswende – Politik und Autoindustrie müssen heute umsteuern. In: Siebenpfeiffer W. (Hrsg.): Mobilität der Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 337–352.

SAE International (2021): SAE J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.

Safran, M.; Babic, D.; Tomasic, D. (2008): Defining the Optimization Criteria for the Functioning of Logistics and Distribution Center. In: *Traffic&Transportation* Vol. 20, No. 1, S. 59–65

Saka, A. (2001): Model for Determining Optimum Bus-Stop Spacing in Urban Areas. In: *Journal of Transportation Engineering*, 3, S. 195–199. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:3(195).

Salicrú, M.; Fleurent, C.; Armengol, J. M. (2011): Timetable-based operation in urban transport: Run-time optimisation and improvements in the operating process. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45, 8, S. 721–740. doi:10.1016/j.tra.2011.04.013.

Salonen, A.; Haavisto, N. (2019): Towards Autonomous Transportation. Passengers' Experiences, Perceptions and Feelings in a Driverless Shuttle Bus in Finland. In: *Sustainability* 11, 3. doi:10.3390/su11030588.

Sandau, J. (2009): Methodische Unterstützung bei der Bewertung und Auswahl von Produktinnovationen unter hoher Marktunsicherheit; Eine empirische Studie in der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Technologie- und Innovationsmanagement, Dissertation.

- Sawall, A. (2018): Was eine Mobilfunkanlage kostet. Online verfügbar unter: <https://www.golem.de/news/bundesregierung-was-eine-mobilfunkanlage-kostet-1811-137497.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Schäfer, K. H. (2024): Öffentlichkeitsarbeit in der Verkehrsplanung. In: Becker T., Bleeß V., Deuster J., Francke A., Mietzsch O., Nobis C., Saary K., Schwedes O. (Hrsg.): Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung. Berlin, Bonn: Wichmann; Economica-Verlag anfangs, S. 1–26.
- Scheiner, J. (2003): Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung. In: Raum und Mobilität – Arbeitspapiere des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsplanung, S. 1–16.
- Schiefelbusch, M. (2018): Öffentlicher Personenverkehr. In: ARL - Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, S. 1631–1637.
- Schmidt, M.; Schöbel, A. (2015): Timetabling with passenger routing. In: OR Spectrum 37, 1, S. 75–97. doi:10.1007/s00291-014-0360-0.
- Schnabel, W.; Lohse, D. (1997): Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung (Band 2). Berlin: Verl. für Bauwesen.
- Schneider, A. (2025): Zur Nutzungsdauer von Gemeindestraßen. Online verfügbar unter: <https://www.verband-wohneigentum.de/hessen/on234130> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Schneidewind, U. (2013): Transformative Literacy. Gesellschaftliche Veränderungsprozesse verstehen und gestalten. In: GAIA 22, 2, S. 82–86.
- Schneidewind, U. (2019): Die Große Transformation; Eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels. Frankfurt am Main: FISCHER Taschenbuch.
- Schnieder, L. (2018): Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr; Ziele, Methoden, Konzepte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schöbel, A. (2005): Locating Stops Along Bus or Railway Lines—A Bicriteria Problem. In: Annals of Operations Research 136, S. 211–227.
- Schöbel, A. (2012): Line planning in public transportation: models and methods. In: OR Spectrum 34, 3, S. 491–510. doi:10.1007/s00291-011-0251-6.
- Schönharting, J. (2021): Bewertungs- und Entscheidungshilfen. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 413–448.
- Schopf, J. M. (2001): Mobilität & Verkehr - Begriffe im Wandel. In: Verkehr und Mobilität, S. 3–11.
- Schreurs, M. A.; Steuwer, S. D. (2015): Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions. In: Maurer M., Gerdes J. C., Lenz B., Winner H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 151–174.

- Schubert, K. (2024): Wie wir das E-Auto-Zeitalter verschlafen. Online verfügbar unter: <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/elektroauto-deutschland-verkehrswende-mobilitaet-probleme-100.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Schucker, J. (2020): Trajektorienplanung und Fahrzeugführung für hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn. Darmstadt: TU Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation.
- Schwedes, O. (2014): Fazit: Vom Öffentlichen Verkehr zu Öffentlichen Mobilität. In: Schwedes O. (Hrsg.): Öffentliche Mobilität. Perspektiven für eine nachhaltige Verkehrsentwicklung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 241–251.
- Schwedes, O.; Rammert, A. (2020a): Mobilitätsmanagement; Ein neues Handlungsfeld integrierter Verkehrsplanung. Wiesbaden, Heidelberg: Springer VS.
- Schwedes, O.; Rammert, A. (2020b): Was ist Integrierte Verkehrsplanung? Hintergründe und Perspektiven einer am Menschen orientierten Planung: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Integrierte Verkehrsplanung. Online verfügbar unter: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/218899/1/1699066698.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Schwedes, O.; Ringwald, R. (2021): Daseinsvorsorge und Öffentliche Mobilität: Die Rolle des Gewährleistungsstaats. In: Schwedes O. (Hrsg.): Öffentliche Mobilität. Voraussetzungen für eine menschengerechte Verkehrsplanung. Wiesbaden: Springer VS, S. 23–52.
- Science Media Center Germany gGmbH (2021): Die Stufen zum autonomen Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/factsheet/details/news/der-weg-zum-automatisch-fahrenden-auto/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Selinger, J.; Schoor, M. (2024): Radar-Sensorik. In: Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Krafffahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1816–1823.
- Shah, K. J.; Pan, S.-Y.; Lee, I.; Kim, H.; You, Z.; Zheng, J.-M.; Chiang, P.-C. (2021): Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies. In: Journal of Cleaner Production 326, 3. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129392.
- Shields, R.; Gomes da Silva, E. J.; Lima e Lima, T.; Osorio, N. (2023): Walkability: a review of trends. In: Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability 16, 1, S. 19–41. doi:10.1080/17549175.2021.1936601.
- Shin, C. W.; Kim, H.; Kim, M. K.; Lim, W.; Cha, S. W. (2014): Development of an evaluation method for quantitative driveability in heavy-duty vehicles. In: J Mech Sci Technol 28, 5, S. 1615–1621. doi:10.1007/s12206-014-0107-5.

Shukla, P.R.; Skea, J.; Reisinger, A.; Slade, R.; Fradera, R.; Pathak, M.; Al Khourdajie, A.; Belkacemi, M.; van Diemen, R.; Hasija, A.; Lisboa, G.; Luz, S.; Malley, J.; McCollum, D.; Some, S.; Vyas, P. (2022): IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., Mall J. (Hrsg.): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, S. 3–48.

SolVoNet GmbH (2024): Was kostet ein Halteverbot? Online verfügbar unter: <https://www.halteverbotsschilder-mieten.de/was-kostet-ein-halteverbot> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Sommer, C.; Deutsch, V. (2021): Nahverkehrsplanung und Netzgestaltung des ÖPNV. In: Vallée D., Engel B., Vogt W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung Band 3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 255–285.

Sommer, C.; Saighani, A. (2019): ÖPNV-Angebotsformen im ländlichen Raum. In: Bracher T., Dziekan K., Gies J., Huber F., Kiepe F., Reutter U., Saary K., Schwedes O. (Hrsg.): HKV - Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung. Strategien, Konzepte, Maßnahmen für eine integrierte und nachhaltige Mobilität. Berlin: VDE-Verlag GmbH, S. 1–29.

Soteropoulos, A.; Mitteregger, M.; Berger, M.; Zwirchmayr, J. (2020): Automated drivability: Toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 136, 4, S. 64–84. doi:10.1016/j.tra.2020.03.024.

Sparbert, J. (2024): Lidar-Sensorik. In: Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1824–1837.

Stadt Berlin Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen (2019): Verkehrsmengen DTVw 2019. Online verfügbar unter: https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp?loginkey=showMap&mapId=k_vmengen2019@senstadt (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Stadt Halle (Saale) (2025): Ausnahmegenehmigung für den Verkehr beantragen. Online verfügbar unter: <https://halle.de/serviceportal/dienstleistungen/leistung/ausnahmegenehmigung-fuer-den-verkehr-beantragen/29829309> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Stadt Köthen (2011): Verkehrserhebung. Online verfügbar unter: https://www.koethen-anhalt.de/de/datei/anzeigen/id/7198,1233/teil2-koethen_radverkehr_abb_1_bis_5.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Stadt Köthen (2024a): Integriertes Stadtentwicklungskonzept INSEK 2035. Online verfügbar unter: https://www.koethen-anhalt.de/de/datei/anzeigen/id/62853,1233/1_insek-koethen_2035_text.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Stadt Köthen (2024b): Zahlen + Fakten über Köthen. Online verfügbar unter: <https://www.koethen-anhalt.de/de/ueber-die-stadt.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2019a): 6 % der EU-Bürger nutzen Mitfahrzentralen. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/Mitfahrzentralen.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2019b): Durchschnittliche Auslastung im öffentlichen Personennahverkehr im Jahr 2017 nach Verkehrsmitteln. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/975534/umfrage/auslastung-des-oeffentlichen-personennahverkehrs-nach-verkehrsmitteln/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2021): Kosten von Mobilität: Haushalte geben im Schnitt 233 Euro monatlich fürs Auto aus, 33 Euro für Bus, Bahn und Co. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_N045_639.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2022): Fahrradfahren: Niederlande im EU-Vergleich ganz vorn. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/Fahrrad.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2023): Straßenverkehrstote in der EU. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/Verkehrstote.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2024a): 6 % mehr Fahrgäste in Bussen und Bahnen im 1. Halbjahr 2024. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/09/PD24_362_461.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2024b): Anzahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland von 1950 bis 2023. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185/umfrage/todesfaelle-im-strassenverkehr/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2024c): Bevölkerung: Deutschland, Stichtag. Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=12411-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1713693814187#abreadcrumb> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2024d): Fahrgastzahl im Linienverkehr mit Bussen und Bahnen 2023 um 7 % gestiegen. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/04/PD24_142_461.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Statistisches Bundesamt (2024e): Internationale Indikatoren - Verkehr. Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=99911-0008&sachmerkmal=STAAT1&startjahr=2003#abreadcrumb> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Statistisches Bundesamt (2024f): Kraftstoffpreise im EU-Vergleich 2024. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/kraftstoffpreise.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Statistisches Bundesamt (2024g): Öffentliche Verkehrsmittel: Österreich und Ungarn führen. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/Personenbefoerderung.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Statistisches Bundesamt (2024h): Unfallbilanz 2023: 42 Verkehrstote mehr als im Vorjahr. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/02/PD24_072_46241.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2022): 7. Regionalisierte Bevölkerungsprognose. Online verfügbar unter: https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landesaeemter/StaLa/startseite/Themen/Bevoelkerung/Tabellen/Bevoelkerungsprognose/1_Internettable_7RBP_nach_Prognosejahr_Geschlecht_alle_Ebenen.xlsx (Datum des Zugriffs: 20. Januar 2025).
- Stegemann, T. (2023): Teslas „Autopilot“ ist kein „autonomes Fahren“. Online verfügbar unter: <https://www.roedl.de/themen/kompass-mobilitaet/2023/20/tesla-autopilot-kein-autonomes-fahren> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Steierwald, G.; Kühne, H. D.; Vogt, W. (Hrsg.) (2005): Stadtverkehrsplanung; Grundlagen, Methoden, Ziele. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- STEIN HGS GmbH (2022): Temposchwellen. Online verfügbar unter: <https://www.stein-hgs.de/p/temposchwellen-komplett-set-1t-10-km-h-37324-vnr> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Steinbach, J. (2013): Kasseler Anlieger zahlen mit für neue Laternen. Online verfügbar unter: <https://www.hna.de/kassel/anlieger-zahlen-neue-laternen-3227438.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Stiller, C.; Burgard, W.; Deml, B.; Eckstein, L.; Flemisch, F. (2018): Kooperativ interagierende Automobile. In: at - Automatisierungstechnik 66, 2, S. 81–99. doi:10.1515/auto-2017-0129.
- Suhl, L.; Kliwer, N.; Steinzen, I. (2007): Optimierungssysteme für die Dienstplanung im ÖPNV. In: Wirtschaftsinformatik Proceedings 2007 82, S. 447–464. doi:10.5445/KSP/1000005781.
- Sustainable Bus (2023): Gaussin and Macnica have taken over Navya. New entity GAMA to showcase a driverless shuttle at Busworld. Online verfügbar unter: <https://www.sustainable-bus.com/news/gama-gaussin-macnica-navya-autonomous-shuttle-busworld/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Sustainable Mobility for All (2019): Global Roadmap of Action; Toward Sustainable Mobility. Online verfügbar unter: <https://sum4all.org/data/files/gra-globalroadmapofaction-press.pdf> (Datum des Zugriffs: 21. Februar 2025).
- Tapiovaara, R.; Sandell, A.-M.; Martijnse-Hartikka, R. (2021): FABULOS Final Conference. Online verfügbar unter: <https://drive.google.com/file/d/1dbTOBTA5b6Oq8wzEwUd17H2hcmd8DjNR/view> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Tesla Inc. (2024a): Autopilot. Online verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_DE/autopilot (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Tesla Inc. (2024b): Autopilot-Funktionalität und Volles Potenzial für autonomes Fahren. Online verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_DE/support/autopilot-and-full-self-driving-capability (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Tesla Inc. (2024c): Autopilot-Funktionalität und Volles Potenzial für autonomes Fahren. Online verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_de/support/autopilot (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Tesla Inc. (2024d): Modell S. Online verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_de/models/design#overview (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Tesla Inc. (2024e): Transitioning to Tesla Vision. Online verfügbar unter: <https://www.tesla.com/support/transitioning-tesla-vision> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Thales Group (2021): What is V2X? Online verfügbar unter: <https://www.thales-group.com/en/markets/digital-identity-and-security/iot/industries/automotive/use-cases/v2x> (Datum des Zugriffs: 09. Dezember 2022).

The British Standards Institution (2020): PAS 1883:2020 - Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification. London, UK: BSI Standards.

TMS Pro Shop GmbH (2025): Leitplanken Komplett-Bausatz M75-1SP, 2,8 m, zum Aufschrauben, Stahl, Profil B. Online verfügbar unter: <https://www.leitplanken-discounter.de/produkt/schutzplanken-komplett-set-m75-1sp-28-m-zum-aufd uebeln-stahlb-profil/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Traton SE (2022): Autonomes Fahren in USA und Asien: Ausnahmeregelungen statt gesetzlicher Vorgaben. Online verfügbar unter: <https://traton.com/de/newsroom/stories/autonomes-fahren-in-usa-und-asien.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Trefz, H. (2016): Das ist die steilste Straße Deutschlands. Online verfügbar unter: <https://www.thueringer-allgemeine.de/leben/land-und-leute/das-ist-die-steilste-strasse-deutschlands-id221898583.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Trojahn, S.; Behrendt, F.; Glistau, E. (2024): Selbstevaluierung der Dissertation: Leitfaden und Checklisten: 17th International Doctoral Students Workshop on Logistics, Supply Chain and Production Management: Otto von Guericke University Library, Magdeburg, Germany, S. 23–38.

Tully, C. J.; Baier, D. (2006): Mobiler Alltag; Mobilität zwischen Option und Zwang - Vom Zusammenspiel biographischer Motive und soziale Vorgaben. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften; GWV Fachverlage GmbH.

U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration (1970): Urban Transportation Planning; General Information and Introduction to System 360. Washington: U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.

Uber Eats Germany GmbH (2022): Fakten zu Uber in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.uber.com/de/newsroom/fakten-uber-deutschland-sachlage/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Ullrich, G.; Albrecht, T. (2019): Fahrerlose Transportsysteme; Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Umweltbundesamt (2017): Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr reduzieren. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/bodenflaeche/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/flaecheninanspruchnahme-fuer-siedlungen-verkehr#siedlungs-und-verkehrsflächen-in-deutschland> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2022a): Ökonomische Aspekte des Verkehrs. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/oe-konomische-aspekte-des-verkehrs> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2022b): Straßenverkehrslärm. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/laerm/verkehrslaerm/strassenverkehrslaerm#gerauschbelastung-im-strassenverkehr> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2022c): Umweltschonende Raumplanung. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/planungsinstrumente/umweltschonende-raumplanung> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2022d): Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2024a): Emissionen des Verkehrs. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klima-minderungsziele-der-bundesregierung> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2024b): Emissionsdaten. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#hbefa> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2024c): Klimaschutz im Verkehr. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#undefined> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Umweltbundesamt (2024d): Siedlungs- und Verkehrsfläche. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke-> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

UN DESA (Population Division) (2022): Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2100. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

UN DESA (Population Division) (2024): Weltbevölkerung von 1950 bis 2024. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1716/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerung/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

United States Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration (United States Department of Transportation NHTSA) (2021): Incident Reporting for Automated Driving Systems (ADS) and Level 2 Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Online verfügbar unter: https://www.heise.de/downloads/18/3/2/5/0/3/7/5/First_Amended_SGO_2021_01_Final.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

University of Michigan (2018): Mcity Driverless Shuttle; A Case Study. Online verfügbar unter: <https://mcity.umich.edu/wp-content/uploads/2018/09/mcity-driverless-shuttle-case-study.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Vallée, J.; Ecke, L.; Chlond, B.; Vortisch, P. (2022): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2021/2022: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Online verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_21_22.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

van Dieren, W. (1995): Mit der Natur Rechnen; Der Neue Club-Of-Rome-Bericht: Vom Bruttosozialprodukt Zum Ökosozialprodukt. Basel: Springer Basel AG.

van Driel, C.; Abendroth, B.; Fleischer, T.; Schippl, J. (2024): Entwicklung des automatisierten Fahrens – ein Überblick. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 15–33.

Vay Technology GmbH (2023): Ein historischer Moment: Das erste Auto fährt ohne Person im Fahrzeug auf einer europäischen öffentlichen Straße. Online verfügbar unter: <https://vay.io/de/press-release/ein-historischer-moment-das-erste-auto-fahrt-ohne-person-im-fahrzeug-auf-einer-europaeischen-oeffentlichen-strasse/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Vay Technology GmbH (2024): Vay. Online verfügbar unter: <https://vay.io/de/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

VCÖ (2018): Mobilitätswende braucht mehr Öffentlichen Verkehr. Online verfügbar unter: <https://vcoe.at/files/vcoe/uploads/Archiv%20Downloadbereich/2018-04%20VCO%CC%88-Publikation%20Mobilita%CC%88tswende%20braucht%20mehr%20O%CC%88ffentlichen%20Verkehr.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

VCÖ (2021): Good Practice aus anderen Ländern. Online verfügbar unter: <https://vcoe.at/files/vcoe/uploads/Archiv%20Downloadbereich/2021-02%20VC%C3%96-Publikation%20Verkehrswende%20-%20Good%20Practice%20aus%20anderen%20L%C3%A4ndern.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

VCÖ (2023): Bessere Mobilität für die Regionen. Online verfügbar unter: <https://vcoe.at/files/vcoe/uploads/Archiv%20Downloadbereich/2023-02%20VC%C3%96-Publikation%20Bessere%20Mobilit%C3%A4t%20f%C3%BCr%20die%20Regionen.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verband der Automobilindustrie (2024): Von Fahrerassistenzsystemen zum autonomen Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/digitalisierung/automatisiertes-fahren> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (Hrsg.) (2000): Stadtbahnen in Deutschland; Innovativ, flexibel, attraktiv. Düsseldorf: Alba-Fachverlag GmbH & Co. KG.

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2016): VDV Statistik 2015. Online verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2015.pdf?forced=true> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019a): VDV-Schrift 4 - Verkehrserschließung, Verkehrsangebot und Netzqualität im ÖPNV. Köln: Beka GmbH.

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019b): VDV-Schrift Nr. 801 „Fahrzeugreserve in Verkehrsunternehmen“. Köln: Beka GmbH.

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2024a): Autonome Shuttle-Bus-Projekte in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2024b): Personal- und Fachkräftebedarf im ÖPNV. Online verfügbar unter: <https://www.vdv.de/personal-und-fachkraeftebedarf-im-oepnv.aspx> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verbraucherzentrale Bundesverband (2021): Fahrerlose Mobilität, aber sicher und nutzerfreundlich. Online verfügbar unter: https://www.vzbv.de/sites/default/files/downloads/2021/02/03/2021-02_-01_stn_vo_af_bmvi_final_.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2010): VDI 2710 - Interdisciplinary design of automated guided vehicle systems (AGVS). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg (2016): Handbuch Alternative Bedienung. Online verfügbar unter: https://www.vbb.de/fileadmin/user_upload/VBB/Dokumente/Handbuch/handbuch-alternative-bedienung.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Verma, A.; Ramanayya, T. V. (2015): Public Transport Planning and Management in Developing Countries. Baton Rouge: Taylor & Francis Group.

- Völker, M. (2001): Busliniennetze optimal gestalten. In: *Der Nahverkehr*, 10, S. 12–17.
- Volkswagen AG (2024): *Autonomes Fahren – Zukunft der Mobilität*. Online verfügbar unter: <https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de/de/autonomes-fahren.html> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Völzow, C.; Pflieger, P.; Rückhardt, B. (2018): *Automatisiertes Fahren – Infrastruktur*. Online verfügbar unter: <https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2018/Downloads/180511-Update-Pospap-Automatis-Fahren-Infrastruktur.pdf> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- vom Brocke, J.; Simons, A.; Niehaves, B.; Reimer, K.; Plattfaut, R.; Cleven, A. (2009): *Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process*. In: *ECIS 2009 Proceedings*. 161.
- von Mörner, M. (2017): *Demand Oriented Mobility Solutions for Rural Areas Using Autonomous Vehicles*. In: Tampere University of Technology (Hrsg.): *1st International Conference of Mobility as a Service (Conference Proceedings)*, S. 296–310.
- VTIS GmbH (2025): *Kameratyp: Verkehrsüberwachung*. Online verfügbar unter: <https://shop.vtis.de/Verkehrsueberwachung> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Wagner, C. (2009): *Nahverkehrsplanung im Spannungsfeld zwischen Aufgabenträger und Betreiber*. In: Mager T. J. (Hrsg.): *Verkehr in der Praxis. Beiträge zur Verkehrspraxis*. Köln: ksv-Verlag, S. 11–26.
- Wagner, P. (2018): *Mobilität wird in Deutschland immer teurer*. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/infografik/15553/preissteigerung-bei-mobilitaet/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Wahlster, W. (2017a): *Autonome Systeme: Grundlagen für das selbstfahrende Auto*. Online verfügbar unter: https://www.blogs.uni-mainz.de/studgen-stiftung-jgsp/files/2019/01/3_VorL_WW_Autonome_Systeme.pdf (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Wahlster, W. (2017b): *Künstliche Intelligenz als Grundlage autonomer Systeme*. In: *Informatik Spektrum* 40, 5, S. 409–418. doi:10.1007/s00287-017-1049-y.
- Wahren, H.-K. (2004): *Erfolgsfaktor Innovation; Ideen systematisch generieren, bewerten und umsetzen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wang, S.; Ge, M. (2019): *Everything You Need to Know About the Fastest-Growing Source of Global Emissions: Transport*. Online verfügbar unter: <https://www.wri.org/insights/everything-you-need-know-about-fastest-growing-source-global-emissions-transport> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Wang, P. (2021): *Research on Comparison of LiDAR and Camera in Autonomous Driving*. In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 2093, 1, S. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/2093/1/012032.
- Warth, C. P. (2012): *Wissenstransferprozesse in der Automobilindustrie; Entwicklung eines ganzheitlichen Modells auf der Grundlage einer Praxisfallstudie*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Waymo LLC (2020): Introducing the 5th-generation Waymo Driver: Informed by experience, designed for scale, engineered to tackle more environments. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/blog/2020/03/introducing-5th-generation-waymo-driver> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2021): The Waymo Driver Handbook: Teaching an autonomous vehicle how to perceive and understand the world around it. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/blog/2021/10/the-waymo-driver-handbook-perception> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2024a): FAQ. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/faq/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2024b): Largest Autonomous Ride-Hail Territory in US Now Even Larger. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/blog/2024/06/largest-autonomous-ride-hail-territory-in-us-now-even-larger/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2024c): Waymo. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2024d): Waymo Driver. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/waymo-driver/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2024e): Waymo One. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/waymo-one/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Waymo LLC (2024f): Waymo Story. Online verfügbar unter: <https://waymo.com/company/#story> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

Weber, J. (2020): *Bewegende Zeiten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Webster, J.; Watson, R. T. (2002): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a literature Review. In: *MIS Quarterly* Vol. 26, No. 2, S. xiii–xxiii.

Weißborn, S. (2020): *Autonomes Fahren – Das Roboter-Auto schläft noch*. Online verfügbar unter: <https://www.ace.de/autoclub/ace-lenkrad/test-und-technik/test-und-technik-artikel/artikel/autonomes-fahren-das-roboter-auto-schlaeft-noch/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

West, A. (2007): *Vergabeverfahren und Vertragsgestaltung im Öffentlichen Personennahverkehr: Behördliche Planung Versus unternehmerische Initiative*. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Dissertation.

Wester, R. (2008): Kommt ein Zug von irgendwo? In: *derFahrgast*, 4, S. 35–51.

Westermann, G. (2012): *Kosten-Nutzen-Analyse; Einführung und Fallstudien*. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.

Whole Mars Catalog (2024): Waymo Shares Info on How Remote Operators Work. Online verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=tPgR8_8EWaM (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).

- Winner, H. (2015): Radarsensorik. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 259–316.
- Winters, M.; Brauer, M.; Setton, E. M.; Teschke, K. (2013): Mapping bikeability: a spatial tool to support sustainable travel. In: Environment and Planning B 40, 5, S. 865–883. doi:10.1068/b38185.
- Witzke, S. (2016): Carsharing und die Gesellschaft von Morgen; Ein umweltbewusster Umgang mit Automobilität? Wiesbaden: Springer Gabler.
- Wolking, C. (2021): Öffentliche Mobilität und neue Mobilitätsdienstleistungen – Rahmenbedingungen und Gestaltungsperspektiven. In: Schwedes O. (Hrsg.): Öffentliche Mobilität. Voraussetzungen für eine menschengerechte Verkehrsplanung. Wiesbaden: Springer VS, S. 105–138.
- Wong, Y. Z.; Hensher, D. A.; Mulley, C. (2018): Emerging transport technologies and the modal efficiency framework: A case for mobility as a service (MaaS): The University of Sydney. Online verfügbar unter: <https://ses.library.usyd.edu.au/bitstream/handle/2123/19100/ITLS-WP-18-04.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- WSW mobil GmbH (2025): Die Schwebebahn. Online verfügbar unter: <https://schwebebahn.de/> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Xia, D.; Ma, J.; Sharif Azadeh, S. (2024): Integrated timetabling and vehicle scheduling of an intermodal urban transit network: A distributionally robust optimization approach. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 162, 2. doi:10.1016/j.trc.2024.104610.
- Yen, R.; Krenn, W. (2024): Was muss man sich unter „automatisiertem Fahren“ vorstellen? In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 2–15.
- Yin, R. K. (2003): Case Study Research; Design and Methods. London: Sage Publications.
- Zeit Online GmbH (2022): Anzahl der E-Busse auf deutschen Straßen 2021 verdoppelt. Online verfügbar unter: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2022-05/elektromobilitaet-elektrobusse-studie-pwc> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zeit Online GmbH (2023): Autobesitzer lassen Wagen wegen steigender Kosten häufiger stehen. Online verfügbar unter: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2023-11/umfrage-adac-weniger-auto-steigende-kosten> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- ZF Friedrichshafen AG (2019): ZF übernimmt Mehrheit beim Mobilitätsanbieter 2getthere. Online verfügbar unter: https://press.zf.com/press/de/releases/release_4097.html (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zha, L.; Yin, Y.; Yang, H. (2016): Economic analysis of ride-sourcing markets. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 71, S. 249–266. doi:10.1016/j.trc.2016.07.010.

