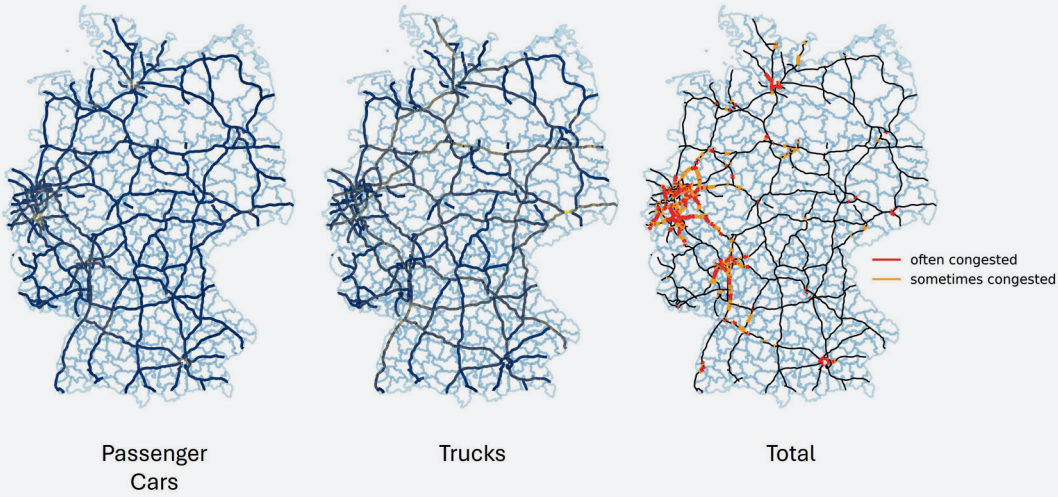


Einfluss des automatisierten Fahrens auf die technoökonomische Performance von Verkehrssystemen

Edgar Jungblut

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 738
ISBN 978-3-69367-007-1

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

JÜLICH
Forschungszentrum

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 738

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institute of Climate and Energy Systems (ICE)
Jülicher Systemanalyse (ICE-2)

Einfluss des automatisierten Fahrens auf die technoökonomische Performance von Verkehrssystemen

Edgar Jungblut

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 738

ISSN 1866-1793 ISBN 978-3-69367-007-1

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Herausgeber und Vertrieb:	Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag 52425 Jülich Tel.: +49 2461 61-5368 Fax: +49 2461 61-6103 zb-publikation@fz-juelich.de www.fz-juelich.de/zb
Umschlaggestaltung:	Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH
Druck:	Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH
Copyright:	Forschungszentrum Jülich 2026

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 738

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2026)

ISSN 1866-1793
ISBN 978-3-69367-006-4 (Print)
ISBN 978-3-69367-007-1 (E-Book)

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess.



This is an Open Access publication distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Ein herzlicher Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. Detlef Stolten, der mir die Arbeit an meinem Thema ermöglicht hat. Ebenso danke ich meinem Zweitprüfer, Prof. Dr. Christian Sattler, für die angenehme Begleitung während des gesamten Prüfungsprozesses.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Thomas Grube, den Leiter meiner Forschungsgruppe, für seine wertvolle Anleitung und den regelmäßigen Austausch. Dank seiner Expertise konnte ich meine Ideen entwickeln und meine Arbeit gestalten.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut, insbesondere der Forschungsgruppe Verkehrsszenarien. Die gemeinsamen Diskussionen und der Austausch von Ideen haben meine Arbeit enorm bereichert.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mir Rückhalt gegeben und mich in schwierigen Phasen motiviert haben. Durch eure Unterstützung habt ihr mir wesentlich dabei geholfen, diese Herausforderung erfolgreich zu meistern.

Kurzfassung

Steigende Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr stellen den deutschen Straßenverkehr neben der Erreichung der Treibhausgasneutralität vor zwei zentrale Herausforderungen. Einerseits muss die Verkehrsinfrastruktur so ausgelegt werden, dass zukünftige Verkehrsströme bewältigt werden können. Andererseits muss der Fahrerbedarf im Güterverkehr gedeckt sein, um den Gütertransport weiterhin zu ermöglichen. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen des automatisierten Fahrens im Hinblick auf diese drei Herausforderungen analysiert.

Zuerst werden die Betriebskosten und der Fahrerbedarf eines automatisierten Straßengüterverkehrs untersucht. Methodische Schwerpunkte sind dabei die Modellierung der Lohnkosten für den Fahrer über die Fahrzeiten und die Be- und Entladungszeiten für verschiedene Betriebsstrategien sowie die Definition einer Vielzahl an Einsatzprofilen. Die Betriebskosten eines teilautomatisierten Betriebs, bei dem Autobahnfahrten automatisiert erfolgen und menschliche Fahrer für Fahrtanteile abseits der Autobahn benötigt werden, sind je nach gewählter Betriebsstrategie erst für Einzelfahrtweiten über 100 km oder 150 km geringer als im nicht-automatisierten Betrieb. Für einen solchen teilautomatisierten Betrieb kann der Fahrerbedarf um mindestens ein Viertel gegenüber dem nicht-automatisierten Fall reduziert und dadurch dem aktuellen Fahrermangel entgegengewirkt werden. Für alle untersuchten Einsatzprofile ist weiterhin eine Automatisierung des Autobahnverkehrs und des ländlichen Verkehrs für einen kosteneffektiven teilautomatisierten Betrieb ausreichend.

Anschließend wird der Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge in Fahrzyklussimulationen analysiert. Die Berücksichtigung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems innerhalb der Fahrzyklussimulationen stellt dabei eine methodische Ergänzung zur bestehenden Literatur dar. Der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W erhöht den Energiebedarf für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr nur um 1% und hat somit einen vernachlässigbaren Einfluss. Eine Geschwindigkeitsreduktion von 90 km/h auf 70 km/h kann jedoch den Energiebedarf und die Gesamtbetriebskosten automatisierter Lastkraftwagen um 15% und 5% senken. Für Personenkraftwagen hat der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems einen relevanten Einfluss, er erhöht den Energiebedarf im Autobahnverkehr um 5% und im Stadtverkehr sogar um 32%. Der Energiebedarf des Automatisierungssystems übertrifft somit sämtliche Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise im Autobahnverkehr sowie eine Eliminierung von Stopps und eine Reduktion der Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h im Stadtverkehr.

Abschließend werden die verkehrlichen Auswirkungen des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge analysiert. Dazu wird das Verkehrsaufkommen des Personen- und Güterverkehrs in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene modelliert und auf das Straßennetz umgelegt. Die Abbildung des Güterverkehrsaufkommens in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene stellt dabei eine methodische Verfeinerung gegenüber der bestehenden Literatur dar. Automatisierte Fahrzeuge können durch geringere Folgeabstände im Vergleich zu menschlichen Fahrern die Straßenkapazität erhöhen und dadurch die Überlastung des Autobahnnetzwerks um bis zu 83% reduzieren. Die Analysen zeigen, dass Überlastungen insbesondere in dicht besiedelten Gebieten auftreten, in denen ein Ausbau des Autobahnnetzwerks als Alternative zur Automatisierung eventuell nicht möglich ist.

Schlagwörter: Automatisiertes Fahren, Gesamtbetriebskosten, Fahrerbedarf, Energiebedarf, Verkehrsfluss, Netzwerkauslastung

Abstract

Increasing passenger and freight traffic volumes pose two central challenges for German road traffic, in addition to achieving greenhouse gas neutrality. On the one hand, the transport infrastructure must be designed in such a way that future traffic flows can be handled. On the other hand, the demand for human drivers in freight transport must be met in order to continue to enable freight transport. In this thesis, the effects of automated driving are analyzed with regard to these three challenges.

First, the operating costs and demand for human drivers of automated road freight transport are examined. Methodological priorities are the modeling of driver wages based on driving times and loading and unloading times for different operating strategies, as well as the definition of a large number of usage profiles. The operating costs of a partially automated operation, in which freeway driving is automated and human drivers are needed for driving off the freeway, are lower than in non-automated operation only for individual trips over 100 km or 150 km, depending on the chosen operating strategy. For such partially automated operation, the driver demand can be reduced by at least a quarter compared to non-automated operation, thereby counteracting the current shortage of human drivers. Furthermore, for all the deployment profiles examined, automation of freeway traffic and rural traffic is sufficient for cost-effective partially automated operation.

Subsequently, the energy demand of automated vehicles is analyzed in driving cycle simulations. The consideration of the energy demand of the automation system within the driving cycle simulations represents a methodological extension to the existing literature. The assumed power demand of the automation system of 1000 W increases the energy demand for trucks in freeway traffic by only 1% and thus has a negligible influence. However, a speed reduction from 90 km/h to 70 km/h can reduce the energy demand and total operating costs of automated trucks by 15% and 5%. For passenger cars, the power requirement of the automation system has a relevant influence, increasing the energy demand in freeway traffic by 5% and in city traffic by as much as 32%. The energy demand of the automation system thus outweighs all savings achieved by a smoother driving style on the freeway and by eliminating stops and reducing the maximum speed to 30 km/h in city traffic.

Finally, the traffic impact of automated vehicles is analyzed. To do this, the volume of passenger and freight traffic is modeled at hourly resolution at the municipal association level and mapped to the road network. Modeling the freight traffic volume in hourly resolution at the municipal association level represents a methodological refinement compared to the existing literature. Automated vehicles can increase road capacity by reducing the distances between vehicles compared to human drivers, thereby reducing congestion on the freeway network by up to 83%. The analyses show that congestion occurs particularly in densely populated areas where expanding the freeway network may not be possible as an alternative to automation.

Keywords: Automated driving, total cost of ownership, driver demand, energy demand, traffic flow, network utilization

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG I
ABSTRACT II
INHALTSVERZEICHNIS III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS V
TABELLENVERZEICHNIS IX
1 EINLEITUNG 1
2 LITERATUR UND GRUNDLAGEN 4
2.1 Definition und aktuelle Anwendungen des automatisierten Fahrens 4
2.2 Technische Umsetzung des automatisierten Fahrens 8
2.2.1 Sensoren und Algorithmen für das automatisierte Fahren 8
2.2.2 Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Rolle der Infrastruktur 12
2.2.3 Anwendungsbereich und Zeitraum der Umsetzung des automatisierten Fahrens 13
2.3 Einfluss des automatisierten Fahrens auf das Mobilitätsverhalten und die Fahrzeugnutzung 15
2.3.1 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Personenverkehr 15
2.3.2 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Straßengüterverkehr 21
2.4 Änderungen im Energiebedarf durch das automatisierte Fahren 31
2.4.1 Übersichtsstudien 31
2.4.2 Einfluss des Fahrstils automatisierter Fahrzeuge 33
2.4.3 Energiebedarf des Automatisierungssystems 37
2.4.4 Berechnung des Energiebedarfs eines Fahrzeugs für einen Fahrzyklus 41
2.5 Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss 44
2.5.1 Qualitative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss 45
2.5.2 Quantitative Auswirkungen auf die Kapazität einzelner Straßenabschnitte 48
2.5.3 Auswirkungen auf die Auslastung des Straßennetzwerks 54
2.6 Verkehrsaufkommen in Deutschland 56
2.6.1 Gesamtverkehrsaufkommen 57
2.6.2 Räumlich und zeitlich aufgelöstes Verkehrsaufkommen 57
2.6.3 Zukünftige Entwicklung des Verkehrsaufkommens 59
3 MODELLIERUNGSANSATZ 62
3.1 Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen 62
3.1.1 Grundlegendes Modell für die Berechnung der Gesamtbetriebskosten 62
3.1.2 Anpassungen des grundlegenden Modells für automatisierte Lastkraftwagen 64
3.1.3 Betriebsstrategien und Fahrerkosten automatisierter Lastkraftwagen 68
3.1.4 Untersuchte Einsatzprofile 72
3.2 Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge 77
3.2.1 Fahrzeuge und Fahrzeugparameter 78
3.2.2 Anpassung der Fahrzyklen 79
3.3 Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung 89
3.3.1 Regionale Auflösung und geografische Beschränkung 89
3.3.2 Modellierung des Verkehrsaufkommens in Deutschland 91
3.3.3 Abbildung des Straßennetzwerks 96
3.3.4 Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk 101
4 MODELLIERUNGSERGEBNISSE 104
4.1 Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen 104

4.1.1 Aufschlüsselung der Betriebskosten ... 104
4.1.2 Betriebskostenänderungen für automatisierte Fahrzeuge ... 114
4.1.3 Bestimmung des kosteneffektiven Automatisierungsanteils ... 131
4.1.4 Mögliche Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr ... 141
4.1.5 Bestimmung des Fahrerbedarfs ... 154
4.2 Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge ... 162
4.2.1 Gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr ... 163
4.2.2 Verringerte Maximalgeschwindigkeit für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr ... 166
4.2.3 Gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile für Personenkraftwagen im Autobahnverkehr ... 171
4.2.4 Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr ... 176
4.2.5 Verringerte Maximalgeschwindigkeit im Stadtverkehr ... 178
4.2.6 Verringerte Maximalgeschwindigkeit und Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr ... 179
4.3 Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung ... 183
4.3.1 Modelliertes Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr ... 183
4.3.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Verkehrsaufkommens ... 189
4.3.3 Auslastung des Autobahnnetzwerks ... 202
4.3.4 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Autobahnnetzwerks ... 207
4.3.5 Vergleich der Fahrzeugautomatisierung mit weiteren Maßnahmen zur Verbesserung der Auslastung des Autobahnnetzwerks ... 213
5 Diskussion der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen ... 223
5.1 Betriebskosten und Fahrerbedarf automatisierter Lastkraftwagen ... 223
5.2 Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge ... 225
5.3 Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung ... 226
5.4 Fazit ... 227
6 Zusammenfassung ... 229
Anhang ... 234
Literaturverzeichnis ... 293

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Sechs Stufen des automatisierten Fahrens definiert von der *SAE International*. 5
Abbildung 2-2 Prognosen und Realisierungen der Automatisierungsstufen. 6
Abbildung 2-3 Erhaltene Finanzierungssummen der führenden Unternehmen, die automatisierte Lastkraftwagen entwickeln. 7
Abbildung 2-4 Schematischer Prozess des automatisierten Fahrens. 8
Abbildung 2-5 Anforderung an die Infrastruktur und Potential der Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur. 13
Abbildung 2-6 Unterschiede in der Gesamtfahrleistung für verschiedene Nutzungskonzepte automatisierter Fahrzeuge. 19
Abbildung 2-7 Zusammensetzung der Gesamtbetriebskosten für Lastkraftwagen in Deutschland. 23
Abbildung 2-8 Gesamtbetriebskosten von Sattelzugmaschinen mit batterieelektrischem Antrieb (BEV) und Dieselverbrennungsmotor (ICEV) über eine Betriebsdauer von zehn Jahren für das Jahr 2025 im Fernverkehr in den USA. 24
Abbildung 2-9 Abschätzung der Änderungen der Gesamtbetriebskosten für eine batterieelektrische Sattelzugmaschinen durch eine Stufe 4 und Stufe 5 Automatisierung. 27
Abbildung 2-10 Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf den Energiebedarf. 33
Abbildung 2-11 *WLTC-3b* Fahrzyklus. 34
Abbildung 2-12 *WHVC* Fahrzyklus. 35
Abbildung 2-13 Leistungs- und Energiebedarf des Automatisierungssystems. 40
Abbildung 2-14 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte. 46
Abbildung 2-15 Vergleich der Fundamentaldiagramme für den nicht-automatisierten und den automatisierten Verkehr mit verschiedenen Szenarien für den räumlichen Mindestabstand der Fahrzeuge im Stand. 47
Abbildung 2-16 Verwendete und ermittelte Fahrzeugfolgeabstände der vorgestellten Studien. 52
Abbildung 2-17 Ermittelte Straßenkapazitäten der vorgestellten Studien. 53
Abbildung 3-1 Anpassungen des grundlegenden Betriebskostenmodells für den Vergleich der Betriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen. 65
Abbildung 3-2 Zusammensetzung der Kosten für das Automatisierungssystem. 66
Abbildung 3-3 Methodik für die Berechnung des Energiebedarfs automatisierter Fahrzeuge. 77
Abbildung 3-4 Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus. 81
Abbildung 3-5 Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus mit verringerter Maximalgeschwindigkeit. 83
Abbildung 3-6 Autobahnsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. 84
Abbildung 3-7 Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus ohne Stopps. 86
Abbildung 3-8 Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus mit verringerter Maximalgeschwindigkeit. 87
Abbildung 3-9 Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus ohne Stopps mit verringerter Maximalgeschwindigkeit. 88
Abbildung 3-10 Wöchentliches Fahrprofil des Straßengüterverkehrs. 94
Abbildung 3-11 Verwendetes Python-Skript zum Herunterladen des deutschen Straßennetzwerks aus „OpenStreetMap “. 97
Abbildung 4-1 Betriebskosten batterieelektrischer Fahrzeuge aller untersuchten Einsatzprofile für das Jahr 2023. 107

Abbildung 4-2 Vergleich der Betriebskosten zweier Einsatzprofile batterieelektrischer Fahrzeuge dieser Arbeit für das Jahr 2023 mit Literaturwerten aufgeteilt nach Kostenaspekten. 112
Abbildung 4-3 Betriebskosten eines batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km. 116
Abbildung 4-4 Betriebskosten eines Stufe 4 automatisierten batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km im Betrieb mit Zubringerfahrzeug. 118
Abbildung 4-5 Betriebskosten eines Stufe 4 automatisierten batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km im Betrieb mit Staffelfahrten. 119
Abbildung 4-6 Vergleich der Gesamtbetriebskosten der Betriebsstrategien eines batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km. 121
Abbildung 4-7 Betriebskosten einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km. 123
Abbildung 4-8 Betriebskosten einer Stufe 4 automatisierten batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km im Betrieb mit Staffelfahrten. 124
Abbildung 4-9 Vergleich der Gesamtbetriebskosten der Betriebsstrategien einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km. 127
Abbildung 4-10 Zeitpunkte, ab denen der automatisierte Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb mit und ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung, für alle in dieser Arbeit untersuchten Betriebsstrategien und Einsatzprofile. 128
Abbildung 4-11 Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien für den batterieelektrischen Kastenwagen unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km in Abhängigkeit des Automatisierungsanteils für das Jahr 2023. 134
Abbildung 4-12 Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien für die batterieelektrische Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km in Abhängigkeit des Automatisierungsanteils für das Jahr 2023. 136
Abbildung 4-13 Benötigter Automatisierungsanteil, damit der Stufe 4 Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. 138
Abbildung 4-14 Benötigter Automatisierungsanteil, damit der Stufe 4 Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. 140
Abbildung 4-15 Minimale und maximale Differenz der Stufe 4 Betriebskosten und der Betriebskosten für den nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für das Jahr 2023. 142
Abbildung 4-16 Minimale und maximale Differenz der Stufe 4 Betriebskosten und der Betriebskosten für den nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für das Jahr 2023. 144
Abbildung 4-17 Minimale und maximale jährliche Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch die Stufe 4 Betriebsstrategien verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. 145
Abbildung 4-18 Minimale und maximale jährliche Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch die Stufe 4 Betriebsstrategien verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. 147
Abbildung 4-19 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen

verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. 149
Abbildung 4-20 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. 151
Abbildung 4-21 Vergleich der ermittelten Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen mit Literaturwerten. 152
Abbildung 4-22 Anzahl benötigter Fahrer für die reine Fahrzeit im deutschen Straßengüterverkehr für den nicht-automatisierten Betrieb und den Stufe 4 Betrieb nach Distanzklassen. 159
Abbildung 4-23 Energiebedarf einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine für das Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus. 164
Abbildung 4-24 Energiebedarf eines batterieelektrischen Mittelklasse Personenkraftwagens für das Autobahnsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. 172
Abbildung 4-25 Energiebedarf eines batterieelektrischen Mittelklasse Personenkraftwagens für das Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. 177
Abbildung 4-26 Vergleich der modellierten und vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) statistisch erfassten Transportleistung für das Jahr 2019 nach Distanzklassen. 185
Abbildung 4-27 Vergleich der modellierten und vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) statistisch erfassten Fahrleistung inklusive Leerfahrten für das Jahr 2019 nach Distanzklassen. 187
Abbildung 4-28 Modelliertes durchschnittliches wöchentliches Aufkommen an Lastkraftwagen auf deutschen Autobahnen für das Jahr 2019. 194
Abbildung 4-29 Vergleich des modellierten und gemessenen wöchentlichen Aufkommens an Lastkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. 196
Abbildung 4-30 Vergleich des modellierten und gemessenen stündlichen Aufkommens an Lastkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. 197
Abbildung 4-31 Modelliertes durchschnittliches wöchentliches Aufkommen an Personenkraftwagen auf deutschen Autobahnen für das Jahr 2019. 198
Abbildung 4-32 Vergleich des modellierten und gemessenen wöchentlichen Aufkommens an Personenkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. 199
Abbildung 4-33 Vergleich des modellierten und gemessenen stündlichen Aufkommens an Personenkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. 201
Abbildung 4-34 Straßenkapazität einer Autobahnspur in Abhängigkeit vom Anteil an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen. 204
Abbildung 4-35 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2019. 206
Abbildung 4-36 Straßenkapazitäten einer Autobahnspur in Abhängigkeit vom Anteil an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen für verschiedene Anteile automatisierter Lastkraftwagen. 208
Abbildung 4-37 Straßenkapazitäten einer Autobahnspur in Abhängigkeit vom Anteil an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen für vollständig automatisierte Lastkraftwagen und verschiedene Anteile automatisierter Personenkraftwagen. 211
Abbildung 4-38 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 unter der Annahme, dass alle Fahrzeuge automatisiert sind. 212
Abbildung 4-39 Vergleich der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf die Gesamtlänge der überlasteten Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045. 214

Abbildung 4-40 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 ohne Berücksichtigung des Güterverkehrs. 216
Abbildung 4-41 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 unter der Annahme, dass alle Autobahnabschnitte um eine Spur erweitert werden. 218

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Relevante Kostenaspekte der Fahrerkosten für den nicht-automatisierten Betrieb und die unterschiedlichen Stufe 4 Betriebsstrategien. ... 71
Tabelle 3-2 Unterschiede in der Berechnung der Gesamtbetriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Fahrzeuge. ... 72
Tabelle 3-3 Verwendete Fahrzeug-Einsatzprofile und Unterscheidungsmerkmale. ... 74
Tabelle 3-4 Verwendete Distanzklassen zur Berechnung der Gesamtbetriebskosten. ... 76
Tabelle 3-5 Fahrzeugparameter für den Mittelklasse Personenkraftwagen und die Sattelzugmaschine ... 78
Tabelle 3-6 Komponentenwirkungsgrade für die untersuchten Fahrzeuge ... 78
Tabelle 3-7 Anzahl der NUTS-3 Regionen für Deutschland und die Nachbarstaaten Deutschlands. ... 90
Tabelle 3-8 Jährliche Wachstumsfaktoren für die Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometern nach Verkehrsart. ... 92
Tabelle 3-9 Jährliche Wachstumsfaktoren für die Gütertransportmengen in Tonnen nach Verkehrsart. ... 93
Tabelle 3-10 Verwendete Distanzklassen zur Berechnung des Güterverkehrsaufkommens. ... 96
Tabelle 3-11 „OpenStreetMap“ Straßen-Bezeichnungen und entsprechende deutsche Straßentypen. ... 98
Tabelle 3-12 Vergleich der mit dem Modell in dieser Arbeit und mit Google Maps bestimmten Streckenlänge und benötigten Fahrzeit für Personenkraftwagen für vier beispielhafte Strecken innerhalb Deutschlands. ... 100
Tabelle 4-1 Vergleich der Betriebskosten zweier Einsatzprofile nicht-automatisierter Lastkraftwagen aufgeteilt nach Kostenaspekten für das Jahr 2023. ... 109
Tabelle 4-2 Gesamtfahrzeit und Anzahl benötigter Fahrer im deutschen Straßengüterverkehr für den nicht-automatisierten Betrieb und den Stufe 4 Betrieb nach Distanzklassen. ... 156
Tabelle 4-3 Gesamtfahrzeit und Anzahl benötigter Fahrer im deutschen Straßengüterverkehr für den nicht-automatisierten Betrieb nach Distanzklassen unter Berücksichtigung der Be- und Entladezeiten. ... 158
Tabelle 4-4 Gesamtfahrzeit und Anzahl benötigter Fahrer im deutschen Straßengüterverkehr für den Stufe 4 automatisierten Betrieb nach Distanzklassen unter Berücksichtigung der Be- und Entladezeiten ... 161
Tabelle 4-5 Modellierte Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs für die Jahre 2019, 2030 und 2045. ... 189
Tabelle 4-6 Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks nach Straßentypen. ... 190
Tabelle 4-7 Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs in Deutschland. ... 190
Tabelle 4-8 Modellierte Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs für das Jahr 2019 nach Straßentypen. ... 193
Tabelle 4-9 Gesamtlänge der staugefährdeten Autobahnabschnitte für die Jahre 2019, 2030 und 2045. ... 205

1 Einleitung

Steigende Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr stellen den deutschen Straßenverkehr neben der Erreichung der Treibhausgasneutralität vor zwei zentrale Herausforderungen. Erstens muss die Verkehrsinfrastruktur so geplant und ausgelegt werden, dass zukünftige Verkehrsströme bewältigt werden können. Zweitens muss der Fahrerbedarf im Güterverkehr gedeckt sein, um den Gütertransport weiterhin zu ermöglichen.

Die langfristige Planung der Verkehrsinfrastruktur eines Landes erfordert eine weitreichende Analyse und ihre Umsetzung bindet einen erheblichen Teil des Haushaltsbudgets für die nächsten Jahrzehnte. In Deutschland erfolgt eine solche Planung durch den Bundesverkehrswegeplan. Der letzte Verkehrswegeplan wurde im Jahr 2016 entwickelt und spezifiziert Projekte zum Erhalt und Ausbau der Verkehrsinfrastruktur bis zum Jahr 2030. Das Gesamtinvestitionsvolumen für die im Plan vorgeschlagenen Aus- und Neubau Projekte beträgt 98 Mrd. € [1]. Die Basis für den Verkehrswegeplan bildet dabei die Verkehrsverflechtungsprognose aus dem Jahr 2014. Nach dieser nimmt die Personenverkehrsleistung von 2010 bis 2030 um 12,2 % zu, während die Güterverkehrsleistung im gleichen Zeitraum um 38% zunimmt [2]. Eine neuere Prognose zur Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs stellt die Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022 dar. Diese prognostiziert für den Zeitraum von 2019 bis 2051 einen Anstieg der Verkehrsleistung im Personenverkehr um 13% und im Güterverkehr um 46% [3]. Um dieses Verkehrsaufkommen aufnehmen zu können werden dementsprechend vermutlich weitere Ausbaumaßnahmen notwendig sein.

Im Jahr 2021 waren laut eines Berichts der *International Road Transport Union* in Deutschland 57.000–80.000 Stellen für Lastkraftwagenfahrer unbesetzt, was einem Anteil von 9% entspricht [4]. Für Europa wird der Fahrermangel insgesamt mit einem Anteil von 10% angegeben [4]. Der Fahrermangel hat viele Gründe und ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass das Berufsbild des Lastkraftwagenfahrers unattraktiv ist. Eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen wird von den meisten Transportunternehmen als wichtigster Schritt angesehen, den Fahrermangel zu reduzieren [4]. In Zukunft kann der Fahrermangel auf Grund eines steigenden Güterverkehrsaufkommens, und der Tatsache, dass mehr Fahrer in den Ruhestand gehen als neue Fahrer ausgebildet werden weiter zunehmen [5]. Im Jahr 2028 könnten laut eines weiteren Berichts der *International Road Transport Union* in Europa 17% der Stellen für Lastkraftwagenfahrer unbesetzt sein [5]. In einer Studie des *International Transport Forum* wird der Fahrerbedarf für Europa und die USA für das Jahr 2030 mit 6,4 Millionen Fahrern abgeschätzt, es wird jedoch prognostiziert, dass nur 5,6 Millionen Fahrer verfügbar sein werden, was einem Fahrermangel von 12,5% entspricht [6].

Den beiden Herausforderungen steht mit dem automatisierten Fahren eine Technik entgegen, die eine Abhilfe für beide Herausforderungen verspricht. Im Laufe der nächsten Jahrzehnte wird das automatisierte Fahren im Bereich des Straßenverkehrs vermutlich seine Marktreife erreichen. Vom automatisierten Fahren wird einerseits erwartet, dass es die Auslastung des Straßennetzwerks reduziert, indem es den Verkehrsfluss verbessert und Straßenkapazitäten erhöht. Andererseits wird vom automatisierten Fahren erwartet, dass es den Fahrerbedarf im Straßengüterverkehr reduziert, indem Teile der Fahrtstrecken von Lastkraftwagen ohne menschlichen Fahrer absolviert werden können.

Die potentiellen Auswirkungen des automatisierten Fahrens werden im Rahmen dieser Arbeit tiefergehend analysiert.

In einem ersten Schritt wird dazu in Abschnitt 2.1 der Stand der Technik des automatisierten Fahrens vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die Hürden in der Umsetzung des automatisierten Fahrens analysiert und mögliche Anwendungsfelder automatisierter Fahrzeuge herausgestellt. Die Verfügbarkeit automatisierter Fahrzeuge ist stark von dem jeweiligen Einsatzbereich abhängig. Verschiedene Einsatzbereiche besitzen unterschiedliche Komplexitätsgrade und stellen somit unterschiedliche Anforderungen an die Automatisierung. Der Güterverkehr wird voraussichtlich der erste Anwendungsbereich automatisierter Fahrzeuge sein, weil der Straßengüterverkehr zu großen Teilen im Autobahnverkehr stattfindet und dieser eine einfachere Verkehrsumgebung darstellt als der Stadtverkehr.

In Abschnitt 2.3 werden Studien zum Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf das Mobilitätsverhalten und die Fahrzeugnutzung im Personen- und Güterverkehr vorgestellt. Dabei werden Forschungslücken im Bereich des automatisierten Straßengüterverkehrs herausgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden sollen. Betriebskostenanalysen automatisierter Fahrzeuge im Straßengüterverkehr wurden bisher nur für wenige Einsatzbereiche und mit exogenen Annahmen zu möglichen Einsparungen durch die Automatisierung durchgeführt. Darüber hinaus werden die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Fahrerbedarf bisher ohne eine detaillierte Modellierung der verschiedenen Aufgaben eines Fahrer, die über die reine Fahraufgabe hinausgehen, untersucht. Diese Lücken werden in dieser Arbeit geschlossen und dabei die folgenden Fragen beantwortet:

- Unter welchen Voraussetzungen ist der Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Straßengüterverkehr ökonomisch sinnvoll im Vergleich zum Einsatz nicht-automatisierter Fahrzeuge?
- Welche Betriebsstrategien sind für einen teilautomatisierten Betrieb möglich?
- Welchen Einfluss hat der automatisierte Betrieb auf den Fahrerbedarf im Straßengüterverkehr?

Da die Treibstoffkosten einen erheblichen Teil der Gesamtbetriebskosten ausmachen, wird der Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge in Abschnitt 2.4 gesondert betrachtet und eine existierende Forschungslücke herausgestellt. In bisherigen Studien werden potentielle Einsparungen im Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge durch eine verbrauchsoptimierte Fahrweise untersucht. In den bisherigen Untersuchungen wird jedoch der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems nicht berücksichtigt. Die analysierten Studien zum Leistungsbedarf des Automatisierungssystems zeigen jedoch, dass der benötigte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems heutzutage vermutlich im Bereich einiger kW liegt und daher nicht vernachlässigt werden sollte. Diese Forschungslücke wird in dieser Arbeit geschlossen und dabei die folgenden Fragen beantwortet:

- Welchen Einfluss haben ein geänderter Fahrstil und geänderte Geschwindigkeitsprofile automatisierter Fahrzeuge auf den Gesamtenergiebedarf?
- Wie wirkt sich der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems für verschiedene Fahrzeugtypen und Einsatzbereiche auf den Gesamtenergiebedarf aus?

Zuletzt werden in Abschnitt 2.5 Studien zu den verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge vorgestellt und bestehende Forschungslücken herausgestellt. Viele Studien haben bereits den Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss einzelner Straßenabschnitte untersucht. Dabei wird der Einfluss im Wesentlichen über veränderte

Folgeabstände automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu nicht-automatisierten Fahrzeugen abgebildet. Einige Studien haben auch bereits den verkehrlichen Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf größere Straßennetzwerke untersucht, indem sie den Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf einzelne Straßenabschnitte auf das gesamte Netzwerk übertragen haben. Das Verkehrsaufkommen liegt in diesen Studien allerdings nur in täglicher oder maximal mehrstündiger Auflösung vor. Eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung ist jedoch notwendig, um die Auslastung des Straßennetzwerks adäquat beurteilen und Engstellen identifizieren zu können. Diese Forschungslücke wird in dieser Arbeit geschlossen und dabei die folgenden Fragen beantwortet:

- Wie ist das deutsche Autobahnnetzwerk heutzutage und zukünftig ausgelastet?
- Wo bestehen Engstellen im Autobahnnetzwerk?
- Kann das automatisierte Fahren dazu beitragen Engstellen zu reduzieren?
- Wie verhält sich der verkehrliche Einfluss automatisierter Fahrzeuge gegenüber dem Ausbau des Autobahnnetzwerks?

Der weitere Aufbau dieser Arbeit ist wie folgt: Die Struktur von Kapitel 2 wurde in den vorherigen Ausführungen bereits beschrieben. Den Abschluss von Kapitel 2 bildet Abschnitt 2.6, in welchem die für die Modellierungen in dieser Arbeit benötigten Datenquellen beschrieben werden. Kapitel 3, Kapitel 4 und Kapitel 5 besitzen jeweils dieselbe Struktur. Sie sind aufgeteilt in einen Abschnitt zur Betriebskostenanalyse, einen Abschnitt zur Energiebedarfsanalyse und einen Abschnitt zur Analyse der verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge. In Kapitel 3 wird die Methodik für die Analysen dieser Arbeit beschrieben, die Ergebnisse der Analysen werden anschließend in Kapitel 4 vorgestellt und eine Diskussion der Kernelemente dieser Arbeit erfolgt in Kapitel 5. Bei der Diskussion der Ergebnisse stehen Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des automatisierten Fahrens im Vordergrund. Die Diskussion wird in Abschnitt 5.4 mit einem Fazit zu den ermittelten Ergebnissen und Handlungsempfehlungen abgeschlossen. In Kapitel 6 werden die Arbeit und die ermittelten Kernergebnisse schließlich zusammenfassend dargestellt.

2 Literatur und Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Konzepte sowie die vorhandene Literatur vorgestellt. Die Ausführungen in den einzelnen Abschnitten sind dabei stark an die Veröffentlichung „Automated and Connected Driving: State-of-the-Art and Implications for Future Scenario Analysis“ [7] und die Literaturteile der Veröffentlichunge „Fuel-saving opportunities for automated vehicles: A driving cycle analysis“ [8] und „The Impact of Automated Trucking on the Demand for Human Drivers” [9] angelehnt.

Zuerst wird in Abschnitt 2.1 der Begriff des „automatisierten Fahrens“ definiert sowie aktuelle Anwendungen des automatisierten Fahrens vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die technische Umsetzung und die Anforderungen an automatisierte Fahrzeuge beschrieben und daraus mögliche Anwendungsbereiche für automatisierte Fahrzeuge abgeleitet. Danach wird in Abschnitt 2.3 die bestehende Literatur zu Änderungen des Mobilitätsverhaltens im Personenverkehr und Änderungen der Betriebskosten und -strategien im Güterverkehr durch automatisierte Fahrzeuge zusammenfassend dargestellt und kritisch beleuchtet. Der Einfluss des automatisierten Fahrens auf den Energiebedarf wird anschließend in Abschnitt 2.4 diskutiert. Danach wird in Abschnitt 2.5 die Literatur zum Einfluss des automatisierten Fahrens auf den Verkehrsfluss analysiert. Abschließend werden Prognosen zur Entwicklung des Personen- und Güterverkehrsaufkommens in Abschnitt 2.6 vorgestellt.

2.1 Definition und aktuelle Anwendungen des automatisierten Fahrens

Der Begriff des „automatisierten Fahrens“ wird durch die *SAE*[1] *International* in sechs Stufen[2] unterteilt [10]. Die Stufen reichen von Stufe 0, welche eine komplette Kontrolle durch den menschlichen Fahrer bedeutet, bis hin zu Stufe 5, bei welcher das Fahrzeug sämtliche Fahraufgaben eigenständig durchführen kann. Die Stufen dazwischen verschieben die Fahraufgaben mehr und mehr in Richtung des Fahrzeugs. In Stufe 1 kontrolliert das Fahrzeug entweder die Geschwindigkeit oder die Lenkung eigenständig. In Stufe 2 werden beide Aufgaben an das Fahrzeug abgegeben, der menschliche Fahrer muss die Fahraufgaben aber ständig überwachen und behält die Verantwortung für diese. Diese Bedingung wird mit Stufe 3 ein wenig entspannt. Nun darf der Fahrer in bestimmten Fahrsituationen anderen Aufgaben nachgehen und muss die Fahraufgaben nicht permanent überwachen, solange er innerhalb kurzer Zeit[3] nach einer Benachrichtigung durch das Fahrzeug die Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernehmen kann. Dies ist notwendig für Situationen, die das Fahrzeug nicht eigenständig bewältigen kann. In Stufe 4 kann der Fahrer gänzlich anderen Aufgaben nachgehen und ist nicht mehr verpflichtet, die Kontrolle zu irgendeinem Zeitpunkt übernehmen zu müssen. Gerät das Fahrzeug in eine Situation, die es nicht eigenständig bewältigen kann, wird es in eine sichere Position übergehen, indem es zum Beispiel an den Straßenrand fährt und dort anhält. Die Stufen der Automatisierung sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

[1] Society of Automotive Engineers

[2] Eng: level

[3] Der Zeitraum ist nicht eindeutig definiert. Häufige Auffassung: wenige Sekunden.

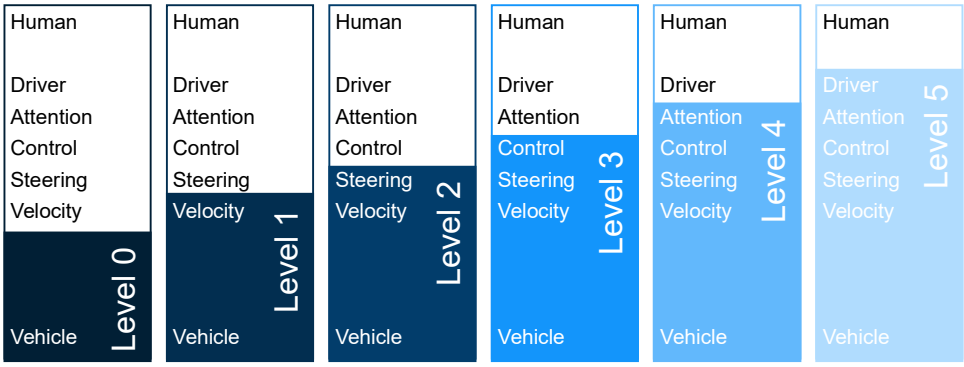


Abbildung 2-1 Sechs Stufen des automatisierten Fahrens definiert von der *SAE International*. Aus [7].

Es gab in den letzten 20 Jahren bereits viele Prognosen dazu, welche Stufe der Automatisierung wann erreicht werden sollte [11]. Ein Überblick über diese Prognosen und die tatsächlichen Realisierungen der Automatisierungsstufen ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Unternehmen wie *Nissan*, *Audi/Nvidia* oder *Ford* haben die Verfügbarkeit von Stufe 5 automatisierten Fahrzeugen für den Anfang der 2020er-Jahre vorhergesagt [12–14]. Diese Ziele wurden offensichtlich weit verfehlt. Aktuelle Prognosen von McKinsey besagen, dass die Stufe 5 automatisierte Fahrzeuge frühestens im Jahr 2030 verfügbar sein werden [15, 16]. Die Prognose des Verkehrsforschers Todd Litman setzt für die Verfügbarkeit Stufe 5 automatisierter Fahrzeuge den Zeitraum von 2030 bis 2040 an [17]. Das automatisierte Fahren wurde seit seiner Einbindung in die *DARPA*[4] *Grand Challenges* in 2004 und 2005 und der *DARPA Urban Challenge* in 2007 [18] stark vorangetrieben. Der damalige Teamleiter des Forschungsteams der Stanford University, Sebastian Thrun, hat im Folgenden das *Google Self-Driving Car Project* gegründet. Dieses wurde im Jahr 2016 ausgegliedert und in *Waymo* umbenannt. Heute ist ein Teammitglied des damaligen Stanford Teams, Dimitri Dolgov, co-CEO von *Waymo*. Eine weitere Person, die bis heute in Verbindung zur Entwicklung automatisierter Fahrzeuge steht, ist Chris Urmson. Der damalige Teamleiter des Teams der Carnegie Mellon University war zwischenzeitlich führend im *Google Self-Driving Car Project* tätig und ist derzeit CEO der *Aurora Innovation Inc.*, einem Unternehmen das automatisierte Lastkraftwagen entwickelt.

Heutzutage haben die meisten Automobilhersteller Fahrassistenzsysteme entwickelt, die einer Stufe 2 Automatisierung entsprechen. *Honda* und *Mercedes-Benz* führen das Feld mit den ersten auf dem Markt verfügbaren Stufe 3 Fahrzeugen an [19, 20]. Währenddessen betreiben die auf das automatisierte Fahren spezialisierten Unternehmen *Cruise* und *Waymo* Flotten von Fahrzeugen mit Stufe 4 Automatisierung in Phoenix, Arizona und San Francisco, Kalifornien [21–23].[5]

[4] Defense Advanced Research Projects Agengy, dt. Behörde für Forschungsprojekte der Verteidigung

[5] Auf Grund eines Unfalls mit Personenschaden in San Francisco hat Cruise den Betrieb seiner Fahrzeuge seit November 2023 pausiert. Im Juni ist der automatisierte Betrieb mit Sicherheitsfahrer in Phoenix, Arizona, wieder angelaufen [24].

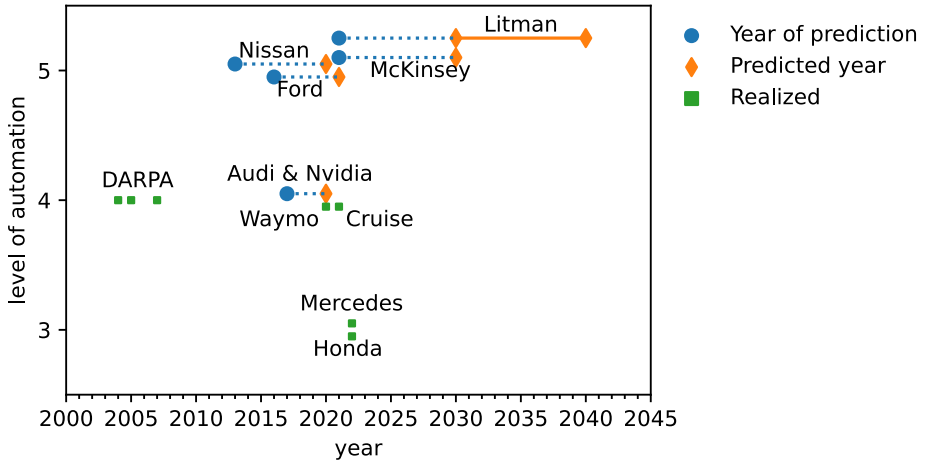


Abbildung 2-2 Prognosen und Realisierungen der Automatisierungsstufen. Referenzen: Audi & Nvidia [13]; Cruise [21, 22]; DARPA [18]; Ford [14]; Honda [20]; Litman [17]; McKinsey [15]; Mercedes [19]; Nissan [12]; Waymo [23]. Aus [7].

Neben diesen Entwicklungen für Fahrzeuge im Personenverkehr hat sich der Fokus in den letzten Jahren verstärkt auch in Richtung des Straßengüterverkehrs bewegt. Dies lässt sich auch an Investments in Unternehmen, die Automatisierungstechnologien für Lastkraftwagen entwickeln, erkennen. Diese sind in den letzten Jahren stark angestiegen. Eine Übersicht über die erhaltene Finanzierung führender Unternehmen ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Mit Abstand die größten Investitionssummen haben bisher *Waymo* und *Aurora* erhalten, gefolgt von *Inceptio Technology*, *TuSimple*, *Plus*, *Embark Trucks*, *Kodiak Robotics* und *Gatik AI* [25–32].

Der Straßengüterverkehr bietet durch große Anteile an Autobahnfahrten, welche eine einfachere Verkehrsumgebung als den Stadtverkehr darstellt, das Potential einfacher automatisiert zu werden [33, 34]. Die Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern sind bei Autobahnfahrten limitiert, da es keine Kreuzungen, Fußgänger oder Radfahrer gibt und alle Fahrzeuge in dieselbe Richtung fahren.

Die Zeitskala für die Verfügbarkeit von automatisierten Lastkraftwagen der Stufe 4, die eigenständig auf Autobahnen fahren können, wird dementsprechend von den Unternehmen schon für die nächsten Jahre angegeben. *Plus* hat bereits ein erstes kommerzielles Produkt ausgeliefert, welches derzeit noch auf einen menschlichen Fahrer angewiesen ist, aber in Zukunft zu einem Stufe 4 automatisierten System weiterentwickelt werden soll und dann keinen menschlichen Fahrer mehr benötigt [35, 36]. Im Juli 2023 haben Testfahrten von *Plus* Fahrzeugen mit menschlichem Fahrer auf öffentlichen Straßen in Deutschland begonnen [37]. Nach einem Bericht aus dem Jahr 2021 plant *TuSimple* Stufe 4 Lastkraftwagen ab 2024 ausliefern zu können, nachdem sie einen ersten Testlauf eines Lastkraftwagens ohne menschlichen Fahrer bereits im Dezember 2021 durchgeführt haben [38]. Bis September 2023 hat das Unternehmen insgesamt 7 Testfahrten auf Straßen in den USA und 11 Fahrten auf Straßen in China ohne menschlichen Fahrer durchgeführt [39]. Ausgehend von ihren Geschäftsplänen aus dem Jahr 2022 möchte *Aurora* bereits erste kommerzielle

Lastkraftwagen der Automatisierungsstufe 4 ab 2023 in ausgewählten US-Bundesstaaten bereitstellen und die Verfügbarkeit über acht Jahre auf alle Bundesstaaten ausweiten [40, 41]. Aktuell finden Testfahrten von *Aurora* in Texas zwischen El Paso und Dallas sowie Dallas und Houston statt [42]. Der aktuelle Geschäftsbericht von August 2023 sieht eine kommerzielle Verfügbarkeit von Stufe 4 automatisierten Lastkraftwagen ohne menschlichen Fahrer für die Pilotstrecke zwischen Dallas und Houston für Ende 2024 vor [42]. Währenddessen hat *Waymo* seine Entwicklungen für automatisierte Lastkraftwagen seit Juli 2023 pausiert und die Geschäftsaktivitäten auf die Entwicklung eines fahrerlosen Taxidienstes fokussiert [43].

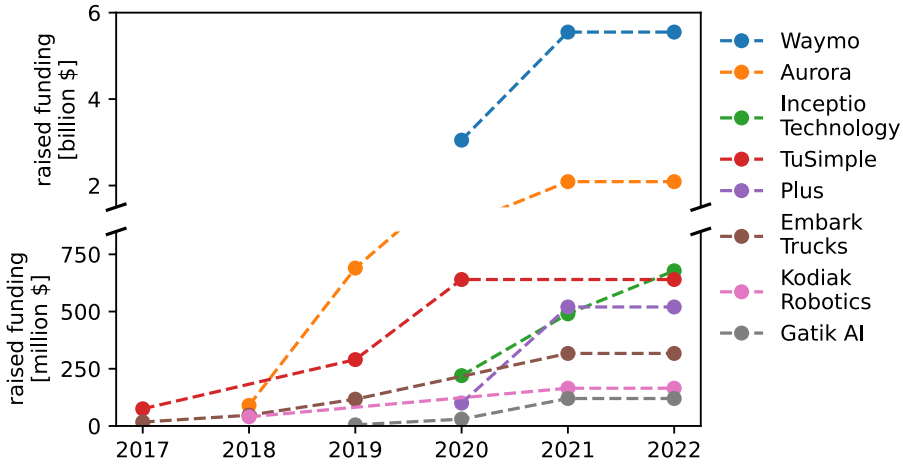


Abbildung 2-3 Erhaltene Finanzierungssummen der führenden Unternehmen, die automatisierte Lastkraftwagen entwickeln. Finanzierungssummen aus [25–32]. Aus [7].

Insgesamt zeigen sich somit sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr deutliche Verzögerungen im Vergleich zu den anfänglichen optimistischen Prognosen für die Umsetzung des automatisierten Fahrens. Die meisten der vorgestellten Prognosen stammen von Unternehmen, die diese Technologie entwickeln und sind dementsprechend weniger als Prognosen und mehr als Ankündigungen einzuordnen, die ein wirtschaftliches Interesse beinhalten. Mit Ankündigungen über eine Umsetzung der Technologie vor den Kontrahenten lassen sich Investoren gewinnen. Diese Ankündigungen sind dementsprechend mit Vorbehalt zu verwenden. Der Zeitraum für die Realisierung der vollständigen Automatisierung wird vermutlich eher im Bereich von 2030 bis 2040 oder später liegen. Weiterhin ist die Umsetzung der Automatisierung anhängig vom Einsatzbereich. Eine Automatisierung des Autobahnverkehrs scheint einer Umfrage von Experten und Beschäftigten im Transportsektor des Vereinigten Königreichs nach einfacher umsetzbar und dementsprechend früher realisierbar als eine Automatisierung des Stadtverkehrs [44]. Dies steht im Kontrast zu der Wahrnehmung des Betriebs automatisierter Personenkraftwagen von *Waymo* und *Cruise* in San Francisco. Der Betrieb dort weist jedoch wie zuvor bereits angesprochen deutliche Probleme bei der Handhabung komplexer Verkehrssituationen auf und steckt noch in einer frühen Entwicklungsphase.

Eine Einordnung möglicher zukünftiger Einsatzbereiche lässt sich durch die Betrachtung der Technische Umsetzung und insbesondere der Herausforderungen in der Entwicklung des automatisierten Fahrens vornehmen. Dies erfolgt im folgenden Abschnitt 2.2.

2.2 Technische Umsetzung des automatisierten Fahrens

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge vorgestellt. Es werden benötigte Komponenten und damit verbundene Kosten sowie die aktuellen Herausforderungen in der Entwicklung dargestellt. Dies dient als Grundlage für die Einschätzung, welche Einsatzbereiche für automatisierte Fahrzeuge ab wann realistisch zu erschließen sind. Zuerst werden in Unterabschnitt 2.2.1 die in automatisierten Fahrzeugen verwendeten Sensoren und Algorithmen vorgestellt. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.2.2 die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und die mögliche Rolle der Infrastruktur diskutiert. Zuletzt wird in Unterabschnitt 2.2.3 eine Einordnung möglicher Einsatzbereiche automatisierter Fahrzeuge vorgenommen.

2.2.1 Sensoren und Algorithmen für das automatisierte Fahren

Automatisiertes Fahren kann als wiederholte Abfolge der vier Aufgaben Erfassen, Wahrnehmen, Planen und Steuern beschrieben werden [45, 46]. Dieser Prozess ist in Abbildung 2-4 dargestellt. Erfassen beinhaltet die Detektion und Vermessung der Umgebung um das Fahrzeug. Wahrnehmen beschreibt die Verarbeitung und Interpretation der erfassten Daten. Planung umfasst die Festlegung der nächsten Schritte des Fahrzeugs zur Erfüllung der Fahraufgabe und zum Erreichen des Zielortes. Zuletzt bezeichnet Steuern die tatsächliche Kontrolle des Fahrzeugs in Form der Lenkung und Beschleunigung.

Im Folgenden werden diese Schritte genauer beschrieben. Da die größten Herausforderungen für das automatisierte Fahren im Bereich der Erfassung und Wahrnehmung liegen, werden diese Prozesse im Folgenden detaillierter dargestellt.

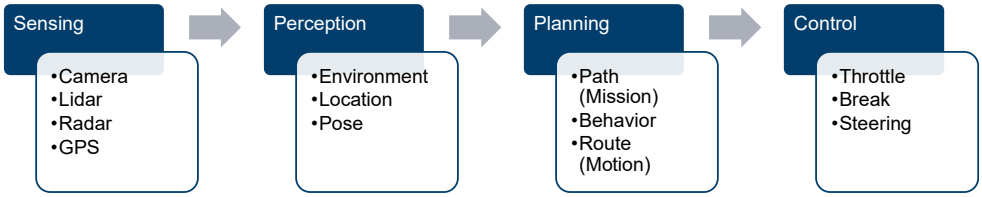


Abbildung 2-4 Schematischer Prozess des automatisierten Fahrens. Aus [7].

Eine Vielzahl an Sensoren bildet die Basis eines jeden automatisierten Fahrzeugs. Die Sensoren erfassen die Umgebung um das Fahrzeug und bestimmen seine Position. Dies ist essentiell für die verlässliche Durchführung der Fahraufgabe in einer für das Fahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer sicheren Weise. Die für automatisierte Fahrzeuge zur Durchführung der hauptsächlichen Fahraufgabe am häufigsten eingesetzten Sensoren sind

Kameras, Lidar-Sensoren[6], Radar-Sensoren[7] sowie inertiale Messeinheiten[8] und Satellitennavigation[9].[10] Alle führenden Entwickler automatisierter Lastkraftwagen verwenden Kombinationen aus Kameras, Radar- und Lidar-Sensoren [47–50]. Basierend auf den Arbeiten von Liu et al. [51] und Yeong et al. [52] werden die Fähigkeiten und Limitationen der Sensoren im Folgenden beschrieben.

Kameras erfassen die Umgebung visuell wie Menschen. Sie werden verwendet, um stationäre und sich bewegende Objekte zu erfassen und zu klassifizieren. Sie haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu anderen Sensoren günstig sind mit ungefähr 500 USD pro Stück [51]. Ihr großer Nachteil liegt jedoch darin, dass sie auf gutes Wetter und Lichtbedingungen angewiesen sind. Ist das Sichtfeld einer Kamera eingeschränkt, liefert sie keine nützlichen Informationen mehr.

Lidar-Sensoren senden Laserimpulse aus und erfassen deren Reflektion. Sie werden genutzt, um Objekte zu detektieren und den Abstand zu diesen zu bestimmen. Die Daten der Lidar-Sensoren werden als Punktwolken[11] erfasst. Lidar-Sensoren besitzen den Vorteil, dass sie die Laserimpulse selbst aussenden und dadurch im Vergleich zu Kameras nicht auf gute Lichtverhältnisse angewiesen sind. Allerdings ist die Leistung der Lidar-Sensoren bei schlechten Wetterbedingungen ebenfalls stark eingeschränkt. Ein weiterer Nachteil von Lidar-Sensoren waren ihre anfänglichen hohen Kosten. Zu Beginn der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge haben Lidar-Sensoren noch bis zu 75.000 USD pro Stück gekostet, bis durch *Waymo* im Jahr 2017 ein Lidar-Sensor für ein Zehntel der Kosten entwickelt wurde [53, 54]. Heutzutage gibt es Lidar-Sensoren bereits ab ca. 1.000 USD pro Stück [54] und zukünftige Kosten könnten bis auf 700 USD pro Stück zurückgehen [55].

Radar-Sensoren senden Radiowellen aus und erfassen deren Reflektionen. Sie werden genutzt, um Abstände von Objekten und deren relative Geschwindigkeit zum Fahrzeug zu bestimmen. Radar-Sensoren haben den Vorteil, dass sie unter allen Licht- und Wetterbedingungen funktionieren. Der Nachteil von Radar-Sensoren besteht jedoch in ihrem geringeren räumlichen Auflösungsvermögen im Vergleich zu Kameras und Lidar-Sensoren. Radar-Sensoren kosten 3.000 USD pro Stück [51].

Um die jeweiligen Limitationen der Sensoren auszugleichen und unter verschiedensten Bedingungen operationsfähig zu bleiben, werden die Messdaten der Sensoren kombiniert[12]. Verschiedene Verfahren für diesen Prozess werden von Feng et al. [56] und Yeong et al. [52] beschrieben. Im Wesentlichen wiegen die Algorithmen zur Kombination der Messdaten der Sensoren Rechenaufwand, Speicherbedarf und Flexibilität in Bezug auf wechselnde Sensorkonfigurationen gegeneinander auf. Durch die Kombination der Sensordaten können automatisierte Fahrzeuge bereits bei schlechten Wetterbedingungen wie starkem Regen und Nebel navigieren, Schnee stellt jedoch weiterhin ein Hindernis dar [57].

---

[6] Eng: light detection and ranging

[7] Eng: radio detection and ranging

[8] Eng: inertial measurement units, IMU. Kombination mehrerer Beschleunigungs- und Drehratensensoren.

[9] Eng: global navigation satellite system, GNSS

[10] Infrarot- und Ultraschallsensoren finden Anwendung für die Detektion des nahen Umfelds des Fahrzeugs und werden beispielsweise für automatisierte Parkfunktionen verwendet. Hier liegt der Fokus jedoch auf den Sensoren, die für die hauptsächliche Fahraufgabe genutzt werden.

[11] Koordinaten der Reflektionen der individuellen Laserimpulse

[12] Eng: sensor fusion

Für die Auswertung der Sensordaten wurde bereits eine Vielzahl an Algorithmen entwickelt. Viele dieser Algorithmen nutzen Methoden des maschinellen Lernens oder neuronale Netzwerke für die Detektion und Klassifizierung von Objekten und anderen Verkehrsteilnehmern.

Die Algorithmen werden mit Hilfe verschiedener Datensätze trainiert, um die korrekte Funktionsweise in verschiedenen Verkehrssituationen und Wetterbedingungen sicherzustellen. Feng et al. [56] haben jedoch angemerkt, dass die in den Trainingsdatensätzen abgebildeten Verkehrssituationen und Wetterbedingungen keine große Variation aufweisen. Zumal auch immer größere Datensätze niemals die gesamte Vielfalt an Verkehrssituationen und Wetterbedingungen, der ein automatisiertes Fahrzeug im Einsatz ausgesetzt sein kann, abdecken kann [58]. Es muss trotzdem sichergestellt sein, dass das Fahrzeug sämtliche Situationen, denen es ausgesetzt sein wird, bewältigen kann. Es ist fragwürdig, ob mit größeren Datensätzen der Umfang der abgedeckten Situationen groß genug werden kann, oder ob eine andere Form der Validierung notwendig sein wird [45].

Neben der zuverlässigen Wahrnehmung der Umgebung, ist die Geschwindigkeit der Wahrnehmung entscheidend. Um die Sicherheit des Fahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten, muss das Fahrzeug schnell auf Veränderungen in seinem Umfeld reagieren können [56, 59, 60]. Dies macht die Entwicklung schneller Algorithmen zur Verarbeitung der Sensordaten notwendig. Lin et al. [59] haben verschiedene Algorithmen für diesen Zweck untersucht. Sie haben die benötigte Rechenzeit der Algorithmen mit einem Schwellenwert von 100 ms verglichen, um sicherzustellen, dass das System mindestens so schnell reagiert wie ein menschlicher Fahrer. Die Autoren haben dabei festgestellt, dass der Prozess der Erkennung und Nachverfolgung von Objekten bis zu 94% der Rechenzeit konventioneller mehrkerniger CPU-Systeme in Anspruch nimmt und solche Systeme nicht in der Lage sind, die Anforderung an die Rechenzeit zu erfüllen. Im Gegensatz dazu können Systeme aus einem Hauptprozessor[13] und drei Grafikprozessoren[14] oder spezialisierte Architekturen aus einem Hauptprozessor und einer programmierbaren Logikgatter-Anordnung[15] die Anforderung an die Rechenzeit erfüllen.

Darüber hinaus entsteht durch das Automatisierungssystem bestehend aus Sensoren und der Recheneinheit ein zusätzlicher Energiebedarf, der gedeckt werden muss. Studien zu diesem Energiebedarf werden in Unterabschnitt 2.4.3 vorgestellt. Im Folgenden wird jedoch in diesem Unterabschnitt die Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge noch zu Ende beschrieben.

Die bisher beschriebenen Sensoren ermöglichen dem Fahrzeug, seine direkte Umgebung wahrzunehmen und somit zu manövrieren, ohne Unfälle zu generieren. Um jedoch die Fahraufgabe durchführen zu können und seine Route zu planen, muss das Fahrzeug wissen, wo es sich befindet und einen Plan des Straßennetzwerks haben, in dem es sich befindet. Die nachfolgenden Ausführungen zur Positionsbestimmung des Fahrzeugs basieren auf der Arbeit von Liu et al. [51].

Automatisierte Fahrzeuge bestimmen ihre Position im Straßennetzwerk durch die Verwendung von Satellitennavigation und Straßenkarten. Allein die Benutzung von Satellitennavigation ist jedoch nicht genau genug. Satellitennavigation besitzt eine typische Genauigkeit von wenigen Metern und eine schlechtere Genauigkeit, wenn das Signal durch Gebäude, Tunnel oder

[13] CPU
[14] GPU
[15] Eng: field programmable gate array, FPGA

ähnliches abgeschirmt wird [46]. Für einen menschlichen Fahrer ist eine solche Genauigkeit ausreichend, für eine automatisiertes Fahrzeug jedoch nicht. Daher muss die Positionsbestimmung für das Fahrzeug noch weiter verbessert werden. Dies kann einerseits mit Hilfe von inertialen Messeinheiten geschehen, welche die Beschleunigung des Fahrzeugs messen und mit Hilfe dieser Information die Position, die über die Satellitennavigation bestimmt wurde, korrigieren [51]. Andererseits können detaillierte Informationen über die Fahrzeugumgebung mit hochaufgelösten Karten[16] verglichen werden, welche nicht nur das Straßennetzwerk, sondern auch Kameraaufnahmen oder Lidar-Sensor-Messdaten der Fahrzeugumgebung beinhalten [51, 61]. Dies entspricht dem Vorgehen eines menschlichen Fahrers, der sich ebenfalls anhand seiner Umgebung orientiert. Das Fahrzeug gleicht seine gemessenen Sensordaten mit denen aus der Karte für seine Umgebung ab und sucht nach der Position mit der größten Übereinstimmung [46].

Die aktuelle Forschung für die Positionsbestimmung fokussiert sich auf die Verwendung hochaufgelöster Karten und im speziellen auf die Fragestellung, welche Informationen in welchem Umfang in den Karten gespeichert werden sollten [61]. Detailliertere Informationen können die Genauigkeit erhöhen, bewirken aber möglicherweise andere Probleme. Erstens benötigen detaillierte Informationen eine große Menge an Speicherplatz. Zweitens sind detaillierte Informationen aufwendig bereitzustellen und dadurch teuer, da Daten für alle Sensoren nicht nur einmal aufgenommen, sondern auch permanent auf dem neusten Stand gehalten werden müssen [61]. Daher muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Praktikabilität für den Umfang der zusätzlichen Informationen gefunden werden.

Die Prozesse der Fahrtplanung und Steuerung werden im Folgenden der Vollständigkeit halber kurz vorgestellt. Die Ausführungen sind bewusst knappgehalten, da diese Prozesse nicht die Hauptschwierigkeiten in der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge darstellen. Für tiefergehende Informationen zu den Prozessen sei auf die Arbeit von Pendleton et al. [46] und darin verwendete Referenzen verwiesen. Die Essenz dieser ist im Folgenden dargestellt.

Der Prozess der Fahrtplanung kann in drei Bereiche unterteilt werden: Aufgaben-, Verhaltens- und Bewegungsplanung[17]. Diese entsprechen lang-, mittel- und kurzfristiger Planung. Die Aufgabenplanung ist damit befasst, einen Pfad von der aktuellen Position zum Zielort zu bestimmen. Dazu werden Daten des Satellitennavigationssystems sowie Straßenkarten verwendet. In einem weiteren Schritt stellt die Verhaltensplanung die Einhaltung der Verkehrsregeln sicher und koordiniert die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern. In dem letzten Schritt verhindert die Bewegungsplanung Kollisionen und Unfälle indem die Fahrzeugbewegung für einzelne Zeitintervalle bestimmt wird.

Basierend auf den Ergebnissen der Planungsprozesse beschleunigt und lenkt das Fahrzeug. Diese Prozesse werden von Regelkreisen gesteuert, welche die aktuelle Geschwindigkeit und Lenkwinkel mit den vorgegebenen abgleichen und daraufhin permanent anpassen.

Nach diesen Ausführungen zur Funktionsweise einzelner automatisierter Fahrzeuge, sollen im folgenden Unterabschnitt 2.2.2 die Anforderungen an die Infrastruktur und das Potential der Kommunikation eines automatisierten Fahrzeugs mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur zur Informationsteilung vorgestellt werden.

[16] Eng: HD maps

[17] Eng: mission, behavioral and motion planning

2.2.2 Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Rolle der Infrastruktur

Damit ein Fahrzeug sicher im Straßenverkehr navigieren kann, muss die Infrastruktur gewisse Mindestanforderungen erfüllen. Straßenmarkierungen, Straßenschilder und Ampeln müssen klar erkennbar sein, um korrekt vom Fahrzeug erfasst werden zu können. Dabei können schon kleine Veränderungen wie ein Aufkleber auf einem Schild dazu führen, dass das Fahrzeug dieses nicht mehr erkennen kann, auch wenn dies für einen menschlichen Fahrer kein Problem darstellt [62, 63]. Schnee kann ebenfalls dazu führen, dass Straßenmarkierungen nicht mehr lesbar sind und somit den Betrieb automatisierter Fahrzeuge einschränken [57].