- Zhang, T. (2020): Toward Automated Vehicle Teleoperation: Vision, Opportunities, and Challenges. In: IEEE Internet Things J. 7, 12, S. 11347–11354. doi:10.1109/JIOT.2020.3028766.
- Zhang, B.; Zhong, Z.; Zhou, X.; Qu, Y.; Li, F. (2023): Optimization Model and Solution Algorithm for Rural Customized Bus Route Operation under Multiple Constraints. In: Sustainability 15, 5 (3883). doi:10.3390/su15053883.
- Ziegler, C. (2023): Trajektorienplanung autonomer Fahrzeuge: Diskrete Lösungsmethode für urbane Szenarien. Darmstadt: TU Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation.
- Zierer, M. H.; Zierer, K. (2010): Zur Zukunft der Mobilität; Eine multiperspektivische Analyse des Verkehrs zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Zingrebe, F.; Stephan, M.; Lorenz, S. (2016): Geschäftsmodellinnovationen in der deutschen Automobilindustrie im Zukunftsfeld der Elektromobilität. In: Proff H., Fojcik T. M. (Hrsg.): Nationale und internationale Trends in der Mobilität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 42–61.
- Zukunftsinstitut GmbH (2023a): Megatrend Individualisierung. Online verfügbar unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/megatrend-individualisierung> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zukunftsinstitut GmbH (2023b): Megatrend Konnektivität. Online verfügbar unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/megatrend-konnektivitaet> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zukunftsinstitut GmbH (2023c): Megatrend Mobilität. Online verfügbar unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/megatrend-mobilitaet> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zukunftsinstitut GmbH (2023d): Megatrend Neo-Ökologie. Online verfügbar unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/megatrend-neo-oekologie> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zukunftsinstitut GmbH (2023e): Megatrend Sicherheit. Online verfügbar unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/megatrend-sicherheit> (Datum des Zugriffs: 25. Februar 2025).
- Zweig, M. (2024): Gesetzlicher Rahmen für die Zulassung automatisierte Fahrzeug. In: Yen R., Braun Binder N., Pitzen C., Schippl J. (Hrsg.): Automatisierter ÖPNV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 310–314.

Anhang

A.1 Status Quo von Mobilität und Verkehr in Deutschland

Im Folgenden werden die Ausführungen von Kapitel 2.1.1 vertiefend ergänzt. In Abschnitt 2.1.1 wurden Kenngrößen aus sechs unterschiedlichen Kategorien dargestellt.

1. Alltagsmobilität einzelner Personen
2. Kennzahlen der Gesamtbevölkerung
3. Kennzahlen einzelner Verkehrsmittel
4. Mobilitätskosten im Personenverkehr
5. THG-Emissionen des Personenverkehrs
6. Unfallstatistiken

An dieser Stelle wird ausschließlich auf die ersten drei Kategorien eingegangen. Als Datengrundlage wird vorwiegend die Studie MiD 2017 verwendet. Diese wird jedoch durch das MOP 2022/2023, Verkehr in Zahlen 2023/2024 und weitere Statistiken des KBA und des Statistischen Bundesamtes ergänzt. In Abschnitt 2.2 wurden die aktuellsten Ergebnisse gezeigt, während in den weiteren Ausführungen der Verlauf der Kenngrößen aus den ersten drei Kategorien dargestellt wird.

1. Alltagsmobilität einzelner Personen

Tabelle 52 visualisiert die Entwicklung der allgemeinen Kenngrößen Mobilitätsquote, Wegeanzahl, Wegelänge und Unterwegszeit. Im Zeitverlauf von 2002 bis 2019 wird erkenntlich, dass die Mobilitätsquote ein in etwa gleich hohes Niveau um 90 % beibehält. Die Anzahl der Wege pro Tag sind geringfügig gesunken, während sich die Wegelänge und Unterwegszeit erhöht haben. Zudem wird ersichtlich, dass die vier Mobilitätskenngrößen seit der Pandemie 2020 wieder steigen, jedoch das Niveau von 2019 noch nicht wieder erreicht haben. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 46; Ecke et al. 2020a, S. 43; Ecke et al. 2020b, S. 44; Ecke et al. 2021, S. 42; Vallée et al. 2022, S. 39; Ecke et al. 2023, S. 28–32]

Tabelle 52: Allgemeine Kenngrößen der Mobilität, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 46; Ecke et al. 2020a, S. 43; Ecke et al. 2020b, S. 44; Ecke et al. 2021, S. 42; Vallée et al. 2022, S. 39; Ecke et al. 2023, S. 28–32]

Studien	Anteil mobiler Personen [%]	Wege [Anzahl pro Person pro Tag]	Tagesstrecke [km pro Person pro Tag]	Unterwegszeit [h:min pro Person]
MiD 2002	87	3,3	33	01:16
MiD 2008	90	3,4	38	01:22
MiD 2017	85	3,1	39	01:25
MOP 2017	91,3	3,27	40,9	01:22
MOP 2018	90	3,23	41	01:21
MOP 2019	89,3	3,15	40,9	01:20
MOP 2020	80,6	2,56	26,9	01:03
MOP 2021	86,2	2,9	35,9	01:15
MOP 2022	85,5	3,0	38,2	01:17

Die Untersuchung der MiD 2017-Studie stellt darüber hinaus weitergehende Informationen zu den Mobilitätskenngrößen zur Verfügung:

- Menschen, die im kleinstädtischen, bzw. dörflichen Raum leben, bewältigen pro Tag eine größere Tagesstrecke (40 bis 44 km) als Personen in Großstädten oder Metropolen (36 bis 37 km).
- Die Anzahl der Wege unterscheidet sich hinsichtlich des Raumtyps nicht.
- Menschen zwischen 30 und 60 Jahren legen die meisten Wege (4,0 – 4,2 Wege) und Kilometer (50 – 51 km) pro Tag zurück.
- Personen, die Vollzeit oder Teilzeit berufstätig sind, weisen eine höhere Mobilität in Bezug auf Anzahl der Wege (4,0 bis 4,3 Wege) und Kilometer (40 bis 59 km) pro Tag auf.
- Je höher der ökonomische Status, desto mobiler sind die Personen (3,7 bis 3,8 Wege und 46 bis 51 km pro Tag). [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 26–29]

2. Kenngrößen der Gesamtbevölkerung

Auf Basis der persönlichen Mobilitätswerte zeigt Tabelle 53, dass das tägliche Verkehrsaufkommen im Vergleich zu 2002 leicht gesunken ist. Dagegen ist die Verkehrsleistung bis 2019 signifikant angestiegen. Beide Kenngrößen sind in Folge der Covid-19-Pandemie gesunken und haben auch in 2022 noch nicht wieder das Niveau von 2019 erreicht. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31]

Tabelle 53: Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 9; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31; Statistisches Bundesamt 2024c]

Studien	Bevölkerung [Anzahl in Mio.]	Verkehrsaufkommen [Wege in Mio. pro Tag]	Verkehrsleistung [Pkm in Mio. pro Tag]
MiD 2002	81,6	270	2 717
MiD 2008	80,7	275	3 080
MiD 2017	82,8	257	3 214
MOP 2017	82,8	271	3 387
MOP 2018	83,0	268	3 403
MOP 2019	83,2	262	3 403
MOP 2020	83,2	213	2 238
MOP 2021	83,2	241	2 987
MOP 2022	84,4	253	3 224

Darüber hinaus zeigt die MiD 2017-Studie weitere Details der beiden Kenngrößen:

- Beim Verkehrsaufkommen existieren geringfügige Unterschiede zwischen Stadt und Land.
- Die Verkehrsleistung in Metropolen und zentralen Städten ist niedriger als der bundesweite Durchschnitt.
- Die Verkehrsleistung im kleinstädtischen, bzw. dörflichen Raum ist höher als der bundesweite Durchschnitt. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 30f.]

Die Auswertungen aus dem Bericht Verkehr in Zahlen 2023/2024 bestätigen diese Entwicklungen. Das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung steigen seit 2020 wieder an, haben jedoch auch in 2022 noch nicht wieder das Niveau aus 2019 erreicht [DLR et al. 2023, S. 217–219]. Gemäß der Prognosen wird das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung ab 2026 über dem Niveau von 2019 liegen und bis mindestens 2030 weiter steigen [DLR et al. 2023, S. 348–350].

Der Modal Split des Verkehrsaufkommens ist in Tabelle 54 dargestellt. Auffällig ist, dass der Pkw weiterhin das bevorzugte Verkehrsmittel in Deutschland ist. Jedoch ist im Verlauf der Zeit seit 2002 der prozentuale Anteil des MIV am Verkehrsaufkommen gesunken. Erhöht haben sich dagegen der Rad- und Fußverkehr. Beim ÖV-Anteil ist zu beobachten, dass dieser bis 2019 gestiegen ist, aber seit der Pandemie noch nicht wieder das vorherige Niveau erreicht hat. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31]

Tabelle 54: Modal Split Verkehrsaufkommen, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31]

Studien	MIV (inkl. Mitfahrer)	ÖV	Fahrrad	Zu Fuß
MiD 2002	58 %	9 %	9 %	24 %
MiD 2008	55 %	9 %	11 %	25 %
MiD 2017	57 %	10 %	11 %	22 %
MOP 2017	56,4 %	11,3 %	12,1 %	20,2 %
MOP 2018	55,6 %	11,9 %	12,1 %	20,4 %
MOP 2019	54,4 %	11,6 %	12,6 %	21,4 %
MOP 2020	53 %	8 %	12 %	27 %
MOP 2021	52 %	10 %	14 %	25 %
MOP 2022	47 %	10 %	17 %	26 %

Weiterhin zeigt die MiD-Studie aus dem Jahr 2017, dass die Wahl des Verkehrsmittels von unterschiedlichen Faktoren abhängt:

- Der ÖV wird häufiger in Metropolen und Großstädten genutzt (Anteil von 20 % am Verkehrsaufkommen in Metropolen)
- Der ÖV wird weniger in kleinstädtischen, dörflichen Regionen genutzt (Anteil von 5 % am Verkehrsaufkommen)
- Beim MIV ist dieser Trend gegenläufig, sodass der MIV einen Anteil von 38 % am Verkehrsaufkommen in Metropolen besitzt.
- Im kleinstädtischen, dörflichen Raum nimmt der MIV dagegen einen Anteil von 70 % ein.
- Menschen zwischen 10 und 30 Jahren nutzen den ÖV überdurchschnittlich häufig (17 % bis 23 %). [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 12–14; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 45–52]

Die zuvor genannten Trends des Modal Splits werden auch durch die Entwicklung der Verkehrsleistung (Tabelle 55) bestätigt. Trotz eines zwischenzeitlichen Höchstwerts während der Covid-19-Pandemie ist der Anteil des MIV an der Verkehrsleistung gesunken. Allerdings bleibt der Pkw weiterhin das mit Abstand wichtigste Verkehrsmittel. Der Anteil des ÖV ist in den letzten Jahren gestiegen und hat gemäß der Datenaufzeichnung in 2022 einen Höchstwert von 27 % erreicht. Fahrrad- und Fußverkehr verhalten sich konstant, wobei das Fahrrad zuletzt einen leichten Anstieg verzeichnen konnte. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31]

Tabelle 55: Modal Split Verkehrsleistung, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2019, S. 13; Ecke et al. 2019, S. 39–43; Ecke et al. 2020a, S. 36–40; Ecke et al. 2020b, S. 37–41; Ecke et al. 2021, S. 33–36; Vallée et al. 2022, S. 29–32; Ecke et al. 2023, S. 28–31]

Studien	MIV (inkl. Mitfahrer)	ÖV	Fahrrad	Zu Fuß
MiD 2002	80 %	14 %	3 %	3 %
MiD 2008	76 %	18 %	3 %	3 %
MiD 2017	75 %	19 %	3 %	3 %
MOP 2017	70,7 %	23,4 %	3,6 %	2,3 %
MOP 2018	69 %	26 %	3 %	2 %
MOP 2019	69 %	25 %	3 %	3 %
MOP 2020	75 %	16 %	4 %	5 %
MOP 2021	73 %	20 %	4 %	3 %
MOP 2022	65 %	27 %	5 %	3 %

Hinsichtlich der Verkehrsleistung zeigt sich, dass in Metropolen kürzere Wege zurückgelegt werden, wobei mit dem ÖV fast so weite Strecken wie mit dem MIV bewältigt werden. In kleinstädtischen, dörflichen Räumen werden dagegen nur wenige und kurze Strecken mit dem ÖV zurückgelegt und der MIV wird für längere Strecken genutzt. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 45–52]

Gemäß den Prognosen für die Entwicklung des Modal Splits im Jahr 2030 wird erkenntlich, dass der Anteil des MIV an der Verkehrsleistung um 2 % sinken wird und dementsprechend der Pkw weiterhin das bevorzugte Verkehrsmittel bleibt. Der Anteil des ÖV soll dagegen um 2 % steigen, wobei dies vor allem auf einen Anstieg im Luftverkehr zurückzuführen ist. Beim Verkehrsaufkommen zeigt sich dagegen ein gegensätzlicher Trend, da der Anteil des MIV um 2 % steigt. [DLR et al. 2023, S. 350]

3. Kenngrößen einzelner Verkehrsmittel

In diesem Abschnitt werden Kenngrößen zum Pkw, zum ÖV, zum Fahrrad, zum Carsharing und zur Multimodalität aufgeführt.

Die Gesamtzahl der Pkw in Deutschland ist weiterhin steigend und hat die Marke von 49 Millionen Pkw zum 01.01.2024 überschritten (siehe Tabelle 56) [Biemann et al. 2024; Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Kraftfahrt Bundesamt 2024b]. Analog dazu hat sich auch die Anzahl der batterieelektrischen Pkw (1,4 Millionen Fahrzeuge) erhöht, deren Neuzulassungen in 2023 um 40 % gestiegen sind [Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Kraftfahrt Bundesamt 2024b]. In 2017 betrug die Anzahl Pkw pro Haushalt 1,1 Fahrzeuge und 78 % der Haushalte verfügten über einen Pkw [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 33f.]. Darüber hinaus besitzen 91 % der erwachsenen Bevölkerung einen Führerschein, wobei die Altersgruppe zwischen 18 und 25 Jahren mit 77 % den geringsten Anteil einnimmt [Ecke et al. 2023, S. 25f.]. Alle Kennzahlen unterstreichen, dass weiterhin der Pkw das bedeutsamste Verkehrsmittel ist und der Trend, ein eigenes Fahrzeug zu besitzen, bislang ungebrochen ist.

Tabelle 56: Kenngrößen zum Verkehrsmittel Pkw, eigene Darstellung i. A. a. [Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 33f.; Ecke et al. 2023, 56-26]

Kenngrößen	Wert	Studie und Jahr
Gesamtanzahl Pkw	49 098 685	KBA, 2023
Gesamtanzahl Elektro-Pkw	1 408 681	KBA, 2023
Anzahl Pkw pro Haushalt	1,1	MiD 2017
Anteil Haushalte mit Pkw	78 %	MiD 2017
Führerscheinbesitz	91 %	MOP 2022/2023

Im Jahr 2020 betrug die Gesamtanzahl von Fahrzeugen im Eisenbahnverkehr 17 565 Fahrzeuge (Lokomotiven, Triebwagen, Personenwagen) [DLR et al. 2023, S. 53]. Zum ÖSPV zählen Stadtschnellbahnwagen, Straßenbahnwagen und Kraftomnibusse [DLR et al. 2023, S. 79]. Der Bestand dieser drei Fahrzeugtypen erreichte im Jahr 2019 einen Wert von 88 023 Fahrzeugen [DLR et al. 2023, S. 79]. Mittlerweile ist die Anzahl der Kraft-Omnibusse von 73 800 Fahrzeugen in 2019 auf 84 628 Fahrzeuge in 2024 gestiegen [DLR et al. 2023, S. 79; Kraftfahrt Bundesamt 2024a]. Gemäß einer Erhebung von PwC ist auch die Anzahl der Elektrobussen im Jahr 2021 gestiegen (1 270 Elektrobusse) [Zeit Online GmbH 2022]. Des Weiteren steigt auch das Fahrgastaufkommen, sodass im Jahr 2023 10,9 Milliarden Fahrgäste mit Bussen und Bahnen im Nah- und Fernverkehr befördert wurden [Statistisches Bundesamt 2024d]. Gemäß den Erhebungen des MOP besitzen 20 % der Erwachsenen eine Zeitkarte für öffentliche Verkehrsmittel [Ecke et al. 2023, S. 24f.]. Gemäß der Studie des MiD besitzt ein Anteil von 15 % der Personen über 14 Jahren eine ÖV-Zeitkarte(siehe Tabelle 57) [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 42].

Tabelle 57: Kenngrößen zum ÖV, eigene Darstellung i. A. a. [DLR et al. 2023, S. 53–79; Kraftfahrt Bundesamt 2024a; Zeit Online GmbH 2022; Statistisches Bundesamt 2024d; Ecke et al. 2023, S. 24f.; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 42]

Kenngrößen	Wert	Studie und Jahr
Gesamtanzahl Fahrzeuge ÖV	105 588	Verkehr in Zahlen 2023/2024 für 2019/2020
Anzahl Kraftomnibusse	84 628	Kraftfahrtbundesamt
Elektrifizierte Busse	1 270	PwC 2021
Fahrgäste pro Jahr	10 900 000 000	Statistisches Bundesamt, 2023
Anteil Erwachsene mit Zeitkarte	20 %	MOP 2022/2023
Anteil der Personen über 14 Jahre mit ÖV-Zeitkarte	15 %	MiD 2017

In Deutschland verfügte die Bevölkerung im Jahr 2017 über 77 Millionen Fahrräder inklusive Pedelecs (siehe Tabelle 58) [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39]. Damit besitzen 76 % der Haushalte ein Fahrrad, während Pedelecs in 8 % der Haushalte vorhanden sind [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39f.]. Die Erhebung des MOP ergab, dass 70 % der Erwachsenen ein Fahrrad besitzen [Ecke et al. 2023, S. 23].

Tabelle 58: Kenngrößen zum Fahrrad, eigene Darstellung i. A. a. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 39f.; Ecke et al. 2023, S. 23]

Kenngrößen	Wert	Studie und Jahr
Gesamtanzahl Fahrräder inkl. Pedelecs	77 000 000	MiD 2017
Anteil Haushalte mit Fahrrad	76 %	MiD 2017
Anteil Haushalte mit Pedelec	8 %	MiD 2017
Anteil Erwachsene mit Fahrrad	70 %	MOP 2022/2023

Der BCS vermeldete in 2024 steigende Nutzerzahlen und eine steigende Anzahl der Carsharing-Fahrzeuge (Tabelle 59) [Bundesverband CarSharing e.V. 2024]. Insgesamt wird Carsharing in 1 285 Städten und Gemeinden in Deutschland angeboten [Bundesverband CarSharing e.V. 2024]. Dabei sind fast alle Großstädte mit einem Angebot versorgt (91,5 %) [Bundesverband CarSharing e.V. 2024]. Im Gegensatz dazu werden jedoch nur 8,5 % Städte und Gemeinden unter 20 000 Einwohnern erschlossen [Bundesverband CarSharing e.V. 2024]. Diese Tendenz zeigt auch die MiD-Studie aus dem Jahr 2017. Laut dieser liegt der Anteil von Haushalten mit einer Carsharing-Mitgliedschaft bei 5 %, wobei dieser in Stadtregionen (bis zu 14 %) signifikant höher als im ländlichen Raum (1 %) ist [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 36f.]. Die Carsharing-Anbieter stellen ihre Flotten zunehmend auf batterieelektrische Fahrzeuge um, die bereits einen Anteil von 17,8 % an der Gesamtanzahl der Fahrzeuge einnehmen [Bundesverband CarSharing e.V. 2024].

Tabelle 59: Kenngrößen zum Carsharing, eigene Darstellung i. A. a. [Bundesverband CarSharing e.V. 2024; Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 36f.]

Kenngrößen	Wert	Studie und Jahr
Angemeldete Nutzer bei Carsharing-Anbietern	5 506 040	BCS, 2024
Carsharing-Fahrzeuge	43 110	BCS, 2024
Anteil Batterieelektrischer Fahrzeuge	17,8 %	BCS, 2024
Anteil Haushalte mit Carsharing-Mitgliedschaft	5 %	MiD 2017

Abschließend zeigt die Kenngröße der Multimodalität, dass in 2017 36 % der Menschen in Deutschland in der Woche zwei oder mehr Verkehrsmittel nutzen. In Metropolen beträgt dieser Wert 42 %, in kleinstädtischen Räumen dagegen nur 31 %. [Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften et al. 2018, S. 56–59]

A.2 Automatisiertes Fahren bei BMW

Analog zu Mercedes kann auch bei BMW die 7er-Reihe mit einem sogenannten „BMW Personal Pilot L3“ ausgerüstet werden, welcher das bedingt automatisierte Fahren (Stufe 3) ermöglicht [BMW AG 2023a; Fasse und Hubik 2023]. In diesem Fall wird das Fahrzeug mit zusätzlichen Kameras, Ultraschall-, Radar- und 3D-Lidar-sensoren ausgestattet [BMW AG 2023a; BMW AG 2023b]. Weiterhin ermöglichen eine Live-HD-Karte und eine hochgenaue GPS-Ortung eine präzise Positionsbestimmung [BMW AG 2023a]. Zusätzlich verbaut BMW eine leistungsstarke Rechenplattform, die eine Anbindung an die BMW Cloud über den Mobilfunkstandard 5G erfüllt [BMW AG 2023a].

Der BMW Personal Pilot L3 kann auf Autobahnen mit baulich voneinander getrennten Richtungsfahrbahnen bei Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h und bei guter Witterung eingesetzt werden [BMW AG 2023a; Fasse und Hubik 2023]. Durch die speziell verbaute Sensorik kann das System auch bei Dunkelheit genutzt werden [BMW AG 2023a]. Übernimmt das automatisierte Fahrsystem die Fahrtätigkeit, kann sich der Fahrer Nebentätigkeiten zuwenden und muss die Umgebung nicht überwachen [BMW AG 2023a; Fasse und Hubik 2023]. Der Fahrer hat jedoch die Möglichkeit die Fahrtätigkeit jederzeit zu übernehmen [BMW AG 2023a]. Außerdem wird der Fahrer durch optische und akustische Signale darauf hingewiesen, dass er in das Verkehrsgeschehen eingreifen muss [BMW AG 2023a]. In Zukunft ist geplant die Zulassung für weitere Länder zu erhalten und die Geschwindigkeit auf 90 km/h und 130 km/h zu erhöhen und damit die Anwendungsfälle zu vergrößern [Fasse und Hubik 2023].

A.3 Sensoren von EasyMile und GAMA

In der Tabelle 60 werden die Sensoren der automatisierten Busse von EasyMile und GAMA aufgelistet.

Tabelle 60: Sensoren und Funktionen der Shuttlebusse von EasyMile und GAMA, eigene Darstellung i. A. a. [Kolb et al. 2020, 68-69; Navya SAS 2024a; EasyMile 2024a; Navya SAS 2022a, S. 8–21]

Sensor	EasyMile EZ10	Autonom® Shuttle Evo
Odometrie	Raddrehzahlsensor, Inertial Measurement Unit (IMU) zur Lokalisierung	Raddrehzahlsensor, IMU zur Lokalisierung
GPS	GPS + Korrektur Signal über Mobilfunk (Lokalisierung)	GNSS RTK (Lokalisierung)
LIDAR	2 x 110° Multi-LIDAR (Lokalisierung) 4 x 270° Einstrahl-LIDAR, 2 x 180° Multi-LIDAR (Objekterkennung)	2 x 360° Velodyne (Multi-LIDAR) 4x Valeo Scala (Multi-LIDAR) 2 x SICK MRS (Multi-LIDAR) 2 x SICK TiM (Einstrahl LIDAR) (Lokalisierung und Objekterkennung)
Kamera	2 Kameras (Objekterkennung)	2 Kameras (Objekterkennung)
Radar	4 Radarsensoren (Objekterkennung)	nicht verbaut

A.4 Ziele, Strategien und Maßnahmen der Verkehrsplanung

Für den Erfolg einer Verkehrsplanung ist es eminent wichtig, dass die Ziele der Planung richtig formuliert und von den Strategien abgegrenzt werden [Gertz 2021, S. 22; Steierwald et al. 2005, S. 11]. Beispielsweise ist die Reduktion des Autoverkehrs kein Ziel, sondern eine Strategie, um die Wertvorstellungen des Zielkatalogs zu erfüllen [Steierwald et al. 2005, S. 11–13]. „Als Ziele der Verkehrsplanung werden die Zustände oder Entwicklungen bezeichnet, die durch verkehrsplanerische oder über die Verkehrsplanung hinausgehenden Maßnahmen und Konzepte angestrebt werden können“ [FGSV 2018a, S. 9]. Folgende Auflistung zeigt mögliche Ziele im Verkehrsplanungsprozess:

- Verbesserung der Verkehrsqualität und Erreichbarkeit (u. a. geringe Reisezeiten)
- Erhöhung der gesellschaftlichen Teilhabe inkl. Barrierefreiheit
- Schutz der Umwelt und Reduzierung der verkehrsbedingten Umweltbelastungen (u. a. Flächen- und Energieverbrauch, THG-Emissionen, Lärm)
- Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Reduktion des Verkehrsaufkommens und -aufwands
- Verringerung des KFZ-Bestands, bzw. Veränderung der Flottenzusammensetzung
- Stärkung des Standortes und Erhöhung der Wirtschaftsentwicklung
- Aufwertung des öffentlichen Raums und Erhöhung der Lebensqualität [Gertz 2021, S. 22; FGSV 2018a, S. 9f.; Jessen 2021, S. 98–107]

Die Ziele für die jeweilige Verkehrsplanung ergeben sich aus konkret benannten Mängeln (u. a. Unfälle), rechtlich verankerten Zielen (u. a. ÖPNV-Gesetz der Länder), politischen Zielen (u. a. Ressourcenschonung), Konkretisierung übergreifender Planungsaufgaben (u. a. integriertes Stadtentwicklungskonzept), Anregungen / Beschwerden aus der Bürgerschaft und aus Entwicklungen im Verkehr [FGSV 2018a, S. 9; Gertz 2021, S. 24; Becker 2018, S. 84–88]. Bei der Erarbeitung des Zielsystems ist darauf zu achten, Ziele mit möglichst konkreten quantitativen Indikatoren zu versehen [Gertz 2021, S. 22f.; FGSV 2018a, S. 22f.]. Diese werden bei der Bewertung der Maßnahmen benötigt, um die Auswirkungen abschätzen zu können [Gertz 2021, S. 22f.; FGSV 2018a, S. 22f.]. Ein Verkehrsplanungsprozess verfolgt in der Regel mehrere Ziele, weshalb Zielkonflikte auftreten können, die berücksichtigt werden müssen [FGSV 2018a, S. 22f.]. Die Zielkonflikte können dabei den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch und sozial) zugeordnet werden [Gertz 2021, S. 22f.; FGSV 2018a, S. 22f.; Agora Verkehrswende 2017, S. 45; van Dieren 1995, S. 120]. Beispielsweise stehen dem Ziel der geringen Reisezeiten (soziales Ziel) die ökologischen Ziele geringe Emissionen und geringer Energieverbrauch entgegen [FGSV 2018a, S. 9; Gertz 2021, S. 23]. Weiterhin erhöhen Tätigkeiten zur Herstellung der Barrierefreiheit (soziales Ziel) die Mobilitätskosten (ökonomisches Ziel) [FGSV 2018a, S. 9]. Darüber hinaus existieren Zielkonflikte zwischen dem Verkehr und der Stadtstruktur [Steierwald et al. 2005, S. 434f.]. Verkehrsberuhigungsmaßnahmen (bremsende Einbauten) zerstören unter Umständen das Stadt- und Straßenbild [Steierwald et al. 2005, S. 434f.].

Um die konkreten Ziele zu erreichen und Zielkonflikte aufzulösen, werden verschiedene Strategien eingesetzt [Gertz 2021, S. 22; FGSV 2018a, S. 10]. Grundsätzlich richtet sich die Verkehrsplanung anhand der folgenden drei Strategien aus: „Vermeiden“, „Verlagern“ und „Verträglich Gestalten“ [Schneidewind 2019, S. 225f.; Gertz 2021, S. 25f.; FGSV 2018a, S. 10]. Das Vermeiden bezieht sich darauf, durch Maßnahmen insgesamt den Verkehrsaufwand zu reduzieren [Gertz 2021, S. 25; BMDV 2024c]. Verkehr auf Verkehrsmittel mit geringerer Energie pro Pkm zu verschieben und den Modal Split zu verändern beschreibt das „Verlagern“ [Gertz 2021, S. 25; BMDV 2024c]. Verbesserung der Fahrzeuge durch eine höhere Effizienz und Auslastung sind Maßnahmen für die Strategie der verträglichen Gestaltung [Gertz 2021, S. 25; BMDV 2024c]. Tabelle 61 zeigt eine mögliche Kategorisierung der Strategien [Gertz 2021, S. 26; FGSV 2018a, S. 10].

Tabelle 61: Strategien in der komplexen Verkehrsplanung, eigene Darstellung i. A. a. [Gertz 2021, S. 26; FGSV 2018a, S. 10]

Umweltbezogene Strategien der Verkehrsplanung	Klassifizierung von Strategien in der Verkehrsplanung („3 V“)	Klassifizierung von Strategien in der Nachhaltigkeit
Reduzierung der zurückgelegten Distanzen	Verkehrsvermeidung	Suffizienzstrategie
Reduzierung der Zahl der Weg		
Reduzierung der Fahrleistung		
Erhöhung der Auslastung		
Verlagerung auf ÖV und nicht-motorisierten Verkehr)	Verkehrsverlagerung	
Einsatz Fahrzeuge mit geringen Emissionen und Energieverbrauch	Verträgliche Abwicklung	Effizienzstrategie
Steuerung Verkehrsabwicklung		
Kreislaufwirtschaft von Verkehrsmitteln und Infrastruktur)		Konsistenzstrategie

Parallel dazu existieren im Sinne der Nachhaltigkeit und der nachhaltigen Mobilität die Suffizienz-, Effizienz- und Konsistenzstrategie [Gertz 2021, S. 25f.]. Die Suffizienzstrategie unterliegt dem Paradigma, den Energieverbrauch durch Verhaltensänderung zu minimieren [Gertz 2021, S. 25; Mauch et al. 2001, S. 133]. Bei der Effizienzstrategie wird versucht, mit technischen Lösungen möglichst wenig Ressourcen zu verbrauchen und gleichzeitig einen größtmöglichen Ertrag zu erreichen [Gertz 2021, S. 25; Mauch et al. 2001, S. 133]. Eine Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen und Ressourcen mehrmals zu verwenden, ist Teil der Konsistenzstrategie [Gertz 2021, S. 25; Mauch et al. 2001, S. 138].

A.5 Aufgabenorganisation bei der Entwicklung des Verkehrsangebots

Gemäß Regionalisierungsgesetz (ReG) ist der Landkreis oder die kreisfreie Stadt der Aufgabenträger, welcher die ÖPNV-Leistung bestellt. Der Betreiber, ein kommunales oder privates Verkehrsunternehmen, entwickelt das ÖPNV-Angebot und erbringt die Leistung, für die es vergütet wird. Die Genehmigungsbehörde ist in diesen Prozess eingebunden und prüft, ob das Verkehrsangebot des Betreibers den Anforderungen des Nahverkehrsplans entspricht und erteilt die Linienkonzession (siehe Abbildung 54). [Böhler et al. 2009, S. 56–58; Schnieder 2018, S. 10]

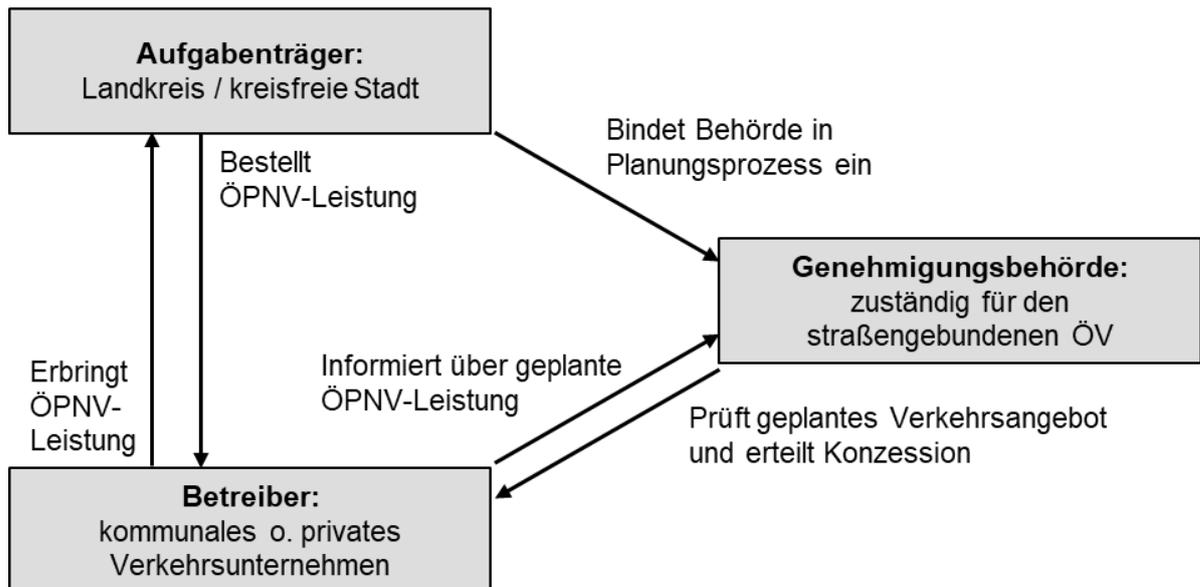


Abbildung 54: Aufgabenorganisation in der ÖPNV-Planung, eigene Darstellung i. A. a. [Böhler et al. 2009, S. 58]

Die Abbildung zeigt, dass der Aufgabenträger und der Betreiber inhaltlich die ÖPNV-Planung bearbeiten [Böhler et al. 2009, S. 56–58; Wagner 2009, S. 22]. Aus diesem Grund wird die Aufgabenverteilung zwischen diesen beiden Institutionen bei der ÖPNV-Planung vertiefend betrachtet. Die Genehmigungsbehörde wird im Weiteren nicht berücksichtigt. Im Rahmen der ÖPNV-Planung werden verschiedene Aufgaben durchgeführt, die im Folgenden kategorisiert werden:

- **Strategische ÖPNV-Planung:** Konzeptionelle Verkehrs- und Bauleitplanung, konzeptionelle ÖPNV-Planung (u. a. grundsätzliche Vorgaben für das Liniennetz, den Takt und die Tarifstruktur), Erstellung und Weiterentwicklung des Nahverkehrsplans (inkl. Zielen des ÖPNV und geplanter Maßnahmen).
- **Bestellfunktionen (Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung der ÖPNV-Leistung):** Vergabekonzeption, Umsetzung der strategischen Planung in Lastenhefte, Budgetplanung, Vorbereitung und Durchführung von Vergabeverfahren, laufende Vertragskontrolle und Sanktionierung, Erfassen der Einnahmen, Abrechnung des Leistungserstellers.
- **Administrative Aufgaben der Betriebsumsetzung:** Übernahme der Linienkonzessionen für das gesamte Bedienungsgebiet, Erstellen der Fahrpläne und Umlaufplanung auf Basis der Vergabe, Abstimmung des Angebotes mit angrenzenden Anbietern.

- **Ausführung der Regiefunktionen:** Tarifpolitik und Tariffestsetzung (Festlegung und Genehmigung), Aufteilung der Einnahmen innerhalb des Verkehrs-/Tarifverbands, Festlegung der Rahmenbedingungen der Vertriebsstrategie, Fahrplanintegration, Finanzierung der Unterdeckung.
- **Marketing- und Kommunikation:** Marktforschung, Vertriebs- und Tarifkonzeption (Entwicklung und Weiterentwicklung), Kommunikation (ggü. der politischen Ebene, der Öffentlichkeit und Betriebsintern), Kundenkontakte (u. a. Public Relations), Produktplanung, Qualitätsplanung und –sicherung, Verkehrsstatistiken, Beschwerdemanagement.
- **Planung und Umsetzung der Infrastruktur:** Fahrwege, Haltestellen und Zugangsstellen, Fahrgastinformationssysteme, Vertriebssysteme, Betriebsleitsystem, Kommunikation mit Lichtsignalanlagen, Busabstellanlagen, Betriebshöfe inkl. Werkstätten.
- **Ausführung der Betriebsfunktionen (Leistungserbringung):** Bereitstellung der Betriebsanlagen und Betriebsmittel, Fahrzeugvor- und -instandhaltung (Reparatur, Reinigung), Planung der Betriebsdurchführung (Dienst- und Einsatzplanung inkl. Fahrzeuge und Personal), Einsatzsteuerung (Personal- und Fahrzeugdisposition), Betriebsdurchführung und laufende Betriebsüberwachung, Fahrplan-/Anschlusssicherung, Erhebung von Fahrgeld. [West 2007, S. 24–28; Wagner 2009, S. 13; Böhler et al. 2009, S. 56–58; Eichmann et al. 2005, S. 13f.]

Zur Aufgabenzuordnung existieren in der Literatur unterschiedliche Ansichten. Daduna unterscheidet die Aufgabenorganisation in ein 2-Ebenen-Modell und ein 3-Ebenen-Modell [Daduna 1995, S. 190–192]. Im 2-Ebenen-Modell werden die Aufgaben zwischen Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen geteilt, wobei die Planung- und Steuerung dem Aufgabenträger obliegt und das Verkehrsunternehmen die operative Ebene übernimmt [Daduna 1995, S. 192]. Beim 3-Ebenen-Modell wird bspw. eine Nahverkehrsgesellschaft als GmbH gegründet, welche die Aufgaben zwischen Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen koordiniert [Daduna 1995, S. 190f.]. Am Beispiel der Stadt Frankfurt wird der Unterschied in der Aufgabenteilung verdeutlicht (siehe Abbildung 55) [Wagner 2009, S. 22]. Während die Stadt Frankfurt im Zwei-Ebenen-Modell den Generalverkehrsplan und den Nahverkehrsplan verantwortet, ist die Angebots-, Fahr- und Betriebsplanung beim Verkehrsunternehmen angesiedelt [Wagner 2009, S. 22]. Im Gegensatz dazu ist die Stadt Frankfurt beim Drei-Ebenen-Modell nur noch für die Strategie im Generalverkehrsplan und die Verkehrsgesellschaft nur noch für die operative Dienstplanung zuständig [Wagner 2009, S. 22]. Das Unternehmen traffiQ ist als Nahverkehrsgesellschaft dazwischengeschaltet und koordiniert die übrigen Aufgaben [Wagner 2009, S. 22].

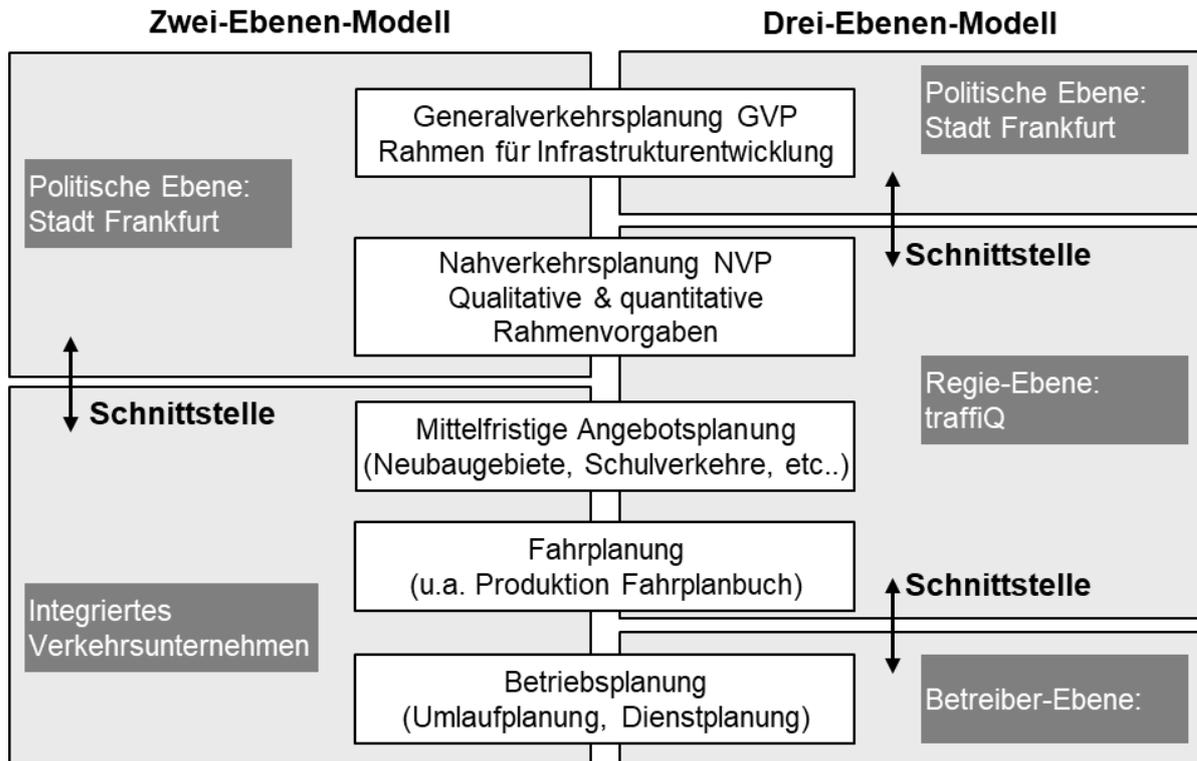


Abbildung 55: Vergleich vom Zwei-Ebenen- und Drei-Ebenen-Modell, eigene Darstellung i. A. a. [Wagner 2009, S. 22]

In einem weiteren Ansatz von Bracher et al. wird postuliert, dass mindestnotwendige Regie- und Bestellfunktionen sowie reine Betriebsfunktionen existieren, die vom Aufgabenträger bzw. vom Verkehrsunternehmen ausgeführt werden müssen. Beispielsweise ist die Beschreibung des Angebots und die Vergabe an ein ÖPNV-Unternehmen dem Aufgabenträger vorbehalten. Auf der anderen Seite ist das Verkehrsunternehmen für den Fahrbetrieb verantwortlich. Aufgaben wie bspw. die Planung und Umsetzung der Infrastruktur, die Netzplanung oder die Fahrplangestaltung können sowohl der einen als auch der anderen Organisation zugeordnet werden und sind abhängig davon, welche Leistungen der Aufgabenträger bei der öffentlichen Vergabe einfordert. [Bracher et al. 2004, S. 86; West 2007, S. 65]

Die Ausführungen der Literatur zeigen, dass die Angebotsplanung des ÖPNV nicht eindeutig dem Aufgabenträger, der Nahverkehrsgesellschaft oder dem Verkehrsunternehmen zuzuordnen sind [West 2007, S. 4f.]. Grundsätzlich ist der Autor der Meinung, dass die Entscheidung über das Planungsergebnis einer Angebotsplanung beim Aufgabenträger liegt, da dieser das ÖPNV-Angebot finanziert. Jedoch bedarf es für die Entscheidung Detailinformationen, bspw. zu den Fahrplänen, weshalb die Unterstützung des Verkehrsunternehmen essenziell ist. Deshalb ist die Angebotsplanung eine gemeinsame Aufgabe für Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen und bedarf der Zusammenarbeit.

A.6 Zielgrößen der Angebotsplanung für automatisierte Busse

Ergänzend zur Tabelle 30 in Abschnitt 5.3.5 zeigt Abbildung 56 eine Gesamtübersicht der verschiedenen Zielgrößen, nach denen sich in den fünf Schritten der Angebotsplanung ausgerichtet wird.

Qualitätsziele der Angebotsplanung
<p>Betriebswirtschaftlich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kosten für Haltestellen (Anzahl und Ausgestaltung) ↓ • Kosten der Fahrzeuge (Anzahl, Art der Fahrzeuge) ↓ • Kosten des Betriebs der Fahrzeuge (Fahrplankilometer, Fahrplanstunden, Fahrzeuglaufzeiten, Leerfahrten, Energieverbrauch/Treibstoffverbrauch) ↓ • Weitere feste und variable Linienkosten (u.a. Leitstelle und Instandhaltung) ↓ • Kosten Personal (Anzahl, Qualifikation, Flexibilität) ↓ • Einsatzfähigkeit von automatisierten Bussen ↑ • Infrastrukturkosten je Straße (Bewertungsverfahren) ↓ • Fahrgeldeinnahmen ↑ • Treibhausgasemissionen ↓
<p>Zuverlässigkeit der Betriebsabwicklung / Fahrplanstabilität</p> <ul style="list-style-type: none"> • Störanfällige / verspätungsanfällige Streckenabschnitte ↓ • Verspätungen, Störungen (Pufferzeiten o. Fahrzeitverlängerungen) ↓ • Anschlusssicherheit (Wartezeiten) ↑ • Wiederholbarkeit betrieblicher Abläufe ↑
<p>Verbesserung des Angebots für Fahrgäste</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erschließungsqualität (Anteil der Einwohner im Einzugsgebiet einer Haltestelle, Mittlere Zugangsweite zur Haltestelle) ↑ • Mittlere Reisezeit (Fahrzeit, Wartezeit, Zugangs-/Abgangszeit) ↓ • Mittlere Umsteigehäufigkeit ↓ • Fahrgastkomfort (Fahrtenhäufigkeit, Sitzplatzverfügbarkeit, Stehdauer, Stehfläche) ↑ • Sicherheit ↑ • Merkbarkeit des Fahrplans (Konstante Fahrzeitvorgaben) ↑ • Umsteigewege (Anordnung Ausstiegs- und Einstiegsorte) ↓
<p>Betriebliche, technische und gesetzliche Randbedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energiemanagement beachten (elektrisch angetriebene Fahrzeuge, energetisch optimiertes Fahrprofil) • Haltestellenbereich groß genug für zwei Fahrzeuge wählen • Betriebliche Reserven einplanen • Geeigneter Verkehrsmittel zu Transportvorgängen zuordnen (ausreichende Kapazität also Sitz- und Stehplätze) • Länge der Umläufe an Tank- oder Ladevorgänge anpassen, bzw. berücksichtigen. • Kapazität von Betriebspunkten und Betriebshöfen bzgl. Abstellplätze berücksichtigen. • Geeignetes Personal zu den Umläufen zuordnen (allgemeine, fahrzeugbezogene Fachkenntnisse und Streckenkenntnisse) • Geeignete Arbeitsumgebung schaffen (arbeitsmedizinische Zielkriterien, soziale Einflussgrößen) • Gesetzliche Rahmenbedingungen einhalten

Abbildung 56: Gesamtheitliche Übersicht der Zielgrößen der Angebotsplanung, eigene Darstellung i. A. a. Abschnitt 5.3

A.7 Beschreibung der begleitenden Prozesse der Verkehrsplanung

Im Folgenden werden die begleitenden Prozesse der Verkehrsplanung ergänzend zu den Ausführungen in Abschnitt 5.6 dargestellt.

Information, Öffentlichkeitsarbeit, Beteiligung und Kooperation:

Bei einem formellen Planungsverfahren setzen sich die Stakeholder aus Projektträger (öffentlich oder private Verantwortliche), Planungsträger (bspw. Kommunen), Träger öffentlicher Belange, vom Vorhaben betroffene Personen oder Interessensgruppen sowie die gesamten Bürgerschaft zusammen [Beckmann 2021, S. 456]. Weiterhin zählen u. a. politische Gremien, Kreise und Landesämter, Verbände (u. a. ADFC), interne Fachbehörden, externe Beratungsunternehmen, Gebietskörperschaften oder private Unternehmen zu den Stakeholdern [FGSV 2018a, S. 40]. Aufgrund dieser Heterogenität, erfolgt die Information und Öffentlichkeitsarbeit über alle Phasen des Verkehrsplanungsprozesses und bildet die Grundlage, damit sich Stakeholder beteiligen und kooperieren [FGSV 2018a, S. 39–41; Federal Highway Administration und Federal Transit Administration 2018, S. 5]. Dies ist keine Garantie, jedoch eine Voraussetzung, um die Akzeptanz für die spätere Umsetzung zu erhöhen [FGSV 2018a, S. 39]. Nicht jeder Stakeholder benötigt die gleichen Informationen und wird auf die gleiche Art und Weise eingebunden [FGSV 2018a, S. 39–42]. Deshalb ist es wichtig, die Zielgruppen festzulegen und eine geeignete Prozessorganisation zu entwickeln [FGSV 2018a, S. 39–42].

Um die Zielgruppen zu clustern, werden die Stakeholder unabhängig von der Entscheidungs- und Fachebene in drei verschiedene Ebenen (institutionelle Ebene, organisierte Ebene sowie Allgemeinheit) eingeteilt (siehe Abbildung 57). Die institutionelle Ebene besteht aus Planungsbehörden, entscheidungslegitimierte politische Gremien, der kommunalen Verwaltung (Fachverwaltung, Stadt-/Gemeinderäte) sowie Verkehrsverbänden und -betrieben. Zur organisierten Ebene werden Gruppen mit unterschiedlichen Interessen (bspw. Verkehrsverbände, Umweltverbände, Wirtschaftsverbände oder Bürgerinitiativen) zugeordnet. Bürgerinnen und Bürger, Beschäftigte, Pendler und weitere Interessensgruppen zählen zur Allgemeinheit. Bei dieser Ebene werden auch sozial benachteiligte Gruppen (u. a. Ältere, Kinder, Migranten, Menschen mit Behinderungen) eingebunden. [FGSV 2018a, S. 40; Beckmann 2021, S. 456f.; Schäfer 2024, S. 6–10]

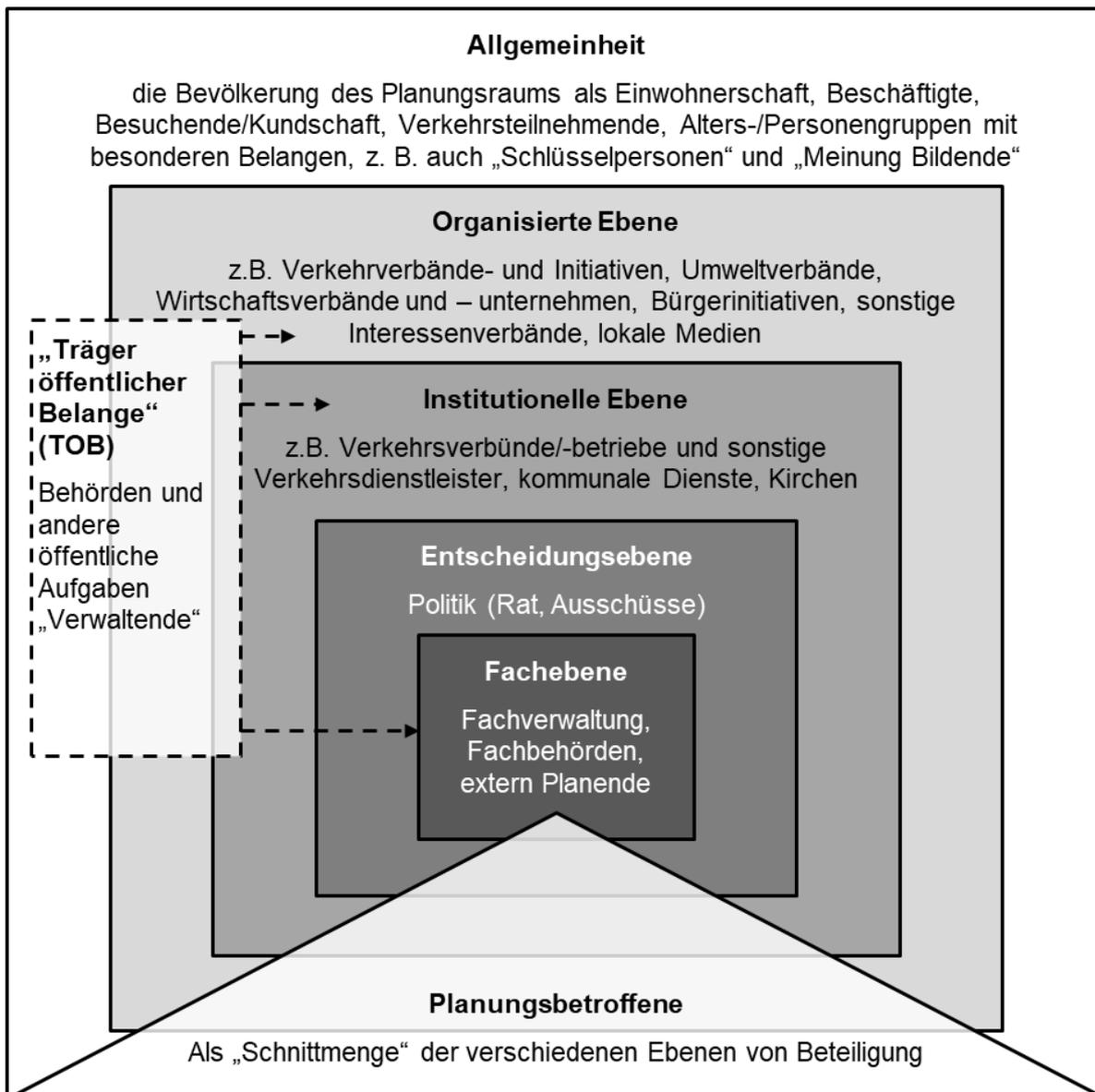


Abbildung 57: Beteiligungsebenen im Verkehrsplanungsprozess, eigene Darstellung i. A. a. [Schäfer 2024, S. 7; FGSV 2013, S. 28]

Im Sinne der integrierten Verkehrsplanung werden mit dem Informations- und Beteiligungsprozess Einschätzungen, Meinungen, Ideen und fachliche Expertise einbezogen, damit geeignete Handlungsansätze entwickelt werden können [Beckmann 2021, S. 457f.; Guidemaps-Konsortium 2004, S. 10]. Aus diesem Grund sind Beteiligungsprozesse entscheidend für den Erfolg eines Verkehrsplanungsprojekts und dienen dazu, Zustimmung und Akzeptanz bei allen Stakeholdern zu erzeugen [Beckmann 2021, S. 457–460; FGSV 2018a, S. 40]. Um die unterschiedlichen Stakeholder einzubinden, wird ein Prozessmanagement eingesetzt, welches u. a. folgende Aufgaben besitzt:

- Ziele, Wirkungen und Betroffene definieren
- Zeit- und Ressourcenmanagement überwachen
- Organisationsstrukturen (Prozessorganisation) und Zuständigkeiten festlegen
- Geeignete Beteiligungsverfahren für jede Projektphase bestimmen
- Kontinuierliche Evaluation der Beteiligung einsetzen [Beckmann 2021, S. 458]

Mithilfe eines Prozessmanagements wird demnach für die unterschiedlichen Stakeholder und Arten der Beteiligung (Information, Beteiligung, Kooperation) eine Prozessorganisation aufgebaut [Beckmann 2021, S. 457–460; FGSV 2018a, S. 40]. Beispiele hierfür sind Arbeitskreise oder „Runde Tische“ mit unterschiedlichen Interessengruppen und Verbänden [Beckmann 2021, S. 458].