An automatisierte Fahrzeuge wird der Anspruch gestellt, dass sie eigenständig innerhalb ihrer jeweiligen Einsatzbereiche operieren können. Für sicherheitsrelevante Informationen darf ein automatisiertes Fahrzeug nicht auf andere Fahrzeuge oder die Infrastruktur angewiesen sein. Das Fahrzeug muss eigenständig sicher navigieren können.

Die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur kann jedoch Vorteile sowohl für die individuellen Fahrzeuge als auch für das Verkehrssystem bewirken. Diese Vorteile sind allerdings mit zusätzlichen Kosten für die Kommunikationstechnik verbunden und müssen dementsprechend gegen diese abgewogen werden. Im Folgenden werden die Kommunikationsformen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug[18] Kommunikation, der Fahrzeug-zu-Infrastruktur[19] Kommunikation und der Fahrzeug-zu-Allem[20] Kommunikation vorgestellt.

Fahrzeug-zu-Allem Kommunikation kann durch das Teilen der Sensordaten mehrerer Fahrzeuge und in der Infrastruktur fest installierter Sensoren zu einem besseren Verständnis der Verkehrssituation durch einzelne Fahrzeuge beitragen [46, 64]. Dies könnte im Wesentlichen die Verhaltens- und Bewegungsplanung der Fahrzeuge betreffen und die Verkehrssicherheit insbesondere im Stadtverkehr weiter erhöhen. Hindernisse wie parkende Autos, Stromkästen oder Häuserecken machen es nahezu unmöglich für ein einzelnes Fahrzeug die gesamte Verkehrssituation mit allen Verkehrsteilnehmern von seinem Standort aus vollständig zu erfassen.

Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation kann durch Landmarken und elektronische Signaturen in der Infrastruktur die Positionsbestimmung der Fahrzeuge verbessern. Zusätzlich kann die Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation genutzt werden, um Fahrzeuggeschwindigkeiten im Stadtverkehr an Ampelphasen anzupassen und den Stadtverkehr somit effizienter zu gestalten. Zuletzt können Informationen über die derzeitige und geplante Auslastung der Infrastruktur bereits in der Aufgabenplanung automatisierter Fahrzeuge für die Bestimmung der Route berücksichtigt werden, um das Verkehrsaufkommen effizienter auf das Straßennetzwerk umzulegen [51].

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation kann dazu genutzt werden, Informationen zum aktuellen und geplanten Fahrverhalten zwischen Fahrzeugen zu teilen. Diese Informationen können die Geschwindigkeit, Beschleunigung und geplante Routen beinhalten. Das Teilen dieser Informationen kann die Verhaltensplanung und somit das Fahrverhalten der Fahrzeuge verbessern [46, 65]. Ein Beispiel dafür stellt das sogenannte *Platooning* dar, bei diesem können Fahrzeuge mit verringertem Sicherheitsabstand hintereinanderfahren, weil sie das

[18] Eng: vehicle-to-vehicle, V2V
[19] Eng: vehicle-to-infrastructure, V2I
[20] Eng: vehicle-to-everything, V2X

geplante Fahrverhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs kennen. Studien zum Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge und Platooning werden in Abschnitt 2.4 noch genauer vorgestellt.

Die vorgestellten Kommunikationsformen benötigen eine Standardisierung, welche regions- und länderübergreifend ausgelegt sein muss, damit eine korrekte Funktionsweise der Fahrzeuge sichergestellt werden kann [63].

Insgesamt stellen die verschiedenen Kommunikationsformen mögliche Ergänzungen zum automatisierten Fahren dar, die jedoch für eine erste Umsetzung nicht notwendig sind. Kommunikation kann die Umfelderfassung des Fahrzeugs erweitern sowie zu einem besseren Verkehrsmanagement beitragen. Die Vorteile sind jedoch gegen die Kosten für die Ausstattung von Fahrzeugen und Infrastruktur mit der jeweiligen Kommunikationstechnik abzuwägen. Die Fahrzeugaufgaben sind zusammen mit den Anforderungen an die Infrastruktur und dem Potential der Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation in Abbildung 2-5 zusammengefasst.

In dieser Arbeit wird das Potential vernetzter automatisierter Fahrzeuge nicht weiter betrachtet, sondern der Fokus auf eigenständige automatisierte Fahrzeuge gelegt.

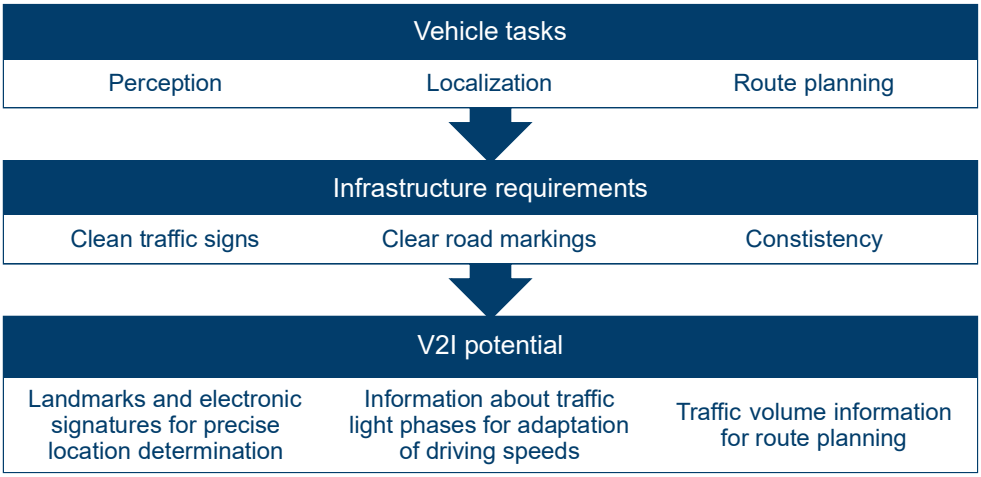


Abbildung 2-5 Anforderung an die Infrastruktur und Potential der Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur. In Anlehnung an [7].

Aus den Ausführungen der beiden vorangegangenen Unterabschnitte 2.2.1 und 2.2.2, sollen im folgenden Unterabschnitt 2.2.3 nun mögliche Anwendungsbereiche für das automatisierte Fahren und ihre jeweiligen Umsetzungszeiträume abgeleitet werden.

2.2.3 Anwendungsbereich und Zeitraum der Umsetzung des automatisierten Fahrens

Aus den Ausführungen zum Stand der Technik automatisierter Fahrzeuge und den aktuellen Herausforderungen in der Entwicklung sollen nun mögliche Einsatzbereiche und damit verbundene Zeithorizonte abgeleitet werden.

Zuerst sei angemerkt, dass die technische Umsetzung des automatisierten Fahrens sehr stark von der jeweiligen Verkehrsumgebung abhängt. Die größten Herausforderungen für das automatisierte Fahren liegen im Bereich der Erfassung der Verkehrsteilnehmer und dem Handling komplexer Verkehrssituationen sowie schlechter Wetterbedingungen. Dies spricht dafür, dass automatisierte Fahrzeuge voraussichtlich zuerst auf Autobahnen zum Einsatz kommen werden, da diese eine Umgebung mit wenig Interaktion und Variation im Vergleich zum Stadtverkehr darstellen. Weiterhin wird sich die Automatisierung anfänglich auf bestimmte Wetterbedingungen beschränken und beispielsweise einen Betrieb bei Schnee ausschließen.

Weiterhin sei angemerkt, dass der Adoptionsprozess des automatisierten Fahrens im Güterverkehr weniger komplex ist als im Personenverkehr. Für den Personenverkehr besitzen persönliche Präferenzen eine große Relevanz. Für den Güterverkehr stehen im Wesentlichen die Verlässlichkeit und die Kosten im Vordergrund. Falls sich Vorteile in den Betriebskosten durch das automatisierte Fahren erzielen lassen, wird es sich schnell im Güterverkehr etablieren [33].

Als erwarteter Zeitrahmen für die Realisierung des Stufe 5 automatisierten Fahrens lässt sich der Zeitraum von 2030 bis 2040 angeben.

Für den Güterverkehr machen Unternehmen, die automatisierte Lastkraftwagen entwickeln, Ankündigungen zur Realisierung eines Stufe 4 automatisierten Betriebs auf Autobahnen innerhalb der nächsten Jahre. Die Umsetzung der letzten Jahre lief allerdings bei weitem nicht so optimistisch, wie zuvor angenommen und bisher finden nur vereinzelt erste Testfahrten auf ausgewählten Routen statt. Bis die Technologie als Produkt am Markt verfügbar ist, wird es dementsprechend noch einige Zeit dauern.

In der Anfangsphase können insbesondere schlechte Wetterbedingungen wie zum Beispiel Schnee einen automatisierten Betrieb einschränken. Für den Fall, dass ein automatisierter Betrieb nicht möglich ist, kann für den Stufe 4 automatisierten Betrieb auf menschliche Fahrer zurückgegriffen werden, die die Lastkraftwagen ansonsten nur abseits der Autobahn fahren. Dies sollte jedoch nur für Transporte genutzt werden, die absolut notwendig sind. Die Einschränkung des automatisierten Betriebs entsteht daher, dass für den automatisierten Betrieb sehr hohe Sicherheitsanforderungen bezüglich der Wahrnehmung der Umgebung und anderer Verkehrsteilnehmer gelten. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen kann unter schlechten Wetterbedingungen nicht garantiert werden. Dabei sei angemerkt, dass ein automatisiertes Fahrzeug durch eine Kombination von Kameras, Radar- und Lidar-Sensoren die Umgebung bei schlechten Wetterverhältnissen vermutlich besser erfassen kann als ein menschlicher Fahrer, der sich ausschließlich auf seine Augen verlassen muss. Der Betrieb mit menschlichen Fahrern ist daher im Vergleich zum automatisierten Betrieb zwar möglich, vermutlich jedoch nicht sicherer. Um den automatisierten Betrieb zukünftig auch bei Schnee zu ermöglichen, werden Sensoren und Sensorkombinationen entwickelt, die eine bessere Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung bei Schnee ermöglichen [57].

Für die Analysen in dieser Arbeit wird angenommen, dass Lastkraftwagen ab 2035 vollständig automatisiert fahren können. Der Fokus der Betriebskostenanalyse in Abschnitt 4.1 liegt jedoch auf dem Stufe 4 automatisierten Betrieb, bei dem Lastkraftwagen auf Autobahnen automatisiert fahren können. Dieser Betrieb wird als bereits heute technisch möglich angenommen. In den Analysen wird keine Marktdurchdringung modelliert, es wird lediglich

das maximale Potential des automatisierten Betriebs bestimmt. Die exakte Datierung der Verfügbarkeit der Technologien ist daher weniger relevant.

Wie bereits diskutiert, wird die Umsetzung im Personenverkehr sehr wahrscheinlich erst nach der Umsetzung im Güterverkehr stattfinden. Die anfänglichen hohen Zusatzkosten für automatisierte Fahrzeuge, die von Elvik [66] im Bereich von 10.000 USD bis 40.000 USD abgeschätzt wurden, machen sie für den Privatbesitz ungeeignet. Die Einführung automatisierter Fahrzeuge im Personenverkehr wird daher vermutlich über Mobilitätsdienste erfolgen. Die Einführung durch Mobilitätsdienste birgt jedoch hohe technische Anforderungen. Der Einsatzbereich von Mobilitätsdiensten ist der Stadtverkehr. Dieser stellt durch seine höhere Komplexität größere Anforderungen an die automatisierten Fahrzeuge als der Autobahnverkehr. Eine Einführung über den Autobahnverkehr, für welchen die Automatisierung einfacher umzusetzen wäre, ist nur im hochpreisigen Marktsegment für Personenkraftwagen vorstellbar. Die Fahrer automatisierter Personenkraftwagen müssten sich auf langen Fahrten nicht mit dem eher langweiligen Fahren auf der Autobahn beschäftigen, sondern könnten anderen Tätigkeiten nachgehen. Wie viele Leute bereit sind, dafür jedoch anfänglich mehrere Tausende Euro zusätzlich zu zahlen, ist fragwürdig.

2.3 Einfluss des automatisierten Fahrens auf das Mobilitätsverhalten und die Fahrzeugnutzung

Im Folgenden werden Studien zum potentiellen Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Fahrzeugnutzung vorgestellt und Forschungslücken, die im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden sollen, identifiziert. In Unterabschnitt 2.3.1 werden zuerst Studien zu den Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Personenverkehr vorgestellt. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.3.2 Studien zu den Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Güterverkehr vorgestellt.

Da automatisierte Fahrzeuge bisher nur in ausgewählten Bereichen eingesetzt werden und noch nicht allgemein verfügbar sind, sind bisherige Studien im Wesentlichen modellbasiert. Für diese Studien werden die untersuchten Regionen, Automatisierungsstufen sowie ihre Annahmen und Methoden rausgestellt.

2.3.1 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Personenverkehr

Einflüsse der Nutzung automatisierter Fahrzeuge werden in dem Übersichtsartikel von Narayan et al. [67] diskutiert. Die Autoren unterteilen die Einflussgebiete dabei in die sieben Kategorien Verkehr und Verkehrssicherheit, Mobilitätsverhalten, Ökonomie, Verkehrsangebot, Landnutzung, Umwelt und Verwaltung.

Der Fokus der nachfolgend vorgestellten Studien liegt dabei auf den Änderungen des Mobilitätsverhaltens im Personenverkehr durch die Verwendung automatisierter Fahrzeuge. Das Mobilitätsverhalten ist zentral für die Veränderungen aller anderen Einflussgebiete.

Automatisierte Fahrzeuge können das Mobilitätsverhalten im Personenverkehr auf zwei Arten verändern.

Erstens können erhöhte Anschaffungskosten für automatisierte Fahrzeuge den privaten Fahrzeugbesitz reduzieren und Mobilitätskonzepte wie Car-Sharing[21] und Ride-Sharing[22] die gemeinschaftliche Fahrzeugnutzung fördern. In diesem Kontext haben Narayanan et al. die Erwartung geäußert, dass die Einführung automatisierter Fahrzeug auf Grund ihrer hohen Anschaffungskosten über Fahrzeugflotten von Mobilitätsdienstleistern erfolgen wird [67].

Zweitens kann die Automatisierung zu einer veränderten Wahrnehmung der Reisezeit führen. Menschliche Fahrer können während der Fahrt anderen Tätigkeiten nachgehen und die Zeit dadurch nutzbar machen. Die Attraktivität der Nutzung eines Verkehrsmittels für eine gewisse Strecke wird in der Verkehrsmodellierung über die Kosten und die Reisezeit abgebildet. Die Reisezeit wird dafür in eine Kostenfunktion[23] übersetzt. Diese Kostenfunktion ist für jede Person individuell und abhängig vom Fahrtzweck und Verkehrsmittel. Durch die Automatisierung und die damit verbundene Möglichkeit zur aktiven Nutzung der Fahrzeit könnten längere Fahrzeiten in Personenkraftwagen an Attraktivität gewinnen. Automatisierte Fahrzeuge könnten somit längere Fahrten begünstigen.

Veränderungen im Personenverkehr durch das Automatisierte Fahren können anhand verschiedener Kriterien untersucht werden. Die Kriterien der im Folgenden vorgestellten Studien sind die Gesamtfahrzeugkilometer[24], der Anteil der verschiedenen Verkehrsmittel an der Gesamtverkehrsleistung[25] und die Anzahl der benötigten Fahrzeuge.

In einer Bestandsaufnahme von Modellierungsstudien aus den Jahren 2013 bis 2018 haben Soteropoulus et al. [68] festgestellt, dass sich die Studien auf hochautomatisierte Fahrzeuge der Stufe 4 und Stufe 5 fokussieren, die in der Lage sind, auch im Stadtverkehr ohne menschlichen Fahrer automatisiert zu fahren. Dies kann dadurch bedingt sein, dass erst durch eine solche Automatisierung neue Mobilitätskonzepte eingeführt und Nutzergruppen erschlossen werden können. Darüber hinaus lassen sich die Studien unterteilen in Studien, die Car- und Ride-Sharing Konzepte für automatisierte Fahrzeuge untersuchen und Studien, die automatisierte Privatfahrzeuge untersuchen.

Generell zeigt sich in Studien zu automatisierten Privatfahrzeugen ein starker Anstieg der Gesamtfahrzeugkilometer. Die Ergebnisse der Studien sind in Abbildung 2-6 auf der linken Seite unter „private vehicles“ zusammengefasst.

Correia und van Arem [69] haben das Mobilitätsverhalten für die Stadt Delft in den Niederlanden mit einem Verkehrsmittelwahlmodell[26] untersucht. Für den Fall, dass nicht-automatisierte private Personenkraftwagen durch automatisierte Personenkraftwagen ersetzt wurden, stieg der Anteil an Fahrten mit Personenkraftwagen von 43,6% auf 47% und die Gesamtfahrzeugkilometer für Personenkraftwagen um 17%. Dieser Anstieg entsteht durch die höhere Verfügbarkeit der Fahrzeuge. Automatisierte Fahrzeuge können nach einer absolvierten Fahrt eines Nutzers eine Leerfahrt ohne Insassen an einen anderen Ort durchführen und dadurch weiteren Nutzern zur Verfügung stehen. Correia und van Arem

[21] Geteilte Fahrzeugnutzung zu unterschiedlichen Zeiten. Beispielsweise nutzt eine Person das Fahrzeug vormittags und eine andere Person nachmittags.

[22] Gemeinsame Fahrzeugnutzung mehrerer Personen zur selben Zeit, wenn sich große Teile der Fahrtstrecke überschneiden.

[23] Eng: Value of travel time, VOT

[24] Eng: vehicle kilometers travelled, VKT

[25] Eng: modal split

[26] Eng: mode choice model

haben in einem weiteren Szenario den Wert der Kostenfunktion der Reisedauer für automatisierte Fahrzeuge auf die Hälfte des Werts für nicht-automatisierte Fahrzeuge reduziert. Dadurch stieg der Anteil an Fahrten mit Personenkraftwagen auf 53,4% und die Gesamtfahrzeugkilometer für Personenkraftwagen um 49%. Der Anstieg der Gesamtfahrzeugkilometer war in allen Szenarien stark von den Leerfahrten automatisierter Fahrzeuge ohne Insassen abhängig. Dies zeigte insbesondere ein letztes Szenario, in dem Fahrzeuge nur in äußeren Stadtgebieten parken konnten. In diesem Szenario stiegen die Gesamtfahrzeugkilometer auf das 2,9-fache des ursprünglichen Wertes, wovon 62% auf Leerfahrten automatisierter Fahrzeuge ohne Insassen zurückzuführen waren.

Auld et al. [70] haben das POLARIS Framework für Verkehrsmodellierungen verwendet, um die Auswirkungen privater Stufe 4 automatisierter Personenkraftwagen in der Stadtregion Chicago zu untersuchen. Für den Fall, dass alle nicht-automatisierten privaten Personenkraftwagen durch automatisierte Personenkraftwagen ersetzt wurden und der Wert der Kostenfunktion der Reisedauer für automatisierte Fahrzeuge auf die Hälfte des Werts für nicht-automatisierte Fahrzeuge reduziert wurde, nahmen die Gesamtfahrzeugkilometer um 43% zu.

In einer weiteren Studie von Auld et al. [71] für die Stadtregion Chicago mit dem POLARIS Framework haben die Autoren zusätzlich einen Anstieg in der Straßenkapazität durch automatisierte Fahrzeuge angenommen. Für den Fall, dass alle nicht-automatisierten privaten Personenkraftwagen durch automatisierte Personenkraftwagen ersetzt wurden und die Straßenkapazität um 77% erhöht wurde, stiegen die Gesamtfahrzeugkilometer um 20,7% und 78,5%, wenn der Wert der Kostenfunktion der Reisedauer für automatisierte Fahrzeuge um 25% und 75% reduziert wurde.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Studien, haben andere Studien angenommen, dass sich hochautomatisierte Fahrzeuge der Stufe 4 und Stufe 5 nicht im Privatbesitz einzelner Personen befinden werden, sondern Bestandteil gemeinschaftlich genutzter Fahrzeugflotten sein werden [67, 68]. Studien zu den Auswirkungen von Car- und Ride-Sharing werden im Folgenden vorgestellt. Neben den Auswirkungen auf die Gesamtfahrzeugkilometer wird dabei zuerst die Fahrzeugauslastung und benötigte Größe der Fahrzeugflotte im Vordergrund stehen.

Konventionelle Personenkraftwagen im Privatbesitz werden durchschnittlich für weniger als vier Stunden am Tag genutzt [62, 63]. Die gemeinschaftliche Nutzung automatisierter Personenkraftwagen hat das Potential diese Auslastung deutlich zu erhöhen.

In einer Studie von Fagnant und Kockelman [72] haben die Autoren für eine fiktive amerikanische Stadtregion mit einer Größe von 10×10 Meilen angenommen, dass 3,5% der Fahrten nicht-automatisierter Personenkraftwagen mit automatisierten Car-Sharing Fahrzeugen stattfinden. Jedes automatisierte Fahrzeug konnte dabei im Durchschnitt die Fahrten von elf nicht-automatisierten Fahrzeugen übernehmen, wenn ausschließlich kurze Fahrten unter 15 Meilen berücksichtigt wurden. Die Wartezeiten der Reisenden betrugen dabei in weniger als 0,5% der Fälle mehr als 5 Minuten, während niemand länger als 15 Minuten warten musste.

In einer Studie von Boesch et al. für die Region Zürich [73] in der Schweiz haben die Autoren ähnliche Resultate gefunden. Für den Fall, dass ein Zehntel der Fahrten nicht-automatisierter privater Personenkraftwagen von automatisierten Car-Sharing Fahrzeugen übernommen und

Wartezeiten von bis zu 10 Minuten akzeptiert wurden, konnte ein automatisiertes Fahrzeug in der Modellierung bis zu zehn nicht-automatisierte Fahrzeuge ersetzen.

In einer Studie von Bischoff und Maciejewski für Berlin [74] in Deutschland ergab sich ein ähnliches Bild. Für automatisierte Car-Sharing Fahrzeuge musste die modellierte Fahrzeugflotte nur einem Zehntel der nicht-automatisierten Fahrzeugflotte entsprechen, um den Bedarf an Fahrten decken zu können, mit Engpässen lediglich zu den Stoßzeiten des Berufsverkehrs am Nachmittag. Die Autoren vermerkten weiterhin, dass die Größe der Fahrzeugflotte weiter reduziert werden kann, wenn längere Wartezeiten zu den Stoßzeiten akzeptiert werden, da die Fahrzeuge im Durchschnitt weiterhin täglich nur für 7,5 Stunden genutzt werden.

Nach diesen Betrachtungen der Größe der Fahrzeugflotte, wird es im Folgenden weiter um die Auswirkungen automatisierter Car- und Ride-Sharing Fahrzeuge auf die Gesamtfahrzeugkilometer gehen. Die Ergebnisse der Studien sind in Abbildung 2-6 zusammengefasst.

In der zuvor erwähnten Studie von Fagnant und Kockelman für eine fiktive amerikanische Stadtregion [72], in welcher ein automatisiertes Car-Sharing Fahrzeug bis zu elf nicht-automatisierte Fahrzeuge ersetzen konnte, stiegen die Gesamtfahrzeugkilometer trotz der kleineren Fahrzeugflotte um 11%. Dies ist auf Leerfahrten der automatisierten Fahrzeuge ohne Insassen zurückzuführen.

In einer Studie von Liu et al. für die Stadtregion Langfang in China [75] nahmen die modellierten Gesamtfahrzeugkilometer um 12% zu, wenn nicht-automatisierte private Personenkraftwagen durch automatisierte Car-Sharing Fahrzeuge ersetzt wurden. Die Nutzung von Ride-Sharing konnte die Gesamtfahrzeugkilometer jedoch reduzieren. Wenn 60% der Car-Sharing Nutzer Ride-Sharing genutzt haben, konnten die Gesamtfahrzeugkilometer um 2% gegenüber dem Referenzszenario ohne automatisierte Fahrzeuge gesenkt werden. Wenn alle Nutzer Ride-Sharing genutzt haben, konnten die Gesamtfahrzeugkilometer sogar um 14% reduziert werden.

Ähnliche Ergebnisse erzielten auch die Modellierungen von Ben-Dor et al. für die Stadtregion Tel-Aviv [76]. Die Autoren haben eine Reduktion der Gesamtfahrzeugkilometer um 20% für die vollständige Nutzung automatisierter Ride-Sharing Fahrzeuge festgestellt.

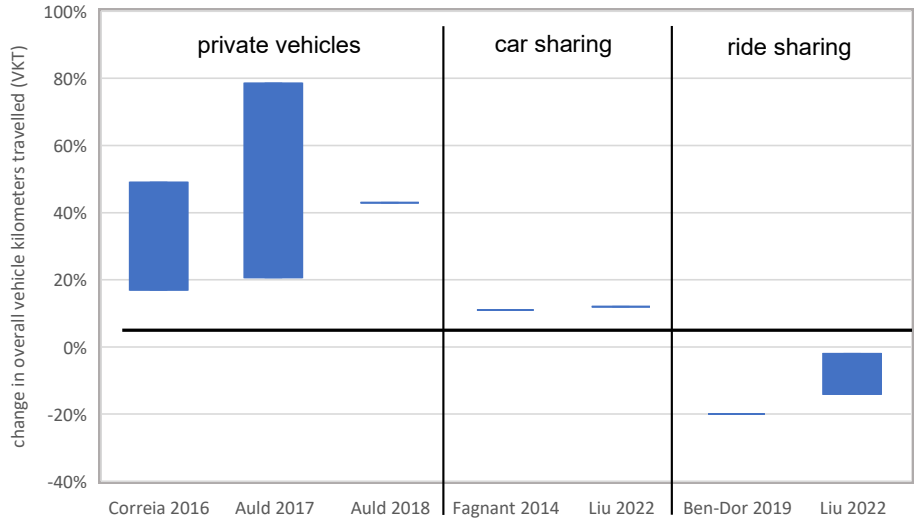


Abbildung 2-6 Unterschiede in der Gesamtfahrleistung für verschiedene Nutzungskonzepte automatisierter Fahrzeuge. Referenzen: Auld 2018 [70], Auld 2017 [71], Ben-Dor 2019 [76], Correia 2016 [69], Fagnant 2014 [72], Liu 2022 [75].

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Gesamtfahrzeugkilometer im Personenverkehr stark von dem Nutzungskonzept abhängt. Die Gesamtfahrzeugkilometer können auf Grund von Leerfahrten sowohl für den Fall der privaten als auch der Car-Sharing Fahrzeuge zunehmen. Die Nutzung von Ride-Sharing kann den Anstieg der Gesamtfahrzeugkilometer durch Leerfahrten jedoch kompensieren und zu einer Reduktion der Gesamtfahrzeugkilometer führen.

Für den Personenverkehr ist zu beachten, dass das Mobilitätsverhalten einzelner Personen stark von ihren jeweiligen sozio-ökonomischen Verhältnissen und Präferenzen abhängt.

Die Ergebnisse der vorgestellten Studien basieren auf Annahmen zum möglichen Nutzungsverhalten automatisierter Fahrzeuge. Eine Einschätzung dieser Annahmen soll im Folgenden anhand der Ergebnissen von Studien zum potentiellen Nutzungsverhalten automatisierter Fahrzeuge erfolgen. Da automatisierte Fahrzeuge jedoch noch nicht verfügbar sind, beschreiben die Studien nicht das realisierte Mobilitätsverhalten[27], sondern das erklärte Mobilitätsverhalten[28] von Personen bezüglich einer hypothetischen Auswahl an Mobilitätsangeboten. Mit diesen Studien lassen sich zwar zukünftige Mobilitätstrends abfragen, jedoch müssen sich diese dann nicht zwangsläufig auch so entwickeln, wenn das Mobilitätsangebot in Zukunft verfügbar ist.

Die starke Reduktion der Werte der Kostenfunktion der Reisedauer in den vorgestellten Studien ist nicht mit den Ergebnissen einer Studie von Yap et al. [77] vereinbar, in welcher die Präferenzen von Personen zur Nutzung automatisierter Fahrzeuge für die erste und letzte

[27] Eng: realized preference
[28] Eng: stated preference

Meile bei Zugfahrten untersucht wurden. In ihrer Studie haben die Autoren festgestellt, dass die meisten Befragten die angenommenen Vorteile der alternativen Nutzung der Zeit in einem automatisierten Fahrzeug wie die Möglichkeiten zu Arbeiten oder zur Handynutzung nicht wahrnehmen würden. Im Gegenteil, der Wert der Kostenfunktion der Reisedauer für automatisierte Fahrzeuge war für die Befragten sogar höher als für nicht-automatisierte Fahrzeuge. Dies steht in deutlichem Kontrast zu den angenommenen Abnahmen der Kostenfunktion der Reisedauer in den Studien von Auld et al. [70] und Correia und van Arem [69] von jeweils 50% und der weiteren Studie von Auld et al. [71] im Bereich von 25% bis 75%.

Rashidi et al. [78] argumentieren ebenfalls, dass in vielen Studien zum potentiellen Einfluss automatisierter Personenkraftwagen der Wert der Kostenfunktion der Reisedauer für automatisierte Personenkraftwagen deutlicher geringer angenommen wird als für nicht-automatisierte Personenkraftwagen, diese Annahme jedoch strittig ist und weitere Szenarien betrachtet werden sollten, in denen sich der Wert nicht verändert oder sogar zunimmt.

Dies ist besonders relevant, da die Ergebnisse der Studien stark von den jeweiligen Annahmen abhängen, wie bereits Soteropoulos et al. [68] angemerkt haben.

Zusätzlich können persönliche Vorbehalte den Einsatz automatisierter Personenkraftwagen einschränken. In einer Präferenzstudie von Haboucha et al. aus dem Jahr 2017 [79] haben die Autoren festgestellt, dass persönliche Vorbehalte gegenüber automatisierten Fahrzeugen großen Einfluss auf die Nutzung automatisierter Fahrzeuge haben können. In der Studie gaben 25% der Befragten an, dass sie automatisierte Fahrzeuge nicht nutzen würden, selbst wenn die Nutzung kostenlos wäre.

In einer weiteren Studie von Elvik aus dem Jahr 2020 [66] zur Zahlungsbereitschaft von Personen für automatisierte Personenkraftwagen stellte der Autor fest, dass 30% der Befragten nicht bereit sind, mehr für ein automatisiertes Fahrzeug der Stufe 3 oder höher zu zahlen als für ein nicht-automatisiertes Fahrzeug. Nur 20% der Befragten waren bereit 10.000 USD oder mehr als Aufpreis zu zahlen. Der Autor nahm an, dass die Zusatzkosten für automatisierte Fahrzeuge im Bereich von 10.000 USD bis 40.000 USD liegen werden und folgerte, dass diese dementsprechend zu teuer für den Privatbesitzt sein werden. Eine Einführung automatisierter Fahrzeuge über Fahrzeugflotten scheint daher naheliegend.

Für die Einordnung der vorgestellten Studien zur Veränderung der Gesamtfahrzeugkilometer bedeutet dies Folgendes:

Die Studienergebnisse zu den Veränderungen der Gesamtfahrzeugkilometer für automatisierte Fahrzeuge im Privatbesitzt sind als Obergrenze anzusehen. In den Studien wurden zwei optimistische Annahmen getroffen: Erstens wurde eine starke Abnahme des Werts der Kostenfunktion der Reisedauer für automatisierte Fahrzeuge angenommen. Zweitens wurde angenommen, dass sich Leute den Privatbesitzt automatisierter Fahrzeuge leisten können.

Wenn die Einführung stattdessen über Car- und Ride-Sharing Konzepte stattfindet, stellen die vorgestellten Studien ein realistischeres Szenario dar. Jedoch besteht auch für diese Nutzung eine erhebliche Unsicherheit.

Die Veränderung der Gesamtfahrzeugkilometer war in diesen Studien stark von der Nutzung von Ride-Sharing Angeboten abhängig. Ohne Ride-Sharing stiegen die Gesamtkilometer um 12%, während sie durch Ride-Sharing um bis zu 20% reduziert werden konnten [72, 75, 76].

Die Nutzung von Ride-Sharing ist jedoch stark von der Bereitschaft abhängig, sich ein Fahrzeug während einer Fahrt mit anderen Personen zu teilen.

Insbesondere durch die COVID-19-Pandemie hat diese Bereitschaft zuletzt abgenommen. Kolarova et al. [80] haben in einer Studie zur Alltagsmobilität festgestellt, dass während der Pandemie Fahrten mit privaten Personenkraftwagen gegenüber dem öffentlichen Verkehr bevorzugt wurden. In einer weiteren Studie von Loa et al. [81], die sich speziell mit der Nutzung von Car-Sharing und Ride-Sharing während der Pandemie befasst hat, haben die Autoren festgestellt, dass beide Konzepte durch Fahrten in privaten Personenkraftwagen ersetzt wurden, weil die Menschen gemeinsam genutzte Umgebungen meiden wollten. Dies ist von besonderer Bedeutung für die zukünftige Entwicklung des Personenverkehrs, weil nach Angaben von Sunder et al. [82], unter Berufung auf eine Umfrage der Deutschen Energie-Agentur GmbH Ende 2020, 61% der befragten Personen an ihrem neuen Mobilitätsverhalten auch nach der Pandemie festhalten wollen.

Insgesamt lässt sich für den Personenverkehr festhalten, dass bereits viele Studien mögliche Veränderungen des Mobilitätsverhaltens modelliert haben. Die Ergebnisse sind jedoch stark von den Annahmen zum jeweiligen Nutzen der Verwendung der Fahrzeuge sowie dem Nutzungskonzept abhängig. Studien zum wahrgenommenen Nutzen und voraussichtlichen Nutzungsverhalten automatisierter Fahrzeuge weichen jedoch teilweise deutlich von den Annahmen der Modellierungen ab.

Änderungen durch automatisierte Fahrzeuge im Personenverkehr werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Wie im vorherigen Unterabschnitt 2.2.3 bereits diskutiert, stellt der Personenverkehr mit einem breiten Spektrum an Verkehrsumgebungen sehr stark unterschiedliche Anforderungen an die Fahrzeugautomatisierung. Eine Einführung automatisierter Fahrzeuge im Stadtverkehr ist auf Grund der höheren Komplexität und Variation der Verkehrsumgebung im Vergleich zum Autobahnverkehr schwieriger zu erreichen. Zudem machen hohe Anschaffungskosten den Privatbesitzt unattraktiv, sodass neue Mobilitätskonzepte wie das Car- und Ride-Sharing an Bedeutung gewinnen könnten. Für die Modellierungen neuer Mobilitätskonzepte müssten Präferenzen abgefragt und Nutzungskonzepte entwickelt werden. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Zur Abbildung des Personenverkehrs in dieser Arbeit wird das im Rahmen der Dissertation von Reul entwickelte Verkehrsnachfragemodell ETHOS.MO|DE verwendet [83]. Dieses Modell wurde anhand demografischer Daten für Deutschland sowie den Resultaten der Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland 2017“ [84] und des „Deutschen Mobilitätspanels“ [85] kalibriert. Das Modell wurde bereits genutzt, um mögliche Einflussfaktoren auf die zukünftige Mobilität in Städten anhand einer fiktiven Stadt, die der deutschen Stadt Köln entsprechen soll, zu untersuchen [86].

2.3.2 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Straßengüterverkehr

Automatisierte Fahrzeuge können dadurch, dass in bestimmten Verkehrsumgebungen auf einen menschlichen Fahrer verzichtet werden kann, Betriebskonzepte im Straßengüterverkehr verändern. Dies kann sowohl Auswirkungen auf die Betriebskosten als auch den Fahrerbedarf

haben. Im Folgenden werden zuerst Studien zum Einfluss auf die Betriebskosten und anschließend Studien zum Einfluss auf den Fahrerbedarf vorgestellt.

Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Gesamtbetriebskosten

Für den Güterverkehr sind die Auswirkungen einer Technologie auf die Gesamtbetriebskosten maßgeblich für den Einsatz dieser Technologie. So haben beispielsweise Ledna et al. [87] das Potential elektrischer Antriebe für den Schwerlastverkehr in den USA und Wietschel et al. [88] das Potential von Oberleitungs-Lastkraftwagen in Deutschland mittels einer Gesamtbetriebskostenanalyse untersucht.

Die Gesamtbetriebskosten von Fahrzeugen im Güterverkehr setzen sich aus den Kosten während des Betriebs wie dem Kraftstoffbedarf, Wartungskosten und Personalkosten sowie den Anschaffungskosten und dem Restwert des Fahrzeugs am Ende der Nutzungsphase zusammen. Die Gesamtbetriebskosten lassen sich zu der Transportleistung des Fahrzeugs während seiner Nutzung ins Verhältnis setzen, sodass sich Kosten für eine Transportleistung in der Form von beispielsweise €/tkm ergeben. Diese Kosten lassen sich dann zwischen verschiedenen Transportmitteln vergleichen, um die günstigste Transportoption zu finden.

Geringere Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen können dazu führen, dass das Straßengüterverkehrsaufkommen zunimmt. In einer Studie von Huang und Kockelman für die USA [89] haben die Autoren mit Hilfe eines multiregionalen Input-Output-Modells[29] Änderungen in der Verkehrsnachfrage für den Güterverkehr unter Annahme verringerter Kosten für den Straßengüterverkehr modelliert. Dabei haben sie festgestellt, dass sich der Gütertransport von anderen Verkehrsträgern hin zum Straßengüterverkehr verschiebt. Eine Reduktion der Gesamtbetriebskosten des Straßengüterverkehrs um 25% erhöht die Tonnenkilometer für diesen um 9,4%, bei einer gleichzeitigen Abnahme der Tonnenkilometer im Schienengüterverkehr um 7,0%.

Bevor Studien zu den geänderten Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen vorgestellt werden, wird zunächst die Zusammensetzung der Betriebskosten nicht-automatisierter Lastkraftwagen vorgestellt.

Nach dem Informationsmaterial des *International Council on Clean Transportation* (ICCT) [90] haben Fahrerkosten mit 32% den größten Teil an den Betriebskosten für den Straßengüterverkehr in Deutschland. Treibstoffkosten folgen direkt darauf mit einem Anteil von 26%. Anschließend folgen Anschaffungskosten, Straßenmaut und Verwaltungskosten mit einem Anteil von jeweils 9%. Mautkosten sind dabei spezifisch für das jeweilige Land, in Deutschland sind die Mautkosten von der Fahrzeuggröße und seit Dezember 2023 von den CO_2-Emissionen der Fahrzeuge abhängig, um einen Anreiz zu schaffen emissionsarme Fahrzeuge einzusetzen [91]. Reparatur -und Wartungskosten folgen mit einem Anteil von 6% und Versicherungskosten mit einem Anteil von 3% [90]. Versicherungskosten sind jedoch einerseits von dem Anschaffungswert des Fahrzeugs [92] und andererseits von der Unfallhistorie des Fahrers abhängig [93]. Die vollständige Kostenaufteilung ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

[29] Eng: random utility-based multiregional input-output model, RUBMRIO

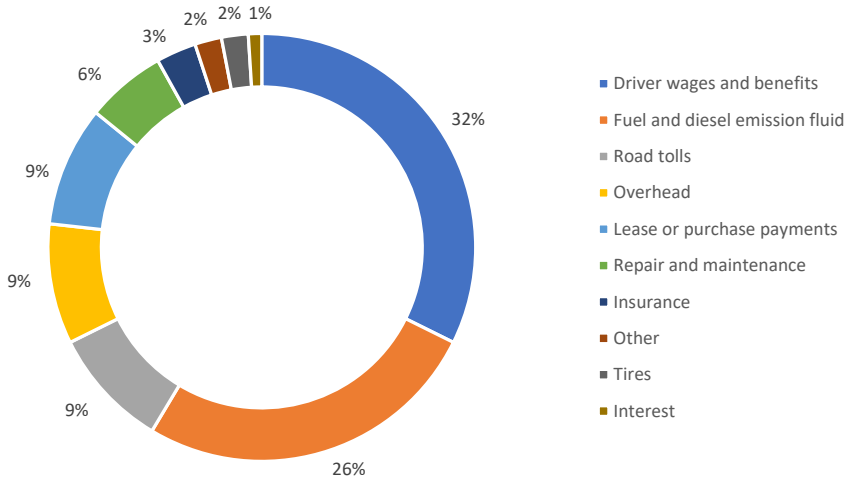


Abbildung 2-7 Zusammensetzung der Gesamtbetriebskosten für Lastkraftwagen in Deutschland. Nach [90].

Burnham et al. haben eine Analyse der Betriebskosten für unterschiedliche Antriebsstränge und Einsatzprofile von Lastkraftwagen in den USA durchgeführt [94]. Für eine Sattelzugmaschine im Fernverkehr haben Fahrerkosten in ihrer Analyse den größten Anteil an den Gesamtbetriebskosten. Für den Fernverkehr nehmen sie 0,79 USD pro Meile als Fahrerkosten an. Damit ergibt sich für ein batterieelektrisches Fahrzeug ein Anteil von 36,7% an den Gesamtbetriebskosten und für ein Fahrzeug mit Dieselverbrennungsmotor einen Anteil von 43,4%. Als zweitgrößter Faktor folgen für das batterieelektrische Fahrzeug die Anschaffungskosten des Fahrzeugs mit 20,2% und danach die Treibstoffkosten mit 15,3%. Im Gegensatz dazu haben für das Fahrzeug mit Dieselverbrennungsmotor die Treibstoffkosten mit 22,4% den zweitgrößten Anteil gefolgt von den Kosten für Reparaturen und Wartungen mit 12,9%. Die Anschaffungskosten folgen erst darauf mit einem Anteil von 9,1%. Eine Übersicht der Kostenzusammenstellung dieser beiden Einsatzprofile ist in Abbildung 2-8 dargestellt.

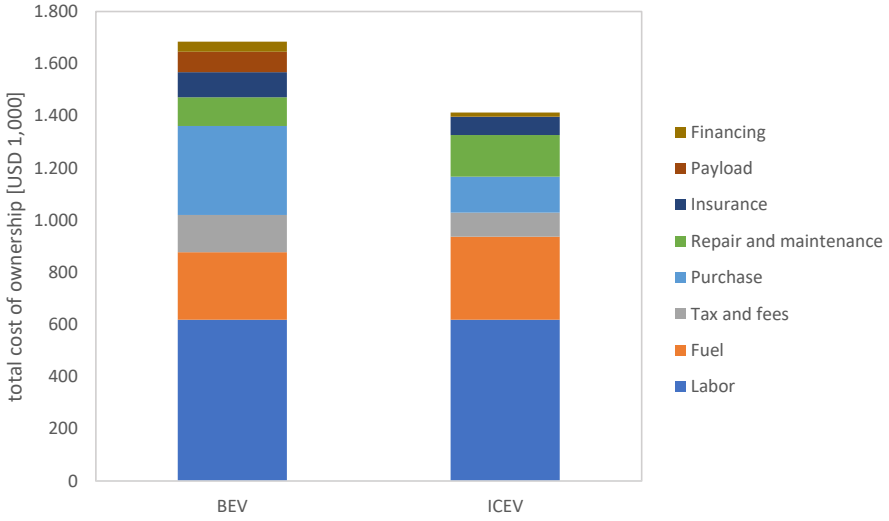


Abbildung 2-8 Gesamtbetriebskosten von Sattelzugmaschinen mit batterieelektrischem Antrieb (BEV) und Dieselverbrennungsmotor (ICEV) über eine Betriebsdauer von zehn Jahren für das Jahr 2025 im Fernverkehr in den USA. Basierend auf [94]. Der Kostenpunkt Payload quantifiziert Einbußen in der maximalen Beladung des Fahrzeugs auf Grund des höheren Fahrzeuggewichts einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine.

Die Zusammensetzung der Betriebskosten und insbesondere der Anteil der Fahrerkosten ist in der Studie von Burnham et al. jedoch stark vom Einsatzprofil abhängig [94]. Fahrerkosten sind für regionale Einsatzprofile deutlich größer und haben auch einen größeren Anteil an den Gesamtbetriebskosten. Dies soll an dieser Stelle für eine erste Einordnung vernachlässigt werden. Für die Diskussion der Betriebskosten der in dieser Arbeit analysierten Einsatzprofile in Unterabschnitt 4.1.1 werden die Unterschiede in den Fahrerkosten jedoch aufgegriffen. Dazu werden auch Daten einer Erhebung der realisierten Betriebskosten von Sattelzugmaschinen des American Transportation Research Institute genutzt [95].

Im Folgenden werden nun Studien zu geänderten Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen vorgestellt. Studien zum Treibstoffbedarf automatisierter Fahrzeuge werden dabei an dieser Stelle ausgelassen.

Der Treibstoffbedarf des Fahrzeugs bietet durch seinen großen Anteil an den Gesamtbetriebskosten eine Möglichkeit für signifikante Kostenänderungen. Durch geänderte Fahrstrategien automatisierter Fahrzeuge kann der Treibstoffbedarf reduziert werden, die mögliche Bandbreite dieser Änderungen ist jedoch sehr groß und hängt von dem Fahrzeugtyp sowie der Fahrweise ab. Zudem steht den Einsparungen im Treibstoffbedarf der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems entgegen. Eine Analyse zu den Veränderungen des Treibstoffbedarfs automatisierter Fahrzeuge stellt einen eigenen Abschnitt der Analysen dieser Arbeit dar. Studien zum Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge werden daher erst in Abschnitt 2.4 vorgestellt und die Ergebnisse der eigenen Modellierungen in Abschnitt 4.2.

Die Studien zu geänderten Betriebskosten beziehen sich im Wesentlichen auf die Anschaffungskosten sowie Fahrerkosten automatisierter Fahrzeuge. Beide haben einen großen Anteil an den Gesamtbetriebskosten und ändern sich offensichtlich für automatisierte Fahrzeuge im Vergleich zu nicht-automatisierten Fahrzeugen.

Die Anschaffungskosten automatisierter Lastkraftwagen sind im Wesentlichen durch die zusätzlichen benötigten Sensoren und das Computersystem höher als für nicht-automatisierte Fahrzeuge. Allerdings gibt es auch Möglichkeiten für Kosteneinsparungen wie bei der Fahrerkabine. Eine Fahrerkabine wird für Stufe 5 automatisierte Fahrzeuge nicht mehr benötigt und kann für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge bereits einfacher gestaltet werden als aktuelle Fahrerkabinen.

In einer Abschätzung der Strategieberatung *Roland Berger* aus dem Jahr 2016 [96] liegen die Zusatzkosten für vollständig automatisierte Lastkraftwagen der Stufe 5 bei 23.400 USD, wovon ungefähr 19.900 USD auf die Software und 3.500 USD auf die Hardware und Sensoren entfallen.

Eine spätere Abschätzung von *Roland Berger* aus dem Jahr 2018 [97] betitelt die Zusatzkosten für teilweise automatisierte Lastkraftwagen der Stufe 4 für das Jahr 2025 mit 30.000 USD, welche sich aus 15.000 USD für die Hardware, 5.000 USD für die Software und 10.000 USD Marge zusammensetzen. Durch Skalierungseffekte sollen die Kosten bis zum Jahr 2030 um die Hälfte abnehmen, mit Anteilen von 10.000 USD, 2.000 USD und 3.000 USD für Hardware, Software und Marge.

Die Zusatzkosten für eine Stufe 4 und Stufe 5 Automatisierung fallen deutlich höher aus als aktuelle Kosten für Abstandregeltempomaten, die im Bereich von 385–880 € pro Fahrzeug liegen [98, 99]. Dies liegt daran, dass für eine Stufe 4 und Stufe 5 Automatisierung deutlich mehr Sensoren verbaut werden müssen und auch das Computersystem deutlich leistungsfähiger sein muss.

Für die vorgestellten Einsatzprofile der Sattelzugmaschinen würden sich die Gesamtbetriebskosten durch die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem nur minimal erhöhen. Die Gesamtbetriebskosten[30] der batterieelektrischen Sattelzugmaschine liegen bei 1,684 Mio. USD und die Gesamtbetriebskosten der Sattelzugmaschine mit Dieselverbrennungsmotor bei 1,412 Mio. USD [94]. Zusatzkosten von 30.000 USD erhöhen die Gesamtbetriebskosten somit ohne Berücksichtigung von Zinseffekten um 1,8–2,1%. Der Anstieg in den Anschaffungskosten würde allerdings große Logistikunternehmen gegenüber kleineren begünstigen, da sich große Unternehmen die höheren Investitionskosten für langfristige Ersparnisse eher leisten können [100].

Die größten Kosteneinsparungen durch automatisierte Lastkraftwagen ergeben sich durch den Wegfall des Fahrers.

Automatisierte Lastkraftwagen werden jedoch nicht von Anfang an die gesamte Strecke automatisiert ohne menschlichen Fahrer fahren können, da unterschiedliche Verkehrsumgebungen, wie zuvor bereits diskutiert, unterschiedlich schwierig zu automatisieren sind. Anfängliche Betriebsstrategien könnten so aussehen, dass die Lastkraftwagen auf Autobahnen ohne menschlichen Fahrer fahren und für die Fahrtanteile abseits der Autobahnen auf einen menschlichen Fahrer zurückgreifen [33, 97].

[30] Anschaffungsjahr 2025, Betriebsdauer 10 Jahre

Das Ausmaß der Ersparnis für eine solche Betriebsstrategie ist stark davon abhängig, welcher Anteil der Gesamtstrecke ohne menschlichen Fahrer zurückgelegt werden kann. Für eine Gesamtstrecke von 800 km, von denen 480 km ohne menschlichen Fahrer zurückgelegt werden, ergab sich in einer Studie von *Roland Berger* [97] eine Gesamtersparnis von 22%. Die Gesamtbetriebskosten können also bereits durch einen Stufe 4 automatisierten Betrieb im Vergleich zu einem nicht-automatisierten Betrieb gesenkt werden.

Für die Gesamtbetriebskosten von Stufe 5 automatisierten Lastkraftwagen wird erwartet, dass die Einsparungen die damit verbundenen Mehrkosten übersteigen.

In einer Studie von Wadud verringern sich die Gesamtbetriebskosten für Lastkraftwagen durch den Stufe 5 automatisierten Betrieb um 15–23% abhängig von der Fahrzeuggröße [101]. Dabei werden Einsparungen im Treibstoffbedarf von 5% und den Fahrerkosten von 60% angenommen. Es wird angenommen, dass 40% der Fahrerkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge entstehen und daher erhalten bleiben.

In einer Studie des International Transport Forum (ITF) wird eine Reduktion der Gesamtbetriebskosten für den Fernverkehr in Höhe von 30% für den Stufe 5 Betrieb als grobe Abschätzung angenommen [6]. Dabei wird konservativ abgeschätzt, dass die Fahrerkosten für den Betrieb um 50% reduziert werden können. Es wird angenommen, dass die Hälfte der Fahrerkosten erhalten bleibt, weil gewisse Fahraufgaben und Aufgaben abseits der Fahraufgaben weiter durch einen menschlichen Fahrer durchgeführt werden müssen. Diese Aufgaben werden jedoch nicht weiter spezifiziert.

In einer Studie von Ghandriz et al. sind die Betriebskosten für Stufe 5 automatisierte Lastkraftwagen um 16%–28% niedriger als für den nicht-automatisierten Betrieb [102]. Fahrerkosten werden dabei komplett eliminiert und durch Kosten für einen Fahrdienstleiter ersetzt, der die Fahrt plant und koordiniert, den Be- und Entladungsprozess überwacht sowie die Fahrzeugkontrolle übernimmt, wenn das Automatisierungssystem ausfällt. Die Kosten für den Fahrdienstleiter inklusive der Kosten für die Kommunikationstechnik und Infrastruktur entsprechen dabei ungefähr 44% der Kosten des Fahrers.

Mit den Annahmen der vorgestellten Studien lässt sich für das vorgestellte Beispiel der batterieelektrischen Sattelzugmaschine eine erste Abschätzung vornehmen, wie sich eine Fahrzeugautomatisierung auf die Gesamtbetriebskosten auswirken könnte. Unter der Annahme, dass die Anschaffungskosten durch die Extrakosten für das Automatisierungssystem um 30.000 USD von 340.000 USD auf 370.000 USD ansteigen und gleichzeitig die Lohnkosten für den Fahrer im Fall der Stufe 5 Automatisierung um 60% reduziert werden, nehmen die Gesamtbetriebskosten insgesamt um 20% ab. Für den Fall der Stufe 4 Automatisierung, für den nur 60% der Strecke automatisiert stattfinden, nehmen die Gesamtbetriebskosten immer noch um 11% ab. Diese Abwägung ist in Abbildung 2-9 zusammenfassend dargestellt.

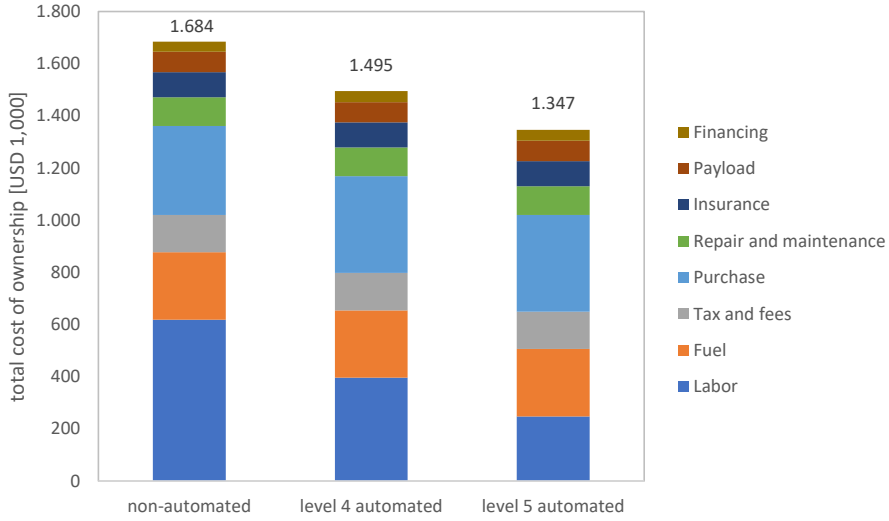


Abbildung 2-9 Abschätzung der Änderungen der Gesamtbetriebskosten für eine batterieelektrische Sattelzugmaschinen durch eine Stufe 4 und Stufe 5 Automatisierung. Basierend auf [94]. Die Betriebskosten beziehen sich auf eine Betriebsdauer von 10 Jahren und das Jahr 2025 als Anschaffungsjahr des Fahrzeugs. Der Kostenpunkt Payload quantifiziert Einbußen in der maximalen Beladung des Fahrzeugs auf Grund des höheren Fahrzeuggewichts einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine.

Kosteneinsparungen können nach dieser einfachen Abschätzung auch bereits für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge, die beispielsweise auf Autobahnen ohne menschlichen Fahrer automatisiert fahren können, erzielt werden. Automatisierte Fahrzeuge könnten dementsprechend schon früh Anwendung im Straßengüterverkehr finden. Für einen solchen Betrieb müssen allerdings Betriebsstrategien entwickelt werden, die den nicht-automatisierten Teil der Fahrt sowie den Übergang zwischen dem automatisierten und nicht-automatisierten Teil der Fahrt beinhalten.

Insgesamt lassen sich für die vorgestellten Studien zwei Lücken herausstellen:

Erstens werden die Annahmen zu Kosteneinsparungen automatisierter Lastkraftwagen in den vorgestellten Studien entweder einheitlich für alle Lastkraftwagen oder jeweils für eine kleine Anzahl verschiedener Einsatzbereiche getroffen. Der Straßengüterverkehr deckt jedoch viele verschiedene Einsatzbereiche von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Anforderungen und Kostenzusammensetzungen ab. Einheitliche Kosteneinsparungen sind daher wenig aussagekräftig.

Zweitens werden die Einsparungspotentiale für automatisierte Fahrzeuge exogen angenommen. Insbesondere Einsparungen in den Fahrerkosten werden teilweise ohne detaillierte Begründung abgeschätzt. Die Fahrerkosten sind jedoch der entscheidende Faktor in den Kosteneinsparungen und eine genaue Betrachtung der Änderungen der Fahrerkosten durch den automatisierten Betrieb ist daher notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die beiden identifizierten Lücken geschlossen werden. Dazu wird eine Betriebskostenanalyse für eine Vielzahl an Einsatzprofilen durchgeführt. Fahrerkosten werden dabei basierend auf der jeweiligen Fahrzeit sowie Be- und Entladezeiten der Fahrzeuge bestimmt.

Die Analyse des Stufe 4 Betriebs stellt einen zentralen Aspekt der Analysen dieser Arbeit dar. Für den Stufe 4 automatisierten Betrieb ergeben sich jeweils bestimmte Anpassungen für die Fahrerkosten. Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Betriebsstrategien für den Stufe 4 Betrieb entwickelt und ihre jeweiligen Gesamtbetriebskosten analysiert.

Die Grundlage für die Analyse der Gesamtbetriebskosten in dieser Arbeit bildet das im Rahmen der Dissertation von Kraus entwickelte Betriebskostenmodell ETHOS.Veh|Cost [103]. Das Modell deckt sämtliche Fahrzeugklassen von Schiffen über Schienenfahrzeuge, Personenkraftwagen, Lastkraftwagen bis hin zu Flugzeugen ab. Das Modell wurde bereits in einer Studie zur Analyse der Kostenentwicklung von Personenkraftwagen genutzt [104]. Für diese Arbeit dient das Modell als Grundlage für die Bestimmung der Gesamtbetriebskosten automatisierter Lastkraftwagen. Dafür wird das Modell so angepasst, dass es die Veränderungen der Gesamtbetriebskosten im Fall einer Automatisierung der Fahrzeuge abdeckt. Die genauen Anpassungen des Modells werden in Abschnitt 3.1 vorgestellt.

Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf den Fahrerbedarf

Neben dem zuvor beschriebenen Einfluss auf die Betriebskosten wird das automatisierte Fahren auch einen erheblichen Einfluss auf den Bedarf an menschlichen Fahrern haben.

Die Arbeits- und Lenkzeiten für Lastkraftwagenfahrer sind in der EU durch zentrale Verordnungen reguliert [105–109]. Dadurch ist auch die maximale Fahrleistung, die diese Fahrer erbringen können, selbst eingeschränkt.

Im Jahr 2021 waren laut eines Berichts der *International Road Transport Union* 425.000 Stellen für Lastkraftwagenfahrer in Europa unbesetzt [4]. Dies entspricht ungefähr einem Anteil von 10% der Stellen [4]. Für Deutschland wird der Fahrermangel in dem Bericht mit einem Anteil von 9% als 57.000–80.000 Fahrer angegeben [4]. In Deutschland waren im Jahr 2019 laut einem Bericht des Bundesamtes für Güterverkehr 572.000 Kraftfahrer sozialversicherungspflichtig registriert [110].

In Zukunft kann der Fahrermangel auf Grund eines steigenden Güterverkehrsaufkommens, und der Tatsache, dass mehr Fahrer in den Ruhestand gehen als neue Fahrer ausgebildet werden, weiter zunehmen [5]. Im Jahr 2028 könnten laut eines weiteren Berichts der *International Road Transport Union* bereits 17% der Stellen für Lastkraftwagenfahrer in Europa unbesetzt sein [5]. In der zuvor bereits vorgestellten Studie des *International Transport Forum* wird für Europa und die USA für das Jahr 2030 von einem Fahrerbedarf von insgesamt 6,4 Millionen Fahrern ausgegangen, es wird jedoch prognostiziert, dass nur 5,6 Millionen Fahrer verfügbar sein werden, was einem Fahrermangel von 12,5% entspricht [6].

Laut Einschätzung der Studie des *International Transport Forum* könnten automatisierte Lastkraftwagen den Fahrerbedarf im Jahr 2030 jedoch bereits um 3,4 bis 4,4 Millionen reduzieren, was einem Anteil von 53–69% entspricht [6]. In der Studie wird davon ausgegangen, dass es sich bei den automatisierten Lastkraftwagen um Stufe 5 Fahrzeuge handelt und dass für den Betrieb der automatisierten Lastkraftwagen überhaupt keine Fahrer

benötigt werden. Die Einsparungen beim Fahrerbedarf entsprechen daher dem Anteil der automatisierten Lastkraftwagen.

Die Studie des *International Transport Forum* vernachlässigt zwei wichtige Aspekte. Erstens sind menschliche Fahrer neben der reinen Fahraufgabe auch für andere Aufgaben wie zum Beispiel die Be- und Entladung der Fahrzeuge zuständig. Zweitens könnte der Einsatzbereich automatisierter Lastkraftwagen zunächst auf Autobahnen beschränkt sein, da automatisierte Lastkraftwagen zunächst im Stufe 4 Betrieb und erst später im Stufe 5 Betrieb verfügbar sein werden. Daher wird für den automatisierten Betrieb anfänglich auch weiterhin noch ein menschlicher Fahrer für gewisse Fahrtanteile erforderlich sein.

Bezüglich der Aufgaben abseits der reinen Fahraufgabe nimmt Wadud [101] im Rahmen einer Gesamtbetriebskostenanalyse an, dass 60% der Arbeitszeit von Fahrern auf die Fahraufgabe und 40% der Arbeitszeit auf andere Aufgaben entfallen.

Der Fahrtanteil und die Anzahl an Fahrern, die von einer Stufe 4 Automatisierung betroffen sein können, werden von Gittleman und Monaco [111] sowie von Mohan und Vaishnav [112] abgeschätzt.

Mohan und Vaishnav haben berechnet, dass 94% der Fahrzeit von Lastkraftwagen im Fernverkehr in den USA durch Stufe 4 automatisierte Lastkraftwagen ohne menschlichen Fahrer stattfinden kann [112]. Die Autoren verwenden dazu Transportdaten aus der Erhebung der Güterströme[31] für die USA. Sie berücksichtigen dabei nur gewerbliche und private Lastkraftwagentransporte mit einer Fahrtdistanz von mehr als 150 Meilen. Für alle Transportfahrten ermitteln sie die Route mit Google Maps und schätzen basierend darauf die Fahrzeiten auf und abseits der Autobahn. Die Autoren nehmen an, dass Stufe 4 automatisierte Lastkraftwagen auf Autobahnen automatisiert fahren können. Weiterhin gehen die Autoren davon aus, dass sich die Rolle des menschlichen Fahrers im Fernverkehr auf die reine Fahraufgabe beschränkt.

Gittleman und Monaco schätzen, dass 18–24% der Lastkraftwagenfahrer in den USA von einer Stufe 4 Automatisierung betroffen sein könnten [111]. Die Autoren treffen jedoch keine Aussage dazu, wie stark der Fahrerbedarf für diesen Anteil reduziert werden könnte. Die Autoren gehen davon aus, dass nur der Fernverkehr von der Stufe 4 Automatisierung betroffen sein wird. Sie schätzen, dass von den insgesamt 1,7 Millionen Fahrern in den USA 300.000–400.000 Fahrer im Fernverkehr tätig sind. Die Autoren betonen, dass der Anteil der Fahrer im Fernverkehr nicht vollständig wegfallen wird, da menschliche Fahrer neben der reinen Fahraufgabe auch weitere Aufgaben übernehmen. In einem automatisierten Betrieb könnte die Be- und Entladung auf andere Personen als den Fahrer übertragen werden, während der Kundenkontakt und die Entgegennahme der Fracht weiterhin Teil der ersten und letzten Meile und somit Aufgaben des Fahrers sein können. Gittleman und Monaco treffen keine Aussage dazu, welcher Anteil an Fernfahrern bei einer Stufe 4 Automatisierung noch benötigt würde.

Insgesamt lässt sich für die vorgestellten Studien die folgende Lücke herausstellen:

Arbeitszeiten des Fahrers abseits der reinen Fahrzeit werden in den vorgestellten Studien als entscheidender Faktor für die mögliche Reduktion des Fahrerbedarfs durch automatisierte Fahrzeuge genannt. Der Anteil dieser Arbeitszeiten wird jedoch entweder exogen abgeschätzt oder nicht weiter spezifiziert.

[31] Eng.: Commodity Flow Survey

Im Rahmen dieser Arbeit soll die identifizierte Lücke geschlossen werden. Dazu werden die Fahrzeiten und Arbeitszeiten abseits der reinen Fahrzeit explizit für einzelne Einsatzprofile und Fahrtdistanzen modelliert. Die Arbeitszeiten abseits der reinen Fahrzeit werden dabei über die angenommenen Be- und Entladezeiten der Fahrzeuge abgebildet.

Die Diskussion der Auswirkungen eines Stufe 4 automatisierten Betriebs auf den Fahrerbedarf erfolgt in dieser Arbeit insbesondere in Anbetracht des beschriebenen vorherrschenden Fahrermangels im Straßengüterverkehr.

In diesem Abschnitt wurden die Forschungslücken in der Literatur identifiziert, welche im Rahmen der Analysen dieser Arbeit geschlossen werden sollen.

Für den Personenverkehr haben bereits viele Studien mögliche Veränderungen des Mobilitätsverhaltens durch die Einführung automatisierter Fahrzeuge modelliert. Die Ergebnisse sind jedoch stark von den Annahmen zum jeweiligen Nutzen der Verwendung der Fahrzeuge sowie dem Nutzungskonzept abhängig. Studien zum wahrgenommenen Nutzen und voraussichtlichen Nutzungsverhalten automatisierter Fahrzeuge weichen jedoch teilweise deutlich von den Annahmen der Modellierungen ab.

Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge im Personenverkehr werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, weil der Personenverkehr mit einem breiten Spektrum an Verkehrsumgebungen sehr unterschiedliche Anforderungen an die Fahrzeugautomatisierung stellt. Für die Modellierungen automatisierter Fahrzeuge im Personenverkehr müssten Nutzungskonzepte entwickelt und Präferenzen abgefragt werden. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Für den Güterverkehr zeigen sich noch deutliche Lücken in den bisherigen Analysen. Einerseits wurden Betriebskostenanalysen automatisierter Fahrzeuge bisher nur für wenige Einsatzbereiche und mit exogenen Annahmen zu möglichen Einsparungen durch die Automatisierung durchgeführt. Darüber hinaus werden die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Fahrerbedarf bisher ohne eine detaillierte Modellierung der verschiedenen Aufgaben eines Fahrer, die über die reine Fahraufgabe hinausgehen, untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die identifizierten Lücken geschlossen werden. Dazu wird eine Betriebskostenanalyse automatisierter Fahrzeuge für eine Vielzahl an Einsatzprofilen durchgeführt. Einsparungen in den Fahrerkosten werden dabei basierend auf den jeweiligen modellierten Fahrzeiten sowie Be- und Entladezeiten der Fahrzeuge bestimmt. Die modellierten Fahrzeiten sowie Be- und Entladezeiten werden weiterhin genutzt, um den Fahrerbedarf für automatisierte Fahrzeuge zu untersuchen.

In dieser Arbeit werden neben Änderungen in den Betriebskosten im Straßengüterverkehr auch die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf den Energiebedarf von Fahrzeugen sowie der verkehrliche Einfluss automatisierter Fahrzeuge analysiert. Studien zum Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss werden in Abschnitt 2.5 vorgestellt. Im folgenden Abschnitt 2.4 werden zuvor noch Studien zu den Änderungen im Energiebedarf von Fahrzeugen durch die Fahrzeugautomatisierung vorgestellt.

2.4 Änderungen im Energiebedarf durch das automatisierte Fahren

Die Fahrzeugautomatisierung kann sowohl den spezifischen Energiebedarf der Fahrzeuge als auch den Gesamtenergiebedarf des Transportsektors beeinflussen. Der spezifische Energiebedarf kann durch eine veränderte Fahrweise und den Energiebedarf des Automatisierungssystems beeinflusst werden. Der Gesamtenergiebedarf kann darüber hinaus durch Veränderungen in der Gesamtfahrleistung, wie im vorherigen Abschnitt 2.3 bereits angesprochen, beeinflusst werden.

In diesem Abschnitt werden daher in einem ersten Schritt in Unterabschnitt 2.4.1 Übersichtsstudien zu den möglichen Gesamtauswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Energiebedarf im Straßenverkehr präsentiert. Dies dient dazu, einen Überblick über die verschiedenen Bereiche für die Änderungen im Energiebedarf zu erhalten. Anschließend wird in Unterabschnitt 2.4.2 der Einfluss des Fahrstils automatisierter Fahrzeuge als Fokusgebiet herausgegriffen und die bestehende Forschungslücke identifiziert. In Unterabschnitt 2.4.3 werden anschließend Studien zum Energiebedarf des Automatisierungssystems vorgestellt. Zuletzt werden in Unterabschnitt 2.4.4 die Grundlagen für die Berechnung des Energiebedarfs von Fahrzeugen in dieser Arbeit vorgestellt.

2.4.1 Übersichtsstudien

Die quantitativen Ergebnisse der Übersichtsstudien sind in Abbildung 2-10 zusammenfassend dargestellt. Die quantitativen Ergebnisse sowie weitere qualitative Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

Lee und Kockelman [113] haben den Einfluss des automatisierten Fahrens auf den Energiebedarf im Personenverkehr für verschiedene Einflussfaktoren untersucht. Der größte Anstieg im Energiebedarf mit 22–46% könnte ihrer Analyse nach durch eine erhöhte Verkehrsleistung entstehen. Der Energiebedarf des Automatisierungssystem könnte weiterhin zu einem 4–15% höheren Energiebedarf führen. Der Einfluss des Fahrstils könnte den Energiebedarf sowohl erhöhen als auch zu einer Abnahme führen und liegt in einem Bereich von -33% bis +15%. Die Nutzung von Ride-Sharing und eine Anpassung der Fahrzeuggröße an den Bedarf[32] kann den Energiebedarf um 5–12% senken. Die Fahrzeug-Interaktionen mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur kann den Energiebedarf um 8–49% senken. Zuletzt bietet die Elektrifizierung der Fahrzeuge das größte Einsparungspotential mit 30–70%. Hier sei angemerkt, dass die Elektrifizierung unabhängig von der Automatisierung der Fahrzeuge ist und somit keinen direkten Einfluss des automatisierten Fahrens darstellt.

Massar et al. [114] haben die Faktoren, die die Treibhausgasemissionen automatisierter Fahrzeuge beeinflussen könnten in positive und negative Faktoren unterteilt. Positive Faktoren umfassen eine ökologische Fahrweise[33], die Anpassung der Fahrzeuggröße an den Bedarf, eine effiziente Streckenführung und Ride-Sharing. Negative Faktoren umfassen ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, höhere Fahrgeschwindigkeiten sowie Leerfahrten von Fahrzeugen. Basierend darauf kommen sie zu dem Schluss, dass der spezifische Energiebedarf pro Fahrtkilometer für automatisierter Fahrzeuge vermutlich abnehmen wird, dieser Effekt jedoch durch einen größeren Anstieg im Verkehrsaufkommen aufgewogen wird, wodurch der Gesamtenergiebedarf wahrscheinlich zunehmen wird.

[32] Eng: vehicle right sizing

[33] Eng: eco-driving

Wadud et al. [115] haben die Faktoren, die den Energiebedarf beeinflussen, in zwei Kategorien unterteilt: Faktoren, die den spezifischen Energiebedarf pro Fahrtkilometer beeinflussen und Faktoren, die das Gesamtverkehrsaufkommen beeinflussen. Die Faktoren, die den spezifischen Energiebedarf beeinflussen, umfassen eine ökologische Fahrweise, Stauvermeidung, Platooning, höhere Fahrgeschwindigkeiten, geringere Beschleunigungen, die Anpassung der Fahrzeuggröße an den Bedarf und die Fahrzeuginnenausstattung. Die Faktoren, die das Gesamtverkehrsaufkommen beeinflussen, umfassen reduzierte Fahrtkosten, neue Nutzergruppen und Änderungen im Mobilitätsangebot durch Car-Sharing und Mobilität auf Abruf[34]. Wadud et al. erwarten, dass der spezifische Energiebedarf bereits bei niedrigen Automatisierungsstufen abnehmen wird. Eine Veränderung des Gesamtverkehrsaufkommens erwarten sie jedoch erst durch eine Stufe 5 Automatisierung. Sie erwarten, dass das Gesamtverkehrsaufkommen zunehmen wird.

Chen et al. [116] nutzen die von Wadud et al. [115] spezifizierten Energiebedarfsfaktoren und koppeln diese mit Markteinführungsszenarien für teilweise und vollständig automatisierte Fahrzeuge im Stadt- und Autobahnverkehr. Das Spektrum der möglichen Veränderungen des Gesamtenergiebedarfs reicht in ihren Analysen von +30% im pessimistischen Fall eines stark erhöhten Gesamtverkehrsaufkommens mit gleichzeitig geringen Reduktionen im spezifischen Energiebedarf pro Kilometer bis hin zu -45% für das optimistischste Szenario.

Roca-Puigròs et al. [117] haben eine Studie zur möglichen Entwicklung des Fahrzeugbestands durchgeführt. Bei der Studie lag der Fokus auf der Fahrzeugelektrifizierung, Fahrzeugautomatisierung und Konzepten für Car- und Ride-Sharing. Sie haben angenommen, dass das Personenverkehrsaufkommen durch neue Nutzergruppen für automatisierte Fahrzeuge um 16,4% bis 21,8% ansteigt. Dieser Anstieg wurde durch Ride-Sharing kompensiert, sodass die Gesamtverkehrsleistung und somit auch der Energiebedarf reduziert wurden. Den größten Einfluss zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs zeigte jedoch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte.

[34] Eng: on-demand mobility

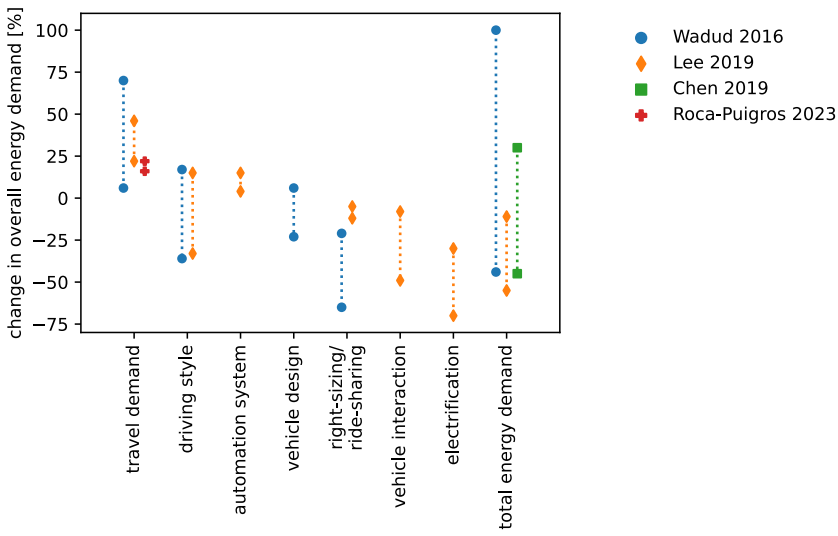


Abbildung 2-10 Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf den Energiebedarf. Referenzen: Chen 2019 [116], Lee 2019 [113], Roca-Puigros 2023 [117], Wadud 2016 [115]. Aus [8].

Aus den vorgestellten Studien ist ersichtlich, dass es noch große Unsicherheiten bezüglich der möglichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Gesamtenergiebedarf des Straßenverkehrs gibt.

Einen wesentlichen Treiber für einen erhöhten Energiebedarf stellt eine erwartete Zunahme des Verkehrsaufkommens dar. Wie in Unterabschnitt 2.3.1 bereits diskutiert, liefern Modellierungsstudien jedoch abhängig von ihren Annahmen ganz unterschiedliche Veränderungen des Personenverkehrsaufkommens durch automatisierte Fahrzeuge. Wesentlich für diese Veränderungen sind die Nutzungskonzepte der Fahrzeuge. Diese sind auch für die hier dargestellten Faktoren des Fahrzeugdesigns und der Anpassung der Fahrzeuggröße an den Bedarf relevant, welche im Wesentlichen zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs beitragen können.

In dieser Arbeit werden Änderungen im Mobilitätsverhalten durch automatisierte Fahrzeuge im Personenverkehr nicht betrachtet. Aus diesem Grund werden auch die zuvor genannten Einflussfaktoren auf den Energiebedarf in dieser Arbeit nicht modelliert.

Dadurch bleiben für die Analysen in dieser Arbeit der Fahrstil automatisierter Fahrzeuge sowie der Energiebedarf des Automatisierungssystems als Einflussfaktoren für einen veränderten Energiebedarf. In den folgenden zwei Unterabschnitten 2.4.2 und 2.4.3 werden daher zuerst Studien zum Einfluss des Fahrstils automatisierter Fahrzeuge auf ihren Energiebedarf und anschließend Studien zum Energiebedarf des Automatisierungssystems vorgestellt.

2.4.2 Einfluss des Fahrstils automatisierter Fahrzeuge

In diesem Unterabschnitt werden Studien zum Einfluss eines angepassten Fahrstils automatisierter Fahrzeuge auf ihren Energiebedarf vorgestellt. Bevor die Studienergebnisse

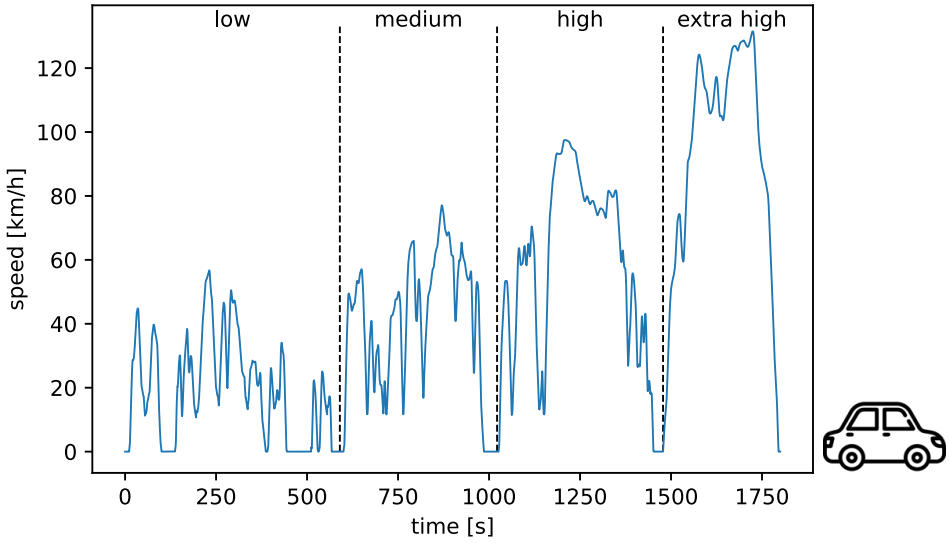
vorgestellt werden, wird jedoch zuvor das Verfahren zur Bestimmung des Kraftstoffbedarfs von Fahrzeugen mittels Fahrzyklen vorgestellt.

Die Bestimmung von Kraftstoffbedarfen und Emissionswerten realer Fahrzeuge erfolgt in Standard-Test-Prozeduren unter Laborbedingungen. Auf einem Prüfstand müssen Fahrzeuge einem vorgeschriebenen Geschwindigkeitsprofil, einem sogenannten Fahrzyklus, folgen. Während der Zeit auf dem Prüfstand werden die Kraftstoffbedarfe und Emissionen der Fahrzeuge erfasst.

Fahrzyklen sollen durchschnittliche Fahrprofile realer Fahrzeuge abbilden. Sie unterscheiden sich daher für unterschiedliche Fahrzeugtypen und Einsatzbereiche. Dadurch lassen sie sich auch verwenden, um Kraftstoffbedarfe von bestehenden sowie erdachten Fahrzeugen zu modellieren.

Für die Modellierungen in dieser Arbeit wird der *WLTC-3b*[35] Fahrzyklus für Personenkraftwagen und der *WHVC*[36] Fahrzyklus für Lastkraftwagen verwenden. Die Daten der Testzyklen wurden von DieselNet [118, 119] heruntergeladen und sind in Abbildung 2-11 und Abbildung 2-12 dargestellt.

Der *WLTC-3b* Fahrzyklus besteht aus vier Abschnitten, welche städtischen, vorstädtischen, ländlichen und Autobahnverkehr abbilden[37]. Der *WHVC* Fahrzyklus besteht aus drei Abschnitten, welche städtischen, ländlichen und Autobahnverkehr abbilden[38].



Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 2-11 *WLTC-3b* Fahrzyklus. Nach [118]. Aus [8].

[35] worldwide harmonized light vehicles test cycle

[36] world harmonized vehicle cycle

[37] Englische Bezeichnung der Abschnitte: „low“, „medium“, „high“ und „extra-high“

[38] Englische Bezeichnung der Abschnitte: „urban“, „rural“ und „motorway“

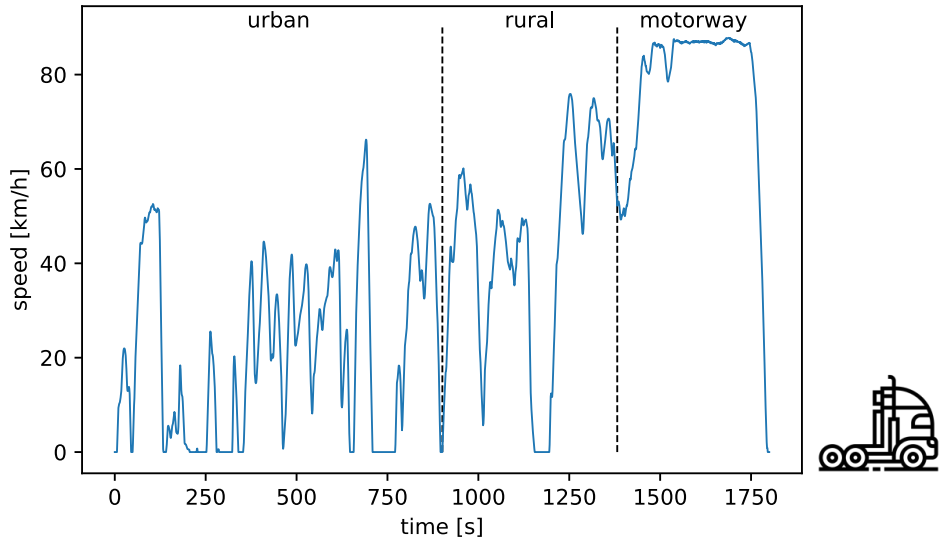


Abbildung 2-12 *WHVC* Fahrzyklus. Nach [119]. Aus [8].

Im Folgenden werden nun die Annahmen und Ergebnisse verschiedener Studien zum Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge vorgestellt.

Eine Fahrstrategie, die insbesondere für den Verkehr von Lastkraftwagen bereits intensiv untersucht wurde, ist das Platooning. Beim Platooning folgen Fahrzeuge einander mit verringertem Sicherheitsabstand, um den Luftwiderstand und damit auch den Treibstoffbedarf zu reduzieren. Platooning wurde bereits intensiv untersucht, da schon niedrige Automatisierungsstufen wie das automatisierte Abstandhalten ausreichen, um geringere Sicherheitsabstände zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten zu können, als es für menschliche Fahrer möglich wäre, ohne ein Sicherheitsrisiko einzugehen [96].

Tsugawa [120] sowie Slowik und Sharpe [100] haben die Ergebnisse mehrerer Platooning Experimente zusammengefasst. Aus ihren Berichten geht hervor, dass der Gesamttreibstoffbedarf von zwei Fahrzeugen, die einen Platoon bilden, abhängig von Geschwindigkeit, Abstand und Beladung der Fahrzeuge um 4–15% abnehmen kann.

Die Umsetzung des Platoonings im Fahrbetrieb benötigt allerdings eine Abstimmung zwischen den Fahrzeugen und nicht alle Strecken eignen sich dafür. In einer Studie von Muratori et al. [121] haben die Autoren angenommen, dass eine Mindestgeschwindigkeit von 80 km/h über einen Zeitraum von mindestens 15 Minuten notwendig ist, um in einem Platoon fahren zu können. Unter diesen Annahmen gaben sie an, dass sich 66% der Fahrzeugkilometer von Lastkraftwagen in den USA für Platooning eignen.

Werden die Resultate der Studien zu den Treibstoffeinsparungen durch Platooning und der Umsetzbarkeit von Platooning im realen Verkehr kombiniert, so kann der Treibstoffbedarf für Lastkraftwagen um 2,6% bis 9,9% reduziert werden.

Weiterhin wurde der Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge in Modellierungsstudien betrachtet.

Liu et al. [122] haben in ihrer Modellierung angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge weniger stark beschleunigen als nicht-automatisierte Fahrzeuge und ihre Geschwindigkeitsprofile dementsprechend kleinere Schwankungen aufweisen. Sie haben die Standardfahrzyklen verwendet und diese für automatisierte Fahrzeuge mit Polynomzügen geglättet und die Emissionen dieser Fahrzyklen mit Hilfe des Kraftfahrzeug-Emissions-Simulators *MOVES* der *United States Environmental Protection Agency* [123] bestimmt.

Insbesondere für Geschwindigkeitsprofile mit starken Beschleunigungsphasen konnten die Emissionen durch die Glättung deutlich reduziert werden [122]. Die Veränderungen der CO_2-Emissionen sind ein guter Indikator für die Änderungen des Energiebedarfs, da für Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren die CO_2-Emissionen direkt proportional zum Kraftstoffbedarf sind [124]. Die mittlere Reduktion der CO_2-Emissionen für verschiedene Fahrzeugtypen und Fahrzyklen basierend auf realen Fahrten in Austin, Texas betrug 6,6% [122]. Für den Autobahnverkehr ist die mögliche Reduktion viel geringer. Für Personenkraftwagen, die einem Standard-Autobahnfahrzyklus[39] folgen, nahmen die CO_2-Emissionen um 1,77% für ein Fahrzeug mit Benzinmotor und 1,82% für ein Fahrzeug mit Dieselmotor ab [122].

Bray und Cebon [125] haben den mechanischen Energiebedarf eines 29,5 t schweren Lastkraftwagens mittels physikalischer Bewegungsgleichungen für einen vereinfachten Start-Stopp Fahrzyklus[40] berechnet. Die Autoren haben festgestellt, dass durch eine Geschwindigkeitsreduktion von Lastkraftwagen auf Autobahnen ein erheblicher Anteil des Treibstoffbedarfs eingespart werden kann. Eine Reduktion der Richtgeschwindigkeit von 90 km/h auf 70 km/h hat den mechanischen Energiebedarf um 26% reduziert.

Darüber hinaus haben Bray und Cebon [125] die Gesamtbetriebskosten eines solchen Betriebs untersucht. Dabei haben die Autoren festgestellt, dass die Geschwindigkeitsreduktion für automatisierte Lastkraftwagen ökonomisch sinnvoll ist, jedoch nicht für Lastkraftwagen mit menschlichem Fahrer. Die Einsparungen im Treibstoffbedarf wurden für den Lastkraftwagen mit menschlichem Fahrer durch die zusätzlichen Lohnkosten für den Fahrer übertroffen. Für den automatisierten Lastkraftwagen wurden die Lohnkosten vollständig ignoriert, sodass sich die Gesamteinsparungen aus den Einsparungen im Treibstoffbedarf ergeben.

Für die vorgestellten Studien lässt sich die folgende Lücke identifizieren:

Die vorgestellten Modellierungsstudien nehmen Anpassungen an den Fahrzyklen vor, um das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge abzubilden. Beide Studien vernachlässigen dabei jedoch den Energiebedarf des Automatisierungssystems [122, 125]. Wie in der Übersichtsstudie von Lee und Kockelman [113] angemerkt, kann der Energiebedarf des Automatisierungssystems den Gesamtenergiebedarf jedoch um 4–15% erhöhen. Dies entspricht den Einsparungen, die in bisherigen Platooning-Studien erreicht werden konnten [100, 120] und übertrifft die von Liu et al. [122] bestimmten Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise. Die Auswirkungen des Energiebedarfs des Automatisierungssystems sind dabei jedoch vermutlich stark von dem jeweiligen Fahrzeugtypen und Einsatzbereich abhängig.

[39] Eng: highway fuel economy test driving schedule, HWFET

[40] Für den vereinfachten Start-Stopp Fahrzyklus startet das Fahrzeug im Stand, beschleunigt auf die Zielgeschwindigkeit, hält diese für eine gewisse Dauer und bremst anschließend wieder bis zum Stand ab.

Um diese Lücke zu schließen, findet in dieser Arbeit eine Modellierung des Energiebedarfs automatisierter Personen- und Lastkraftwagen in verschiedenen Verkehrsumgebungen inklusive einer Modellierung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems statt. Die Modellierung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems erfolgt über die benötigte Fahrzeit für einen Streckenabschnitt und Annahmen zum Leistungsbedarf des Automatisierungssystems basierend auf Literaturdaten.

Im folgenden Unterabschnitt 2.4.3 werden Studien zum Energie- und Leistungsbedarf des Automatisierungssystems vorgestellt.

2.4.3 Energiebedarf des Automatisierungssystems

Dieser Unterabschnitt stellt die Ergebnisse verschiedener Studien zum Energie- und Leistungsbedarf des Automatisierungssystems sowie die von anderen Studien für den Energiebedarf angenommenen Werte dar. Die Darstellungen in diesem Unterabschnitt dienen der Abschätzung des Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems für die Modellierungen in dieser Arbeit.

Lin et al. [59] haben den Energiebedarf des Automatisierungssystems basierend auf der benötigten Rechenleistung abgeschätzt. Dazu haben sie verschiedene Hardware-Zusammenstellungen in Bezug auf ihre Fähigkeit, typische Aufgaben automatisierter Fahrzeuge zu erfüllen, getestet. Die Abschätzung von Lin et al. enthält neben dem Energiebedarf der Recheneinheiten den Energiebedarf für die Speicher sowie die Kühlung des Systems. Systembeschreibungen erfolgen im Folgenden ohne explizite Nennung von Speicher und Kühlung, diese sind jedoch im Energiebedarf berücksichtigt. Der Energiebedarf reicht von 500 W für ein System aus einem Hauptprozessor[41] und einer programmierbaren Logikgatter-Anordnung[42] bis zu einem Energiebedarf von 1800 W für ein System aus einem Hauptprozessor und drei Grafikprozessoren[43]. Lin et al. haben angemerkt, dass der Energiebedarf für das Automatisierungssystem insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge von hoher Relevanz ist. Ein zusätzlicher Energiebedarf von 1800 W würde ihrer Schätzung zufolge die Reichweite eines batterieelektrischen Chevrolet Bolt um bis zu 11,5% reduzieren. Standard-Grafikprozessoren sind ihrer Meinung nach ungeeignet, da sie zwar die Anforderungen der benötigten Rechengeschwindigkeit erfüllen, jedoch einen deutlich höheren Energiebedarf haben als auf die Anforderungen automatisierter Fahrzeuge spezialisierte Hardware wie programmierbare Logikgatter-Anordnungen.

Gawron et al. [126] haben einen deutlich geringeren Energiebedarf angenommen. Sie nahmen an, dass das Computersystem aus zwei *Nvidia Drive PX2* mit einem Strombedarf von jeweils 96 W besteht und die Sensoren sowie die Kommunikationstechnik des Fahrzeugs weitere 48 W benötigen. Mit diesen Annahmen haben sie berechnet, dass der Energiebedarf eines batterieelektrischen Fahrzeugs durch das Automatisierungssystem um 2,2 kWh/100km ansteigt, wovon 41% auf das Computersystem, 18% auf die Sensoren und 9% auf die Kommunikationstechnik entfallen. Der restliche zusätzliche Energiebedarf ist mechanischer Energiebedarf durch zusätzliches Gewicht und zusätzlichen Luftwiderstand durch das

[41] CPU
[42] Eng: field programmable gate array, FPGA
[43] GPU

Automatisierungssystem. Für einen *2015 Ford Focus Electric* haben sie ermittelt, dass der Energiebedarf über die gesamte Lebensdauer inklusive Herstellung mit einer Gesamtfahrleistung von 257.500 km[44] über 12 Jahre durch das Automatisierungssystem um 3,8% zunimmt, sofern keine Energieeinsparung durch eine effizientere Fahrweise angenommen wird.

Diese Berechnung von Gawron et al. [126] haben Lee und Kockelman [113] als untere Grenze für ihre Abschätzung des zusätzlichen Energiebedarfs des Automatisierungssystems gewählt. Um die obere Grenze abzuschätzen, haben sie einen Strombedarf von 1000 W für das Computersystem angenommen, was den Energiebedarf des Fahrzeugs um 15% erhöht. Sie begründen die Wahl ihrer Obergrenze damit, dass dies der Leistung eines hochleistungs-Standrechners entspricht.

Liu et al. [127] haben den Energiebedarf für das Automatisierungssystem bezüglich der verwendeten Sensoren, Kommunikationstechnik und des Computersystems untersucht. Für das Computersystem haben sie ein *Nvidia Drive Pegasus* System mit einem Strombedarf von 450 W gewählt, welches doppelt verbaut ist. Es handelt sich jeweils um 600 W Systeme, die 88% ihrer Leistung zu 85% der Zeit ausschöpfen. Insgesamt haben die Autoren einen zusätzlichen Energiebedarf durch das Automatisierungssystem von 5 kWh/100km berechnet, wovon ungefähr 61% auf das Computersystem entfallen. Ihrer Berechnung nach nimmt damit der Energiebedarf eines Personenkraftwagens um bis zu 25% zu, mit einer Zunahme von 15% allein durch das Computersystem.

Die Berechnungen von Liu et al. [127] dienen zusammen mit den Berechnungen von Gawron et al. [126] als Grundlage für die Berechnungen einer Studie von *Agora Verkehrswende* [128]. In der Studie wird der Energiebedarf aller Sensoren und des Computersystems eines Stufe 3 automatisierten Fahrzeugs im Jahr 2020 mit 0,46 kWh/100km angegeben. Der Wert entspricht nur etwa einem Fünftel des Werts den Gawron et al. für ein Stufe 4 Fahrzeug angeben. Für die Entwicklung des Energiebedarfs wird in der Studie weiterhin eine Effizienzsteigerung von 10% für alle Komponenten und speziell für das Computersystem eine Verdopplung der Recheneffizienz alle fünf Jahre in Verbindung mit einem gleichzeitigen Anstieg der benötigten Rechenleistung um 20% alle fünf Jahre angenommen. Insgesamt ergibt sich damit ein Energiebedarf von 0,27 kWh/100km im Jahr 2050. Aus den Angaben zur Effizienzentwicklung lässt sich berechnen, dass sich dieser Wert mit 0,26 kWh/100km fast ausschließlich aus dem Energiebedarf der Sensoren zusammensetzt. Den Annahmen von *Agora Verkehrswende* zufolge wird der Energiebedarf des Computersystems in Zukunft also vernachlässigbar sein.

Schall et al. [129] haben für die Simulation des autonomen elektrischen Fahrzeugkonzepts U-Shift des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, welches aus einem Fahrmodul mit austauschbaren Transportkapseln besteht, einen Strombedarf von 3000 W für die Sensoren und das Computersystem angenommen.

Sigle und Hahn [130] haben die Annahmen von Schall et al. [129] als Grundlage genutzt und den Strombedarf für die Sensoren und das Computersystem eines automatisierten Lastkraftwagens mit 2500 W abgeschätzt.

Zuletzt haben Sudhakar et al. [131] den Gesamtenergiebedarf der Computersysteme einer automatisierten Fahrzeugflotte abgeschätzt. Für die Abschätzung des Energiebedarfs haben sie angenommen, dass das Computersystem die Eingangsdaten von mehreren Kameras

[44] 160.000 Meilen

auswerten muss. Sie haben aktuelle Deep Learning Algorithmen[45] für diese Aufgabe auf Grafikprozessoren laufen lassen, um den Rechenaufwand für diese Aufgabe zu bestimmen. Anschließend haben sie basierend auf dem Rechenaufwand den Energiebedarf aktueller Systeme über Angaben zu deren Recheneffizienz bestimmt.

Die genauen Ergebnisse der Modellierung sind für die Betrachtungen dieser Arbeit nicht nutzbar. Sudhakar et al. [131] haben eine stochastische Modellierung durchgeführt und dabei unter anderem den globalen Fahrzeugbestand und den Anteil automatisierter Fahrzeuge variiert. Aus den Ergebnissen lässt sich daher nicht der spezifische Energiebedarf einzelner Fahrzeuge berechnen.

Trotzdem lassen sich einige Annahmen von Sudhakar et al. [131] für die Betrachtungen in dieser Arbeit nutzen. Sie haben angenommen, dass die benötigte Rechenleistung in Zukunft zunehmen könnte, um eine bessere Performance der Algorithmen zu ermöglichen und dadurch die Sicherheit zu erhöhen. Weiterhin haben sie angemerkt, dass auf Grund der vorhersehbaren konstanten Anforderung an die Rechenleistung des Systems spezialisierte Hardware-Architekturen verwendet werden sollten, welche den Energiebedarf deutlich reduzieren könnten.

Aus den vorgestellten Studien lässt sich erkennen, dass die Abschätzungen des Leistungs- und Energiebedarfs des Automatisierungssystems sehr weit auseinander gehen. Viele Studien geben jedoch an, dass der zusätzliche Energiebedarf den Gesamtenergiebedarf von Fahrzeugen deutlich beeinflussen kann. Die Ergebnisse der vorgestellten Studien zum Leistungs- und Energiebedarf des Automatisierungssystems sind in Abbildung 2-13 zusammengefasst.

[45] EfficientNet-B0 und DeepLabV3

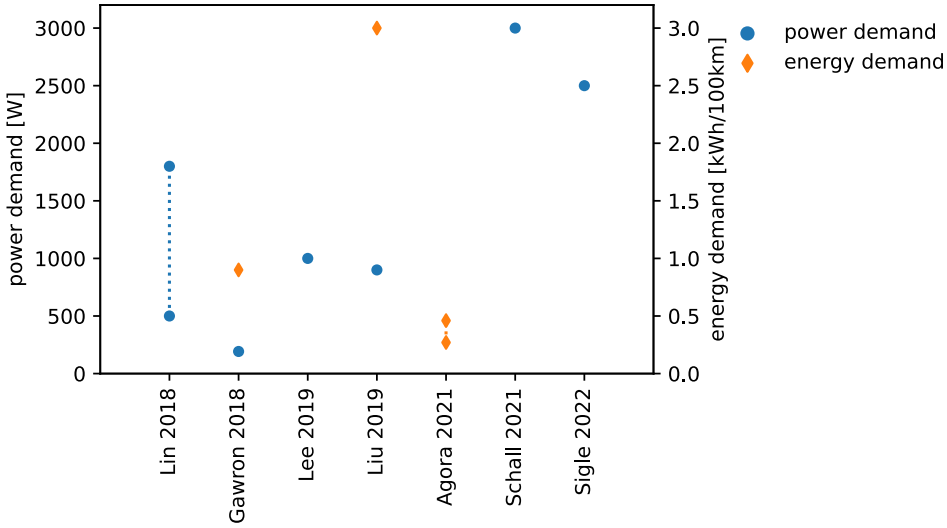


Abbildung 2-13 Leistungs- und Energiebedarf des Automatisierungssystems. Referenzen: Agora 2021, [128]; Gawron 2018, [126]; Lee 2019, [113] ;Lin 2018, [59]; Liu 2019, [127]; Schall 2021, [129]; Sigle 2022, [130]. Aus [8].