Bei einem Verkehrsplanungsprojekt ist zu beachten, dass in der frühen Projektphase große Entscheidungsspielräume existieren, Beteiligte und Betroffene jedoch häufig nicht die Chance wahrnehmen, sich zu beteiligen [Beckmann 2021, S. 459f.]. Dies ändert sich in der späteren Projektphase (bspw. der Umsetzung). Betroffene werden während der Umsetzung teilweise eingeschränkt und fordern eine Beteiligung ein [Beckmann 2021, S. 459f.]. Im Rahmen der Umsetzung ist der Entscheidungsspielraum in Bezug auf die vorhandenen Alternativen jedoch äußerst begrenzt [Beckmann 2021, S. 459f.]. Aus diesem Grund werden während des Verkehrsplanungsprozesses unterschiedliche Stakeholder differenziert eingebunden [FGSV 2018a, S. 40].

Monitoring, Evaluation und Qualitätsmanagement:

Im Rahmen des Monitorings werden kontinuierlich zu festgelegten Zeitpunkten und mit den gleichen Methoden der Zustand und die Entwicklung des Verkehrsplanungsprozesses beobachtet. Beispiele hierfür sind Anzahl der Unfallopfer, Kennzahlen zur Verkehrsnachfrage oder verursachte Emissionen. Das Monitoring bildet damit die Datengrundlage für die folgende Evaluation. In dieser werden die Informationen systematisch analysiert und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufgezeigt. Des Weiteren werden Maßnahmen abgeleitet, um den Verkehrsplanungsprozess anzupassen und die festgelegten Ziele zu erreichen. Somit wird die Evaluation in ex-ante (vor der Maßnahmenumsetzung) und ex-post (nach der Maßnahmenumsetzung) unterschieden. Um die Effizienz und Effektivität des Verkehrsplanungsprozesses zu beurteilen und zu verbessern, wird dieser durch ein Qualitätsmanagement kontinuierlich überwacht. Das Qualitätsmanagement umfasst u. a. die Zielerreichung, den Arbeits- und Zeitplan sowie Verantwortlichkeiten. Diese drei Elemente (Monitoring, Evaluation und Qualitätsmanagement) werden in unterschiedlichen Phasen des Verkehrsplanungsprozesses verwendet. Das Monitoring wird in der Orientierungsphase und zur Problemanalyse eingesetzt. Zum Abschluss der Orientierungsphase, in der Problemanalyse und vor allem in der Maßnahmenuntersuchung sind die Evaluation und das Qualitätsmanagement zentrale Instrumente. Während der Umsetzung wird wiederum das Monitoring eingesetzt, um die tatsächliche Zielerreichung zu überprüfen. [FGSV 2018a, S. 43–45]

A.8 Übersicht der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien

Auf Basis der Experteninterviews wurden 53 Kriterien identifiziert, die einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse besitzen. In Tabelle 62 werden die Kriterien, die zur Bewertung der Eignung einer Straße im Rahmen der Nutzwertanalyse verwendet werden, aufgelistet [Beckmann et al. 2025, S. 21–28]. Dabei wird jedes Kriterium beschrieben, eingeordnet und die Wirkungsrichtung dargestellt. Zusätzlich wird die Gewichtung ausgewiesen.

Tabelle 62: Übersicht des Kriterienkatalogs der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 21–28]

Kriterium	Beschreibung
<p style="text-align: center;">Fahrbahnbreite</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Breite der Fahrbahn in Meter. • Für elf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Große Fahrbahnbreite wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,84 %.
<p style="text-align: center;">Steigung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Steigung der Fahrbahn. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (kann Ausschlusskriterium sein). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / geringe Steigung wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,74 %.
<p style="text-align: center;">Unterführungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Höhe einer Unterführung. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (kann Ausschlusskriterium sein). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine Unterführung / Unterführungen mit großer Höhe wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,54 %.

Kriterium	Beschreibung
Durchgängigkeit der Straße	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der Durchgängigkeit einer Straße. • Für neun Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte und indirekte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine hohe Durchgängigkeit (keine Sackgasse) wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,96 %.
Fahrradweg	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein eines Radweges. • Für elf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Ein vorhandener Fahrradweg wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,05 %.
Fußweg	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein eines Fußwegs. • Für neun Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Ein vorhandener Fußweg wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,66 %.
ÖPNV-Haltestellen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von ÖPNV-Haltestellen. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Indirekte positive Wirkung (bezieht sich auf den Betrieb, nicht auf die Automatisierung). • Wirkungsrichtung: Vorhandene ÖPNV-Haltestellen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,15 %.

Kriterium	Beschreibung
<p>Fahrbahnmarkierung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Fahrbahnmarkierungen. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Das Vorhandensein von Fahrbahnmarkierungen wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,33 %.
<p>Anzahl Fahrspuren</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Fahrspuren. • Für elf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Wenige / eine Fahrspur je Richtung wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,86 %.
<p>Fahrbahnoberfläche</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der Fahrbahnoberfläche. • Für neun Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine ebene Fahrbahnoberfläche wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,66 %.
<p>Straßenbahnschienen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Straßenbahnschienen auf der Fahrbahn. • Für zehn Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte und indirekte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine Straßenbahnschienen auf der Straße wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,47 %.

Kriterium	Beschreibung
Kurven	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Kurven in einer Straße. • Für neun Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige einfache (in Bezug auf Radius und Einsehbarkeit) Kurven wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,47 %.
Anlieferbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Anlieferbereiche. • Für fünf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Viele Anlieferbereiche wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses (besseres ausweichen möglich). • Gewichtung: 1,27 %.
Kreuzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Kreuzungen. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Kreuzungen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,74 %.
Lichtsignalanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Lichtsignalanlagen. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Lichtsignalanlagen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses (war nicht eindeutig). • Gewichtung: 2,84 %.

Kriterium	Beschreibung
Kreisverkehre	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Kreisverkehre. • Für zehn Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Kreisverkehre wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,05 %.
T-Kreuzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der T-Kreuzungen. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige T-Kreuzungen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,35 %.
Fußgängerüberwege	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Fußgängerüberwege. • Für elf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Fußgängerüberwege wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,15 %.
Straßenbevorrechtigung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der Straßenbevorrechtigung. • Für elf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine vorrangige Straßenordnung (Vorfahrtsstraße) wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,25 %.

Kriterium	Beschreibung
Kreuzende Eisenbahnübergänge	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl von kreuzenden Eisenbahnübergängen. • Für acht Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Indirekte negative Wirkung (bezogen auf die Genehmigung vom Eisenbahnunternehmen). • Wirkungsrichtung: keine / wenige kreuzende Eisenbahnübergänge wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,96 %.
Verkehrsaufkommen (Menge)	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl Pkw pro Stunde. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Ein niedriges Verkehrsaufkommen wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,74 %.
Verkehrsaufkommen (Diversität)	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der verschiedenen Verkehrsmittel. • Für vier Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine geringe Diversität (weniger Lkw und Busse) wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,98 %.
Parkende Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von parkenden Fahrzeugen. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine parkenden Fahrzeuge auf oder neben der Straße wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,52 %.

Kriterium	Beschreibung
Statische Hindernisse	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von statischen Hindernissen. • Für zehn Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine statischen Hindernisse auf der Straße wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,15 %.
Fußgängerzone	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein einer Fußgängerzone • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / kleiner Anteil der Fußgängerzone wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,25 %.
Parallele Buslinien	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein parallele Buslinien. • Für vier Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Indirekte negative Wirkung (bezieht sich auf den Betrieb, nicht auf die Automatisierung). • Wirkungsrichtung: Keine parallele Buslinie wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,68 %.
Verkehrsschilder kreuzende Tiere	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein Verkehrsschilder kreuzende Tiere. • Für sieben Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine Verkehrsschilder mit kreuzenden Tieren wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,59 %.

Kriterium	Beschreibung
Verkehrsschilder Splitt, Schotter	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein Verkehrsschilder mit Hinweis auf Splitt, Schotter. • Für drei Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine Verkehrsschilder mit Hinweis auf Splitt und Schotter wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,29 %.
Parkverbote	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Parkverboten. • Für sechs Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Ein vorhandenes Parkverbot wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,57 %.
Halteverbote	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Halteverboten. • Für sechs Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Ein vorhandenes Halteverbot wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,98 %.
Höchstgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Höhe der Geschwindigkeitsbeschränkung. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine geringe Geschwindigkeitsbeschränkung wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,42 %.

Kriterium	Beschreibung
Einbahnstraße	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein einer Einbahnstraße. • Für acht Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Das Vorhandensein einer Einbahnstraße wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,47 %.
Bereiche mit viel Personenverkehr	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art und Anzahl der Bereiche mit viel Personenverkehr (Schulen, Kirchen, Bahnhöfe). • Für einen Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Bereiche mit viel Personenverkehr wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,29 %.
Mobilfunkverbindung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der empfangbaren mobilen Datenverbindung. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (ggf. auch Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine schnelle mobile Datenverbindung wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,82 %.
Satellitenanzahl	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Satelliten. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (Ausschlusskriterium) • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine höhere Anzahl von Satelliten wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,42 %.

Kriterium	Beschreibung
Vegetation / Häuser	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf Häuser entlang der Straße. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Häuser beidseitig oder einseitig entlang der Straße wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,54 %.
Baustellen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein und die Art von Baustellen. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (ggf. auch Ausschlusskriterium, z. B. bei Vollsperrung). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Baustellen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,33 %.
Rettungsdienststellen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Rettungsdienststellen in der näheren Umgebung. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Rettungsdienststellen in der näheren Umgebung wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,74 %.
Vegetation / Bäume	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf (überhängende) Bäume entlang der Strecke. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Bäume entlang der Strecke wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,84 %.

Kriterium	Beschreibung
Straßenbeleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Straßenbeleuchtung. • Für acht Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte positive Wirkung. • Wirkungsrichtung: Vorhandene Straßenbeleuchtung wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,17 %.
Flüsse / Gräben / Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf das Vorhandensein von Gewässern entlang der Straße. • Für drei Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / abgesperrte Gewässer entlang der Straße wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,39 %.
Anzahl Unfälle	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Unfälle in einer Straße in der Vergangenheit. • Für sieben Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Unfälle in der Vergangenheit wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,08 %.
Raumordnung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der Raumordnung (öffentlich oder privat) einer Straße. • Für neun Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Indirekte positive Wirkung (bezogen auf die Zulassung). • Wirkungsrichtung: Ein privates Gebiet wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,96 %.

Kriterium	Beschreibung
Denkmalschutzgebiet	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art des Denkmalschutzgebiets in einer Straße. • Für einen Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium • Wirkung: Indirekte negative Wirkung (bezogen auf die Genehmigung von Infrastrukturmaßnahmen). • Wirkungsrichtung: Eine Straße ohne Denkmalschutz wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,20 %.
Gewichtsbeschränkung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Höhe der Gewichtsbeschränkung. • Für acht Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium. • Wirkung: Indirekte negative Wirkung (aber auch positive Wirkung möglich). • Wirkungsrichtung: Keine / hohe Gewichtsbeschränkung wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,66 %.
Regen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Tage mit starkem Regen. • Für zwölf Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Tage mit starkem Regen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,54 %.
Temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Höhe der Temperatur. • Für acht Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium (Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Mittlere Temperaturen (nicht zu heiß und nicht zu kalt) wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,08 %.

Kriterium	Beschreibung
Wind	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Tage mit starkem Wind. • Für sieben Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Soll-Kriterium (Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Tage mit starkem Wind wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 1,08 %.
Nebel	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Tage mit Nebel. • Für 13 Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige mit Nebel wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 3,03 %.
Schnee	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Tage mit Schnee. • Für zehn Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Muss-Kriterium (Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige Tage mit Schnee wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 2,35 %.
Staub	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Tage mit hohem Staubvorkommen. • Für einen Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium (Ausschlusskriterium). • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine / wenige mit hohem Staubvorkommen wirken positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,20 %.

Kriterium	Beschreibung
Verschmutzte Fahrbahn	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der Fahrbahnverschmutzung. • Für einen Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Eine saubere Fahrbahn wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,10 %.
Tiefstehende Sonne	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung: Dieses Kriterium bezieht sich auf die Art der tiefstehenden Sonne. • Für einen Experten hat dieses Kriterium einen Einfluss auf den Einsatz automatisierter Busse. • Einordnung: Kann-Kriterium. • Wirkung: Direkte negative Wirkung. • Wirkungsrichtung: Keine tiefstehende Sonne wirkt positiv auf den Einsatz eines automatisierten Busses. • Gewichtung: 0,20 %.

Weiterhin zeigt Tabelle 63 die Gewichtung der Kriterien des Experteninterviews als Rangfolge [Beckmann et al. 2025, S. 11f.].

Tabelle 63: Gewichtung der Kriterien auf der Grundlage von Experteninterviews, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 11f.]

Nr.	Kriterium	Gewichtung
1	Mobilfunkverbindung	3,82 %
2	Parkende Fahrzeuge	3,52 %
3	Höchstgeschwindigkeit	3,42 %
4	Satellitenanzahl	3,42 %
5	Fahrbahnmarkierung	3,33 %
6	Baustellen	3,33 %
7	Nebel	3,03 %
8	Fahrbahnbreite	2,84 %
9	Lichtsignalanlagen	2,84 %
10	Vegetation / Bäume	2,84 %
11	Steigung	2,74 %
12	Kreuzungen	2,74 %
13	Verkehrsaufkommen (Menge)	2,74 %
14	Rettungsdienststellen	2,74 %
15	Unterführungen	2,54 %
16	Vegetation / LiDAR	2,54 %
17	Regen	2,54 %
18	T-Kreuzungen	2,35 %
19	Schnee	2,35 %
20	Straßenbevorrechtigung	2,25 %
21	Fußgängerzone	2,25 %

Nr.	Kriterium	Gewichtung
22	ÖPNV-Haltestellen	2,15 %
23	Fußgängerüberwege	2,15 %
24	Statische Hindernisse	2,15 %
25	Fahrradweg	2,05 %
26	Kreisverkehre	2,05 %
27	Durchgängigkeit der Straße	1,96 %
28	Kreuzende Eisenbahnübergänge	1,96 %
29	Raumordnung	1,96 %
30	Anzahl Fahrspuren	1,86 %
31	Fußweg	1,66 %
32	Fahrbahnoberfläche	1,66 %
33	Gewichtsbeschränkung	1,66 %
34	Parkverbote	1,57 %
35	Straßenbahnschienen	1,47 %
36	Kurven	1,47 %
37	Einbahnstraße	1,47 %
38	Anlieferbereiche	1,27 %
39	Straßenbeleuchtung	1,17 %
40	Anzahl Unfälle	1,08 %
41	Temperatur	1,08 %
42	Wind	1,08 %
43	Verkehrsaufkommen (Diversität)	0,98 %
44	Halteverbote	0,98 %
45	Parallele Buslinien	0,68 %
46	Verkehrsschilder kreuzende Tiere	0,59 %
47	Flüsse / Gräben / Gewässer	0,39 %
48	Verkehrsschilder Splitt, Schotter	0,29 %
49	Bereiche mit viel Personenverkehr	0,29 %
50	Denkmalschutz	0,20 %
51	Staub	0,20 %
52	Tiefstehende Sonne	0,20 %
53	Verschmutzte Fahrbahn	0,10 %

A.9 Skalierung der Kriterien

In Tabelle 64 wird die Skalierung der Kriterien auf einer umgekehrten Schulnotenskala von „null“ bis „sechs“ dargestellt. Die Wirkungsrichtung der Kriterien orientiert sich dabei am Ergebnis der Experteninterviews (siehe Anhang A.8). Im Falle von Kriterien, die aus zwei Merkmalen bestehen (bspw. Vorhandensein der Unterführung und Art der Unterführung), wird der Mittelwert dieser beiden Merkmale zur Bestimmung des Teilnutzens gebildet. Die Ausprägungen ergeben sich aus den in Tabelle 64 aufgeführten Literaturangaben und Annahmen auf Basis der eigener Projekterfahrung.

Tabelle 64: Skalierung der Kriterien

Kriterium	Skala
Fahrbahnbreite (zweispurig) [Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011]	6: ≥ 8 m 5: ≥ 7 m 4: ≥ 6 m 3: ≥ 5 m 2: ≥ 4 m 1: < 4 m 0: Keine Bewertung
Steigung [Trefz 2016]	6: ≤ 1 % 5: ≤ 5 % 4: ≤ 10 % 3: ≤ 15 % 2: ≤ 20 % 1: ≤ 25 % 0: > 25 %
Unterführungen [ADAC e.V. 2023c]	In Bezug zur Höhe: 6: Gar keine 5: $\geq 4,40$ m 4: ≥ 4 m 3: ≥ 3 m 2: ≥ 2 m 1: < 2 m 0: Keine Bewertung Art der Unterführungen: 6: Brücke 5: Tunnel bis 50 m 4: Tunnel bis 100 m 3: Tunnel bis 500 m 2: Tunnel bis 1 000 m 1: Tunnel über 1 000 m 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Durchgängigkeit der Straße	6: Durchgängige Straße 5: Keine Bewertung 4: Keine Bewertung 3: Sackgasse mit Wendemöglichkeit 2: Keine Bewertung 1: Keine Bewertung 0: Sackgasse ohne Wendemöglichkeit
Fahrradweg	6: Beidseitiger Radweg 5: Teilweise beidseitiger Radweg, gesamt Einseitig 4: Einseitiger Radweg 3: Teilweise beidseitig und nicht einseitiger Radweg 2: Teilweise einseitiger Radweg 1: Kein Radweg 0: Keine Bewertung
Fußweg	6: Beidseitiger Fußweg 5: Teilweise beidseitiger Fußweg, gesamt Einseitig 4: Einseitiger Fußweg 3: Teilweise beidseitig und nicht einseitiger Fußweg 2: Teilweise einseitiger Fußweg 1: Kein Fußgängerweg 0: Keine Bewertung
ÖPNV-Haltestellen [ISUP Ingenieurbüro für Systemberatung und Planung GmbH 2016, S. 45]	6: Haltestelle je Richtung in einem Abstand bis zu 300 m 5: Eine Haltestelle je Richtung in einem Abstand bis zu 500 m 4: Haltestellen in einer Richtung im Abstand von bis zu 300 m, oder eine Haltestelle je Richtung mit einem Abstand über 500 m 3: Haltestellen in einer Richtung in Abstand von bis zu 500 m 2: Haltestellen in einer Richtung im Abstand über 500 m 1: Keine Haltestelle vorhanden 0: Keine Bewertung
Fahrbahnmarkierung	6: Seitenstreifen und Mittelstreifen / Bordsteine 5: Teilweise Mittelstreifen und komplett Seitenstreifen / Bordsteine 4: Nur Mittelstreifen oder nur Seitenstreifen / Bordsteine 3: Teilweise Mittelstreifen und teilweise Seitenstreifen / Bordsteine 2: Teilweise Mittelstreifen oder teilweise Seitenstreifen / Bordsteine 1: Keine Markierungen 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Anzahl Fahrspuren [Prigge und von Steuber 2021]	6: Eine Fahrspur pro Richtung 5: Eine Fahrspur pro Richtung, nur beim Abbiegen zwei Fahrspuren pro Richtung 4: Zwei Fahrspuren pro Richtung 3: Drei Fahrspuren pro Richtung 2: 4 Fahrspuren pro Richtung 1: > vier Fahrspuren pro Richtung 0: Keine Bewertung
Fahrbahnoberfläche [ADFC Landesverband Hamburg e.V. 2019]	6: Asphalt 5: Verbundsteine, dreckiger Asphalt 4: Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand 3: Kopfsteinpflaster 2: Grant, Schotter 1: Gras 0: Keine Bewertung
Straßenbahnschienen	6: Keine Straßenbahnschienen vorhanden 5: ≤ 20 % der Straße mit Straßenbahnschienen 4: ≤ 40 % der Straße mit Straßenbahnschienen 3: ≤ 60 % der Straße mit Straßenbahnschienen 2: ≤ 80 % der Straße mit Straßenbahnschienen 1: ≤ 100 % der Straße mit Straßenbahnschienen 0: Keine Bewertung
Kurven	6: Null Kurven 5: Eine Kurve 4: Zwei Kurven 3: Drei Kurven 2: Vier Kurven 1: \geq fünf Kurven 0: Keine Bewertung
Anlieferbereiche	6: < einen Anlieferbereich pro 100 m 5: < einen Anlieferbereich pro 250 m 4: < einen Anlieferbereich pro 500 m 3: < einen Anlieferbereich pro 750 m 2: \geq einen Anlieferbereich pro 750 m 1: Keine Anlieferbereiche 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Kreuzungen [Soteropoulos et al. 2020, S. 71–77]	<p>In Bezug zur Anzahl:</p> <p>6: Keine Kreuzung 5: Ein bis zwei Kreuzungen 4: Drei bis vier Kreuzungen 3: Fünf bis sechs Kreuzungen 2: < zehn Kreuzungen 1: >= zehn Kreuzungen 0: Keine Bewertung</p> <p>In Bezug zur Art:</p> <p>6: Geregelter Kreuzungen 5: Keine Bewertung 4: Keine Bewertung 3: Keine Bewertung 2: Keine Bewertung 1: Ungeregelte Kreuzungen 0: Keine Bewertung</p>
Lichtsignalanlagen [Soteropoulos et al. 2020, S. 71–77]	<p>6: Keine Lichtsignalanlage 5: Ein bis zwei Lichtsignalanlagen 4: Drei bis vier Lichtsignalanlagen 3: Fünf bis sechs Lichtsignalanlagen 2: < zehn Lichtsignalanlagen 1: >= zehn Lichtsignalanlagen 0: Keine Bewertung</p>
Kreisverkehre [Soteropoulos et al. 2020, S. 71–77]	<p>6: Kein Kreisverkehr 5: Ein bis zwei Kreisverkehre 4: Drei bis vier Kreisverkehre 3: Fünf bis sechs Kreisverkehre 2: < zehn Kreisverkehre 1: >= zehn Kreisverkehre 0: Keine Bewertung</p>

Kriterium	Skala
T-Kreuzungen [Soteropoulos et al. 2020, S. 71–77]	<p>In Bezug zur Anzahl: 6: Keine T-Kreuzung 5: Ein bis zwei T-Kreuzungen 4: Drei bis vier T-Kreuzungen 3: Fünf bis sechs T-Kreuzungen 2: < zehn T-Kreuzungen 1: >= zehn T-Kreuzungen 0: Keine Bewertung</p> <p>In Bezug zur Art: 6: Geregelter T-Kreuzungen 5: Keine Bewertung 4: Keine Bewertung 3: Keine Bewertung 2: Keine Bewertung 1: Ungeregelter T-Kreuzungen 0: Keine Bewertung</p>
Fußgängerüberwege [Soteropoulos et al. 2020, S. 71–77]	6: Kein Fußgängerüberweg 5: Ein bis zwei Fußgängerüberwege 4: Drei bis vier Fußgängerüberwege 3: Fünf bis sechs Fußgängerüberwege 2: < zehn Fußgängerüberwege 1: >= zehn Fußgängerüberwege 0: Keine Bewertung
Straßenbevorrechtigung	6: Vorfahrtsstraße 5: Vorfahrtsstraße und Vorfahrt gewähren 4: Vorfahrt gewährende Straße 3: Vorfahrtsstraße und Gleichberechtigt und ggf. Vorfahrt gewähren 2: Vorfahrt gewähren und Gleichberechtigt 1: Gleichberechtigt 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Kreuzende Eisenbahnübergänge [Effer 2025]	<p>In Bezug zur Anzahl</p> <p>6: Kein kreuzender Eisenbahnübergang</p> <p>5: Ein bis zwei kreuzende Eisenbahnübergänge</p> <p>4: Drei bis vier kreuzende Eisenbahnübergänge</p> <p>3: Fünf bis sechs kreuzende Eisenbahnübergänge</p> <p>2: < zehn kreuzende Eisenbahnübergänge</p> <p>1: >= zehn kreuzende Eisenbahnübergänge</p> <p>0: Keine Bewertung</p> <p>In Bezug zur Art der kreuzenden Eisenbahnübergänge:</p> <p>6: Mit Technischer Sicherung</p> <p>5: Keine Bewertung</p> <p>4: Keine Bewertung</p> <p>3: Keine Bewertung</p> <p>2: Keine Bewertung</p> <p>1: Ohne technische Sicherung (unbeschränkt)</p> <p>0: Keine Bewertung</p>
Verkehrsaufkommen (Menge) [Stadt Berlin Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen 2019]	<p>6: <= 100 Fahrzeuge pro Tag</p> <p>5: <= 3 000 Fahrzeuge pro Tag</p> <p>4: <= 10 000 Fahrzeuge pro Tag</p> <p>3: <= 40 000 Fahrzeuge pro Tag</p> <p>2: <= 80 000 Fahrzeuge pro Tag</p> <p>1: > 80 000 Fahrzeuge pro Tag</p> <p>0: Keine Bewertung</p>
Verkehrsaufkommen (Diversität) [123fahrschule Holding GmbH 2020]	<p>6: Pkw und Motorrad</p> <p>5: Pkw, Lkw</p> <p>4: Pkw, Lkw, Sonderverkehr (Landwirtschaft, Pferdekutschen)</p> <p>3: Pkw, Lkw, Fußverkehr</p> <p>2: Pkw, Lkw, Fußverkehr, Radverkehr</p> <p>1: Pkw, Lkw, Sonderverkehr (Landwirtschaft, Pferdekutschen), Radverkehr, Fußverkehr</p> <p>0: Keine Bewertung</p>
Parkende Fahrzeuge	<p>6: Keine parkenden Fahrzeuge</p> <p>5: Parkende Fahrzeuge in Parkbuchten</p> <p>4: Teilweise einseitig parkende Fahrzeuge</p> <p>3: Einseitig parkende Fahrzeuge</p> <p>2: Teilweise beidseitig parkende Fahrzeuge</p> <p>1: Beidseitig parkende Fahrzeuge</p> <p>0: Keine Bewertung</p>

Kriterium	Skala
Statische Hindernisse	6: Keine statischen Hindernisse 5: Ein bis zwei statischen Hindernisse 4: Drei bis vier statischen Hindernisse 3: Fünf bis sechs statischen Hindernisse 2: < zehn statischen Hindernisse 1: >= zehn statischen Hindernisse 0: Keine Bewertung
Fußgängerzone	6: Fußgängerzone nicht vorhanden 5: Fußgängerzone zu <= 20 % in der Straße vorhanden 4: Fußgängerzone zu <= 40 % in der Straße vorhanden 3: Fußgängerzone zu <= 60 % in der Straße vorhanden 2: Fußgängerzone zu <= 80 % in der Straße vorhanden 1: Fußgängerzone zu <= 100 % in der Straße vorhanden 0: Keine Bewertung
Parallele Buslinien	6: Keine parallele Buslinie 5: Parallele Buslinien auf <= 20 % der Straße 4: Parallele Buslinien auf <= 40 % der Straße 3: Parallele Buslinien auf <= 60 % der Straße 2: Parallele Buslinien auf <= 80 % der Straße 1: Parallele Buslinien auf <= 100 % der Straße 0: Keine Bewertung
Verkehrsschilder kreuzende Tiere	6: Keine Verkehrsschilder 5: Verkehrsschilder mit kreuzenden Tieren gelten für <= 20 % der Straße 4: Verkehrsschilder mit kreuzenden Tieren gelten für <= 40 % der Straße 3: Verkehrsschilder mit kreuzenden Tieren gelten für <= 60 % der Straße 2: Verkehrsschilder mit kreuzenden Tieren gelten für <= 80 % der Straße 1: Verkehrsschilder mit kreuzenden Tieren gelten für <= 100 % der Straße 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Verkehrsschilder Splitt, Schotter	6: Keine Verkehrsschilder 5: Verkehrsschilder mit Splitt und Schotter gelten für $\leq 20\%$ der Straße 4: Verkehrsschilder mit Splitt und Schotter gelten für $\leq 40\%$ der Straße 3: Verkehrsschilder mit Splitt und Schotter gelten für $\leq 60\%$ der Straße 2: Verkehrsschilder mit Splitt und Schotter gelten für $\leq 80\%$ der Straße 1: Verkehrsschilder mit Splitt und Schotter gelten für $\leq 100\%$ der Straße 0: Keine Bewertung
Parkverbote	6: Beidseitiges Parkverbot 5: Teilweise beidseitiges und gesamt einseitiges Parkverbot 4: Einseitiges Parkverbot 3: Teilweise beidseitiges und kein einseitiges Parkverbot 2: Teilweise einseitiges Parkverbot 1: Kein Parkverbot 0: Keine Bewertung
Halteverbote	6: Beidseitiges Halteverbot 5: Teilweise beidseitiges und gesamt einseitiges Halteverbot 4: Einseitiges Halteverbot 3: Teilweise beidseitiges und kein einseitig Halteverbot 2: Teilweise einseitiges Halteverbot 1: Kein Halteverbot 0: Keine Bewertung
Höchstgeschwindigkeit	6: Verkehrsberuhigter Bereich 5: ≤ 30 km/h 4: ≤ 50 km/h 3: ≤ 70 km/h 2: ≤ 100 km/h 1: > 100 km/h 0: Keine Bewertung
Einbahnstraße	6: Komplette Einbahnstraße 5: Einbahnstraße, aber nicht für Fahrräder 4: Keine Bewertung 3: Keine Bewertung 2: Keine Bewertung 1: Keine Einbahnstraße 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Bereiche mit viel Personenverkehr	6: Keine Bereiche mit viel Personenverkehr 5: Ein Bereich mit viel Personenverkehr 4: Zwei Bereiche mit viel Personenverkehr 3: Drei Bereiche mit viel Personenverkehr 2: Vier Bereiche mit viel Personenverkehr 1: > vier Bereiche mit viel Personenverkehr 0: Keine Bewertung
Mobilfunkverbindung [mobilezone GmbH 2025]	6: 5G DSS 5: 5G 4: 4G 3: 3G 2: 2G 1: 1G 0: Kein Mobilfunknetz
Satellitenanzahl [Holst 2022, S. 171]	6: Neun Satelliten 5: Sieben bis acht Satelliten 4: Fünf bis sechs Satelliten 3: Drei bis vier Satelliten 2: Zwei Satelliten 1: Ein Satellit 0: Kein Satellit
Vegetation / Häuser	6: (Häuser beidseitig und einseitig) – Straße vollständig bebaut $\leq 100\%$ 5: (Häuser beidseitig und einseitig) – Straße zu $\leq 80\%$ bebaut 4: (Häuser beidseitig und einseitig) – Straße zu $\leq 60\%$ bebaut 3: (Häuser beidseitig und einseitig) – Straße zu $\leq 40\%$ bebaut 2: (Häuser beidseitig und einseitig) – Straße zu $\leq 20\%$ bebaut 1: Keine Häuser vorhanden 0: Keine Bewertung
Baustellen	6: Keine Baustelle 5: Eine Baustelle einseitig, aber keine Vollsperrung 4: Mehrere Baustellen einseitig, aber keine Vollsperrung 3: Eine Fahrbahn komplett gesperrt 2: Jeweils eine Baustelle auf jeder Fahrspur, aber keine Vollsperrung 1: Mehrere Baustellen (> 2) beidseitig, aber keine Vollsperrung 0: Vollsperrung (beide Fahrbahnen komplett gesperrt)

Kriterium	Skala
Rettungsdienststellen	6: Keine Nähe zu Rettungsdiensten 5: Nebenstraßen nahe Rettungsdienst (1 bis 2 Straßen weiter) 4: Hauptstraßen nahe Rettungsdienst (1 bis 2 Straßen weiter) 3: Straße in der der Rettungsdienst ist 2: Straße in der der Rettungsdienst ist, Nebenstraße nahe weiteren Rettungsdienst 1: Straße in der der Rettungsdienst ist, Hauptstraße nahe weiteren Rettungsdienst 0: Keine Bewertung
Vegetation / Bäume	6: Keine Bäume entlang der Straße → null Bäume 5: Einzelne überhängende Bäume entlang der Straße → ein bis fünf Bäume 4: Wenige überhängende Bäume entlang der Straße → <= zehn Bäume 3: Teilweise überhängende Bäume entlang der Straße → <= 20 Bäume 2: Viele überhängende Bäume entlang der Straße → <= 30 Bäume 1: Sehr viele überhängende Bäume entlang der Straße → > 30 Bäume 0: Keine Bewertung
Straßenbeleuchtung	6: Laternen zu <= 100 % in der Straße vorhanden 5: Laternen zu <= 80 % in der Straße vorhanden 4: Laternen zu <= 60 % in der Straße vorhanden 3: Laternen zu <= 40 % in der Straße vorhanden 2: Laternen zu <= 20 % in der Straße vorhanden 1: Laternen nicht vorhanden (0 %) 0: Keine Bewertung
Flüsse / Gräben / Gewässer	6: Kein Gewässer 5: Ein Gewässer nur an einer kurzen Stelle aber richtig abgesperrt 4: Mehrere Gewässer (entlang Großteil der Strecke) aber richtig abgesperrt 3: Ein oder mehrere Gewässer nur durch Bäume abgesperrt 2: Ein oder mehrere Gewässer ohne Absperrung (mindestens 10 m entfernt) 1: Ein oder mehrere Gewässer ohne Absperrung in direkter Nähe 0: Keine Bewertung

Kriterium	Skala
Anzahl Unfälle	6: Keine Unfälle pro Jahr 5: Ein Unfall pro Jahr 4: Zwei Unfälle pro Jahr 3: Drei Unfälle pro Jahr 2: Vier Unfälle pro Jahr 1: > fünf Unfälle pro Jahr 0: Keine Bewertung
Raumordnung	6: Straße ist zu \leq 100 % eine Privatstraße 5: Straße ist zu \leq 80 % eine Privatstraße 4: Straße ist zu \leq 60 % eine Privatstraße 3: Straße ist zu \leq 40 % eine Privatstraße 2: Straße ist zu \leq 20 % eine Privatstraße 1: Straße ist vollständig eine öffentliche Straße 0: Keine Bewertung
Denkmalschutzgebiet	6: Kein Denkmalschutz vorhanden (0 %) 5: \leq 20 % der Straße unter Denkmalschutz 4: \leq 40 % der Straße unter Denkmalschutz 3: \leq 60 % der Straße unter Denkmalschutz 2: \leq 80 % der Straße unter Denkmalschutz 1: \leq 100 % der Straße unter Denkmalschutz 0: Keine Bewertung
Gewichtsbeschränkung [Kilinc 2025]	6: \geq 40 t 5: \geq 18 t 4: \geq 12 t 3: \geq 7,5 t 2: \geq 3,5 t 1: < 3,5 t 0: Keine Bewertung
Regen [International Organization for Standardization 2023, S. 16f.]	6: \geq 90 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h) 5: \geq 80 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h) 4: \geq 70 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h) 3: \geq 60 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h) 2: \geq 50 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h) 1: \geq 40 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h) 0: < 40 % kein Regen (Regen geringer als 7,6 mm/h)
Temperatur [Hebermehl und Baumann 2022]	6: \geq 90 % über 3 °C und unter 25 °C 5: \geq 80 % über 3 °C und unter 25 °C 4: \geq 70 % über 3 °C und unter 25 °C 3: \geq 60 % über 3 °C und unter 25 °C 2: \geq 50 % über 3 °C und unter 25 °C 1: \geq 40 % über 3 °C und unter 25 °C 0: < 40 % über 3 °C und unter 25 °C

Kriterium	Skala
Wind [International Organization for Standardization 2023, S. 15f.]	<p>6: ≥ 90 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p> <p>5: ≥ 80 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p> <p>4: ≥ 70 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p> <p>3: ≥ 60 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p> <p>2: ≥ 50 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p> <p>1: ≥ 40 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p> <p>0: < 40 % kein starker Wind (Windstärke liegt unter 8,0 m/s, bzw. ungefähr 29 km/h)</p>
Nebel [International Organization for Standardization 2023, S. 22]	<p>6: ≥ 90 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p> <p>5: ≥ 80 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p> <p>4: ≥ 70 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p> <p>3: ≥ 60 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p> <p>2: ≥ 50 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p> <p>1: ≥ 40 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p> <p>0: < 40 % der Tage kein Nebel (keine nähere Definition für Nebel)</p>

Kriterium	Skala
Schnee [International Organization for Standardization 2023, S. 16f.]	<p>6: ≥ 90 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p> <p>5: ≥ 80 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p> <p>4: ≥ 70 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls es diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p> <p>3: ≥ 60 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p> <p>2: ≥ 50 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p> <p>1: ≥ 40 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p> <p>0: < 40 % kein Schnee (Schneefall kleiner als 7,6 mm/h, Sichtbarkeit geringer als 0,5 km, falls diese Daten nicht erhoben werden können, wird die Anzahl der Schneetage verwendet)</p>
Staub [International Organization for Standardization 2023, S. 17]	<p>6: ≥ 90 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p> <p>5: ≥ 80 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p> <p>4: ≥ 70 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p> <p>3: ≥ 60 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p> <p>2: ≥ 50 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p> <p>1: ≥ 40 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p> <p>0: < 40 % der Tage kein Staub (keine nähere Definition für Staub)</p>

Kriterium	Skala
Verschmutzte Fahrbahn	6: Keine Verschmutzte Fahrbahn 5: Fahrbahn \leq 20 % verschmutzt 4: Fahrbahn \leq 40 % verschmutzt 3: Fahrbahn \leq 60 % verschmutzt 2: Fahrbahn \leq 80 % verschmutzt 1: Fahrbahn \leq 100 % verschmutzt 0: Keine Bewertung
Tiefstehende Sonne [International Organization for Standardization 2023, S. 17f.]	6: Keine tiefstehende Sonne 5: Tiefstehende Sonne \leq 1 h 4: Tiefstehende Sonne \leq 2 h 3: Tiefstehende Sonne \leq 3 h 2: Tiefstehende Sonne \leq 4 h 1: Tiefstehende Sonne $>$ 4 h 0: Keine Bewertung

A.10 Übersicht der verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Maßnahmen

In der folgenden Tabelle 65 sind die möglichen verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Maßnahmen je Kriterium aufgelistet [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–71; Beckmann et al. 2020, S. 8–12; Holst 2022, S. 147–161; Bundesanstalt für Straßenwesen 2021, S. 63–71; Völzow et al. 2018, S. 3f.].

Tabelle 65: Übersicht der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen für den Einsatz automatisierter Busse, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 69–71; Beckmann et al. 2020, S. 8–12; Holst 2022, S. 147–161; Bundesanstalt für Straßenwesen 2021, S. 63–71; Völzow et al. 2018, S. 3f.]

Kriterium	Maßnahmen
Fahrbahnbreite	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrbahn verbreitern • Parkverbote / Halteverbote aufstellen • Zur Einbahnstraße umwidmen
Steigung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, da die Steigung nicht verändert werden kann
Unterführungen	<ul style="list-style-type: none"> • Brückenneubau / Brückenanpassung
Durchgängigkeit der Straße	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Fahrradweg	<ul style="list-style-type: none"> • Bau / Erweiterung eines Radwegs • Installation eines Pop-Up-Radwegs
Fußweg	<ul style="list-style-type: none"> • Bau / Erweiterung eines Fußwegs
ÖPNV-Haltestellen	<ul style="list-style-type: none"> • Bau von ÖPNV-Haltestellen
Fahrbahnmarkierung	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelstreifen auftragen • Seitenstreifen auftragen • Bordsteine / Gehweg bauen • Hochgenaue Digitale Karten
Anzahl Fahrspuren	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Implementierung von Kameras zur Detektion
Fahrbahnoberfläche	<ul style="list-style-type: none"> • (Teil-)Asphaltierung der Straße
Straßenbahnschienen	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Kurven	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Anlieferbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Nothaltebuchten einrichten • Schild mit Hinweis der Entfernung zur nächsten Haltebucht
Kreuzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Installation von Vorfahrtsregelungen • Implementierung einer Lichtsignalanlage
Lichtsignalanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Kreisverkehre	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs

Kriterium	Maßnahmen
T-Kreuzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Installation von Vorfahrtsregelungen • Implementierung einer Lichtsignalanlage
Fußgängerüberwege	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Straßenbevorrechtigung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, außer Regelung der Kreuzung und T-Kreuzung
Kreuzende Eisenbahnübergänge	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung einer technischen Sicherungsanlage (Schranke oder Lichtsignalanlage)
Verkehrsaufkommen (Menge)	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, da sonst eine andere Straße mehr Verkehr hätte
Verkehrsaufkommen (Diversität)	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, da sonst eine andere Straße mehr Verkehr hätte
Parkende Fahrzeuge / Parkverbote / Halteverbote	<ul style="list-style-type: none"> • Parkverbote aufstellen • Halteverbote aufstellen • Bestehende Halte- bzw. Parkverbote anpassen • Verkehrskontrollmaßnahmen erhöhen • Dialog mit Anwohner*innen führen
Statische Hindernisse	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs
Fußgängerzone	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Parallele ÖPNV-Linie	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Verkehrsschilder kreuzende Tiere	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Leitplanken an den Straßenseiten • Wildfangzäune
Verkehrsschilder Splitt, Schotter	<ul style="list-style-type: none"> • (Teil-)Asphaltierung der Straße
Höchstgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Geschwindigkeitsbegrenzungen einrichten oder bestehende Begrenzungen anpassen • Temposchwellen errichten • Räumzeiten der Lichtsignalanlage anpassen
Einbahnstraße	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich, da nicht jede Straße zur Einbahnstraße umgewidmet werden kann.
Mobilfunkverbindung	<ul style="list-style-type: none"> • 5G Sendemast aufstellen
Satellitenanzahl	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Vegetation / LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisierungspaneel aufstellen
Baustellen	<ul style="list-style-type: none"> • Schilder mit dem Hinweis einer Baustelle • Kontrolle der Baustellenhinweise (Leitkegel oder Baken) • Implementierung von RSUs
Rettungsdienststellen	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich

Kriterium	Maßnahmen
Vegetation / Bäume	<ul style="list-style-type: none"> • Bäume verschneiden
Nachtbeleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> • Straßenbeleuchtung aufstellen
Flüsse / Gräben / Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> • Absperrung zum Gewässer errichten
Anzahl Unfälle	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von RSUs • Installation von Vorfahrtsregelungen • Implementierung einer Lichtsignalanlage
Raumordnung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Maßnahme möglich
Denkmalschutz	<ul style="list-style-type: none"> • Ausnahmegenehmigung einholen
Gewichtsbeschränkung	<ul style="list-style-type: none"> • Ausnahmegenehmigung einholen

Aufbauend auf der vorherigen Tabelle 65 zeigt Tabelle 66 die Kosten und gesellschaftlichen Konsequenzen je Maßnahme. In der Tabelle sind die jeweiligen Quellenangaben hinterlegt.

Tabelle 66: Kosten und gesellschaftliche Konsequenzen der infrastrukturellen und verkehrsorganisatorischen Maßnahmen

Maßnahmen	Kosten	Gesellschaftliche Konsequenzen
(Teil-)Asphaltierung der Straße / Fahrbahn verbreitern	160 Euro pro m ² [BMVI 2015b]	
Parkverbote / Halteverbote aufstellen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139; SolVoNet GmbH 2024]	Ja
Zur Einbahnstraße umwidmen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139; SolVoNet GmbH 2024]	Ja
Brückenneubau / Brücken Anpassung	7 100 Euro pro m ² Brückenfläche [Regierungspräsidien Baden-Württemberg 2014; Regierungspräsidien Baden-Württemberg 2019]	
Bau / Erweiterung eines Radwegs	200 Euro pro m [Jacobs 2016]	
Installation eines Pop-Up-Radwegs	11 Euro pro m [Jacobs 2016]	
Bau / Erweiterung eines Fußwegs	140 Euro pro m [EHL AG 2021]	
Bau von ÖPNV-Haltestellen	40 000 Euro [Lück 2023]	
Mittelstreifen auftragen	15 Euro pro Meter [Bohmeyer & Schuster GmbH 2024]	

Maßnahmen	Kosten	Gesellschaftliche Konsequenzen
Seitenstreifen auftragen	15 Euro pro Meter [Bohmeyer & Schuster GmbH 2024]	
Bordsteine / Gehweg bauen	140 Euro pro m [EHL AG 2021]	
Hochgenaue Digitale Karten erstellen	4 855,18 Euro [Reddit Netherlands B.V. 2021]	
Implementierung von RSUs	9 829 Euro Investitionskosten und 9 280 Euro jährliche Kosten [Beckmann und Zadek 2022, S. 140]	
Implementierung von Kameras zur Detektion	5 355 Euro Investitionskosten und 9 280 Euro jährliche Kosten [Beckmann und Zadek 2022, S. 140; VTIS GmbH 2025]	
Nothaltebuchten einrichten (15 m lang)	160 Euro pro m [BMVI 2015b]	
Schild mit Hinweis, zur Entfernung zur nächsten Haltebucht	465 Euro pro Haltebucht [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	
Installation von Vorfahrtsregelungen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	
Implementierung einer Lichtsignalanlage	100 000 Euro pro LSA) [Deutscher Bundestag 2016, S. 6]	
Implementierung einer technischen Sicherungsanlage (Schranke oder Lichtsignalanlage)	350 000 Euro [Wester 2008, S. 37]	
Parkverbote aufstellen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	Ja
Halteverbote aufstellen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	Ja
Bestehende Halte- bzw. Parkverbote anpassen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	Ja

Maßnahmen	Kosten	Gesellschaftliche Konsequenzen
Verkehrskontrollmaßnahmen erhöhen	Keine direkt nachweisbaren Kosten	Ja
Dialog mit Anwohner*innen führen	Keine direkt nachweisbaren Kosten	
Leitplanken an den Straßenseiten	150 Euro pro m [TMS Pro Shop GmbH 2025]	
Wildfangzäune	2,47 Euro pro m [Aquagart Trading GmbH 2025]	
Neue Geschwindigkeitsbegrenzungen einrichten oder bestehende Begrenzungen anpassen Kosten	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	Ja
Temposchwellen errichten	130 Euro pro Temposchwelle [STEIN HGS GmbH 2022]	Ja
Räumzeiten der Lichtsignalanlage anpassen	10 875 Euro pro Lichtsignalanlage [Beckmann und Zadek 2022, S. 137]	
5G Sendemast aufstellen	170.000 Euro) bei 10 bis 15 km Reichweite [Sawall 2018]	
Lokalisierungsplan aufstellen	620 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	
Schilder mit dem Hinweis einer Baustelle aufstellen	465 Euro pro Schild [Beckmann und Zadek 2022, S. 139]	
Kontrolle der Baustellenhinweise	600 Euro für ein Jahr [Air-Bavarian GmbH 2025]	
Bäume verschneiden	50 Euro pro Baum [Beckmann und Zadek 2022, S. 138f.]	
Straßenbeleuchtung aufstellen	4 000 Euro [Steinbach 2013]	
Absperrung zum Gewässer errichten	150 Euro pro m [TMS Pro Shop GmbH 2025]	
Ausnahmegenehmigung für Denkmalschutz einholen	keine Kosten [Landeshauptstadt Hannover 2025]	

Maßnahmen	Kosten	Gesellschaftliche Konsequenzen
Ausnahmegenehmigung für Gewichtsbeschränkung einholen	767 Euro pro Jahr [Saale 2025]	Ja.

Weiterhin wird in den Berechnungen folgendes berücksichtigt:

- Zinssatz: 3 % [gpaNRW 2023]
- Nutzungsdauer 5G-Sendemast: 12 Jahre [Bundesministerium der Finanzen 2025a]
- Wartungs- und Reparaturkosten: 2 % [Gerd Kommer GmbH 2021]
- Nutzungsdauer Fahrbahnoberfläche für Straßen, Fuß- und Radwege: 25 bis 30 Jahre [Schneider 2025]
- Instandhaltungskosten Fahrbahnoberfläche für Straßen, Fuß- und Radwege: 1,30 Euro pro m² [FGSV 2004, S. 8–14]
- Nutzungsdauer Brücken: 33 Jahre [Bundesministerium der Finanzen 2025c]
- Nutzungsdauer Lichtsignalanlage: 18 Jahre [Niedersächsisches Vorschrifteninformationssystem 2023, S. 9]
- Nutzungsdauer RSU und Kamerasysteme: 8 Jahre [Bundesministerium der Finanzen 2025c]
- Nutzungsdauer Fahrbahnmarkierung: 5 Jahre [HP-Fahrbahnmarkierung Göttsch e.K. 2025]
- Nutzungsdauer Straßenbeleuchtung: 19 Jahre [Haufe-Lexware GmbH & Co. KG 2025]
- Nutzungsdauer Zaun / Absperrung: 17 Jahre [Bock 2025]
- Nutzungsdauer ÖPNV-Haltestellen: 25 Jahre [Bundesministerium der Finanzen 2025b]
- Nutzungsdauer technische Ausstattung des Bahnübergangs: 20 Jahre [Bundesministerium der Finanzen 2025b]

A.11 Ergebnis der Verkehrszählung in Köthen

Die Abbildung 58 zeigt das Verkehrsaufkommen als Ergebnis einer Verkehrszählung in der Stadt Köthen. Dabei wird ein Ausschnitt der Stadt Köthen visualisiert.