Zusammenfassend lassen sich für die Analysen dieser Arbeit folgende Schlussfolgerungen aus den vorgestellten Studien ziehen:

Der benötigte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems liegt heutzutage vermutlich im Bereich einiger kW. Die Analysen von Lin et al. [59] bezüglich der Bewältigung typischer Anforderungsprofile automatisierter Fahrzeuge mit verschiedenen Hardware-Zusammenstellungen hat gezeigt, dass aktuelle Systeme basierend auf Grafikprozessoren einen Leistungsbedarf von bis zu 1800 W haben. Ein weiteres Indiz für aktuell noch sehr hohe Leistungsbedarfe für Automatisierungssysteme ist die Annahme eines Leistungsbedarfs von 3000 W für das Automatisierungssystem des Fahrzeugkonzepts U-Shift durch Schall et al. [129]. Es ist nicht realistisch, dass aktuelle Automatisierungssysteme, wie von Gawron et al. [126] angenommen, mit einem Leistungsbedarf von 192 W für das Computersystem auskommen.

Der Energiebedarf des Automatisierungssystems ist jedoch stark von der Recheneffizienz des Computersystems abhängig und kann in Zukunft deutlich abnehmen. Eine Analyse der historischen Entwicklung der Anzahl der Rechnungen, die ein Computersystem pro kWh durchführen kann, zeigt für den Zeitraum von 1946 bis 2009 eine Verdopplung alle 1,57 Jahre [132]. Für den Zeitraum von 2000 bis 2009 trat eine Verdopplung nur noch alle 2,6 Jahre auf [133]. Agora Verkehrswende nimmt in ihrer Studie eine deutlich konservativere Entwicklung der Recheneffizienz mit einer Verdopplung alle fünf Jahre an [128]. Über den Zeitraum von 2020 bis 2050 bedeutet dies immer noch, dass der benötigte Energiebedarf für die gleiche Rechenleistung um einen Faktor von 64 abnimmt.

Diesen positiven Entwicklungen sind jedoch erhöhte Anforderungen an die Rechenleistung entgegenzusetzen. Sudhakar et al. [131] nehmen eine Verdopplung der benötigten Rechenleistung alle drei Jahre an. Mit einer Verdopplung der Recheneffizienz alle 2,6 Jahre

und einer Verdopplung der benötigten Rechenleistung alle 3 Jahre nimmt der Energiebedarf im Zeitraum von 2020 bis 2050 nur noch um einen Faktor von 3 ab.

Für die Computersysteme von automatisierten Fahrzeugen sollten spezialisierte Hardware-Architekturen entwickelt werden. Lin et al. [59] und Sudhakar et al. [131] haben angemerkt, dass die Anforderungen an die Rechenleistung des Computersystems automatisierter Fahrzeuge vorhersehbar und konstant sind. Spezialisierte Hardware-Architekturen können daher verwendet werden, was den benötigten Energiebedarf deutlich reduzieren kann. Für die Untersuchungen von Liu et al. [59] lag der Leistungsbedarf eines Systems mit Standard-Grafikprozessoren bei 1800 W und der eines spezialisierten Systems mit programmierbaren Logikgatter-Anordnungen bei 500 W.

Für die Analysen des Energiebedarfs in dieser Arbeit wird basierend auf den diskutierten Ergebnissen der Literatur ein Leistungsbedarf von 1000 W für aktuelle Computersysteme automatisierter Fahrzeuge angenommen. Da der aktuelle Leistungsbedarf in der Literatur jedoch teilweise auch deutlich höher angenommen wird, wird in dieser Arbeit für eine Variation auch ein erhöhter Leistungsbedarf von 3000 W betrachtet. Der Wert entspricht dem Maximalwert der Studien wie von Schall et al. [129] angegeben. Um zukünftige Entwicklungen abzubilden, wird in dieser Arbeit für eine weitere Variation ein Leistungsbedarf von 200 W angenommen. Der Wert entspricht dem Minimalwert der Studien wie von Gawron et al. [126] angegeben. Ein solcher Wert ist momentan noch nicht denkbar, könnte sich aber basierend auf der diskutierten Entwicklung der Recheneffizienz und einer Anpassung der Hardware-Architektur für zukünftige Computersysteme automatisierter Fahrzeuge langfristig ergeben.

2.4.4 Berechnung des Energiebedarfs eines Fahrzeugs für einen Fahrzyklus

Dieser Unterabschnitt beschreibt die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsmethodik zur Bestimmung des Energiebedarfs automatisierter Fahrzeuge. Die Berechnungsmethodik umfasst die Bestimmung des mechanischen Energiebedarfs sowie des Nebenenergiebedarfs für die Fahrzeugelektronik und das Automatisierungssystem.

Der Energiebedarf des Fahrzeugs beruht auf dem mechanischen Energiebedarf, der benötigt wird, um den jeweiligen Fahrzyklus zu bewältigen. Dabei werden die Beschleunigung des Fahrzeugs sowie die Kräfte zur Überwindung von Roll- und Luftwiderständen berücksichtigt. Fahrbahnneigungen werden in der Betrachtung dieser Arbeit hingegen nicht berücksichtigt. Die mechanischen Kräfte für einen Zeitschritt t lassen sich wie folgt beschreiben:

Luftwiderstand

$$F_{\mathrm{aero}}(t) = \frac{1}{2}\rho_{\mathrm{air}} \cdot A_{\mathrm{front}} \cdot c_{\mathrm{d}} \cdot v^2(t)\,,$$

Gl. 2-1

mit der Luftdichte ρ_{air}[46], der Stirnfläche des Fahrzeugs A_{front}, dem Luftwiderstandsbeiwert c_{d} sowie der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit $v(t)$.

[46] Angenommen mit 1,225 kg/m³

Rollwiderstand

$$F_{\mathrm{roll}}(t) = (m_{\mathrm{veh}} + m_{\mathrm{load}}) \cdot g \cdot c_{\mathrm{r}}(t)\,,$$

Gl. 2-2

mit der Fahrzeugmasse m_{veh}, der Masse der Passagiere/Fracht m_{load}, der Gravitationskonstante g[47] und dem Rollwiderstandkoeffizienten $c_{\mathrm{r}}(t)$.

Der Rollwiderstandkoeffizienten wird für die Berechnungen in dieser Arbeit für Lastkraftwagen als konstanter Wert angenommen. Für Personenkraftwagen wird er mittels der Berechnungsmethode von Mitschke und Wallentowitz [134], parametrisiert von Grube [135], folgendermaßen berechnet

$$c_{\mathrm{r}}(t) = \left(0{,}0088 + 0{,}0017 \cdot \frac{v_{\mathrm{kmh}}(t)}{100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}} + 0{,}00028 \cdot \left(\frac{v_{\mathrm{kmh}}(t)}{100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}}\right)^{4}\right) \cdot 0{,}985\,,$$

Gl. 2-3

wobei $v_{\mathrm{kmh}}(t)$ den Wert der Geschwindigkeit des Fahrzeugs in km/h bezeichnet. Der Faktor 0,985 stammt aus der Arbeit von Kraus [136] und bildet den Fortschritt in der Reifenentwicklung seit der Arbeit von Grube aus dem Jahr 2014 bis zum Jahr 2022 ab.

Beschleunigung

$$F_{\mathrm{acc}}(t) = \left((1{,}02 \cdot m_{\mathrm{veh}}) + m_{\mathrm{load}}\right) \cdot a(t)\,,$$

Gl. 2-4

mit der momentanen Fahrzeugbeschleunigung $a(t)$. Der Faktor $1{,}02$ berücksichtigt das Trägheitsmoment des Fahrzeugs inklusiver rotierender Massen und stammt aus der Arbeit von Kraus [136].

Die gesamte mechanische Kraft ergibt sich als Summe der Beschleunigungs- und Widerstandkräfte:

$$F_{\mathrm{mech}}(t) = F_{\mathrm{acc}}(t) + F_{\mathrm{roll}}(t) + F_{\mathrm{aero}}(t)\,.$$

Gl. 2-5

Der momentane mechanische Energiebedarf des Fahrzeugs ergibt sich dann als Produkt der gesamten mechanischen Kraft mit der zurückgelegten Wegstrecke, wobei die zurückgelegte Wegstrecke das Produkt aus der momentanen Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Länge des betrachteten Zeitschritts ist:

$$E_{\mathrm{mech}}(t) = F_{\mathrm{mech}}(t) \cdot v(t) \cdot \tau(t)\,.$$

Gl. 2-6

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der momentane mechanische Energiebedarf negativ sein kann, wenn die Fahrzeugbeschleunigung negativ ist. Für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wäre dies Bewegungsenergie, die beim Bremsen in Form von Wärme an die Umwelt abgegeben wird und dementsprechend in den Energiebedarf des Fahrzeugs als null eingeht.

[47] 9,81 m/s²

Für ein Fahrzeug mit Elektromotor kann hingegen beim Bremsen ein Teil der Bewegungsenergie durch den Einsatz von Rekuperationsbremsen in elektrische Energie umgewandelt und dem Fahrzeug nach Zwischenspeicherung in der Batterie wieder zur Verfügung gestellt werden. Für die Analysen in dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass 80% der überschüssigen Bewegungsenergie beim Bremsen rekuperiert werden kann.

Zusätzlich zum mechanischen Energiebedarf ist der Nebenenergiebedarf für die Fahrzeugelektronik und das Automatisierungssystem relevant. Der momentane Nebenenergiebedarf ergibt sich durch

$$E_{\mathrm{aux}}(t) = \left(P_{\mathrm{elec}}(t) + P_{\mathrm{aut}}(t)\right) \cdot \tau(t)\,,$$

Gl. 2-7

mit dem Leistungsbedarf der Fahrzeugelektronik $P_{\mathrm{elec}}(t)$ und dem Leistungsbedarf des Automatisierungssystems $P_{\mathrm{aut}}(t)$.

Den Leistungsbedarf der Fahrzeugelektronik einer Sattelzugmaschine haben Sigle und Hahn [130] mit 8660 W abgeschätzt. Die größten Teile entfallen dabei auf die Servolenkungspumpe mit 1800 W, den Druckluftkompressor mit 4500 W und Heizung/Klimaanlage mit 2000 W im Mittel.

Für einen Mittelklasse Personenkraftwagen lässt sich aus Abschätzungen von Cox [137] und Helms et al. [138] ein Leistungsbedarf der Fahrzeugelektronik von 600 W ableiten.

Bei diesen Abschätzungen ist auffällig, dass allein der Strombedarf für die Heizung/Klimaanlage der Sattelzugmaschine den gesamten Strombedarf des Personenkraftwagens um einen Faktor drei übersteigt. Dies scheint auf den ersten Blick fragwürdig, wird aber so akzeptiert. Wie sich in Abschnitt 4.2 später noch zeigen wird, ist ein erhöhter Nebenenergiebedarf für Sattelzugmaschinen im Vergleich zu Personenkraftwagen weniger relevant, da der mechanische Energiebedarf für Sattelzugmaschinen deutlich größer ist.

Der Leistungsbedarf für das Automatisierungssystem wird wie im vorherigen Unterabschnitt 2.4.3 detailliert ausgeführt mit 1000 W abgeschätzt. Der Leistungsbedarf wird in den Analysen in Abschnitt 4.2 für Personenkraftwagen zu 3000 W und 200 W variiert, um Unsicherheiten im aktuellen Leistungsbedarf und eine mögliche zukünftige Entwicklung des Leistungsbedarfs abzubilden.

Um aus dem mechanischen Energiebedarf und dem Nebenenergiebedarf den Treibstoffbedarf des Fahrzeugs zu bestimmen, müssen noch die Wirkungsgrade der verschiedenen Systemkomponenten berücksichtigt werden. Die Wirkungsgrade sind abhängig von dem betrachteten Antriebsstrang. In den Analysen dieser Arbeit wird ausschließlich ein batterieelektrischer Antriebsstrang betrachtet. Für diesen sind die drei Wirkungsgrade der Batterie, des Motors und des mechanischen Antriebsstrangs relevant.

Für einen batterieelektrischen Antriebsstrang ist die Bezeichnung „Treibstoffbedarf“ unpassend. Daher wird im Folgenden stattdessen die Bezeichnung „Gesamtenergiebedarf“ verwendet.

Für den Nebenenergiebedarf ist der Wirkungsgrad der Batterie η_{bat} relevant. Für den mechanischen Energiebedarf sind zusätzlich noch der Wirkungsgrad des Elektromotors η_{engine} und des mechanischen Antriebsstrangs η_{trans} relevant. Für den Fall der Rekuperation

kann die rekuperierte Energie direkt genutzt werden, um den Nebenenergiebedarf zu decken ohne in der Batterie zwischengespeichert zu werden, sodass für diesen Fall nur der Wirkungsgrad des Elektromotors η_{engine} und des mechanischen Antriebsstrangs η_{trans} zu berücksichtigen sind. Übersteigt die rekuperierte Energie den Nebenenergiebedarf, wird die überschüssige Energie in der Batterie zwischengespeichert. Die zwischengespeicherte Energie wird für die Bilanzierung des Gesamtenergiebedarfs in dieser Arbeit mit allen drei Wirkungsgraden verrechnet.

Die verwendeten Fahrzeugparameter sowie die Wirkungsgrade sind in Abschnitt 3.2 zu finden, in welchem die Methodik dieser Arbeit zur Bestimmung des Energiebedarfs automatisierter Fahrzeuge vorgestellt wird. Dabei werden die untersuchten Fahrzeugtypen sowie die jeweiligen Anpassungen der Fahrzyklen für automatisierte Fahrzeuge vorgestellt. Die Fahrzeugmasse des in dieser Arbeit verwendete Personenkraftwagens liegt mit 1508 kg am unteren Ende der Fahrzeugmassen aktuell verfügbarer batterieelektrischer Fahrzeuge [139].

In diesem Abschnitt wurde die Literatur zum Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge analysiert und bestehende Forschungslücken identifiziert.

In bisherigen Studien, die den Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge modelliert haben, wird der Energiebedarf des Automatisierungssystems vernachlässigt. Die analysierten Studien zum Leistungsbedarf des Automatisierungssystems zeigen jedoch, dass der benötigte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems heutzutage vermutlich im Bereich einiger kW liegt. Die Auswirkungen eines solchen Leistungsbedarf des Automatisierungssystems auf den Gesamtenergiebedarf sind stark von dem jeweiligen Fahrzeugtypen und Einsatzbereich abhängig.

Um diese Lücke zu schließen, findet in dieser Arbeit eine Modellierung des Energiebedarfs automatisierter Personen- und Lastkraftwagen in verschiedenen Verkehrsumgebungen inklusive einer Modellierung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems statt. Die Modellierung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems erfolgt über Annahmen zum Leistungsbedarf in Anlehnung an die Ergebnisse der analysierten Literatur.

2.5 Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss

In diesem Abschnitt werden Studien zu den Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss vorgestellt. Dabei werden in Unterabschnitt 2.5.1 die möglichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss für eine erste Einordnung qualitativ beschrieben. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.5.2 die quantitativen Ergebnisse von Studien zum Einfluss des automatisierten Fahrens auf die Straßenkapazität einzelner Straßenabschnitte vorgestellt. Abschließend werden in Unterabschnitt 2.5.3 Studien zu den potentiellen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Straßennetzwerks vorgestellt und die bestehende Forschungslücke herausgestellt.

2.5.1 Qualitative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss

In diesem Unterabschnitt werden die möglichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss für eine erste Einordnung qualitativ beschrieben.

Der Verkehr auf einem Straßenabschnitt lässt sich durch die drei makroskopischen Größen Verkehrsgeschwindigkeit $V(t)$, Verkehrsdichte $\mathrm{P}(t)$ und Verkehrsfluss $Q(t)$ abbilden. Die Verkehrsgeschwindigkeit bezeichnet dabei die durchschnittliche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge auf dem Abschnitt. Die Verkehrsdichte ergibt sich als Quotient der Anzahl der Fahrzeuge auf dem Straßenabschnitt und der Länge des Abschnitts. Zuletzt bezeichnet der Verkehrsfluss die Anzahl der Fahrzeuge, die den Abschnitt im Beobachtungszeitraum passieren. Der Zusammenhang der drei Größen ist durch die folgende Gleichung gegeben

$$Q(t) = V(t) \cdot \mathrm{P}(t) \ .$$

Gl. 2-8

Die paarweise Relation der Größen sind in den sogenannten Fundamentaldiagrammen des Verkehrsflusses abgebildet. Insbesondere das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte wird häufig zur Charakterisierung des Autobahnverkehrs genutzt. Aus diesem Diagramm lässt sich die maximale Straßenkapazität C sowie die Freiflussgeschwindigkeit ermitteln. Weiterhin lässt sich mit Hilfe des Fundamentaldiagramms auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Stauendes auf einem Straßenabschnitt bestimmen.

Das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte weist den folgenden universellen Verlauf auf:

Für geringe Verkehrsdichten steigt der Verkehrsfluss linear mit der Verkehrsdichte an. In diesem Bereich sind nur wenige Fahrzeuge auf dem Straßenabschnitt, sodass sich die Fahrzeuge nicht gegenseitig beeinflussen und alle Fahrzeuge mit ihrer gewünschten Geschwindigkeit, der sogenannten Freiflussgeschwindigkeit, fahren. Diese lässt sich im Diagramm als Steigung des Verkehrsflusses ermitteln.

Mit steigender Verkehrsdichte fangen die Fahrzeuge an, sich gegenseitig zu beeinflussen. Die Fahrzeuge können nicht mehr mit der Freiflussgeschwindigkeit fahren und der Anstieg des Verkehrsflusses mit der Verkehrsdichte wird geringer.

Bei einer gewissen Verkehrsdichte erreicht der Verkehrsfluss seinen Maximalwert. Dieser Wert wird als Kapazität C des Straßenabschnitts bezeichnet und ist abhängig von den Folgeabständen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, welche wiederum von der Beschaffenheit der Straße sowie äußeren Bedingungen wie dem Wetter abhängig sind.

Mit weiter steigender Verkehrsdichte nimmt der Verkehrsfluss nach Erreichen des Maximalwerts linear ab, bis er ab einem gewissen Punkt gänzlich zum Erliegen kommt. Die negative Steigung im Fundamentaldiagramm entspricht dabei der Geschwindigkeit, mit der sich das Stauende entgegen der Fahrtrichtung bewegt.

In Abbildung 2-14 ist das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte dargestellt.

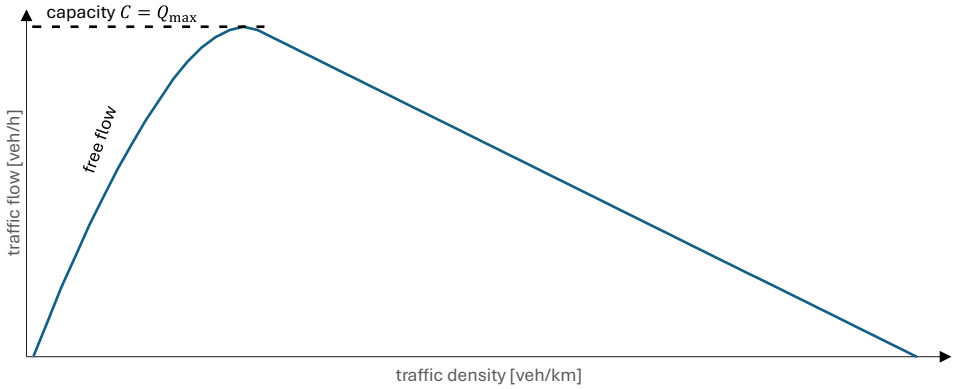


Abbildung 2-14 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte. In Anlehnung an Friedrich [140].

Das Fundamentaldiagramm wird im Folgenden genutzt, um die mögliche Wirkung automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss anschaulich zu ergründen. Die zu erwartenden qualitativen Änderungen werden mit Hilfe des Fundamentaldiagramms basierend auf den Ergebnissen von Shi und Li [141] sowie Zhang et al. [142] diskutiert.

Das Fundamentaldiagramm für den nicht-automatisierten Verkehr sowie drei mögliche Fundamentaldiagramme für einen automatisierten Verkehr sind in Abbildung 2-15 dargestellt.

Es wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge dieselben Höchstgeschwindigkeiten haben wie nicht-automatisierte Fahrzeuge. Für geringe Fahrzeugdichten, bei denen sich die Fahrzeuge nicht beeinflussen, verändert sich somit nichts. Für das Fundamentaldiagramm bleibt der anfängliche lineare Anstieg mit der Freiflussgeschwindigkeit unverändert.

Es wird jedoch weiterhin angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge geringere zeitliche Folgeabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen einhalten können als nicht-automatisierte Fahrzeuge. Dies führt dazu, dass sich automatisierte Fahrzeuge erst bei höheren Fahrzeugdichten beeinflussen als nicht-automatisierte Fahrzeuge. Folglich bleibt die Freiflussphase im automatisierten Fall mit zunehmender Fahrzeugdichte länger erhalten als im nicht-automatisierten Fall. Dies hat wiederum zur Folge, dass der maximale Fahrzeugfluss erst bei einer höheren Fahrzeugdichte erreicht wird und folglich der maximale Fahrzeugfluss und somit die Kapazität zunimmt.

Bis zu diesem Punkt stimmen die Erwartungen von Shi und Li [141] mit denen von Zhang et al. [142] überein. Für den weiteren Verlauf gibt es jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Erwartungen der beiden Studien.

Shi und Li [141] erwarten, dass die Abnahme des Verkehrsflusses für den automatisierten Verkehr nach Erreichen des maximalen Verkehrsflusses deutlich stärker ist als für den nicht-automatisierten Verkehr und dass der Verkehrsfluss schon bei einer geringeren Fahrzeugdichte komplett zum Erliegen kommt. Dies hätte zur Folge, dass die Geschwindigkeit, mit der sich ein Stauende entgegen der Fahrtrichtung bewegt stark zunimmt. Ein solcher Verlauf ist als schwarze gestrichelte Linie in Abbildung 2-15 dargestellt.

Zhang et al. [142] gehen im Gegensatz dazu jedoch davon aus, dass der Verkehr erst bei einer höheren Verkehrsdichte zum vollständigen Erliegen kommt, wodurch die Geschwindigkeit eines Stauendes weniger stark zunimmt oder sogar unverändert bleiben kann. Ein solcher Verlauf ist als graue gepunktete Linie in Abbildung 2-15 dargestellt.

Die Fahrzeugdichte, bei der der Verkehr vollständig zum Erliegen kommt, ist stark von dem Platzbedarf von Fahrzeugen im Stau abhängig. Der Platzbedarf ergibt sich aus der Fahrzeuglänge und dem räumlichen Mindestabstand der Fahrzeug. Die zeitlichen Folgeabstände sind somit weniger relevant. Sofern der Platzbedarf für automatisierte Fahrzeuge unverändert bleibt, kommt der Verkehr bei ungefähr der gleichen Fahrzeugdichte wie im nicht-automatisierten Fall zum vollständigen Erliegen. Bei einer erhöhten Straßenkapazität im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall nimmt die Geschwindigkeit des Stauendes dadurch auf jeden Fall zu. Ein solcher Verlauf ist als blaue gestichelt-gepunktete Linie in Abbildung 2-15 dargestellt.

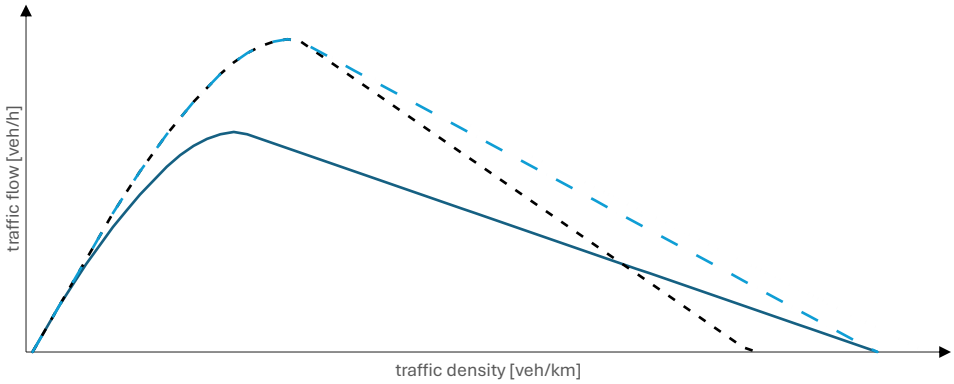


Abbildung 2-15 Vergleich der Fundamentaldiagramme für den nicht-automatisierten und den automatisierten Verkehr mit verschiedenen Szenarien für den räumlichen Mindestabstand der Fahrzeuge im Stand. Die dunkelblaue Linie entspricht dem nicht-automatisierten Fall. Die drei anderen Linien stellen den automatisierten Fall dar. Für die blaue gestichelt-gepunktete entspricht der Mindestabstand im Stand dem des nicht-automatisierten Falls. Für die schwarze gestrichelte Linie wurde der Abstand erhöht und für die graue gepunktete Linie verringert. In Anlehnung an Shi und Li [141] und Zhang et al. [142].

Die Betrachtung mit Hilfe des Fundamentaldiagramms zeigt, dass die Auswirkungen der Veränderungen der Folgeabstände durch automatisierte Fahrzeuge über die reine Straßenkapazität hinausgehen. Werden ausschließlich die zeitlichen Folgeabstände verkürzt, so erhöht sich im Falle eines Staus die Geschwindigkeit, mit der sich das Stauende entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet.

Erhöhte Geschwindigkeiten von Stauenden können die Unfallwahrscheinlichkeiten auf Autobahnen erhöhen. Bewegt sich ein Stauende mit höherer Geschwindigkeit, müssen herannahende Fahrzeuge bei gleicher Voraussicht stärker bremsen, um einen Auffahrunfall zu vermeiden. Für große Fahrzeuge mit langem Bremsweg, lässt sich ein Auffahrunfall dann eventuell schon nicht mehr verhindern. Für diese Fahrzeuge ist eine Erhöhung der Voraussicht notwendig, um ein Auffahrunfälle zu vermeiden.

Dem Anstieg der Geschwindigkeit des Stauendes lässt sich nur in begrenztem Maße entgegenwirken. Die Geschwindigkeit des Stauendes ist von dem Platzbedarf von Fahrzeugen im Stau abhängig. Benötigen Fahrzeuge mehr Platz, so kommt der Verkehr schon bei geringeren Fahrzeugdichten komplett zum Erliegen und die Geschwindigkeit des Stauendes nimmt zu. Um die Geschwindigkeit zu reduzieren, muss also der Platzbedarf reduziert werden. Dies lässt sich realisieren, indem die Fahrzeugabstände im Stau reduziert werden. Das absolute Minimum für den Platzbedarf stellen jedoch weiterhin die jeweiligen Fahrzeuglängen dar.

Weiterhin können automatisierte Fahrzeuge einen Einfluss auf die Stabilität des Verkehrsflusses haben. Stabilität bezeichnet die Reaktion des Verkehrsflusses auf Störungen im Verkehrsfluss. Vereinfacht gesagt ist der Verkehrsfluss auf der Ebene einzelner Fahrzeuge stabil, wenn Störungen wie ein hartes Bremsen eines Fahrzeugs von Folgefahrzeug zu Folgefahrzeug abnehmen und nach einer gewissen Anzahl an Fahrzeugen nicht mehr auftreten. Wenn Störungen nicht abnehmen oder sogar zunehmen, wird der Verkehr als instabil bezeichnet. Für eine genauere Betrachtung der Stabilität auf lokaler Ebene sowie auf Netzwerkebene sei an dieser Stelle auf die Ausführungen von Gu et al. [143] verwiesen.

Nach dieser Einordnung der qualitativen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss werden im folgenden Unterabschnitt 2.5.2 Studien zu den quantitativen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Kapazität einzelner Straßenabschnitte vorgestellt.

2.5.2 Quantitative Auswirkungen auf die Kapazität einzelner Straßenabschnitte

Der Fokus der Analysen in dieser Arbeit liegt auf der kapazitätsbedingten Auslastung des Autobahnnetzwerks. In diesem Unterabschnitt werden daher die quantitativen Ergebnisse von Studien zum Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Straßenkapazität einzelner Straßenabschnitte vorgestellt. Die Annahmen der in diesem Unterabschnitt vorgestellten Studien zu den Folgeabständen automatisierter Fahrzeuge bilden die Grundlage für die Modellierung des Einflusses automatisierter Fahrzeuge auf die kapazitätsbedingte Auslastung des Autobahnnetzwerks in dieser Arbeit.

Eine einfache Abschätzung zur Kapazität eines Autobahnabschnitts ergibt sich aus dem zeitlichen Folgeabstand der Fahrzeuge. In Deutschland gilt als Abstandsregel die Faustformel des „halben-Tacho“. Diese besagt, dass der halbe Wert der Geschwindigkeit gemessen in km/h als räumlicher Folgeabstand in Metern eingehalten werden sollte. Dies entspricht einem zeitlichen Folgeabstand von 1,8 Sekunden. Halten Fahrzeuge einen solchen Folgeabstand ein, können innerhalb einer Stunde pro Fahrspur 2000 Fahrzeuge einen Abschnitt passieren.[48]

[48] Bei dieser Betrachtung entspricht der Folgeabstand dem gemessenen Abstand zweier Fahrzeuge beim Passieren eines Abschnitts. Dieser Abstand entspricht folglich dem Abstand zwischen den Frontstoßstangen der Fahrzeuge. Im realen Verkehr würde ein Fahrzeug jedoch den Abstand zur hinteren Stoßstange des vorausfahrenden Fahrzeugs halten und die Länge der Fahrzeuge würde somit eine Rolle spielen. Für die späteren Analysen in dieser Arbeit wird die Ausdehnung der Fahrzeuge berücksichtigt, für die Einordnung der Kapazitätswerte an dieser Stelle soll jedoch die vereinfachende Darstellung genügen.

Eine Kapazität von 2000 Fahrzeugen pro Fahrspur pro Stunde haben auch Shi und Li basierend auf realen Messdaten für den Verkehrsfluss auf einem Abschnitt der I-75 in Florida als Richtwert angenommen [141]. In weiteren Studien zum Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Straßenkapazität haben andere Autoren ebenfalls Werte von 1600 bis 2400 Fahrzeugen pro Fahrspur pro Stunde als Kapazität für den nicht-automatisierten Verkehr verwendet [140, 144–146].

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen sind die Kapazitäten von Autobahnabschnitten mit 1500–2000 Fahrzeugen pro Fahrspur pro Stunde angegeben [147]. Dabei werden die Straßenkapazitäten unter anderem für unterschiedliche Anzahlen an Fahrspuren, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Güterverkehrsanteile angegeben. Dabei sinkt die Kapazität pro Spur mit steigender Anzahl an Spuren. Weiterhin sinkt die Kapazität mit steigendem Güterverkehrsanteil.

Die Ergebnisse der Studien zum Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Straßenkapazität werden im Folgenden vorgestellt. Die verwendeten und ermittelten Folgeabstände der Studien sind in Abbildung 2-16 und die Ergebnisse bezüglich der Straßenkapazität in Abbildung 2-17 zusammenfassen dargestellt. Sofern nicht explizit anders beschrieben, bezeichnet der Begriff Straßenkapazität im Folgenden die Kapazität eines Straßenabschnitts pro Fahrspur.

Shladover et al. [145] haben in einer Studie aus dem Jahr 2012 mit Hilfe mikroskopischer Verkehrssimulationen den Effekt unterschiedlicher Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge auf die Straßenkapazität von Autobahnen untersucht. Sie haben angenommen, dass sich automatisierte und nicht-automatisierte Fahrzeuge in ihren zeitlichen Folgeabständen unterscheiden.

Den zeitlichen Folgeabstand nicht-automatisierter Fahrzeuge haben sie mit 1,64 s (+/-0,16 s) angenommen. Die simulierte Straßenkapazität für einen rein nicht-automatisierten Verkehr ergab sich damit zu 2018 Kfz/h.

Weiterhin haben sie zwei Arten automatisierter Fahrzeuge simuliert. Fahrzeuge mit Abstandregeltempomat[49] und Fahrzeuge, die zusätzlich miteinander vernetzt sind[50]. Die zeitlichen Folgeabstände für diese Fahrzeugtypen haben sie nach den Präferenzen von Teilnehmern eines Fahrzeugfolgeexperiments gewählt. Für die Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomat ergab sich ein Abstand von 1,5 s und für die vernetzten Fahrzeuge ein Abstand von 0,7 s. Dabei haben die Autoren angenommen, dass vernetzte Fahrzeuge einen Abstand von 0,7 s nur einhalten können, wenn sie einem anderen vernetzten Fahrzeug folgen und ansonsten ebenfalls einen Abstand von 1,5 s einhalten.

Die Einführung automatisierter Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomat hat mit einer Straßenkapazität im Bereich von 2030 Kfz/h bis 2100 Kfz/h unabhängig von ihrer Durchdringungsrate keinen erheblichen Unterschied bewirkt. Dies liegt daran, dass Folgeabstände für diese Fahrzeuge sehr nah an denen nicht-automatisierter Fahrzeuge gewählt wurden.

Vernetzte Fahrzeuge konnten hingegen einen deutlichen Unterschied in der Straßenkapazität bewirken mit einer Kapazität von 3970 Kfz/h bei einer vollständigen Durchdringung. Der

[49] Eng: adaptive cruise control, ACC

[50] Eng: cooperative adaptive cruise control, CACC

Anstieg ist jedoch stark nichtlinear und nimmt mit steigender Durchdringungsrate zu. Dies liegt daran, dass vernetzte Fahrzeuge erst bei hohen Durchdringungsraten häufiger anderen vernetzten Fahrzeugen folgen und somit ihren Folgeabstand reduzieren können.

Um die Straßenkapazität schon bei geringeren Durchdringungsraten deutlich zu erhöhen, haben die Autoren vorgeschlagen, nicht-automatisierte Fahrzeuge mit Kommunikationstechnologie auszustatten. Nicht-automatisierte Fahrzeuge würden selbst weiterhin einen Folgeabstand von 1,64 s zu ihrem Vorderfahrzeug einhalten, vernetzte Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomat könnten jedoch auf Grund der Kommunikation mit den nicht-automatisierten Fahrzeugen ihren Folgeabstand zu diesen auf 0,7 s reduzieren.

Friedrich [140] hat in einem Buchbeitrag aus dem Jahr 2016 die Straßenkapazität von Autobahnen für verschiedene Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge berechnet. Er hat den Unterschied zwischen automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen über deren zeitliche Folgeabstände abgebildet und alle anderen Fahrzeugparameter unverändert gelassen.

In einer ersten Abschätzung konnte die Straßenkapazität durch einen vollständig automatisierten Verkehr nahezu verdoppelt werden. Für nicht-automatisierte Fahrzeuge hat Friedrich einen Abstand von 1,15 s verwendet und für automatisierte Fahrzeuge einen Abstand von 0,5 s. Damit konnte die Straßenkapazität von 2420 Kfz/h für den rein nicht-automatisierten Verkehr auf 4300 Kfz/h für den rein automatisierten Verkehr gesteigert werden.

Weiterhin hat er einen gemischten Verkehr aus automatisierten und nicht-automatisierten in zwei verschiedene Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario hat er angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge zu allen Fahrzeugen einen Abstand von 0,5 s halten. Im zweiten Szenario halten automatisierte Fahrzeuge nur zu anderen automatisierten Fahrzeugen einen Abstand von 0,5 s und einen Abstand von 0,9 s zu nicht-automatisierten Fahrzeugen.

Die Wahl unterschiedlicher Folgeabstände in Abhängigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs hat eine deutliche Auswirkung auf den Zuwachs der Straßenkapazität mit dem Anteil automatisierter Fahrzeuge. Während für das erste Szenario bei einem Anteil automatisierter Fahrzeuge von 50% eine Straßenkapazität von 3100 Kfz/h erreicht werden kann, wird diese Straßenkapazität für das zweite Szenario erst bei einem Anteil automatisierter Fahrzeuge von 65% erreicht. Für beide Szenarien ist der Kapazitätsanstieg mit dem Anteil automatisierter Fahrzeuge nichtlinear, für das zweite Szenario nimmt der Anstieg der Straßenkapazität mit steigendem Anteil automatisierter Fahrzeuge jedoch noch stärker zu.

Zuletzt hat Friedrich neben Personenkraftwagen auch Lastkraftwagen im Verkehr betrachtet. Für diese hat er dieselben Fahreigenschaften angenommen und lediglich die Fahrzeuglänge von 4,5 m auf 18 m erhöht. Weiterhin hat er einen Anteil von 15% am Gesamtverkehrsaufkommen für Lastkraftwagen angenommen. Damit ergab sich die Straßenkapazität für den vollständig nicht-automatisierten Fall zu 2280 Kfz/h und für den vollständig automatisierten Fall zu 3880 Kfz/h.

Zhou und Zhu [144] haben in einer Studie aus dem Jahr 2020 das Fundamentaldiagramm für den Verkehrsfluss über die Fahrzeugdichte für verschiedene Durchdringungsraten von vernetzten automatisierten Fahrzeugen modelliert. Dazu haben sie angenommen, dass vernetzte automatisierte Fahrzeuge einen zeitlichen Abstand von 0,6 s zueinander einhalten,

während nicht-automatisierte Fahrzeuge einen Abstand von 2 s zueinander einhalten. Für den Fall, dass ein automatisiertes Fahrzeug auf ein nicht-automatisiertes folgt oder andersherum, wurde ein Abstand von 1,5 s angenommen. Weiterhin wurde angenommen, dass beide Fahrzeugtypen dieselbe Freiflussgeschwindigkeit von 120 km/h anstreben und dieselbe Länge von 4,5 m besitzen. Der Mindestabstand für stehende Fahrzeuge, welcher zusätzlich zum zeitlichen Abstand eingehalten werden muss, wurde jedoch für automatisierte Fahrzeuge gestrichen, wohingegen er für nicht-automatisierte Fahrzeuge 2 m beträgt.

Für den rein nicht-automatisierten Fall berechneten die Autoren eine Straßenkapazität von 1640 Kfz/h. Für den Fall, dass alle Fahrzeuge automatisiert sind, erhielten sie eine nahezu dreimal so große Straßenkapazität von 4900 Kfz/h. Der Anstieg der Straßenkapazität in Abhängigkeit des Anteils automatisierter Fahrzeuge ist nicht linear und nimmt mit steigendem Anteil zu. Bei einem Anteil von 50% betrug die Straßenkapazität noch 2300 Kfz/h.

Während sich die bisher vorgestellten Ergebnisse auf den Fall einer zufälligen Abfolge automatisierter und nicht-automatisierter Fahrzeuge beziehen, haben die Autoren auch verschiedene Konstellationen für die Abfolge automatisierter und nicht-automatisierter Fahrzeuge betrachtet. In dem Grenzfall, dass bei einem Anteil von 50% automatisierter Fahrzeuge automatisierte und nicht-automatisiertes Fahrzeuge immer abwechselnd auftreten, sinkt die Straßenkapazität auf 2160 Kfz/h. Für den entgegengesetzten Grenzfall, dass automatisierte und nicht-automatisierte Fahrzeuge in separaten Kolonnen auftreten, steigt die Straßenkapazität auf 2460 Kfz/h. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass ab einem gewissen Anteil automatisierter Fahrzeuge eine separate Fahrspur für automatisierte Fahrzeuge die Straßenkapazität steigern kann.

Shi und Li [141] haben in einer Studie aus dem Jahr 2021 drei Datensätze mit Trajektorien von Fahrzeugen ausgewertet.

Der erste Datensatz besteht aus den gemessenen Fahrzeugtrajektorien zweier Experimente. Das erste Experiment umfasst ein 2015 Audi Q7 als Führungsfahrzeug, welcher eine konstante Geschwindigkeit fährt, und ein 2016 sowie 2017 Lincoln MKZ als Folgefahrzeuge, welche mittels Abstandsregeltempomat dem jeweils vorausfahrenden Fahrzeug folgen. Das zweite Experiment verzichtet auf den Audi, sodass in diesem Fall der 2016 Lincoln MKZ als Führungsfahrzeug und nur der 2017 Lincoln MKZ als Folgefahrzeug fungieren. Für beide Experimente wurden die Folgeabstände der Fahrzeuge in vier Stufen[51] sowie die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs in 15 Stufen von 25 mph bis 53 mph in 2 mph-Schritten variiert.

Der zweite Datensatz enthält ebenfalls Trajektorien von Fahrzeugen aus Fahrzeugfolgeexperimenten. In diesem Datensatz gibt es jedoch weder quantitative Angaben zu den Folgeabständen noch sind die verwendeten Fahrzeugtypen genauer spezifiziert. Auf die Ergebnisse dieses Datensatzes wird deshalb hier nicht weiter eingegangen.

Der dritte Datensatz umfasst die Trajektorien nicht-automatisierter Fahrzeuge im realen Verkehr aufgenommen auf einem Abschnitt der I-75 in Florida. Dieser Datensatz dient als Richtwert für den nicht-automatisierten Verkehr.

Die aus dem dritten Datensatz ermittelte Straßenkapazität für den nicht-automatisierten Verkehr beträgt 2000 Kfz/h. Aus den Fahrzeugfolgeexperimenten des ersten Datensatzes

[51] Aus dem Handbuch des Herstellers für den 2016 Lincoln MKZ lässt sich entnehmen, dass die vier Stufen der Folgeabstände den folgenden zeitlichen Abständen entsprechen: 1 s, 1,4 s, 1,8 s, und 2,2 s [148].

ergeben sich Straßenkapazitäten von 1500 Kfz/h bis 2900 Kfz/h abhängig vom gewählten Folgeabstand. Große Folgeabstände von 2,2 s können zu einer Reduktion der Straßenkapazität um 25% im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall führen, während kleine Folgeabstände von 1 s die Straßenkapazität um bis zu 45% steigern können.

Li et al. [149] haben in einer Studie aus dem Jahr 2022 das Folgeverhalten verschiedener kommerziell verfügbarer Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomat untersucht und Fundamentaldiagramme für diese erstellt. Sie haben dazu Trajektorien von Fahrzeugen aus verschiedenen Fahrzeugfolgeexperimenten ausgewertet. Die untersuchten Daten umfassen 17 Fahrzeugmodelle.

Ihre Auswertung zeigt, dass die meisten Fahrzeuge während der Experimente auch auf der niedrigsten Abstandsstufe einen Folgeabstand von 0,75 s nicht unterschritten haben. Der geringste gemessene Folgeabstand eines Fahrzeugs während der Experimente betrug allerdings nur 0,54 s. Der höchste gemessene Folgeabstand betrug hingegen 2,39 s.

Als Referenzdaten für nicht-automatisierte Fahrzeuge verwendeten die Autoren Daten einer Studie, die Trajektorien realer Fahrzeuge auf Autobahnen in den USA ausgewertet hat. Den mittlere Folgeabstand nicht-automatisierter Fahrzeuge haben sie daraus mit 1,5 s ermittelt.

Die von den Autoren bestimmten Straßenkapazitäten für die automatisierten Fahrzeuge fielen ähnlich breit aus wie die Folgeabstände. Die drei höchsten Kapazitätswerte lagen im Bereich von 3300 Kfz/h bis 3600 Kfz/h, während die niedrigsten Kapazitätswerte im Bereich von 1300 Kfz/h bis 1400 Kfz/h lagen. Als Referenzwert für nicht automatisierte Fahrzeuge haben sie einen Mittelwert von 2050 Kfz/h ermittelt.

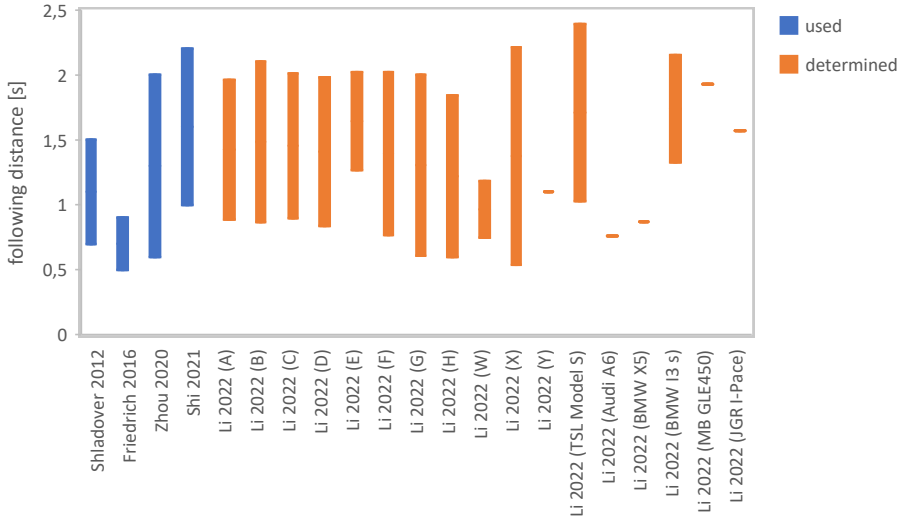


Abbildung 2-16 Verwendete und ermittelte Fahrzeugfolgeabstände der vorgestellten Studien. Referenzen: Friedrich 2016 [140], Li 2022 [149], Shi 2021 [141], Shladover 2012 [145], Zhou 2020 [144].

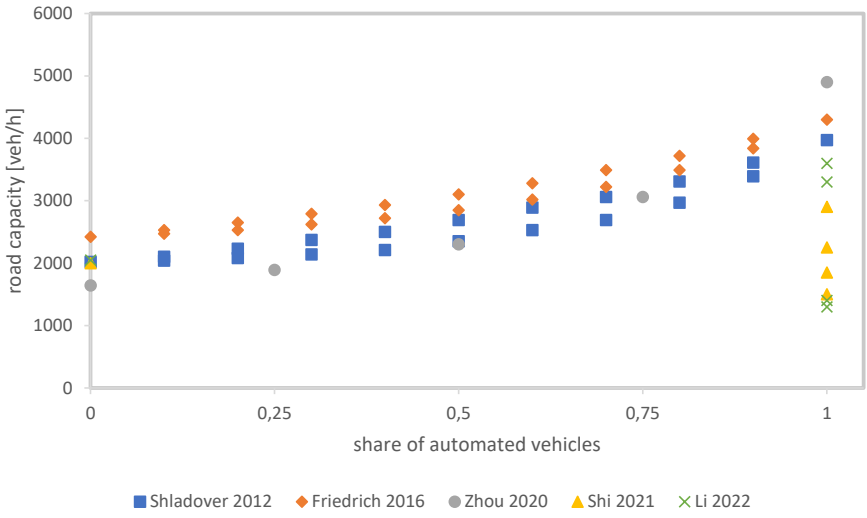


Abbildung 2-17 Ermittelte Straßenkapazitäten der vorgestellten Studien. Referenzen: Friedrich 2016 [140], Li 2022 [149], Shi 2021 [141], Shladover 2012 [145], Zhou 2020 [144].

In den vorgestellten Studien lassen sich folgende Trends erkennen:

Die gewählten zeitlichen Folgeabstände automatisierter Fahrzeuge wurden in frühen Studien niedriger gewählt als für nicht-automatisierte Fahrzeuge, mit einem Minimalwert von 0,5 s für automatisierte Fahrzeuge gegenüber einem Wert von 1,15 s für nicht-automatisierte Fahrzeuge [140]. Dies lässt sich so interpretieren, dass mit diesen Studien das maximale Potential zur Steigerung der Straßenkapazität durch automatisierte Fahrzeuge abgeschätzt werden sollte.

Neuere Studien, die Folgeabstände real verfügbarer Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomat verwenden, berücksichtigen auch Folgeabstände, die oberhalb derer nicht-automatisierter Fahrzeuge liegen [141].

Die Bandbreite realisierter Folgeabstände von Fahrzeugen mit Abstandsregeltempomat ist sehr groß und reicht von 0,54 s bis zu 2,39 s [149]. Die Tatsache, dass heutige Fahrzeuge jedoch bereits Abstände von 0,54 s einhalten können, lässt die Vermutung zu, dass diese Abstände für zukünftige automatisierte Fahrzeuge noch geringer ausfallen könnten.

Die Wahl der Folgeabstände hat einen großen Einfluss auf die berechneten und simulierten Straßenkapazitäten. Die Straßenkapazitäten weisen mit einer Spannweite von 1300 bis 3600 Kfz/h erhebliche Schwankungen auf [149]. Werden Folgeabstände gewählt, die oberhalb des aktuellen menschlichen Folgeabstands liegen, reduziert sich die Straßenkapazität. Werden hingegen kürzere Folgeabstände gewählt, so nimmt die Straßenkapazität zu.

Für die Analysen in dieser Arbeit ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

Es ist notwendig Personenkraftwagen und Lastkraftwagen als verschiedene Fahrzeugtypen für die Berechnung der Straßenkapazität zu berücksichtigen.

Der Folgeabstand nicht-automatisierter Fahrzeuge wird mit 1,6 Sekunden angenommen.

Der Folgeabstand automatisierter Fahrzeuge wird mit 0,8 Sekunden angenommen.

Es findet keine Unterscheidung für die Folgeabstände automatisierter Fahrzeuge für unterschiedliche vorausfahrende Fahrzeuge statt. Der angenommene Wert für den Folgeabstand automatisierter Fahrzeuge liegt im unteren Bereich der Abstände, die mit heutigen Abstandsregeltempomaten bereits realisiert werden können. Für diesen Abstand ist keine Kommunikation mit anderen Fahrzeugen notwendig. Daher kann dieser Abstand zu allen vorausfahrenden Fahrzeugen eingehalten werden.

2.5.3 Auswirkungen auf die Auslastung des Straßennetzwerks

Die verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge sind von besonderem Interesse für die Planung zukünftiger Verkehrsinfrastrukturen. Steigende Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr können zusätzliche Investitionen für den Infrastrukturausbau erforderlich machen. Wie im vorherigen Unterabschnitt 2.5.2 gezeigt, können automatisierte Fahrzeuge jedoch die Kapazität von Straßenabschnitten erhöhen und somit einem steigenden Verkehrsaufkommen entgegenwirken. Da eine Infrastrukturplanung für mehrere Jahrzehnte im Voraus zu denken ist, sollte der potentielle Einfluss automatisierter Fahrzeuge in heutigen Planungen bereits berücksichtigt werden, obwohl automatisierte Fahrzeuge noch nicht verfügbar sind. Ein Netzausbau, der im Fall des nicht-automatisierten Verkehrs notwendig erscheint, wird im Fall eines automatisierten Verkehrs vermutlich nicht mehr notwendig sein.

Im Folgenden werden Studien zu den potentiellen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Straßennetzwerks vorgestellt und die bestehende Forschungslücke herausgestellt.

Die Übersichtsstudien von Aittoniemi [150] sowie Matin und Dia [151] haben eine Vielzahl an Studien gefunden, die den verkehrlichen Einfluss automatisierter Fahrzeuge untersuchen. Dabei haben sowohl Aittoniemi [150] als auch Matin und Dia [151] festgestellt, dass die meisten existenten Studien den Einfluss selbst entwickelter Konzepte für das Folgeverhalten und den Verkehrsfluss automatisierter Fahrzeuge auf einzelnen Abschnitten untersucht haben und die praktischen Implikationen für den Verkehrsfluss in Straßennetzwerken für die Studien weniger relevant waren. Weiterhin hat Aittoniemi [150] angemerkt, dass die Studien nur eine begrenzte Anzahl an Straßenkonstellationen untersuchen und sich im Wesentlichen auf Personenkraftwagen konzentrieren.

Nur einzelne Studien betrachten ein Netzwerk mehrerer Straßenabschnitte oder sogar Metropolregionen. Park et al. [152] modellieren den verkehrlichen Einfluss automatisierter Personenkraftwagen im Stadtverkehr. Dazu betrachten sie einen 4,5 km langen Abschnitt eines Straßennetzwerks bestehend aus einer Hauptstraße mit mehreren Stich- und Nebenstraßen mit insgesamt 13 Kreuzungen in einer mikroskopischen Verkehrssimulation, die das Fahrverhalten automatisierter Personenkraftwagen über kürzere Folgeabstände im Vergleich zu nicht-automatisierten Personenkraftwagen abbildet. Auld et al. [70] betrachten die Metropolregion Chicago und modellieren den Verkehrsfluss über gruppierte Verkehrsaufkommen und durchschnittliche Geschwindigkeit von Fahrzeugen auf einzelnen Abschnitten. Die Analysen von Park et al. [152] und Auld et al. [70] beschränken sich auf Personenkraftwagen. Im Gegensatz dazu betrachten Chowdhury et al. [153] neben Personenkraftwagen auch Lastkraftwagen in einer Analyse der Metropolregion Toronto und

Hamilton[52]. Sie modellieren das Verkehrsaufkommen für fünf Zeitabschnitte pro Tag über mehrere Stunden und vergleichen es mit gemessenen Verkehrsaufkommen auf Autobahnen sowie auf Stadtstraßen. Für automatisierte Lastkraftwagen nehmen sie an, dass diese gemessen in Personenkraftwagenäquivalenten weniger der Straßenkapazität in Anspruch nehmen als nicht-automatisierte Lastkraftwagen.

Hartmann et al. [154] gehen noch einen Schritt weiter und betrachten das gesamte Autobahnnetzwerk in Deutschland. Mit der kommerziellen Software PTV Validate modellieren sie das Verkehrsaufkommen des Personen- und Güterverkehrs auf deutschen Autobahnen in täglicher Auflösung und vergleichen es anschließend mit der jeweiligen Kapazität der Straßenabschnitte. Um den Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Straßenkapazität abzubilden, führen sie mikroskopische Verkehrssimulationen auf generischen Autobahnsegmenten durch und übertragen die Ergebnisse auf die jeweiligen Autobahnabschnitte, die diesen Segmenten entsprechen. Für den Fall, dass alle Fahrzeuge automatisiert sind, finden sie eine starke Abnahme der Auslastung des Autobahnnetzwerks durch eine Zunahme der Kapazität um 30%. Für geringe Anteile automatisierter Fahrzeuge sind die Auswirkungen hingegen vernachlässigbar.

Insgesamt zeigt sich, dass nur wenige Studien den verkehrlichen Einfluss automatisierter Fahrzeuge für größere Straßennetzwerke untersucht haben. Die meisten Studien beschränken sich auf einzelne Straßenabschnitte oder kleinere Netzwerke. Dabei liegt ein Fokus auf dem Personenverkehr. Der Güterverkehr wird nur in einzelnen Studien explizit berücksichtigt. In den Studien, die größere Straßennetzwerke betrachtet haben, werden die verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge für einzelne Abschnitte bestimmt oder festgelegt und anschließend abschnittsweise auf das gesamte Straßennetzwerk übertragen.

Für die Studien, die bereits größere Straßennetzwerke untersucht haben lässt sich folgende Forschungslücke identifizieren:

Die Studien beschreiben die potentiellen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge und bestimmen teilweise auch ökonomische Vorteile. Das Verkehrsaufkommen liegt dabei allerdings nur in täglicher oder maximal mehrstündiger Auflösung vor. Eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung ist jedoch notwendig, um die Auslastung des Straßennetzwerks adäquat beurteilen und Engstellen identifizieren zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die identifizierte Lücke geschlossen werden. Dazu wird das Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr in stündlicher Auflösung modelliert und auf das Straßennetzwerk umgelegt. Die Auslastung aller Autobahnabschnitte wird anschließend einzeln in stündlicher Auflösung analysiert. Potentielle Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge werden mit den Auswirkungen einer Erweiterung überlasteter Autobahnabschnitte um eine Fahrspur sowie einer Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs verglichen. Dabei werden sowohl die verkehrlichen Einflüsse als auch die mit den jeweiligen Maßnahmen verbundenen Kosten beurteilt.

[52] Eng.: Greater Toronto and Hamilton Area

In diesem Abschnitt wurden Studien zum verkehrlichen Einfluss automatisierter Fahrzeuge vorgestellt und die Forschungslücke identifiziert, welche im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden soll.

Viele Studien haben bereits den Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss einzelner Straßenabschnitte untersucht. Dabei wird der Einfluss im Wesentlichen über veränderte Folgeabstände automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu nicht-automatisierten Fahrzeugen abgebildet. Halten automatisierte Fahrzeuge kürzere Folgeabstände als menschliche Fahrer ein, kann dies die Kapazität der Straßenabschnitte erhöhen und somit einen höheren Verkehrsfluss bei gleichbleibender Infrastruktur ermöglichen.

Einige Studien haben auch bereits den verkehrlichen Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf größere Straßennetzwerke untersucht, indem sie die Ergebnisse von Analysen zu einzelnen Straßenabschnitte auf das gesamte Netzwerk übertragen haben. Dabei zeigt sich jedoch noch eine Lücke. Das Verkehrsaufkommen liegt in diesen Studien nur in täglicher oder maximal mehrstündiger Auflösung vor. Eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung ist jedoch notwendig, um die Auslastung des Straßennetzwerks adäquat beurteilen und Engstellen identifizieren zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die identifizierte Lücke geschlossen werden. Dazu wird das Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr in stündlicher Auflösung modelliert. Die Auslastung aller Autobahnabschnitte wird anschließend analysiert. Abschließend werden potentielle Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge mit den Auswirkungen einer Erweiterung überlasteter Autobahnabschnitte um eine Fahrspur sowie einer Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs verglichen.

2.6 Verkehrsaufkommen in Deutschland

Im Rahmen dieser Arbeit werden Analysen zur Auslastung des deutschen Straßennetzwerks durchgeführt. Um solche Analysen sinnvoll durchführen zu können, muss das Verkehrsaufkommen adäquat modelliert werden. In diesem Abschnitt werden Datenquellen vorgestellt, die für die Modellierung und Validierung des Verkehrsaufkommens in dieser Arbeit verwendet werden. Diese beinhalten aktuelle Verkehrsstatistiken für Deutschland sowie Prognosen für die zukünftige Entwicklung des Verkehrsaufkommens.

Aktuelle Statistiken zum Verkehrsaufkommen sind geeignet, um Annahmen für die Modellierung zu treffen und die Modellierungsergebnisse zu validieren. Statistiken zum Gesamtverkehrsaufkommen und insbesondere dem Güterverkehrsaufkommen werden in Unterabschnitt 2.6.1 vorgestellt.

Um eine sinnvolle Analyse der Auslastung des Straßennetzwerks durchführen zu können, ist jedoch eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung des Verkehrsaufkommens notwendig. Im folgenden Unterabschnitt 2.6.2 werden daher Datenquellen zur räumlichen und zeitlichen Verteilung des Verkehrsaufkommens sowie zum Straßennetzwerk vorgestellt.

Wie in Unterabschnitt 2.2.3 dargestellt, werden automatisierte Fahrzeuge vermutlich erst in den nächsten Jahrzehnten einen relevanten Effekt auf den Straßenverkehr haben. Prognosen des zukünftigen Verkehrsaufkommens sind deshalb notwendig, um den Einfluss des automatisierten Fahrens abschätzen zu können. Prognosen zur Entwicklung des Verkehrsaufkommens in Deutschland werden in Unterabschnitt 2.6.3 vorgestellt.

2.6.1 Gesamtverkehrsaufkommen

Ein Standardwerk zur Verkehrsstatistik in Deutschland ist „Verkehr in Zahlen“, welches jährlich vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr herausgegeben wird. Es beinhaltet Daten zum Personen- und Güterverkehr. Die Modellierungen in dieser Arbeit verwenden das Jahr 2019 als Basisjahr. Die Vergleichswerte für das Verkehrsaufkommen werden dementsprechend aus „Verkehr in Zahlen 2021/2022“ [155] für das Jahr 2019 entnommen.

Die Personenverkehrsleistung für das Jahr 2019 wird darin mit 1170,2 Mrd. pkm[53] angegeben, wovon 917,4 Mrd. pkm auf den motorisierten Individualverkehr, sprich Personenkraftwagen, motorisierte Zweiräder, Taxen und Mietwagen, entfallen. Die Güterverkehrsleistung für den Straßengüterverkehr auf deutschen Straßen wird mit 498,6 Mrd. tkm[54] angegeben, wovon 291,6 Mrd. tkm auf deutsche Lastkraftfahrzeuge entfallen.

Für den Straßengüterverkehr gibt das Kraftfahrtbundesamt ebenfalls jährlich eine Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen heraus. Die Verkehrsleistung für den Straßengüterverkehr auf deutschen Straßen wird darin für das Jahr 2019 mit 470,3 Mrd. tkm angegeben [156]. Die Statistik enthält zusätzlich eine detaillierte Aufstellung über die insgesamt gefahrenen Last- und Leerkilometer.

Weiterhin gibt das Kraftfahrtbundesamt eine jährliche Übersicht des im Zentralen Fahrzeugregister gespeicherten Fahrzeugbestands aus [157].

2.6.2 Räumlich und zeitlich aufgelöstes Verkehrsaufkommen

Detaillierte Daten zum Mobilitätsverhalten im Personenverkehr und der Fahrzeugnutzung im Güterverkehr werden im mehrjährigen Abstand in Form von Stichprobenerhebungen aufgenommen.

Für das Mobilitätsverhalten im Personenverkehr ist die „Mobilität in Deutschland“ die bundesweit größte Erhebung zur Alltagsmobilität [158]. Die letzte Erhebung fand im Jahr 2023 statt, die Daten dieser Erhebung werden jedoch voraussichtlich erst Ende 2024 zur Verfügung stehen. Die letzte Erhebung, deren Daten verfügbar sind, fand im Jahr 2017 statt [84]. Sie umfasst das Mobilitätsverhalten von 70.000 Personen aus 35.000 Haushalten. In der Erhebung sind zurückgelegte Wegstrecken, genutzte Verkehrsmittel und die jeweiligen Wegzwecke der Personen am Befragungsstichtag sowie haushalts- und personenbezogene Daten erfasst.

Eine weitere Erhebung zum Mobilitätsverhalten im Personenverkehr ist das „Deutsche Mobilitätspanel“ [85]. Das Mobilitätspanel ist eine jährliche Längsschnittstudie. In dieser Erhebung machen die teilnehmenden Personen Angaben zu ihrem Mobilitätsverhalten innerhalb einer Woche in Form eines Tagebuchs. Die Daten enthalten Informationen zu zurückgelegten Wegen sowie deren Zeiträumen, gewählten Verkehrsmitteln und Zwecken. Aus diesen Daten lassen sich repräsentative Mobilitätsprofile für Personengruppen erstellen.

Zusätzlich gibt es mit „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ eine Erhebung der Nutzung von Fahrzeugen mit einem Schwerpunkt auf dem Wirtschaftsverkehr [159, 160]. Die Erhebung umfasst Fahrten im Güterverkehr sowie im Personenverkehr mit dienstlichem/geschäftlichem Zweck. Die letzte Erhebung hat im Jahr 2010 stattgefunden. Für den Güterverkehr enthält die

[53] Personenkilometer

[54] Tonnenkilometer

Erhebung Angaben zum Fahrzeugtyp, den Zeiten und Längen der durchgeführten Fahrten sowie der Art und Menge der transportierten Ladung am jeweiligen Befragungsstichtag.

Eine zusätzliche Quelle für regional aufgelöste Güterverkehrsströme ist der von Speth et al. [161] kurierte Datensatz „Synthetic European Freight Flows“, der auf Mendeley bereitgestellt wird [162]. Der Datensatz enthält Abschätzungen der transportierten Gütermengen zwischen den NUTS-3 Regionen Europas auf jährlicher Basis für die Jahre 2010 und 2019 sowie eine Prognose für das Jahr 2030.

NUTS[55] ist eine Klassifikation der Gebietseinheiten der Europäischen Union, die einen grenzübergreifenden Vergleich von Regionen ermöglichen soll [163, 164]. Für Deutschland entspricht die NUTS-3 Klassifikation den Kreisen und kreisfreien Städten.

Für eine höhere räumliche Auflösung können die NUTS-3 Regionen für Deutschland auf die Gemeindeverbandsebene runtergebrochen werden. Eine Übersicht der politisch selbstständigen Gemeinden, welche auch die Gemeindeverbände enthält, bietet das Statistische Bundesamt [165]. Im Jahr 2019 gab es 11010 Gemeinden in Deutschland, deren Größen und Strukturen sich jedoch stark für die Bundesländer unterscheiden. Eine zwischen den Bundesländern vergleichbare Ebene Stellen die Gemeindeverbände dar, welche einzelne Gemeinden zusammenfassen, falls diese eine Mindestgröße unterschreiten. Insgesamt gab es im Jahr 2019 in Deutschland 4623 Gemeindeverbände. Um das Verkehrsaufkommen von den NUTS-3 Regionen auf die Gemeindeverbandsebene herunterzubrechen werden in dieser Arbeit Beschäftigungsstatistiken der Regionaldatenbank Deutschland der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder genutzt [166].

In dem Datensatz von Speth et al. [161], der Abschätzungen zu den transportierten Gütermengen zwischen den NUTS-3 Regionen Europas auf jährlicher Basis enthält, wurde der lokale Verkehr innerhalb der NUTS-3 Regionen entfernt, da die Autoren das Verkehrsaufkommen im europäischen Autobahnnetzwerk untersucht haben und eine lokale Betrachtung auf Grund der groben Auflösung des Straßennetzwerks nicht sinnvoll war.