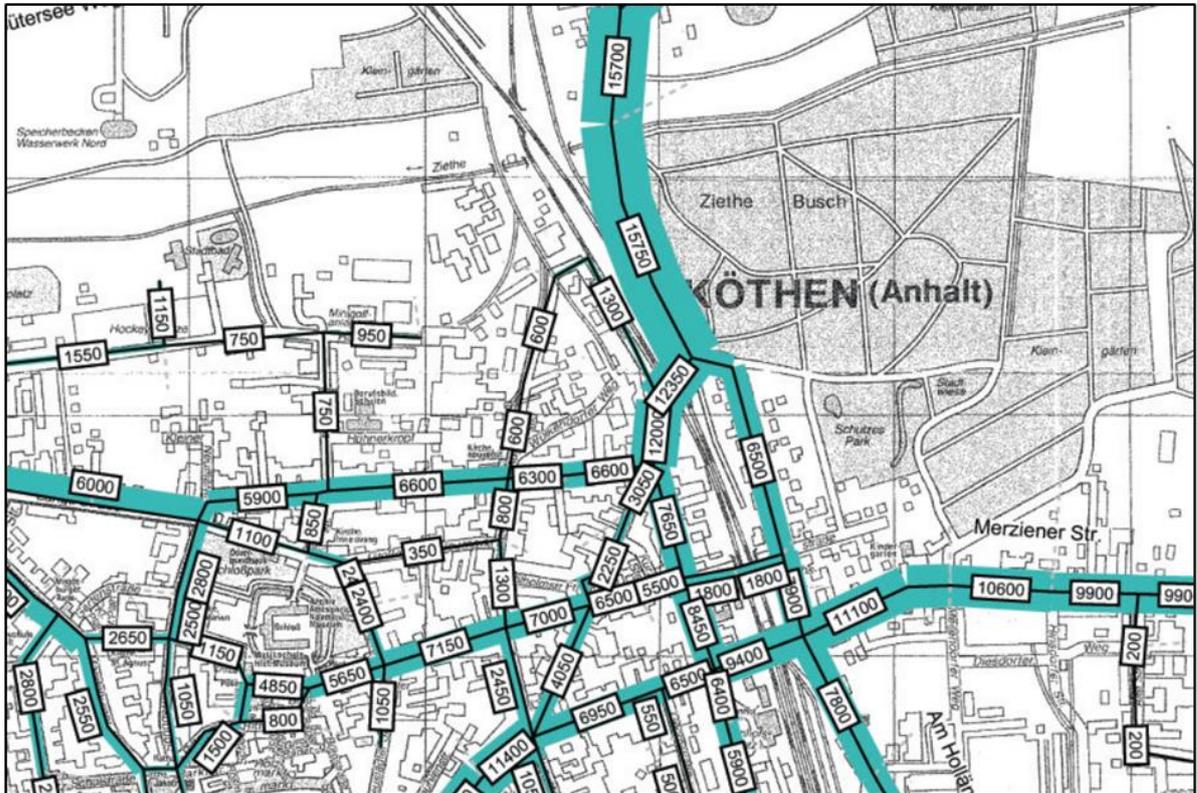


Abbildung 58: Ergebnis der Verkehrszählung der Stadt Köthen (Kartenausschnitt) [Stadt Köthen 2011]

A.12 Datenerhebung am Beispiel der Stadt Köthen

Am Beispiel der Stadt Köthen konnten die verkehrsorganisatorischen und infrastrukturellen Kriterien mithilfe der in Tabelle 67 dargestellten Quellen erhoben werden.

Tabelle 67: Kriterien und Datenquellen für die Fallstudie zur Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 13f.]

Kriterium	Quellen
Fahrbahnbreite	Stadt Köthen, OpenStreetMap, Google Maps, Vorort-Besichtigung
Steigung	Google Maps
Unterführungen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Durchgängigkeit der Straße	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Fahrradweg	Stadt Köthen, OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Fußweg	Stadt Köthen, OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
ÖPNV-Haltestellen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung, www.insa.de , www.mein-bus.net/ (Internetseiten der lokalen Verkehrsunternehmen)
Fahrbahnmarkierung	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Anzahl Fahrspuren	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Fahrbahnoberfläche	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Straßenbahnschienen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung, www.insa.de , www.mein-bus.net (Internetseiten der lokalen Verkehrsunternehmen)
Kurven	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Anlieferbereiche	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Kreuzungen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Lichtsignalanlagen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Kreisverkehre	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
T-Kreuzungen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Fußgängerüberwege	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung

Kriterium	Quellen
Straßenbevorrechtigung	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Kreuzende Eisenbahn- übergänge	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Verkehrsaufkommen (Menge)	Stadt Köthen, Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (Geodatenportal Sachsen-Anhalt), Google Maps,
Verkehrsaufkommen (Diversität)	Keine öffentlichen Quellen vorhanden (lokale Verkehrszählungen wären eine Möglichkeit)
Parkende Fahrzeuge	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Statische Hindernisse	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Fußgängerzone	Stadt Köthen, OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Parallele Buslinien	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung, www.insa.de , www.mein-bus.net/ (Internetseiten der lokalen Verkehrsunternehmen)
Verkehrsschilder kreuzende Tiere	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Verkehrsschilder Splitt, Schotter	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Parkverbote	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Halteverbote	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Höchstgeschwindigkeit	Stadt Köthen, OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Einbahnstraße	Stadt Köthen, OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Bereiche mit viel Personenverkehr	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps
Mobilfunkverbindung	BMDV Breitbandatlas
Satellitenanzahl	www.gnssplanning.com (aber nur auf Stadtebene)
Vegetation / Häuser	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Baustellen	Stadt Köthen, Landkreis Anhalt-Bitterfeld, Landesstraßenbaubehörde, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Rettungsdienststellen	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps
Vegetation / Bäume	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Straßenbeleuchtung	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung

Kriterium	Quellen
Flüsse / Gräben / Gewässer	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Anzahl Unfälle	Keine öffentlichen Quellen vorhanden (lokale Verkehrszählungen wären eine Möglichkeit)
Raumordnung	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Denkmalschutzgebiet	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (Geodatenportal Sachsen-Anhalt),
Gewichtsbeschränkung	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps, Vorort-Besichtigung
Regen	German weather service, wetter.com, Climate-Data.org (aber nur auf Stadtebene)
Temperatur	German weather service, wetter.com, Climate-Data.org (aber nur auf Stadtebene)
Wind	German weather service, wetter.com, Climate-Data.org, www.meteoblue.com (aber nur auf Stadtebene)
Nebel	Keine öffentlichen Quellen vorhanden
Schnee	German weather service, wetter.com, Climate-Data.org, www.meteoblue.com (aber nur auf Stadtebene)
Staub	Keine öffentlichen Quellen vorhanden
Verschmutzte Fahrbahn	OpenStreetMap, Google Maps, Apple Maps (keine aktuellen Daten)
Tiefstehende Sonne	Keine öffentlichen Quellen vorhanden

In der folgenden Tabelle 68 wird die Datenqualität der Erhebung dargestellt. Die meisten Daten weisen eine hohe Datenqualität auf, sodass diese exakt über Google Maps, Apple Maps und OpenStreetMap erhoben werden konnten. Da die Fahrbahnbreite händisch über Google Maps gemessen wurde, können für dieses Kriterium Messungenauigkeiten auftreten. Deshalb wird die Datenqualität als „Mittel“ eingestuft. Informationen zu den Baustellen werden über die Internetseite der Stadt Köthen veröffentlicht. Dabei kann die Aktualität der Daten nicht garantiert werden, weshalb die Datenqualität als „Mittel“ eingestuft wird.

Tabelle 68: Datenqualität der Kriterien für die Fallstudie zur Stadt Köthen

Kriterium	Datenqualität
Fahrbahnbreite	Mittel
Steigung	Hoch
Unterführungen	Hoch
Durchgängigkeit der Straße	Hoch
Fahrradweg	Hoch
Fußweg	Hoch
ÖPNV-Haltestellen	Hoch
Fahrbahnmarkierung	Hoch
Anzahl Fahrspuren	Hoch
Fahrbahnoberfläche	Hoch
Straßenbahnschienen	Hoch

Kriterium	Datenqualität
Kurven	Hoch
Anlieferbereiche	Hoch
Kreuzungen	Hoch
Lichtsignalanlagen	Hoch
Kreisverkehre	Hoch
T-Kreuzungen	Hoch
Fußgängerüberwege	Hoch
Straßenbevorrechtigung	Hoch
Kreuzende Eisenbahnübergänge	Hoch
Verkehrsaufkommen (Menge)	Hoch
Verkehrsaufkommen (Diversität)	Konnte nicht erhoben werden
Parkende Fahrzeuge	Hoch
Statische Hindernisse	Hoch
Fußgängerzone	Hoch
Parallele Buslinien	Hoch
Verkehrsschilder kreuzende Tiere	Hoch
Verkehrsschilder Splitt, Schotter	Hoch
Parkverbote	Hoch
Halteverbote	Hoch
Höchstgeschwindigkeit	Hoch
Einbahnstraße	Hoch
Bereiche mit viel Personenverkehr	Hoch
Mobilfunkverbindung	Hoch
Satellitenanzahl	Hoch
Vegetation / Häuser	Hoch
Baustellen	Mittel
Rettungsdienststellen	Hoch
Vegetation / Bäume	Hoch
Straßenbeleuchtung	Hoch
Flüsse / Gräben / Gewässer	Hoch
Anzahl Unfälle	Konnte nicht erhoben werden
Raumordnung	Hoch
Denkmalschutzgebiet	Hoch
Gewichtsbeschränkung	Hoch
Regen	Hoch
Temperatur	Hoch
Wind	Hoch
Nebel	Konnte nicht erhoben werden
Schnee	Hoch
Staub	Konnte nicht erhoben werden
Verschmutzte Fahrbahn	Konnte nicht erhoben werden
Tiefstehende Sonne	Konnte nicht erhoben werden

A.13 Neuer Kriterienkatalog inklusive Gewichtung

Die übergeordneten Kriterien zur Bewertung der Eignung des gesamten Untersuchungsbereichs der Stadt Köthen werden in Tabelle 69 dargestellt [Beckmann et al. 2025, S. 14f.].

Tabelle 69: Übergeordnete Kriterien, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 14f.]

Nr.	Kriterium	Gewichtung
1	Satellitenanzahl	32,71 %
2	Regen	24,30 %
3	Schnee	22,43 %
4	Temperatur	10,82 %
5	Wind	10,82 %

Legende: dunkelgrün = Einstimmige Kriterien (von allen 13 Experten genannt); grün = Muss-Kriterien (von ≥ 75 % der Experten genannt); orange = Soll-Kriterien (von ≥ 50 % der Experten genannt); gelb = Kann-Kriterien (von < 50 % der Experten genannt)

Die straßenbezogenen Kriterien, die für die Bewertung der Stadt Köthen verwendet werden, werden in Tabelle 70 dargestellt [Beckmann et al. 2025, S. 15].

Tabelle 70: Übersicht der Kriterien für die Nutzwertanalyse der Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 15]

Straßeninfrastruktur	Kreuzende Situationen	Objekte	Lokalisierung und Kommunikation	Stabilität und Genehmigung der ODD
Steigung	Kreuzungen	Parkende Fahrzeuge	Mobile Datenverbindung	Baustellen
Unterführungen	Lichtsignalanlagen	Fußgängerzone	Vegetation / Häuser	Rettungsdienststellen
Fahrbahnmarkierung	Kreisverkehre	Höchstgeschwindigkeit		Vegetation / Bäume
Fahrbahnbreite	T-Kreuzungen	Verkehrsaufkommen (Menge)		Straßenbeleuchtung
Fahrradweg	Fußgängerüberwege	Statische Hindernisse		Raumordnung
Anzahl Fahrspuren	Straßenbevorrechtigung	Verkehrsschilder kreuzende Tiere		Gewichtsbeschränkung
ÖPNV-Haltestellen	Kreuzende Eisenbahnübergänge	Einbahnstraße		Flüsse / Gräben / Gewässer
Straßenbahnschienen		Parkverbote		Denkmalschutzgebiet
Fußweg		Halteverbote		
Durchgängigkeit der Straße		Parallele Buslinien		
Fahrbahnoberfläche		Verkehrsschilder Splitt, Schotter		
Kurven		Bereiche mit viel Personverkehr		
Anlieferbereiche				
Legende: dunkelgrün = Einstimmige Kriterien (von allen 13 Experten genannt); grün = Muss-Kriterien (von >= 75 % der Experten genannt); orange = Soll-Kriterien (von >= 50 % der Experten genannt); gelb				

Tabelle 71 zeigt die angepasste Gewichtung für die 42 Kriterien, die im Rahmen der Nutzwertanalyse zur Bewertung der Stadt Köthen verwendet werden [Beckmann et al. 2025, S. 15f.].

Tabelle 71: Gewichtung der Kriterien für die Nutzwertanalyse der Stadt Köthen, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann et al. 2025, S. 15f.]

Nr.	Kriterium	Gewichtung
1	Mobilfunkverbindung	4,55 %
2	Parkende Fahrzeuge	4,20 %
3	Höchstgeschwindigkeit	4,08 %
4	Fahrbahnmarkierung	3,96 %
5	Baustellen	3,96 %
6	Fahrbahnbreite	3,38 %
7	Lichtsignalanlagen	3,38 %
8	Vegetation / Bäume	3,38 %
9	Steigung	3,26 %
10	Kreuzungen	3,26 %
11	Verkehrsaufkommen (Menge)	3,26 %
12	Rettungsdienststellen	3,26 %
13	Unterführungen	3,03 %
14	Vegetation / LiDAR	3,03 %
15	T-Kreuzungen	2,80 %
16	Straßenbevorrechtigung	2,68 %
17	Fußgängerzone	2,68 %
18	ÖPNV-Haltestellen	2,56 %
19	Fußgängerüberwege	2,56 %
20	Statische Hindernisse	2,56 %
21	Fahrradweg	2,45 %
22	Kreisverkehre	2,45 %
23	Durchgängigkeit der Straße	2,33 %
24	Kreuzende Eisenbahnübergänge	2,33 %
25	Raumordnung	2,33 %
26	Anzahl Fahrspuren	2,21 %
27	Fußweg	1,98 %
28	Fahrbahnoberfläche	1,98 %
29	Gewichtsbeschränkung	1,98 %
30	Parkverbote	1,86 %
31	Straßenbahnschienen	1,75 %
32	Kurven	1,75 %
33	Einbahnstraße	1,75 %
34	Anlieferbereiche	1,52 %
35	Straßenbeleuchtung	1,40 %
36	Halteverbote	1,17 %
37	Parallele Buslinien	0,82 %
38	Verkehrsschilder kreuzende Tiere	0,70 %
39	Flüsse / Gräben / Gewässer	0,47 %
40	Verkehrsschilder Splitt, Schotter	0,35 %
41	Bereiche mit viel Personenverkehr	0,35 %
42	Denkmalschutz	0,23 %

A.14 Ergebnisse Infrastrukturanalyse

Die Abbildungen 59, 60 und 61 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse.

Ortsteil	Straßenname	Anfangs- und Endpunkt	Startpunkt	Endpunkt
Köthen	Ackerstraße	Von Tischlerei Queitsch bis zur Fabrikstraße	51.751562893369346	51.749168479703954
Köthen	Adolf-Kolping-Straße	Von Anfang bis Parkplatz Ende	51.7443565411749	51.74489070952868
Köthen	Akazienstraße	Von Kreuzung Friedrichstraße bis Dessauer Straße	51.75498701714641	51.75807799448176
Köthen	Albertstraße	Von Wülknitzer Straße bis Ende	51.7412053376414	51.738309308921494
Köthen	Albrechtstraße	Von Ludwigstraße nach Leipziger Straße	51.749531883744154	51.74979137952765
Köthen	Alexanderstraße	Von Eduardstraße nach Brunnenstraße	51.74764572270364	51.74632570028983
Köthen	Alte Straße	Von Merziener Straße nach Schlachthofstraße	51.75429364717345	51.75169562848574
Köthen	Alte Straße	Von Schlachthofstraße bis Grenzstraße	51.75169562848574	51.75153429813179
Köthen	Alte Straße	Von Grenzstraße bis Im Winkel	51.75153429813179	51.75158331936933
Köthen	Am Dreiangel	Von Dessauer bis Augustenstraße	51.75736241216947	51.75919155517798
Köthen	Am Flugplatz	Von Zeppelin nach Zeppelin	51.733286505088195	51.731713875237624
Köthen	Am Galgenberg	Von Lohman nach Leipziger Straße	51.7462970214133	51.74623225502354
Köthen	Am Güterbahnhof	Von Maxi Gorki bis Kaiser Recycling	51.74564553343043	51.74246121242103
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	Von Friedrich-Ebert-Straße bis Quellendorfer	51.753637578097155	51.74640579640275
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	Von Quellendorfer bis Prosigker Kreisstraße	51.74640579640275	51.744272318377604
Köthen	Am Holländer Weg (Wohnstraße)	Vom Holländer Weg bis zu den Containern	51.75085746608272	51.74932552038932
Köthen	Am Obstmusterergarten	Von Mühlenbreite nach Lelitzer Straße	51.74931195157681	51.7506323345491
Köthen	Am Quellteich	Von Fasaneriealle nach Lelitzer Straße	51.75361521643872	51.75425147554573
Köthen	Am Sportzentrum	Von Anhaltische Straße	51.745770495473074	51.74546893149392
Köthen	Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	Von Lohmanstraße bis Ortsausgang	51.74637929167095	51.738517129452134

Abbildung 59: Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse

Straßenname	Steigung [%]	Höhe von Unterführungen	Zulässige Höchstgeschwindigkeit
Ackerstraße	0,86%	Gar keine Unterführung	30
Adolf-Kolping-Straße	1,11%	Gar keine Unterführung	30
Akazienstraße	1,00%	Gar keine Unterführung	50
Albertstraße	0,29%	Gar keine Unterführung	Verkehrsberuhigter Bereich
Albrechtstraße	0,83%	Gar keine Unterführung	30
Alexanderstraße	0,59%	Gar keine Unterführung	50
Alte Straße	0,23%	Gar keine Unterführung	50
Alte Straße	0,59%	Gar keine Unterführung	30
Alte Straße	0,40%	Gar keine Unterführung	30
Am Dreiangel	0,29%	Gar keine Unterführung	50
Am Flugplatz	0,29%	Gar keine Unterführung	50
Am Galgenberg	0,00%	Gar keine Unterführung	50
Am Güterbahnhof	0,29%	Gar keine Unterführung	30
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	0,78%	Gar keine Unterführung	50
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	1,30%	Gar keine Unterführung	50
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	1,11%	Gar keine Unterführung	50
Am Obstmusterergarten	0,00%	Gar keine Unterführung	30
Am Quellteich	0,00%	Gar keine Unterführung	Verkehrsberuhigter Bereich
Am Sportzentrum	0,00%	Gar keine Unterführung	30
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	0,11%	Gar keine Unterführung	50

Abbildung 60: Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse

Ortsteil	Straßenname	Fahrbahnoberfläche angepasst	max. Gewicht angepasst	Fahrbahnbreite angepasst [m]	Fahrbahnbreite effektiv [m]	
Köthen	Ackerstraße	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		4,8	
Köthen	Adolf-Kolping-Straße	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		4,4	
Köthen	Akazienstraße	Asphalt	>=40t		7,5	
Köthen	Albertstraße	Kopfsteinpflaster	>=40t		5,9	3,9
Köthen	Albrechtstraße	Asphalt	>=40t		6,6	4,6
Köthen	Alexanderstraße	Kopfsteinpflaster	>=40t		7,5	3,5
Köthen	Alte Straße	Asphalt	>=7,5t		6	
Köthen	Alte Straße	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		6	
Köthen	Alte Straße	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		6	
Köthen	Am Dreiangel	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		6	
Köthen	Am Flugplatz	Asphalt	>=40t		4,9	
Köthen	Am Galgenberg	Asphalt	>=40t		8,8	
Köthen	Am Güterbahnhof	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		5,6	
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	Asphalt	>=40t		7,5	
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	Asphalt	>=40t		7,5	
Köthen	Am Holländer Weg (Wohnstraße)	Kopfsteinpflaster	>=40t		5,3	
Köthen	Am Obstmusterergarten	Betonplatten, Asphalt schlechter Zustand	>=40t		3,8	
Köthen	Am Quellteich	Verbundsteine, dreckiger Asphalt	>=40t		5,8	
Köthen	Am Sportzentrum	Asphalt	>=40t		6	4
Köthen	Am Wasserturm (Hauptstraße, Inner)	Asphalt	>=40t		6,1	

Abbildung 61: Dritter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Infrastrukturanalyse

A.15 Ergebnis der SWOT-Analyse

Die Abbildungen 62 und 63 zeigen das Ergebnis der SWOT-Analyse.

Positiv	
Unternehmensanalyse	<p style="text-align: center;">Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Starkes ÖPNV-Angebot entlang der Hauptlinien • Starkes ÖPNV-Angebot in der Woche zwischen 4 Uhr und 23 Uhr. • Starkes ÖPNV-Angebot in der Innenstadt von Köthen (halbstündlicher Takt) • Die Vorgabe zu den Umsteigezeiten (3 bis 20 Minuten) wird eingehalten • Alle zentralen Orte in Köthen sind innerhalb 45 Minuten von jedem umliegenden Dorf erreichbar
Umfeldanalyse	<p style="text-align: center;">Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Steigendes Umweltbewusstsein in der deutschen Gesellschaft • Neue Antriebstechnologien (u.a. Elektroantrieb, Wasserstoff) • Digitalisierung (Fahrgastinformationen, Ticketing, automatisiertes Fahren) • Autos den Platz weg nehmen

Abbildung 62: Ergebnis der SWOT-Analyse am Beispiel der Stadt Köthen (Teil 1)

Negativ	
Unternehmensanalyse	<p style="text-align: center;">Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine feste Bedienung an Sonn- und Feiertagen • Keine Bedienung zwischen 23 Uhr und 4 Uhr • Einige Stadtteile in Köthen und das neue Gewerbegebiet sind nicht an das ÖPNV-Angebot angeschlossen • Erschließung von Elsdorf, Klein- und Großwülknitz, Gahrendorf, Hohsdorf und Zehringen kann verbessert werden • Nebenlinien bieten fast nur flexible Bedienung an • Es werden keine Fahrzeuge mit alternativen Antrieben eingesetzt.
Umfeldanalyse	<p style="text-align: center;">Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Demografischer Wandel und steigende Urbanisierung verringern die Nachfragen nach ÖPNV-Angeboten im ländlichen Raum • Finanzierbarkeit des ÖPNV-Angebots • Stromausfälle, Hackerangriffe • Home-Office • Widerstand der autofahrenden Bevölkerung

Abbildung 63: Ergebnis der SWOT-Analyse am Beispiel der Stadt Köthen (Teil 2)

A.16 Teilnutzen der Kriterien

Die Abbildungen 64, 65 und 66 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zum Teilnutzen der Kriterien.

Ortsteil	Straßenname	Fahrbahnoberfläche angepasst	max. Gewicht angepasst	Bewertung Fahrbahnbreite	Steigung [%]
Köthen	Ackerstraße	4	6	2	6
Köthen	Adolf-Kolping-Straße	4	6	2	5
Köthen	Akazienstraße	6	6	5	6
Köthen	Albertstraße	3	6	1	6
Köthen	Albrechtstraße	6	6	2	6
Köthen	Alexanderstraße	3	6	1	6
Köthen	Alte Straße	6	3	4	6
Köthen	Alte Straße	4	6	4	6
Köthen	Alte Straße	4	6	4	6
Köthen	Am Dreiangel	4	6	4	6
Köthen	Am Flugplatz	6	6	2	6
Köthen	Am Galgenberg	6	6	6	6
Köthen	Am Güterbahnhof	4	6	3	6
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	6	6	5	6
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	6	6	5	5
Köthen	Am Holländer Weg (Wohnstraße)	3	6	3	5
Köthen	Am Obstmustergarten	4	6	1	6
Köthen	Am Quellteich	5	6	3	6
Köthen	Am Sportzentrum	6	6	2	6
Köthen	Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	6	6	4	6
Köthen	Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverke	6	6	4	6
Köthen	Am Wasserwerk	6	6	2	6
Köthen	Am Wasserwerk	2	6	2	6
Köthen	Amselweg	6	6	2	6

Abbildung 64: Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Teilnutzen

Ortsteil	Straßenname	Straßenbevorrechtigung	T-Kreuzung Gesamt	Anzahl Fahrspuren	Parkverbote
Köthen	Ackerstraße	1	2	6	1
Köthen	Adolf-Kolping-Straße	1	3	6	1
Köthen	Akazienstraße	5	5	6	1
Köthen	Albertstraße	4	5	6	1
Köthen	Albrechtstraße	2	4	6	4
Köthen	Alexanderstraße	2	3	6	1
Köthen	Alte Straße	4	5	6	1
Köthen	Alte Straße	2	3	6	1
Köthen	Alte Straße	1	3	6	4
Köthen	Am Dreiangel	2	5	6	1
Köthen	Am Flugplatz	4	5	6	6
Köthen	Am Galgenberg	6	5	6	1
Köthen	Am Güterbahnhof	4	5	6	4
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	6	5	5	1
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	4	5	5	1
Köthen	Am Holländer Weg (Wohnstraße)	4	5	6	6
Köthen	Am Obstmustergarten	1	3	6	1
Köthen	Am Quellteich	4	5	6	1
Köthen	Am Sportzentrum	4	3	6	1
Köthen	Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	6	3	6	4
Köthen	Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverke	5	6	6	1
Köthen	Am Wasserwerk	2	4	6	1
Köthen	Am Wasserwerk	3	4	6	1
Köthen	Amselweg	4	5	6	1

Abbildung 65: Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Teilnutzen

Ortsteil	Straßenname	Fahrradwege	Fußgängerüberwege / Zebrastreifen	Fahrbahnmarkierungen / Mittelstreifen	Raumordnung (öffentlich, privat)
Köthen	Ackerstraße	1	6	1	1
Köthen	Adolf-Kolping-Straße	1	6	2	1
Köthen	Akazienstraße	1	6	6	1
Köthen	Albertstraße	1	6	1	1
Köthen	Albrechtstraße	1	6	4	1
Köthen	Alexanderstraße	1	6	4	1
Köthen	Alte Straße	1	6	1	1
Köthen	Alte Straße	1	6	1	1
Köthen	Alte Straße	1	6	1	1
Köthen	Am Dreiangel	1	6	2	1
Köthen	Am Flugplatz	1	6	2	1
Köthen	Am Galgenberg	1	6	6	1
Köthen	Am Güterbahnhof	1	6	2	1
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	1	6	6	1
Köthen	Am Holländer Weg (Bundesstraße)	1	6	6	1
Köthen	Am Holländer Weg (Wohnstraße)	1	6	4	1
Köthen	Am Obstmustergarten	1	6	4	1
Köthen	Am Quellteich	1	6	1	1
Köthen	Am Sportzentrum	1	6	4	1
Köthen	Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	4	6	6	1
Köthen	Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverke	4	6	6	1
Köthen	Am Wasserwerk	1	6	1	1
Köthen	Am Wasserwerk	1	6	1	1
Köthen	Amselweg	1	6	4	1

Abbildung 66: Dritter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Teilnutzen

A.17 Nutzwerte von EasyMile

In der Tabelle 72 werden die Nutzwerte des automatisierten Busses EZ10 Gen 3 von EasyMile dargestellt. Die Werte beruhen auf Angaben aus der Literatur und eigenen Projekterfahrungen.