Der lokale Verkehr innerhalb der NUTS-3 Regionen lässt sich jedoch aus den Daten des ETISPlus Projektes aus dem Jahr 2012 [167] rekonstruieren, auf welchen der Datensatz von Speth et al. [161] basiert.

Um die Auslastung des Verkehrssystems analysieren zu können, muss das regional aufgelöste Verkehrsaufkommen auf das Straßennetzwerk umgelegt werden. Dazu werden einerseits Daten zum Straßennetzwerk und andererseits Methoden zur Umlegung benötigt.

Eine Quelle für Daten zum Straßennetzwerk stellt „OpenStreetMap“ [168] dar. „OpenStreetMap“ ist ein Projekt, bei dem Mitglieder Geodaten sammeln und in einer Datenbank zur freien Verfügung stellen. Dabei wird das Straßennetzwerk nach bestimmten Straßenklassen typisiert [169]. Die Daten können in Python mit Hilfe der Programmbibliothek OSMnx [170] direkt heruntergeladen und in eine Netzwerkstruktur umgewandelt werden.

Das Straßennetzwerk aus „OpenStreetMap“ lässt sich anhand der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr [171] und speziell für den Autobahnanteil anhand der Berichte zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr des Bundesamts für Logistik und Mobilität und der Toll Collect GmbH [172, 173] validieren.

[55] Nomenclature des Unités territoriales statistiques

Für die Umlegung auf das Straßennetzwerk muss das Verkehrsaufkommen in tatsächliche Routen umgewandelt werden. Unter der Annahme, dass der Transport im Personen- und Güterverkehr nur Mittel zum Zweck ist und keine unnötig langen Strecken gefahren werden, entsprechen die Routen den kürzesten Verbindungen zwischen den jeweiligen Regionen. Die kürzesten Verbindungen in einem Netzwerk lassen sich mit Hilfe verschiedener Algorithmen bestimmen. In Python kann unter anderem die Programmbibliothek NetworkX [174] verwendet werden, in welcher eine Umsetzung des Dijkstra-Algorithmus implementiert ist.

Für den Vergleich des modellierten Verkehrsaufkommens mit dem tatsächlichen Aufkommen auf Abschnitten von Bundesautobahnen und Bundesstraßen lässt sich das von festinstallierten Dauerzählstellen erfasste Verkehrsaufkommen verwenden. Die Dauerzählstellen geben Aufschluss über das Verkehrsaufkommen an bestimmten Orten zu bestimmten Zeitpunkten. Damit ergänzen sie umfängliche manuelle Verkehrszählungen, welche nur im Abstand mehrerer Jahre durchgeführt werden.

Die Dauerzählstellen bestehen aus von Wechselstrom durchflossenen Induktionsschleifen, die sich unterhalb der Fahrbahn jeder Fahrspur befinden. Fährt ein Fahrzeug über eine Induktionsschleife, so verändern die Metallteile des Fahrzeugs die Induktivität der Spule und das Fahrzeug wird auf diese Weise erfasst. Basierend auf der Form des Signals kann auch eine Unterscheidung verschiedener Fahrzeugtypen wie Motorräder, Personenkraftwagen oder Lastkraftwagen stattfinden. Weiterhin befinden sich auf einer Fahrspur jeweils zwei Induktionsschleifen in einem Abstand weniger Meter zueinander, sodass aus dem zeitlichen Abstand der Signale der beiden Induktionsschleifen auch die Geschwindigkeit des passierenden Fahrzeugs bestimmt werden kann.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen stellt die Daten festinstallierter Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen in stündlicher Auflösung kostenlos zur Verfügung. Für das Jahr 2019 umfasst der Datensatz insgesamt 1551 Dauerzählstellen, von denen 837 auf Autobahnen und 714 auf Bundesstraßen installiert sind [175].

Die modellierte Fahrleistung auf Autobahnen lässt sich weiterhin anhand der Verkehrs- und Unfalldaten der Bundesanstalt für Straßenwesen [176] und der Mautstatistik des Bundesamts für Güterverkehr [177] validieren.

2.6.3 Zukünftige Entwicklung des Verkehrsaufkommens

Eine langfristige Prognose für den Personen- und Güterverkehr stellt die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [2] aus dem Jahr 2014 dar. Sie wurde vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr[56] in Auftrag gegeben und dient als Orientierung für langfristige verkehrspolitische Belange. Sie beinhaltet den Straßenverkehr, Schienenverkehr, die Binnenschifffahrt für den Güterverkehr sowie den Luftverkehr.

Für die Verkehrsverflechtungsprognose dient das Jahr 2010 als Basisjahr und es wird das Verkehrsaufkommen für das Jahr 2030 prognostiziert. Die Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs im Personenverkehr soll in diesem Zeitraum um 9,9% von 902,4 Mrd. pkm auf 991,8 Mrd. pkm ansteigen und die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr um 38,9% von 437,3 Mrd. tkm auf 607,4 Mrd. tkm.

[56] Damals Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur

Die Prognose verwendet jedoch mittlerweile veraltete Annahmen. Unter anderem wird eine Abnahme der Bevölkerung in Deutschland von 80,210 Mio. Personen im Jahr 2010 auf 78,249 Mio. Personen im Jahr 2030 angenommen.

Eine aktuellere Prognose stellt die Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022 [3] aus dem Jahr 2023 dar, welche ebenfalls vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr in Auftrag gegeben wurde.

Laut dieser Prognose nimmt die Verkehrsleistung im Personenverkehr von 2019 bis 2051 um 13% zu. Dabei nimmt der motorisierte Individualverkehr jedoch nur um 4% zu. Die Verkehrsleistung im Güterverkehr nimmt im gleichen Zeitraum um 46% zu. Wobei der Straßengüterverkehr sogar um 54% zunimmt.

In dem Bericht „Verkehrswende als Mehrwert“ von Agora Verkehrswende wird ein ähnlicher Anstieg des Personenverkehrsaufkommens um 4,1% vom Jahr 2019 bis zum Jahr 2045 angenommen, der Anstieg der Güterverkehrsleistung wird jedoch mit 22,6% deutlich geringer angenommen [178].

Die Ausführung zu den verwendeten Datenquellen zur Modellierung und Validierung des Verkehrsaufkommens schließen das Literaturkapitel dieser Arbeit ab.

Im Folgenden werden die Forschungslücken, die sich aus der Literaturanalyse ergeben und die Aufgaben, die sich für diese Arbeit ergeben, noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Betriebskosten- und Fahrerbedarf automatisierter Lastkraftwagen (siehe Abschnitt 2.3)

Betriebskostenanalysen automatisierter Fahrzeuge werden bisher nur für wenige Einsatzbereiche und mit exogenen Annahmen zu möglichen Einsparungen durch die Automatisierung durchgeführt. Eine detaillierte Betrachtung der Änderungen der Fahrerkosten als entscheidender Faktor der Kosteneinsparungen ist jedoch notwendig. Darüber hinaus werden die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Fahrerbedarf bisher ohne eine detaillierte Modellierung der verschiedenen Aufgaben eines Fahrer, die über die reine Fahraufgabe hinausgehen, untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Betriebskostenanalyse automatisierter Fahrzeuge für eine Vielzahl an Einsatzprofilen durchgeführt. Dabei werden die jeweiligen Fahrzeiten sowie Be- und Entladezeiten modelliert, um Einsparungen in den Fahrerkosten sowie den Fahrerbedarf für automatisierte Fahrzeuge zu bestimmen.

Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge (siehe Abschnitt 2.4)

Der Energiebedarf des Automatisierungssystems wird in Studien zum Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge bisher vernachlässigt. Studien zum Leistungsbedarf des Automatisierungssystems zeigen jedoch, dass der benötigte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems heutzutage bis in den Bereich einiger kW reicht. Die Auswirkungen eines solchen Leistungsbedarf des Automatisierungssystems auf den Gesamtenergiebedarf sind abhängig vom jeweiligen Fahrzeugtypen und Einsatzbereich nicht vernachlässigbar.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Energiebedarfs automatisierter Personen- und Lastkraftwagen in verschiedenen Verkehrsumgebungen inklusive des Energiebedarfs des Automatisierungssystems modelliert.

Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge (siehe Abschnitt 2.5)

Studien zu den verkehrlichen Einflüssen automatisierter Fahrzeuge in größeren Straßennetzwerken modellieren das Verkehrsaufkommen in täglicher oder maximal mehrstündiger Auflösung. Eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung ist jedoch notwendig, um die Auslastung des Straßennetzwerks adäquat beurteilen und Engstellen identifizieren zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr in stündlicher Auflösung modelliert, um die Auslastung aller Autobahnabschnitte sowie potentielle Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge zu analysieren.

Im folgenden Kapitel 3 wird die Methodik und der Modellierungsansatz der Analysen dieser Arbeit detailliert beschrieben.

3 Modellierungsansatz

In diesem Kapitel werden die Methodiken der drei Analysebereiche dieser Arbeit zu den Betriebskosten, dem Energiebedarf und den verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge vorgestellt. In Abschnitt 3.1 wird die Methodik der Betriebskostenanalyse dargestellt. Dabei werden das grundlegende Modell für die Betriebskosten von Lastkraftwagen und die Anpassungen des Modells im Rahmen dieser Arbeit sowie die entwickelten Betriebsstrategien für automatisierte Lastkraftwagen und die untersuchten Einsatzprofile vorgestellt. In Abschnitt 3.2 wird die Methodik zur Berechnung des Energiebedarfs dargestellt. Dazu werden die durchgeführten Anpassungen von Fahrzyklen zur Abbildung einer angepassten Fahrweise automatisierter Fahrzeuge diskutiert. Abschließend wird in Abschnitt 3.3 die Methodik zur Beurteilung der verkehrlichen Auswirkungen und der Netzwerkauslastung des Straßennetzwerks vorgestellt. Es werden die Ansätze zur Modellierung des Verkehrsaufkommens im Personen- und Güterverkehr sowie zur Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk dargelegt.

3.1 Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen

In diesem Abschnitt wird die Methodik für die Betriebskostenanalyse in dieser Arbeit dargestellt. In Unterabschnitt 3.1.1 wird zuerst das grundlegende Modell zur Berechnung der Gesamtbetriebskosten vorgestellt. Anschließend werden in Unterabschnitt 3.1.2 die Anpassungen dieses Modells zur Abbildung automatisierter Fahrzeuge erläutert. In Unterabschnitt 3.1.3 werden mögliche Stufe 4 Betriebsstrategien und ihre Auswirkungen auf die Fahrerkosten präsentiert. Abschließend werden in Unterabschnitt 3.1.4 die untersuchten Einsatzprofile vorgestellt. Die explizite Modellierung der Lohnkosten für den Fahrer für die verschiedenen Betriebsstrategien sowie die Definition einer Vielzahl an Einsatzprofilen stellen dabei methodische Weiterentwicklungen gegenüber der bestehenden Literatur dar.

3.1.1 Grundlegendes Modell für die Berechnung der Gesamtbetriebskosten

Als Grundlage für die Berechnung der Gesamtbetriebskosten dient das Betriebskostenmodell ETHOS.Veh|Cost [104, 136]. Dieses berechnet die Gesamtbetriebskosten TCO[57] als Summe der Investitionsausgaben $Capex$[58] und der Betriebskosten $Opex$[59]

$$TCO = Capex + Opex \ .$$

Gl. 3-1

Die Investitionsausgaben ergeben sich aus den Anschaffungskosten und dem Restwert des Fahrzeugs. Der Restwert des Fahrzeugs wird dabei mit einem Barwert-Zinsfaktor $PVIF$[60] diskontiert. Anschließend werden die Investitionsausgaben mit einem Kapitalrückflussfaktor

[57] Eng: total cost of ownership
[58] Eng: capital expenditures
[59] Eng: operating expenses
[60] Eng: present value interest factor

CRF[61] in jährliche Zahlungen über die Haltedauer des Fahrzeugs umgerechnet. Schließlich ergeben sich die Investitionsausgaben pro Fahrtkilometer, indem die jährlichen Zahlungen mit der jährlichen Gesamtfahrleistung VMT[62] verrechnet werden

$$Capex = \frac{\left(C_{\text{Anschaffung}} - C_{\text{Restwert}} \cdot PVIF\right) \cdot \text{CRF}}{VMT_{\text{Jahr}}} \quad .$$

Gl. 3-2

Der Barwert-Zinsfaktor und Kapitalrückflussfaktor sind dabei gegeben als

$$PVIF = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Gl. 3-3

und

$$CRF = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad .$$

Gl. 3-4

Mit der jährlichen Zinsrate i und der Haltedauer des Fahrzeugs in Jahren n.

In den bisherigen Verwendungen des Modells wurde auf eine Betrachtung des Restwertes verzichtet, da diese marktspezifisch ist und eine Zinsrate von 0% angenommen [104].

In dieser Arbeit werden diese Annahmen beibehalten. Die Investitionsausgaben vereinfachen sich somit zu

$$Capex = \frac{C_{\text{Anschaffung}}}{n \cdot VMT_{\text{Jahr}}} \quad .$$

Gl. 3-5

Die Betriebskosten setzen sich aus variablen und fixen Betriebskosten zusammen

$$Opex = Opex_{\text{var}} + Opex_{\text{fix}} \ .$$

Gl. 3-6

Die variablen Betriebskosten umfassen dabei die Treibstoff- und Wartungskosten des Fahrzeugs

[61] Eng: capital recovery factor

[62] Eng: vehicle miles travelled

$$Opex_{\text{var}} = C_{\text{Treibstoff}} + C_{\text{Wartung}} \quad .$$

Gl. 3-7

Die Treibstoffkosten entsprechen dabei den durchschnittlichen Treibstoffkosten über die gesamte Haltedauer, die zugrundeliegenden jährlichen Treibstoffkosten bilden dabei die erwartete Kostenentwicklung für diese ab.

Mautkosten für zurückgelegte Strecken wurden im bisherigen Modell nicht berücksichtigt, da ein Vergleich verschiedener Antriebsstränge durchgeführt wurde und die Mautkosten zum Zeitpunkt der Modellentwicklung für alle Antriebsstränge gleich waren. Seit Dezember 2023 sind die Kosten jedoch abhängig von den CO_2-Emissionen der Fahrzeuge, um einen Anreiz für den Einsatz emissionsarmer Fahrzeuge zu schaffen [91]. Diese Kostenunterschiede sind politisch motiviert.

Mautkosten werden in dieser Arbeit weiterhin nicht berücksichtigt. In dieser Arbeit werden die Betriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen verglichen. Es soll kein Vergleich verschiedener Antriebsstränge stattfinden. Die politisch motivierte Verwendung unterschiedlicher Mauttarife für automatisierte und nicht-automatisierte Fahrzeuge wird ebenfalls nicht betrachtet.

Die fixen Betriebskosten umfassen jährliche Kosten für den Fahrer, Versicherung sowie Fahrzeugsteuern. Diese lassen sich mit der jährlichen Gesamtfahrleistung zu fixen Betriebskosten pro Kilometer umrechnen

$$Opex_{\text{fix}} = \frac{C_{\text{Fahrer}} + C_{\text{Versicherung}} + C_{\text{Steuern}}}{VMT_{\text{Jahr}}} \quad .$$

Gl. 3-8

Die fixen Betriebskosten wurden in den bisherigen Verwendungen des Modells bisher aus verschiedenen Gründen nicht berücksichtigt [104]. Versicherungskosten, weil sie abhängig vom Unternehmen sind. Steuern, weil sie politisch motiviert sind und die Ergebnisse für die einzelnen Antriebsstränge verschieben würden [104]. Fahrerkosten, weil sie für alle Antriebsstränge gleich hoch sind und somit keinen Einfluss auf den Vergleich der Antriebstränge haben.

In dieser Arbeit werden die Fahrerkosten sowie die Versicherungskosten als fixe Betriebskosten aufgenommen. Fahrzeugsteuern werden weiterhin nicht berücksichtigt, da die politisch motivierte Verwendung unterschiedlicher Fahrzeugsteuern für automatisierte und nicht-automatisierte Fahrzeuge nicht betrachtet wird.

3.1.2 Anpassungen des grundlegenden Modells für automatisierte Lastkraftwagen

Um die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf die Betriebskosten abzubilden, wird das Gesamtbetriebskostenmodell um zwei Aspekte erweitert.

Zuerst werden zu den Anschaffungskosten der Lastkraftwagen die Kosten für die Sensoren und das Computersystem automatisierter Fahrzeuge hinzugefügt und die Kosten für die

Fahrerkabine angepasst, welche für automatisierte Lastkraftwagen je nach Einsatzbereich keine Schlafkabine beinhalten muss.

Als zweites werden die Fahrer- und Versicherungskosten als fixe Betriebskosten aufgenommen. Fahrzeugsteuern werden nicht berücksichtigt, da diese für automatisierte und nicht-automatisierte Lastkraftwagen gleich hoch sind und somit keine Auswirkungen auf den Gesamtbetriebskostenvergleich haben. Die politisch motivierte Verwendung unterschiedlicher Fahrzeugsteuern für automatisierte und nicht-automatisierte Lastkraftwagen wird nicht betrachtet.

Treibstoff- und Wartungskosten werden in dieser Arbeit für automatisierte Lastkraftwagen im Vergleich zu nicht-automatisierten Lastkraftwagen unverändert angenommen. Wie die Analysen in Abschnitt 4.2 dieser Arbeit zeigen werden, verändert sich der Treibstoffbedarf automatisierter Lastkraftwagen durch den zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems und eine optimierte Fahrweise im Vergleich zu nicht-automatisierten Lastkraftwagen kaum.

Für die Sensoren automatisierter Lastkraftwagen werden neben den Anschaffungskosten keine weiteren Kosten angenommen. Für die Sensoren wird angenommen, dass ihre Lebensdauer die Haltedauer der Fahrzeuge übersteigt, ein Austausch der Sensoren ist somit nur notwendig, wenn diese durch einen Unfall beschädigt werden, dieser Fall ist jedoch von den Versicherungskosten abgedeckt. Weiterhin werden Kosten für eine spezielle Inspektion der Sensoren in dieser Arbeit vernachlässigt. Wird angenommen, dass eine Inspektion der Sensoren jährlich zusammen mit der Hauptuntersuchung durchgeführt wird und zusätzliche Kosten von 200 € für die Inspektion der Sensoren anfallen, ergeben sich selbst für das Einsatzprofil mit der geringsten in dieser Arbeit angenommenen Jahresfahrleistung von 15.000 km nur Kosten von knapp 0,01 €/km. Für alle anderen Einsatzprofile fallen die Kosten auf Grund einer höheren Jahresfahrleistung geringer aus. Zusätzliche Kosten für die Sensoren neben den Anschaffungskosten werden daher in dieser Arbeit vernachlässigt.

Die Anpassungen des Betriebskostenmodells für den Vergleich der Betriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen sind in Abbildung 3-1 zusammenfassend dargestellt.

Extension	Base model
$\boldsymbol{Capex = \frac{C_{automation}}{n \cdot VMT_{year}}} + \frac{C_{\mathrm{purchase}}}{n \cdot VMT_{\mathrm{year}}}$	
	$Opex_{\mathrm{var}} = C_{fuel} + C_{maintenance}$
$\boldsymbol{Opex_{fix} = \frac{C_{driver} + C_{insurance}}{VMT_{year}}}$	
$\boldsymbol{TCO = Capex + Opex_{fix}} + Opex_{\mathrm{var}}$	

Abbildung 3-1 Anpassungen des grundlegenden Betriebskostenmodells für den Vergleich der Betriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen.

Im Folgenden werden die durchgeführten Anpassungen detailliert beschrieben. Zuerst werden die Änderungen der Anschaffungskosten durch das Automatisierungssystem und die Vereinfachung der Fahrerkabine erläutert. Anschließend werden Versicherungskosten und deren Änderungen für automatisierte Lastkraftwagen diskutiert. Änderungen der Fahrerkosten werden in Unterabschnitt 3.1.3 separat diskutiert, da diese von den jeweiligen Betriebsstrategien der Stufe 4 und Stufe 5 automatisierten Fahrzeuge abhängig sind.

Anschaffungskosten

Für das Jahr 2020 werden Gesamtkosten von 40.000 € für das Automatisierungssystem angenommen, die sich aus 20.000 € für Sensoren, 5.000 € für das Computersystem und 15.000 € für die Automatisierungssoftware zusammensetzen. Die Annahmen zu den Kosten für das Automatisierungssystem basieren auf den Ausführungen zu den benötigten Sensoren in Unterabschnitt 2.2.1 und den Ausführungen zum Computersystem in Unterabschnitt 2.3.2. Es werden acht Kameras mit Gesamtkosten von 4.000 €, zwei Radar-Sensoren mit Gesamtkosten von 6.000 € und zwei kleine und ein großer Lidar-Sensor mit Gesamtkosten von 10.000 € angenommen.

Für das Jahr 2050 werden Gesamtkosten von 15.000 € für das Automatisierungssystem angenommen. Die Kostenentwicklung im Vergleich zum Jahr 2020 wird dabei für die Sensoren, das Computersystem und die Automatisierungssoftware unterschiedlich angenommen. Die Kosten des Computersystems nehmen auf Grund technischer Entwicklungen um 80% ab. Die Kosten für die Automatisierungssoftware auf Grund höherer Konkurrenz am Markt und geringerer Margen um 73% ab. Die Kosten der Sensoren nehmen auf Grund größerer Produktionsvolumen und technischer Entwicklungen um 50% ab.

Die Entwicklung der angenommenen Kosten ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

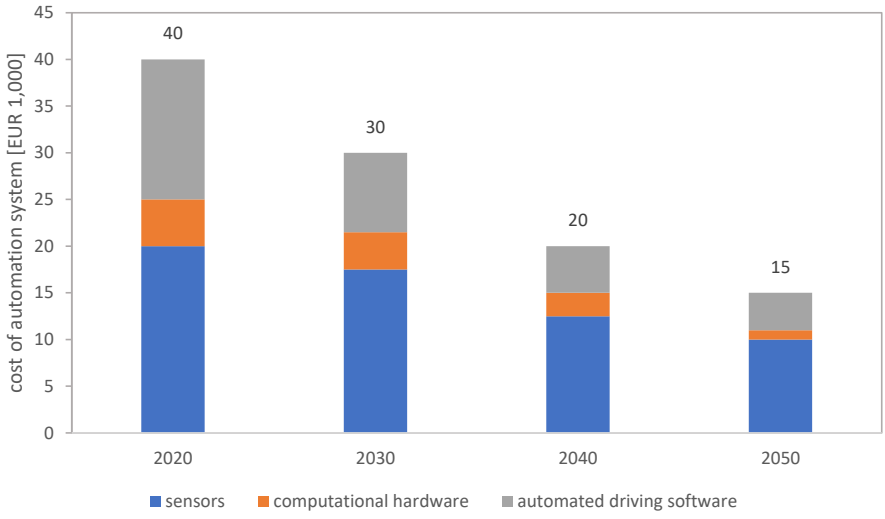


Abbildung 3-2 Zusammensetzung der Kosten für das Automatisierungssystem. Eigene Berechnung: Sensorkosten basieren auf [51, 53, 54]; Kosten für das Computersystem und die Software basieren auf [96, 97].

Die Auslegung der Fahrerkabine automatisierter Lastkraftwagen ist stark davon abhängig, für welche Strecken ein menschlicher Fahrer im Fahrzeug sein wird.

Im Fall der vollständigen Automatisierung kann gänzlich auf die Fahrerkabine verzichtet werden. Werden Autobahnfahrten automatisiert gefahren und nur Strecken abseits der Autobahn durch menschliche Fahrer, kann für den Fernverkehr auf eine Schlafkabine verzichtet werden. Wird das Fahrzeug abseits der Autobahn ferngesteuert, ist ein menschlicher Fahrer im Fahrzeug nur in Ausnahmefällen notwendig und die Fahrerkabine kann in Größe und Komfort weiter reduziert werden. In diesem Fall ist das Fahrzeug allerdings mit zusätzlicher Kommunikationstechnologie für die Fernsteuerung auszustatten, was die Einsparungen durch das vereinfachte Design wieder aufhebt.

Aus der Studie von Burnham et al. [94] lässt sich entnehmen, dass der Kostenunterschied eines Lastkraftwagens mit Schlafkabine und ohne Schlafkabine bei ungefähr 30.000 USD liegt. Die Angabe bezieht sich auf Lastkraftwagen in den USA, welche häufig mit deutlich üppigeren Schlafkabinen ausgestattet sind als Lastkraftwagen in Deutschland und Europa. Die möglichen Kosteneinsparungen werden in dieser Arbeit daher deutlich geringer angenommen.

Für den Verzicht auf eine Schlafkabine im Fernverkehr werden Einsparungen von 10.000 € angenommen, wird komplett auf eine Fahrerkabine verzichtet ergeben sich weitere Einsparungen von 10.000 €. Die maximalen Einsparungen betragen somit 20.000 € im Fernverkehr und 10.000 € im Nahverkehr.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass für alle Betriebsstrategien automatisierter Lastkraftwagen auf eine Schlafkabine verzichtet werden kann. Mögliche Betriebsstrategien automatisierter Lastkraftwagen werden in Unterabschnitt 3.1.3 detailliert beschrieben. Zum Abschluss dieses Unterabschnitts werden jedoch noch die Versicherungskosten der Fahrzeuge diskutiert.

Versicherungskosten

In der Betrachtung der Versicherungskosten der Fahrzeuge geht es in dieser Arbeit um die Versicherungskosten für Unfallrisiken. Die jährliche Versicherungsrate für nicht-automatisierte Fahrzeuge wird dabei mit 3,2% der Anschaffungskosten des Fahrzeugs angenommen, wie es den Unterlagen der *ING Groep N.V.* entspricht [92].

Die allgemeine Erwartung an automatisierte Fahrzeuge ist, dass diese die Anzahl und Schwere von Unfällen deutlich reduzieren werden, da die meisten Unfälle auf ein Fehlverhalten des menschlichen Fahrers zurückzuführen sind. Unter dieser Annahme würden die Versicherungskosten für Unfallrisiken abnehmen. Für heutige Unfallversicherungen gibt es reduzierte Versicherungsbeiträge je nachdem, wie lange jemand unfallfrei gefahren ist. Für einen menschlichen Fahrer mit 20 Jahren Unfallfreiheit kann die Versicherungsrate für einen Lastkraftwagen beispielsweise nur noch 30% des ursprünglichen Werts entsprechen [93].

Für vollständig automatisierte Fahrzeuge der Stufe 5 wird in dieser Arbeit analog zu einem menschlichen Fahrer mit 20 Jahren Unfallfreiheit eine Reduktion der Versicherungsrate um 70% im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall angenommen. Für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge wird hingegen die gleiche jährliche Versicherungsrate wie im nicht-automatisierten Fall von 3,2% der Anschaffungskosten angenommen.

Zusätzliche Kosten für Schäden an den Sensoren sind in den gewählten Versicherungskosten bereits enthalten. Sensoren befinden sich in exponierten Positionen an den Fahrzeugen und können bei Unfällen leicht beschädigt werden. Die Wahl der Versicherungskosten in

Abhängigkeit von den Anschaffungskosten des Fahrzeugs berücksichtigt für automatisierte Fahrzeuge neben den Sensorkosten auch die Kosten des Computersystems und der Software. Durch Unfälle entstehen jedoch keine Kosten für die Software und die Wahrscheinlichkeit für Schäden am Computersystem ist ebenfalls gering. Die Annahme der insgesamt gleichen Versicherungsrate wie für den nicht-automatisierten Fall berücksichtigt somit höhere Kosten für Schäden an Sensoren.

3.1.3 Betriebsstrategien und Fahrerkosten automatisierter Lastkraftwagen

Um einen Stufe 4 automatisierten Lastkraftwagen, der auf Autobahnen automatisiert fahren kann, effizient zu betreiben, müssen Betriebsstrategien entwickelt werden, die den nicht-automatisierten Teil der Fahrten abseits der Autobahnen und den Einsatz eines menschlichen Fahrers abdecken. Mögliche Betriebsstrategien und ihre Auswirkungen auf die Gesamtbetriebskostenanalyse im Rahmen dieser Arbeit werden in diesem Unterabschnitt vorgestellt.

Prinzipiell lässt sich bei den Betriebsstrategien eine Unterscheidung abhängig davon treffen, ob permanent ein menschlicher Fahrer an Bord des Lastkraftwagens ist oder nur für den Teil abseits der Autobahn. Für beide Varianten werden im Folgenden mögliche Betriebsstrategien vorgestellt.

Für den Fall, dass sich permanent ein menschlicher Fahrer an Bord befindet, ähnelt der Betrieb einer Doppelbesetzung eines nicht-automatisierten Lastkraftwagens mit zwei menschlichen Fahrern mit dem Unterschied, dass das automatisierte Fahrzeug einen menschlichen Fahrer ersetzt.

Ein solcher Betrieb ist vorwiegend für den Fernverkehr geeignet, bei denen der Fahrer mehrere Tage auf dem Fahrzeug verbringt. Der menschliche Fahrer kann eine Pause einlegen oder sogar schlafen, solange der Lastkraftwagen automatisiert auf der Autobahn fährt.

Große Einsparungen in den Fahrerkosten sind für einen solchen Betrieb jedoch nicht realisierbar. Der menschliche Fahrer müsste weiterhin für seine gesamte Zeit auf dem Lastkraftwagen bezahlt werden. Geringere Löhne für den Fahrer im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall sind dabei nicht zu erwarten. Das Fahren des Lastkraftwagens bleibt in dieser Betriebsweise weiterhin ein unterattraktiver Beruf, insbesondere wenn der Fahrer mehrere Tage unterwegs ist und nicht zuhause schlafen kann.

Weiterhin kann es auch zu Problemen mit den vorgeschriebenen Ruhezeiten des menschlichen Fahrers kommen. In der aktuellen EU-Verordnung zu Fahrt- und Ruhezeiten sind tägliche ununterbrochene Ruhezeiten von mindestens neun Stunden vorgeschrieben [105–109]. Diese können die Fahrzeiten des automatisierten Lastkraftwagens limitieren.

Aus diesen Gründen wird ein Betrieb, der während der gesamten Fahrzeit einen menschlichen Fahrer an Bord voraussetzen, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Für den Fall, dass ein menschlicher Fahrer erst für die Fahrt abseits der Autobahn auf das Fahrzeug kommt, gibt es zwei verschiedene Varianten für den Transfer des Fahrers zum Lastkraftwagen.

Im ersten Fall kommt der menschliche Fahrer mit einem Zubringerfahrzeug[63] zu dem Übergabeort, an dem die Fahrt abseits der Autobahn beginnt. Der Fahrer lässt das Zubringerfahrzeug dort stehen und fährt den Lastkraftwagen an seinen Zielort. Dort wartet er, während der Lastkraftwagen be- und entladen wird und fährt ihn anschließend zurück an den Übergabeort. Das Zubringerfahrzeug bleibt bis zur Rückkehr des menschlichen Fahrers an dem Übergabeort stehen. Am Übergabeort startet der Lastkraftwagen erneut seine automatisierte Fahrt auf der Autobahn und der menschliche Fahrer fährt mit dem Zubringerfahrzeug an den nächsten Übergabeort.

Der Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist für individuelle kleinere Zielorte mit geringem Straßengüterverkehrsaufkommen geeignet. Handelt es sich bei den Zielorten jedoch um Zielorte mit hohem Straßengüterverkehrsaufkommen oder große Logistikzentren, die alle denselben Übergabeort haben, ist ein Transfer auf andere Weise möglich.

Für Übergabeorte mit hohem Straßengüterverkehrsaufkommen kann eine Staffelfahrt[64] stattfinden. Das bedeutet, der Fahrer fährt mit einem anderen automatisierten Lastkraftwagen zum Übergabeort und wechselt dort das Fahrzeug. Der menschliche Fahrer fährt das neue Fahrzeug an seinen Zielort abseits der Autobahn, während das andere Fahrzeug seine automatisierte Fahrt auf der Autobahn aufnimmt.

Im Fall von Sattelzugmaschinen ist es sogar denkbar, dass der menschliche Fahrer eine nicht-automatisierte Sattelzugmaschine fährt und am Übergabeort lediglich den Auflieger wechselt[65].

Die drei beschriebenen Transfervarianten mit Zubringerfahrzeug, Staffelfahrten und Aufliegerwechsel stellen Betriebsstrategien dar, die im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden.

Eine letzte Variante erfordert keinerlei physische Präsenz eines menschlichen Fahrers im automatisierten Lastkraftwagen. Für die Fahrtstrecke abseits der Autobahn wird der Lastkraftwagen durch Teleoperation[66] von einem speziell ausgebildeten menschlichen Fahrer von einem Teleoperationszentrum aus ferngesteuert. Dies ist jedoch nur möglich, sofern der Fahrer nicht für die Be- und Entladung des Fahrzeugs benötigt wird.

Durch Teleoperation können sämtliche Transfer- und Umstiegs-Zeiten des menschlichen Fahrers eingespart werden. Ein Fahrer ist nur für die reine Fahrzeit notwendig. Sobald eine Fahrt abgeschlossen ist, kann der Fahrer direkt ein anderes Fahrzeug steuern.

Die Teleoperation