Tabelle 72: Nutzwerte des EZ10 Gen 3 von EasyMile, eigene Darstellung i. A. a. [Beckmann und Zadek 2022, S. 53–93; Holst 2022, S. 147–199]

Kriterium	Nutzwerte des EZ10 Gen 3
Fahrbahnbreite	4
Steigung	3
Unterführungen	3
Durchgängigkeit der Straße	3
Fahrradweg	4
Fußweg	4
ÖPNV-Haltestellen	5
Fahrbahnmarkierung	4
Anzahl Fahrspuren	6
Fahrbahnoberfläche	3
Straßenbahnschienen	4
Kurven	6
Anlieferbereiche	1
Kreuzungen	6
Lichtsignalanlagen	6
Kreisverkehre	6
T-Kreuzungen	6
Fußgängerüberwege	6
Straßenbevorrechtigung	1
Kreuzende Eisenbahnübergänge	5
Verkehrsaufkommen (Menge)	1
Parkende Fahrzeuge	5
Statische Hindernisse	6
Fußgängerzone	1
Parallele Buslinien	4
Verkehrsschilder kreuzende Tiere	6
Verkehrsschilder Splitt, Schotter	6
Parkverbote	1
Halteverbote	1
Höchstgeschwindigkeit	5
Einbahnstraße	1
Bereiche mit viel Personenverkehr	1
Mobilfunkverbindung	4
Vegetation / Häuser	4
Baustellen	6
Rettungsdienststellen	6
Vegetation / Bäume	6

Kriterium	Nutzwerte des EZ10 Gen 3
Straßenbeleuchtung	6
Flüsse / Gräben / Gewässer	4
Raumordnung	1
Denkmalschutzgebiet	1
Gewichtsbeschränkung	2

A.18 Ergebnisse Nutzwertanalyse

Die Abbildungen 67 und 68 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zum Ergebnis der Nutzwertanalyse.

Straßenname	Nutzwert Experten	Nutzwert Gleichgewicht	Notwendiger Nutzwert EasyMile	Notwendiger Nutzwert EasyMile	Maximal möglicher Wert
Holzmarkt (Fußgängerzone)	5,04312354	4,88095238	4,13170163	3,9047619	6
Diesdorfer Weg	4,95221445	5	4,13170163	3,9047619	6
Dr.-Krause-Straße (nach gm)	4,95221445	4,95238095	4,13170163	3,9047619	6
Gartenstraße	4,95221445	4,83333333	4,13170163	3,9047619	6
Siebenbrunnenpromenade	4,94988345	4,97619048	4,13170163	3,9047619	6
Langenfelder Straße	4,94755245	4,97619048	4,13170163	3,9047619	6
Bärteichpromenade (von Durchbruch bis Teichgasse)	4,94055944	4,95238095	4,13170163	3,9047619	6
Magdeburger Straße (Landstraße, beginnt ab C...	4,93939394	4,88095238	4,13170163	3,9047619	6
Weintraubenstraße (ab Augustenstraße, an der...	4,93939394	4,97619048	4,13170163	3,9047619	6
Buttermarkt	4,93123543	4,78571429	4,13170163	3,9047619	6
An der Eisenbahn (Richtung Dr.-Krause-Straße)	4,91142191	4,80952381	4,13170163	3,9047619	6
Bernburger Straße (ab Lange Straße bis Magde...	4,9009324	4,85714286	4,13170163	3,9047619	6
Meilendorfer Weg	4,8986014	4,9047619	4,13170163	3,9047619	6
Dorfstraße (Porst)	4,87529138	4,76190476	4,13170163	3,9047619	6
Neustädter Platz oben	4,87179487	4,78571429	4,13170163	3,9047619	6
Großer Neumarkt	4,87062937	4,78571429	4,13170163	3,9047619	6
Jürgenweg	4,86946387	4,78571429	4,13170163	3,9047619	6
Schloßplatz (Lindenstraße bis Stiftstraße)	4,86946387	4,80952381	4,13170163	3,9047619	6
Schalaunische Straße (von Holzmarkt bis Kreis...	4,86713287	4,73809524	4,13170163	3,9047619	6
Köthener Straße (Dohndorf)	4,85547786	4,76190476	4,13170163	3,9047619	6
Augustenstraße (von Friedrichstraße bis Friedri...	4,84382284	4,92857143	4,13170163	3,9047619	6
Siebenbrunnenpromenade	4,84032634	4,9047619	4,13170163	3,9047619	6
Bahnhofplatz (Zufahrt zu Bahnhofsgebäude)	4,83682984	4,64285714	4,13170163	3,9047619	6
Wallstraße (Fußgängerzone)	4,83682984	4,66666667	4,13170163	3,9047619	6
Lachsfang	4,83566434	4,78571429	4,13170163	3,9047619	6
Schloßplatz (Mitte)	4,83566434	4,66666667	4,13170163	3,9047619	6
Lindenstraße (bis Neustädter Platz)	4,82983683	4,66666667	4,13170163	3,9047619	6
Leipziger Straße (von Bärplatz bis Albrechtstra...	4,82867133	4,88095238	4,13170163	3,9047619	6
Teichgasse	4,82750583	4,69047619	4,13170163	3,9047619	6
Lange Straße (Landstraße)	4,82634033	4,83333333	4,13170163	3,9047619	6
Heinrichsplatz	4,82400932	4,80952381	4,13170163	3,9047619	6
Schlachthofstraße	4,81934732	4,71428571	4,13170163	3,9047619	6
Friedrichstraße (von Westen bis zur Einbahnstr...	4,81118881	4,80952381	4,13170163	3,9047619	6

Abbildung 67: Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Straßenname	Nutzwert Experten	Nutzwert Gleichgewicht	Notwendiger Nutzwert EasyMile	Notwendiger Nutzwert EasyMile
Bernburger Straße (Spielstraße)	4,8030303	4,78571429	4,13170163	3,9047619
Ritterstraße (Einbahnstraße)	4,79487179	4,73809524	4,13170163	3,9047619
Bahnhofstraße (nach google maps)	4,79137529	4,76190476	4,13170163	3,9047619
Schalaunische Straße (von Ölmühlenstraße bis	4,78787879	4,66666667	4,13170163	3,9047619
Kastanienstraße (Wohnstraße)	4,78671329	4,73809524	4,13170163	3,9047619
Springstraße (bis zum Stoppschild)	4,78321678	4,71428571	4,13170163	3,9047619
Friedrich-Ebert-Straße (Landstraße)	4,78088578	4,73809524	4,13170163	3,9047619
Stiftstraße (Landstraße)	4,78088578	4,5952381	4,13170163	3,9047619
Dorfstraße (Porst) - Einbahnstraße	4,77855478	4,80952381	4,13170163	3,9047619
Friedhofstraße	4,76806527	4,80952381	4,13170163	3,9047619
Friedrich-Ebert-Straße	4,76689977	4,66666667	4,13170163	3,9047619
Lohmannstraße (Wohnstraße)	4,76456876	4,71428571	4,13170163	3,9047619
Konrad-Adenauer-Allee	4,76340326	4,73809524	4,13170163	3,9047619
Am Bauerteich (Einbahnstraße) aber ein Teil is	4,76340326	4,76190476	4,13170163	3,9047619
An der Eisenbahn (von Dr.-Krause-Straße richtu	4,76107226	4,69047619	4,13170163	3,9047619
Leopoldstraße	4,75524476	4,71428571	4,13170163	3,9047619
Neustädter Platz - rechts (von Neustädter Platz	4,75524476	4,69047619	4,13170163	3,9047619
Joachimiallee	4,75058275	4,78571429	4,13170163	3,9047619
Baasdorfer Straße (von Friedhofstraße bis Lohm	4,74592075	4,80952381	4,13170163	3,9047619
Hallesche Straße (Zufahrt Krankenhaus)	4,74358974	4,78571429	4,13170163	3,9047619
Mühlenstraße	4,74358974	4,71428571	4,13170163	3,9047619
Friedrich-Ebert-Straße	4,74358974	4,54761905	4,13170163	3,9047619
Magdeburger Straße (von Stiftstraße bis Markt	4,74242424	4,66666667	4,13170163	3,9047619
Leipziger Straße (ab Bahnhofstraße)	4,74125874	4,73809524	4,13170163	3,9047619
Köthener Straße (Elsdorf, Landstraße)- wo sich	4,73892774	4,64285714	4,13170163	3,9047619
Bernburger Straße (Geuzer Straße bis Lange S	4,73776224	4,66666667	4,13170163	3,9047619
Landstraße L145 (nach Kleinwülknitz)	4,73659674	4,64285714	4,13170163	3,9047619
Holzmarkt	4,73193473	4,66666667	4,13170163	3,9047619
Schloßstraße (von Lindenstraße bis Ritterstraß	4,73193473	4,69047619	4,13170163	3,9047619
August-Bebel-Straße (Landstraße)	4,73076923	4,69047619	4,13170163	3,9047619
Pappelweg	4,72960373	4,73809524	4,13170163	3,9047619
Museumsgasse	4,72843823	4,64285714	4,13170163	3,9047619
Am Galgenberg	4,72727273	4,71428571	4,13170163	3,9047619

Abbildung 68: Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Die Kartendarstellung in Abbildung 69 visualisiert die Straßen der Stadt Köthen, welche den benötigten Nutzwert des EZ10 Gen 3 von EasyMile überschreiten. Diese Straßen sind grün markiert.

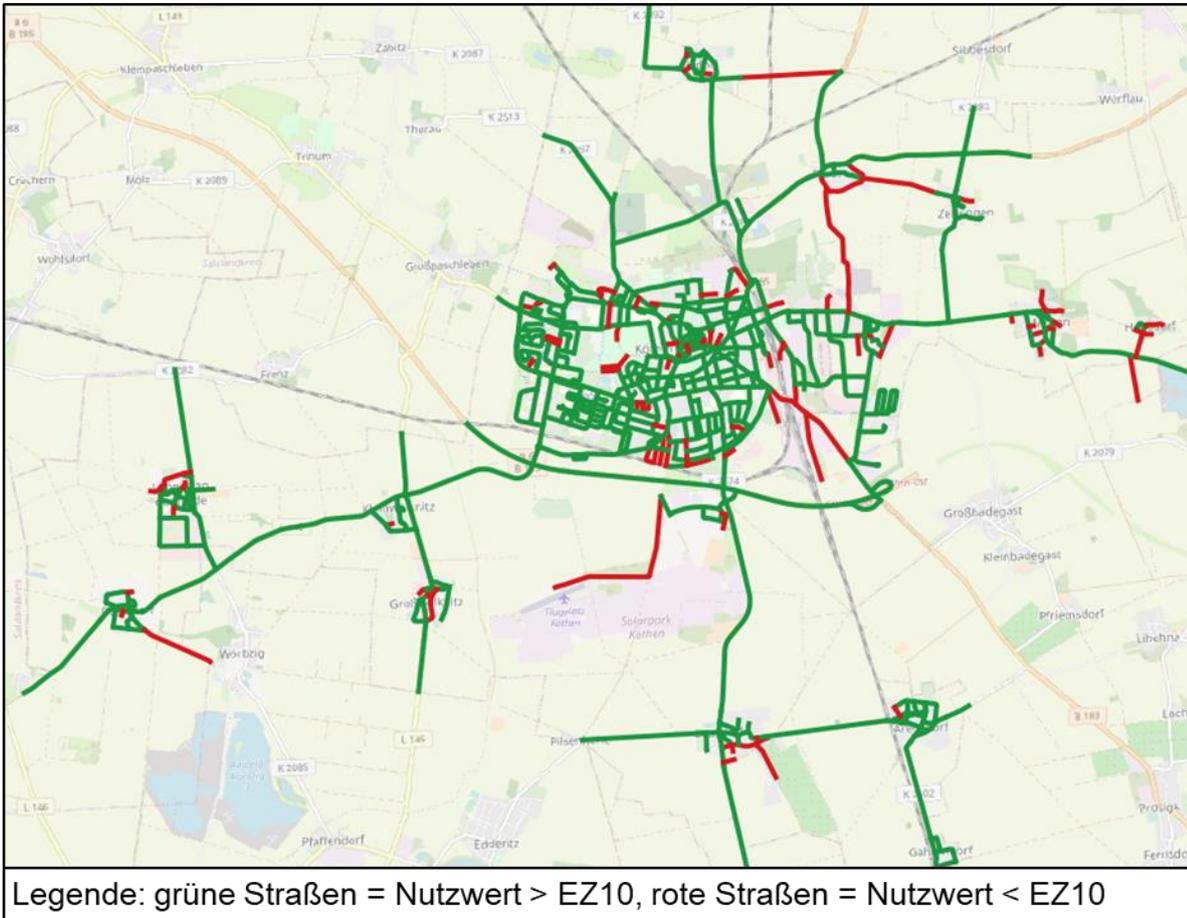


Abbildung 69: Ergebnis der Nutzwertanalyse bezogen auf den EZ10 Gen 3 von EasyMile

A.19 Teilnutzen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Abbildungen 70, 71 und 72 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens im Rahmen der Kosten-Wirksamkeits-Analyse.

Straßenname	Internetverbindung 3G/4G/5G	GNSS-Empfang (Satelliten)	Durchgängigkeit der Straße
Ackerstraße	5	6	6
Adolf-Kolping-Straße	4	6	3
Akazienstraße	5	6	6
Albertstraße	4	6	0
Albrechtstraße	5	6	6
Alexanderstraße	5	6	6
Alte Straße	5	6	6
Alte Straße	5	6	6
Alte Straße	5	6	6
Am Dreieck	5	6	0
Am Flugplatz	5	6	6
Am Galgenberg	5	6	6
Am Güterbahnhof	4	6	0
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	5	6	6
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	5	6	6
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	5	6	0
Am Obstmustergarten	4	6	6
Am Quellteich	5	6	6
Am Sportzentrum	4	6	3
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	5	6	6
Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverkehr)	5	6	6
Am Wasserwerk	4	6	6

Abbildung 70: Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens

Straßenname	Kreuzungen	Kreisverkehr	LSA
Biendorfer Bogen	6	6	6
Blumenstraße	6	6	6
Brandgasse	6	6	6
Brauhausplatz	6	6	6
Brauhausplatz	6	6	6
Brauhausplatz	6	6	6
Brunnenstraße	6	6	6
Brunnenstraße	6	6	6
Brunnenstraße	6	6	6
Burgstraße (bis Abzweig Große Badergasse)	6	6	6
Burgstraße (von Abzweig Große Badergasse bis	6	6	6
Buttermarkt	6	6	6
Clara-Zetkin-Straße	6	6	6
Clara-Zetkin-Straße	6	6	6
Damaschkeweg (Bundesstraße)	6	6	6
Damaschkeweg (Wohnstraße)	6	6	6
Dessauer Straße (Ab 185 bis Ortsausgang)	6	6	6
Dessauer Straße (Kreisverkehr bis 185)	6	6	6
Dessauer Straße (Augustenstraße bis Friedrichst	6	6	6
Dessauer Straße (Friedrichsplatz bis Kreisel	6	6	6
Dessauer Straße (nahe Ortsausgang)	6	6	6
Diesdorfer Weg	6	6	6

Abbildung 71: Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens

Straßenname	Halteverbot	Parkzonen (Parkende Autos)	Einbahnstraße
Hallesche Straße (Fußgängerz.)	1	6	1
Heinrich-Heine-Straße	1	5	1
Heinrich-Heine-Straße	1	5	1
Heinrichsplatz	1	6	1
Hermann-Wäschke-Straße	1	5	1
Hinsdorfer Straße (oberer Teil)	1	6	1
Hinsdorfer Straße (unterer Teil)	1	6	1
Hinter der Mauer (Einbahnstraße)	1	5	6
Hinter der Mauer	1	6	1
Hinter der Mauer (Fußgängerzone)	1	6	1
Hirtengasse	1	6	1
Hohenköthener Straße	1	5	1
Hohenköthener Straße (kleine Abzweigung)	1	6	6
Holzmarkt	1	5	6
Holzmarkt (Fußgängerzone)	1	6	6
Hopfengasse	1	6	1
Hoymmer Ring	1	5	1
Hubertus	1	5	1
Hugo-Junkers-Straße	3	5	1
Hühnerkropf	4	5	1
Im Winkel (Startet ab Klepziger Platz)	1	5	1
Industriestraße	1	5	1

Abbildung 72: Dritter Ausschnitt der Excel-Tabelle zur Veränderung des Teilnutzens

A.20 Kostenübersicht der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Abbildungen 73, 74 und 75 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse.

Straßenname	Kreuzungen	Anzahl Fahrspuren	Parkzonen (Parkende Autos)	Einbahnstraße
Ackerstraße	43.410,56 €	- €	- €	- €
Adolf-Kolping-Straße	10.852,64 €	- €	- €	- €
Akazienstraße	21.705,28 €	- €	- €	- €
Albertstraße	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
Albrechtstraße	21.705,28 €	- €	930,00 €	- €
Alexanderstraße	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
Alte Straße	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
Alte Straße	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
Alte Straße	21.705,28 €	- €	930,00 €	- €
Am Dreiangel	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
Am Flugplatz	21.705,28 €	- €	- €	- €
Am Galgenberg	21.705,28 €	- €	- €	- €
Am Güterbahnhof	10.852,64 €	- €	- €	- €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	43.410,56 €	20.989,44 €	- €	- €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	21.705,28 €	20.989,44 €	- €	- €
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	21.705,28 €	- €	- €	- €
Am Obstmustergarten	21.705,28 €	- €	- €	- €
Am Quellteich	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
Am Sportzentrum	10.852,64 €	- €	930,00 €	- €
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	162.789,60 €	- €	- €	- €
Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverke	10.852,64 €	- €	- €	- €
Am Wasserwerk	21.705,28 €	- €	- €	- €
Am Wasserwerk	21.705,28 €	- €	- €	- €
Amselweg	10.852,64 €	- €	- €	- €
An der Eisenbahn (der weg Richtung Süden)	21.705,28 €	- €	- €	- €
An der Eisenbahn (von Dr.-Krause-Straße richtu	10.852,64 €	- €	- €	- €
An der Eisenbahn (Richtung Dr.-Krause-Straße	10.852,64 €	- €	- €	- €
An der Knochenmühle	21.705,28 €	- €	1.860,00 €	- €
An der Rüsternbreite (Landstraße)	130.231,68 €	20.989,44 €	- €	- €
An der Rüsternbreite (Wohnstraße)	75.968,48 €	- €	5.580,00 €	- €
An der Schafweide	43.410,56 €	- €	- €	- €

Abbildung 73: Erster Ausschnitt aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Straßenname	Nachtbeleuchtung	Vegetation / Bäume	Vegetation / LiDAR-Lokalisierung
Bauernweg		250,00 €	992,00 €
Bergstraße		2.500,00 €	1.240,00 €
Bernburger Straße (Geuzer Straße bis Lange S		1.750,00 €	3.100,00 €
Bernburger Straße (ab Lange Straße bis Magde		250,00 €	1.612,00 €
Bernburger Straße (Spielstraße)		250,00 €	198,40 €
Bernhard-Kellermann-Straße		1.000,00 €	3.410,00 €
Biendorfer Bogen		500,00 €	1.860,00 €
Blumenstraße		2.500,00 €	620,00 €
Brandgasse		2.500,00 €	372,00 €
Brauhausplatz		250,00 €	341,00 €
Brauhausplatz		250,00 €	266,60 €
Brauhausplatz		250,00 €	291,40 €
Brunnenstraße		2.500,00 €	682,00 €
Brunnenstraße		2.500,00 €	477,40 €
Brunnenstraße		250,00 €	409,20 €
Burgstraße (bis Abzweig Große Badergasse)		2.500,00 €	285,20 €
Burgstraße (von Abzweig Große Badergasse bis		2.500,00 €	310,00 €
Buttermarkt		2.500,00 €	744,00 €
Clara-Zetkin-Straße		250,00 €	868,00 €
Clara-Zetkin-Straße		250,00 €	198,40 €
Damaschkeweg (Bundesstraße)		2.500,00 €	2.728,00 €
Damaschkeweg (Wohnstraße)		2.500,00 €	868,00 €
Dessauer Straße (Ab 185 bis Ortsausgang)		2.500,00 €	4.464,00 €
Dessauer Straße (Kreisverkehr bis 185)		500,00 €	570,40 €
Dessauer Straße (Augustenstraße bis Friedrich		1.750,00 €	1.302,00 €
Dessauer Straße (Friedrichsplatz bis Kreisel		1.000,00 €	1.054,00 €
Dessauer Straße (nahe Ortsausgang)	3.505,26 €	500,00 €	372,00 €
Diesdorfer Weg		250,00 €	1.116,00 €
Dr.-Krause-Straße (nach gm)		250,00 €	148,80 €
Dr.-Krause-Straße (nach gm)		1.000,00 €	1.178,00 €
Dr.-Krause-Straße (nach gm)		1.000,00 €	1.302,00 €
Dr.-Wilhelm-Külz-Straße		250,00 €	1.550,00 €

Abbildung 74: Zweiter Ausschnitt aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Straßenname	Gesamte jährliche Kosten Min	Jährliche Kosten pro Meter	Gesellschaftliche Konsequenzen
Bauernweg	45.746,28 €	285,91 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Bergstraße	60.286,89 €	301,43 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Bernburger Straße (Geuzer Straße bis Lange S	127.004,53 €	254,01 €	Geschwindigkeitsreduzierung
Bernburger Straße (ab Lange Straße bis Magde	15.903,97 €	61,17 €	
Bernburger Straße (Spielstraße)	23.336,37 €	145,85 €	
Bernhard-Kellermann-Straße	122.067,79 €	221,94 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Biendorfer Bogen	36.261,53 €	120,87 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Blumenstraße	36.701,95 €	367,02 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote, Geschwindigkeitsreduzierung
Brandgasse	33.453,28 €	557,55 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Brauhausplatz	54.396,23 €	989,02 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Brauhausplatz	31.539,35 €	733,47 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Brauhausplatz	30.683,21 €	652,83 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Brunnenstraße	53.542,67 €	486,75 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote, Geschwindigkeitsreduzierung
Brunnenstraße	36.277,21 €	471,13 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote, Geschwindigkeitsreduzierung
Brunnenstraße	33.359,08 €	505,44 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote, Geschwindigkeitsreduzierung
Burgstraße (bis Abzweig Große Badergasse)	53.591,09 €	1.165,02 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Burgstraße (von Abzweig Große Badergasse bi	31.142,16 €	622,84 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Buttermarkt	86.684,48 €	722,37 €	
Clara-Zetkin-Straße	54.105,89 €	386,47 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Clara-Zetkin-Straße	29.451,01 €	736,28 €	
Damaschkeweg (Bundesstraße)	149.323,84 €	135,75 €	Geschwindigkeitsreduzierung
Damaschkeweg (Wohnstraße)	45.822,45 €	130,92 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote
Dessauer Straße (Ab 185 bis Ortsausgang)	97.006,64 €	107,79 €	Geschwindigkeitsreduzierung
Dessauer Straße (Kreisverkehr bis 185)	52.340,96 €	227,57 €	Geschwindigkeitsreduzierung
Dessauer Straße (Augustenstraße bis Friedrich	35.134,93 €	167,31 €	Geschwindigkeitsreduzierung, Parkverbote
Dessauer Straße (Friedrichsplatz bis Kreisel	43.004,30 €	252,97 €	Parkverbote
Dessauer Straße (nahe Ortsausgang)	46.462,54 €	154,88 €	Ggf. Einbahnstraße oder Parkverbote, Geschwindigkeitsreduzierung
Diesdorfer Weg	30.931,28 €	171,84 €	Geschwindigkeitsreduzierung
Dr.-Krause-Straße (nach gm)	52.599,36 €	438,33 €	Geschwindigkeitsreduzierung
Dr.-Krause-Straße (nach gm)	34.198,30 €	179,99 €	Geschwindigkeitsreduzierung, Parkverbote
Dr.-Krause-Straße (nach gm)	32.989,93 €	157,09 €	Geschwindigkeitsreduzierung, Parkverbote

Abbildung 75: Dritter Ausschnitt aus der Excel-Tabelle zu den Kosten der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

A.21 Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Abbildungen 76 und 77 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zum Ergebnis der Kosten-Wirksamkeits-Analyse.

Straßenname	Wirkungs- index Min	Wirkungs- index Max	Vergleich
An der Schafweide	75,19 €	92,13 €	16,94 €
An der Schafweide	117,31 €	131,87 €	14,56 €
Andreas-Hofer-Platz	99,73 €	109,37 €	9,64 €
Angerstraße (Spielstraße)	74,99 €	79,41 €	4,42 €
Angerstraße (Wohnstraße)	31,91 €	39,35 €	7,44 €
Angerstraße (Wohnstraße)	43,22 €	48,41 €	5,19 €
Angerstraße (Wohnstraße)	55,73 €	62,35 €	6,62 €
Anhaltische Straße	58,56 €	64,97 €	6,41 €
Anne-Frank-Straße	35,73 €	51,90 €	16,17 €
Antoinettenstraße	40,85 €	43,85 €	3,00 €
Antoinettenstraße	24,07 €	39,19 €	15,12 €
Arendorfer Weg	16,94 €	23,98 €	7,04 €
Aribertstraße (von Brunnenstraße bis Eduardstraße)	48,90 €	63,71 €	14,80 €
Aribertstraße (von Eduardstraße bis Bärteichpromenade)	35,80 €	48,91 €	13,11 €
Ascherslebener Allee	61,44 €	66,11 €	4,67 €
August-Bebel-Straße (Landstraße)	81,31 €	88,42 €	7,11 €
August-Bebel-Straße (1 von Westen)	1.000,00 €	1.000,00 €	- €
August-Bebel-Straße (2 von Westen)	1.000,00 €	1.000,00 €	- €
August-Bebel-Straße (3 von Westen)	1.000,00 €	1.000,00 €	- €
Augustenstraße (von Dreiangel bis Leopoldstraße)	36,62 €	54,69 €	18,08 €
Augustenstraße (von Leopoldstraße bis Friedrichstraße)	69,68 €	72,18 €	2,50 €
Augustenstraße (von Friedrich-Ebert-Straße bis Dr.-Krause-Straße)	43,48 €	57,19 €	13,71 €
Augustenstraße (von Friedrichstraße bis Friedrich-Ebert-Straße)	49,09 €	52,24 €	3,15 €
Baasdorfer Straße (von Bärteich bis Friedhofstraße)	37,35 €	58,79 €	21,44 €
Baasdorfer Straße (von Friedhofstraße bis Lohmannstraße)	39,89 €	50,07 €	10,18 €
Bachplatz	1.000,00 €	1.000,00 €	- €
Badeweg	43,70 €	58,15 €	14,45 €
Bahnhofsplatz	91,77 €	89,69 €	- 2,08 €
Bahnhofsplatz (Zufahrt zu Bahnhofsgebäude)	42,05 €	55,22 €	13,17 €

Abbildung 76: Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Straßenname	Kosten Min	Kosten pro M Min	Wirkung Min
An der Schafweide	57.124,69 €	357,03 €	4,748
An der Schafweide	44.309,99 €	553,87 €	4,721
Andreas-Hofer-Platz	34.287,95 €	489,83 €	4,911
Angerstraße (Spielstraße)	48.627,63 €	374,06 €	4,988
Angerstraße (Wohnstraße)	53.606,93 €	153,16 €	4,800
Angerstraße (Wohnstraße)	39.400,44 €	207,37 €	4,798
Angerstraße (Wohnstraße)	37.911,20 €	270,79 €	4,859
Anhaltische Straße	291.344,75 €	291,34 €	4,976
Anne-Frank-Straße	22.589,97 €	173,77 €	4,864
Antoinettenstraße	34.514,28 €	203,03 €	4,970
Antoinettenstraße	21.888,53 €	115,20 €	4,787
Arensdorfer Weg	24.601,64 €	82,01 €	4,840
Aribertstraße (von Brunnenstraße bis Eduardstraße)	35.840,28 €	238,94 €	4,886
Aribertstraße (von Eduardstraße bis Bärtichpromenade)	45.790,84 €	183,16 €	5,117
Ascherslebener Allee	107.188,61 €	306,25 €	4,985
August-Bebel-Straße (Landstraße)	163.180,70 €	407,95 €	5,017
August-Bebel-Straße (1 von Westen)	23.199,87 €	331,43 €	0,000
August-Bebel-Straße (2 von Westen)	24.624,43 €	351,78 €	0,000
August-Bebel-Straße (3 von Westen)	22.705,46 €	267,12 €	0,000
Augustenstraße (von Dreiangel bis Leopoldstraße)	62.046,89 €	177,28 €	4,841
Augustenstraße (von Leopoldstraße bis Friedrichstraße)	88.462,51 €	353,85 €	5,078
Augustenstraße (von Friedrich-Ebert-Straße bis Dr.-Krause-Str)	35.418,35 €	221,36 €	5,091
Augustenstraße (von Friedrichstraße bis Friedrich-Ebert-Straße)	48.286,59 €	254,14 €	5,177
Baasdorfer Straße (von Bärtich bis Friedhofstraße)	25.398,28 €	181,42 €	4,857
Baasdorfer Straße (von Friedhofstraße bis Lohmannstraße)	52.022,56 €	200,09 €	5,016
Bachplatz	2.965,00 €	- €	0,000
Badeweg	55.962,29 €	215,24 €	4,925
Bahnhofsplatz	111.669,11 €	465,29 €	5,070

Abbildung 77: Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Kartendarstellung in Abbildung 78 visualisiert die Straßen der Stadt Köthen, welche einen Wirkungsindex von unter 30 Euro pro Eignungspunkt besitzen. Diese Straßen sind grün markiert.

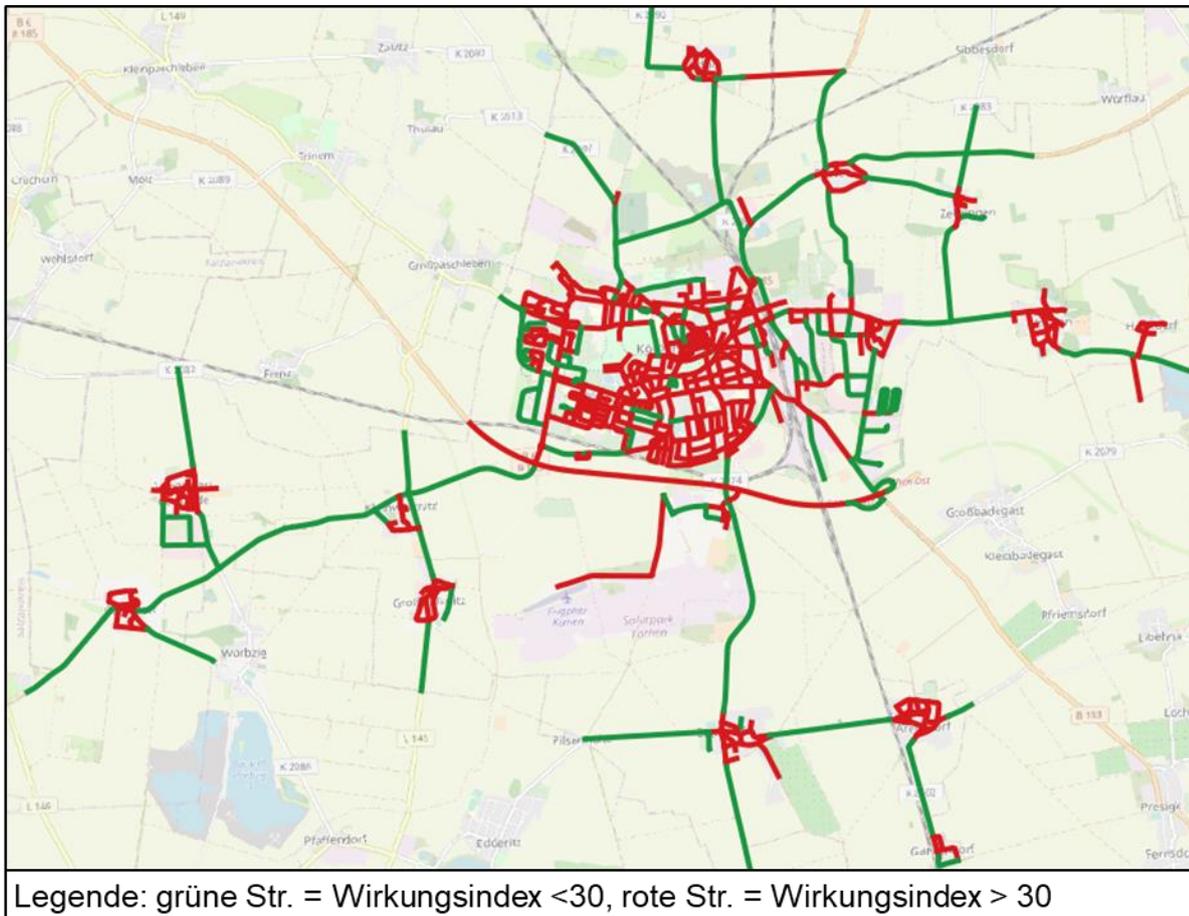


Abbildung 78: Ergebnis der Kosten-Wirksamkeits-Analyse bezogen auf einen Wirkungsindex von 30 Euro pro Eignungspunkt

A.22 Berechnung der Nutzenkriterien für die Kosten-Nutzen-Analyse

Auf Basis der Verkehrszählung der Stadt Köthen, wird das Verkehrsaufkommen für jede Straße ermittelt. Dieses wird mit dem Modal-Split des ÖV (8 %) und mit den Fahrgeldeinnahmen pro Strecke (1,80 Euro) multipliziert. Auf dieser Basis werden die Fahrgeldeinnahmen pro Tag berechnet (siehe Abbildung 79)

Straßenname	Verkehrsaufkommen Gesamt angepasst	Verkehrsaufkommen ÖV (Normal-Case)	Verkehrsaufkommen ÖV (Best-Case)	Fahrgeldeinnahmen pro Tag
Ackerstraße	800	64	128	115,20 €
Adolf-Kolping-Straße	250	20	40	36,00 €
Akazienstraße	7100	568	1136	1.022,40 €
Albertstraße	250	20	40	36,00 €
Albrechtstraße	600	48	96	86,40 €
Alexanderstraße	950	76	152	136,80 €
Alte Straße	200	16	32	28,80 €
Alte Straße	150	12	24	21,60 €
Alte Straße	150	12	24	21,60 €
Am Dreiangel	1250	100	200	180,00 €
Am Flugplatz	250	20	40	36,00 €
Am Galgenberg	8700	696	1392	1.252,80 €
Am Güterbahnhof	50	4	8	7,20 €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	8600	688	1376	1.238,40 €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	9350	748	1496	1.346,40 €
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	50	4	8	7,20 €
Am Obstmustergarten	250	20	40	36,00 €
Am Quellteich	50	4	8	7,20 €
Am Sportzentrum	250	20	40	36,00 €
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	5720	457,6	915,2	823,68 €
Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverkehr)	6620	529,6	1059,2	953,28 €
Am Wasserwerk	200	16	32	28,80 €
Am Wasserwerk	650	52	104	93,60 €

Abbildung 79: Berechnung der Fahrgeldeinnahmen (Teil 1)

Diese Werte werden anschließend auf ein Jahr hochgerechnet (multipliziert mit 365). Unter der Annahme, dass die Fahrgäste im Durchschnitt fünf Straßen mit dem Bus zurücklegen, werden die Einnahmen angepasst (dividiert durch fünf). Diese Ergebnisse werden in Abbildung 80 dargestellt.

Straßenname	Fahrgeldeinnahmen pro Jahr	Angepasste Fahrgeldeinnahmen pro Jahr
Ackerstraße	42.048,00 €	8.409,60 €
Adolf-Kolping-Straße	13.140,00 €	2.628,00 €
Akazienstraße	373.176,00 €	74.635,20 €
Albertstraße	13.140,00 €	2.628,00 €
Albrechtstraße	31.536,00 €	6.307,20 €
Alexanderstraße	49.932,00 €	9.986,40 €
Alte Straße	10.512,00 €	2.102,40 €
Alte Straße	7.884,00 €	1.576,80 €
Alte Straße	7.884,00 €	1.576,80 €
Am Dreiangel	65.700,00 €	13.140,00 €
Am Flugplatz	13.140,00 €	2.628,00 €
Am Galgenberg	457.272,00 €	91.454,40 €
Am Güterbahnhof	2.628,00 €	525,60 €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	452.016,00 €	90.403,20 €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	491.436,00 €	98.287,20 €
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	2.628,00 €	525,60 €
Am Obstmustergarten	13.140,00 €	2.628,00 €
Am Quellteich	2.628,00 €	525,60 €
Am Sportzentrum	13.140,00 €	2.628,00 €
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	300.643,20 €	60.128,64 €
Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreisverkehr)	347.947,20 €	69.589,44 €
Am Wasserwerk	10.512,00 €	2.102,40 €
Am Wasserwerk	34.164,00 €	6.832,80 €

Abbildung 80: Berechnung der Fahrgeldeinnahmen (Teil 2)

Auf Basis des Verbrauchs pro 100 km werden die Kosten eines Elektrobusses und eines Dieselmotors berechnet. Für den Elektrobuss wird ein Verbrauch von 92 kWh pro 100 km und für den Dieselmotors ein Verbrauch von 28 L pro 100 km angenommen [IVECO Magirus AG 2021]. Dies wird mit einem Strompreis von 0,3197 €/kWh, bzw. mit dem Dieselpreis von 1,599 €/L, multipliziert [BMWK 2024]. Um die Kosten pro Jahr zu berechnen, wird dieses Ergebnis mit den jährlich zu fahrenden Kilometern des ÖV in der jeweiligen Straße multipliziert. Abschließend werden die Einsparungen abgeleitet (siehe Abbildung 81).

Straßenname	Verbrauch E-Bus pro 100km	Verbrauch Dieselbus pro 100km	Kosten E-Bus pro 100km	Kosten Dieselbus pro 100km	Kosten pro Jahr E-Bus	Kosten pro Jahr Dieselbus	Einsparung
Ackerstraße	92	28	29,4124	44,772	2.404,76 €	3.660,56 €	1.255,80 €
Adolf-Kolping-Straße	92	28	29,4124	44,772	386,48 €	588,30 €	201,83 €
Akazienstraße	92	28	29,4124	44,772	24.391,12 €	37.128,52 €	12.737,41 €
Albertstraße	92	28	29,4124	44,772	751,49 €	1.143,92 €	392,44 €
Albrechtstraße	92	28	29,4124	44,772	618,37 €	941,29 €	322,92 €
Alexanderstraße	92	28	29,4124	44,772	1.387,03 €	2.111,36 €	724,33 €
Alte Straße	92	28	29,4124	44,772	738,60 €	1.124,31 €	385,71 €
Alte Straße	92	28	29,4124	44,772	219,00 €	333,37 €	114,37 €
Alte Straße	92	28	29,4124	44,772	322,07 €	490,25 €	168,19 €
Am Dreiangel	92	28	29,4124	44,772	3.757,43 €	5.719,62 €	1.962,19 €
Am Flugplatz	92	28	29,4124	44,772	751,49 €	1.143,92 €	392,44 €
Am Galgenberg	92	28	29,4124	44,772	6.724,73 €	10.236,49 €	3.511,76 €
Am Güterbahnhof	92	28	29,4124	44,772	150,30 €	228,78 €	78,49 €
Am Holländer Weg (Bundess	92	28	29,4124	44,772	66.474,38 €	101.188,30 €	34.713,92 €
Am Holländer Weg (Bundess	92	28	29,4124	44,772	18.469,40 €	28.114,40 €	9.645,00 €
Am Holländer Weg (Wohnstr	92	28	29,4124	44,772	77,30 €	117,66 €	40,37 €
Am Obstmustergarten	92	28	29,4124	44,772	536,78 €	817,09 €	280,31 €
Am Quellteich	92	28	29,4124	44,772	85,88 €	130,73 €	44,85 €
Am Sportzentrum	92	28	29,4124	44,772	300,59 €	457,57 €	156,98 €
Am Wasserturm (Hauptstraß	92	28	29,4124	44,772	44.213,19 €	67.301,99 €	23.088,80 €
Am Wasserturm (Außerorts t	92	28	29,4124	44,772	28.427,67 €	43.273,03 €	14.845,36 €
Am Wasserwerk	92	28	29,4124	44,772	446,60 €	679,82 €	233,22 €
Am Wasserwerk	92	28	29,4124	44,772	1.898,04 €	2.889,23 €	991,19 €

Abbildung 81: Berechnung der Kraftstoffeinsparungen

Die THG-Einsparungen von 24 gCO_{2e}/pkm werden mit der jährlichen Fahrleistung des ÖV in der jeweiligen Straße und mit dem CO₂-Preis multipliziert. Daraus resultieren die Einsparungen pro Jahr (siehe Abbildung 82) [Die Bundesregierung 2025].

Straßenname	Einsparung pro m (kgCO _{2e} /m)	Gesamteinsparungen pro Jahr (kgCO _{2e} /a)	Kosten CO ₂ (Euro/Tonne)	Einsparungen pro Jahr (Euro / a)
Ackerstraße	0,000024	196,224	55,00 €	10,79 €
Adolf-Kolping-Straße	0,000024	31,536	55,00 €	1,73 €
Akazienstraße	0,000024	1990,272	55,00 €	109,46 €
Albertstraße	0,000024	61,32	55,00 €	3,37 €
Albrechtstraße	0,000024	50,4576	55,00 €	2,78 €
Alexanderstraße	0,000024	113,1792	55,00 €	6,22 €
Alte Straße	0,000024	60,2688	55,00 €	3,31 €
Alte Straße	0,000024	17,8704	55,00 €	0,98 €
Alte Straße	0,000024	26,28	55,00 €	1,45 €
Am Dreiangel	0,000024	306,6	55,00 €	16,86 €
Am Flugplatz	0,000024	61,32	55,00 €	3,37 €
Am Galgenberg	0,000024	548,7264	55,00 €	30,18 €
Am Güterbahnhof	0,000024	12,264	55,00 €	0,67 €
Am Holländer Weg (Bundess	0,000024	5424,192	55,00 €	298,33 €
Am Holländer Weg (Bundess	0,000024	1507,0704	55,00 €	82,89 €
Am Holländer Weg (Wohnstr	0,000024	6,3072	55,00 €	0,35 €
Am Obstmustergarten	0,000024	43,8	55,00 €	2,41 €
Am Quellteich	0,000024	7,008	55,00 €	0,39 €
Am Sportzentrum	0,000024	24,528	55,00 €	1,35 €
Am Wasserturm (Hauptstraß	0,000024	3607,7184	55,00 €	198,42 €
Am Wasserturm (Außerorts t	0,000024	2319,648	55,00 €	127,58 €
Am Wasserwerk	0,000024	36,4416	55,00 €	2,00 €

Abbildung 82: Berechnung des Einsparpotenzials der THG-Emissionen

Abschließend werden die drei Nutzenkriterien zu den Gesamteinnahmen pro Jahr addiert (siehe Abbildung 83).

Straßenname	Fahrgeldeinnahmen NC pro Jahr	THG-Einsparungen pro Jahr (Euro / a)	Kraftstoffeinsparung pro Jahr (Euro / a)	Gesamteinnahmen pro Jahr
Ackerstraße	8.409,60 €	10,79 €	1.255,80 €	9.676,19 €
Adolf-Kolping-Straße	2.628,00 €	1,73 €	201,83 €	2.831,56 €
Akazienstraße	74.635,20 €	109,46 €	12.737,41 €	87.482,07 €
Albertstraße	2.628,00 €	3,37 €	392,44 €	3.023,81 €
Albrechtstraße	6.307,20 €	2,78 €	322,92 €	6.632,90 €
Alexanderstraße	9.986,40 €	6,22 €	724,33 €	10.716,95 €
Alte Straße	2.102,40 €	3,31 €	385,71 €	2.491,43 €
Alte Straße	1.576,80 €	0,98 €	114,37 €	1.692,15 €
Alte Straße	1.576,80 €	1,45 €	168,19 €	1.746,43 €
Am Dreiangel	13.140,00 €	16,86 €	1.962,19 €	15.119,05 €
Am Flugplatz	2.628,00 €	3,37 €	392,44 €	3.023,81 €
Am Galgenberg	91.454,40 €	30,18 €	3.511,76 €	94.996,34 €
Am Güterbahnhof	525,60 €	0,67 €	78,49 €	604,76 €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	90.403,20 €	298,33 €	34.713,92 €	125.415,46 €
Am Holländer Weg (Bundesstraße)	98.287,20 €	82,89 €	9.645,00 €	108.015,09 €
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	525,60 €	0,35 €	40,37 €	566,31 €
Am Obstmustergarten	2.628,00 €	2,41 €	280,31 €	2.910,72 €
Am Quellteich	525,60 €	0,39 €	44,85 €	570,84 €
Am Sportzentrum	2.628,00 €	1,35 €	156,98 €	2.786,32 €
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	60.128,64 €	198,42 €	23.088,80 €	83.415,86 €
Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreis)	69.589,44 €	127,58 €	14.845,36 €	84.562,38 €
Am Wasserwerk	2.102,40 €	2,00 €	233,22 €	2.337,62 €
Am Wasserwerk	6.832,80 €	8,52 €	991,19 €	7.832,50 €

Abbildung 83: Berechnung der Gesamteinnahmen pro Jahr

A.23 Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse

Die Abbildungen 84 und 85 zeigen Ausschnitte aus der Excel-Tabelle zum Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse.

Straßenname	Kosten-Nutzen-Verhältnis Min	Kosten-Nutzen-Verhältnis Max	Positiv oder negativ min	Positiv oder negativ Max
Am Holländer Weg (Wohnstraße)	200,50 €	299,55 €	0	0
Am Obstmustergarten	122,36 €	260,26 €	0	0
Am Quellteich	243,02 €	342,29 €	0	0
Am Sportzentrum	136,05 €	185,38 €	0	0
Am Wasserturm (Hauptstraße, Innerorts)	110,98 €	182,24 €	0	0
Am Wasserturm (Außerorts bis zum Kreis	114,92 €	59,52 €	1	1
Am Wasserwerk	161,12 €	215,89 €	0	0
Am Wasserwerk	158,59 €	226,37 €	0	0
Amselweg	196,29 €	263,53 €	0	0
An der Eisenbahn (der weg Richtung Süde	146,29 €	245,08 €	0	0
An der Eisenbahn (von Dr.-Krause-Straße	14,71 €	86,35 €	0	0
An der Eisenbahn (Richtung Dr.-Krause-St	14,71 €	76,17 €	0	0
An der Knochenmühle	186,00 €	239,25 €	0	0
An der Rüsternbreite (Landstraße)	71,43 €	111,92 €	0	0
An der Rüsternbreite (Wohnstraße)	274,03 €	413,84 €	0	0
An der Schafweide	353,52 €	503,51 €	0	0
An der Schafweide	547,08 €	718,96 €	0	0
Andreas-Hofer-Platz	482,09 €	597,76 €	0	0
Angerstraße (Spielstraße)	369,79 €	432,77 €	0	0
Angerstraße (Wohnstraße)	151,43 €	216,12 €	0	0
Angerstraße (Wohnstraße)	204,38 €	265,01 €	0	0
Angerstraße (Wohnstraße)	266,81 €	341,18 €	0	0
Anhaltische Straße	263,15 €	330,18 €	0	0
Anne-Frank-Straße	169,50 €	279,42 €	0	0
Antoinettenstraße	40,45 €	78,77 €	0	0
Antoinettenstraße	85,28 €	182,77 €	0	0
Arensdorfer Weg	72,11 €	121,06 €	0	0
Aribertstraße (von Brunnenstraße bis Edua	168,06 €	279,74 €	0	0
Aribertstraße (von Eduardstraße bis Bärtel	138,92 €	231,59 €	0	0

Abbildung 84: Erster Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse

Straßenname	Kosten-Nutzen-Verhältnis Min	Kosten-Nutzen-Verhältnis Max	Positiv oder negativ min	Positiv oder negativ Max
Friedrich-Ebert-Straße (Landstraße)	315,46 €	300,35 €	1	1
Friedrich-Ebert-Straße	171,98 €	217,19 €	1	0
Friedrich-Ebert-Straße	67,98 €	8,06 €	1	0
Friedrich-Ebert-Straße	73,54 €	19,38 €	1	1
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße (von Rüstern	129,07 €	244,50 €	0	0
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße (Umfahrung	146,78 €	262,59 €	0	0
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße (Verbindung	1.108,21 €	1.414,32 €	0	0
Friedrichsplatz	141,04 €	264,37 €	0	0
Friedrichstraße (von Westen bis zur Einba	85,75 €	136,94 €	0	0
Friedrichstraße (Einbahnstraße)	203,18 €	226,10 €	0	0
Friedrichstraße (bis zur Sackgasse am En	165,53 €	227,08 €	0	0
Gartenstraße	226,68 €	333,79 €	0	0
Gartenweg	351,73 €	480,73 €	0	0
Georgstraße	74,02 €	109,80 €	0	0
Geschwister-Scholl-Straße	192,65 €	315,01 €	0	0
Geuzer Straße (Landstraße)	84,80 €	113,18 €	0	0
Geuzer Straße (Wohnstraße Oben)	392,42 €	547,85 €	0	0
Geuzer Straße (Wohnstraße unten)	242,95 €	389,63 €	0	0
Gnetscher Straße (Bundesstraße)	10,68 €	63,17 €	0	0
Gnetscher Straße (Landstraße)	9,36 €	61,67 €	0	0
Goethestraße	168,32 €	236,25 €	0	0
Goethestraße	195,43 €	241,04 €	0	0
Grenzstraße	120,68 €	158,72 €	0	0
Große Badergasse	431,46 €	546,80 €	0	0
Großer Neumarkt	131,53 €	219,52 €	0	0
Großer Neumarkt	119,31 €	182,05 €	0	0

Abbildung 85: Zweiter Ausschnitt der Excel-Tabelle zum Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse

Die Kartendarstellung in Abbildung 86 visualisiert die Straßen der Stadt Köthen, welche ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Diese Straßen sind grün markiert.

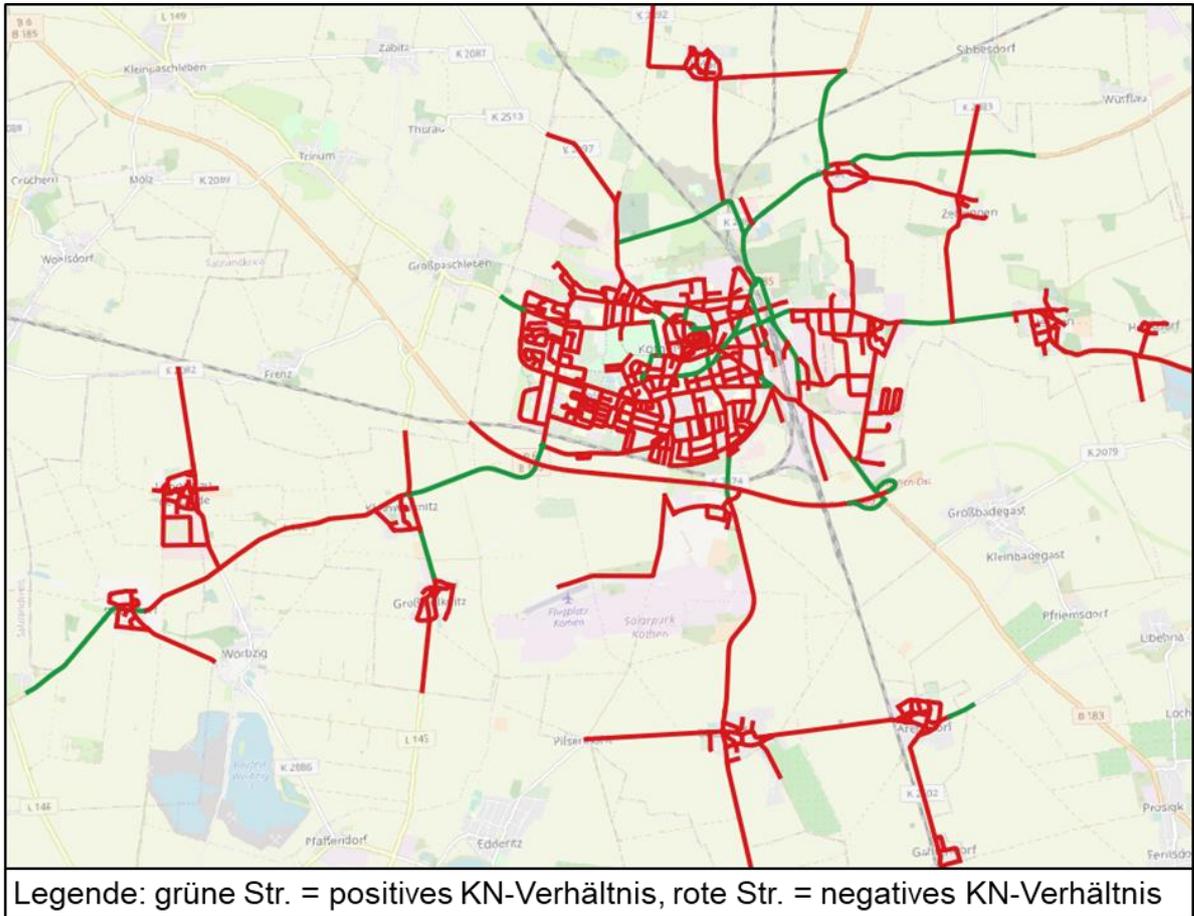


Abbildung 86: Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse bezogen auf ein positives oder negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis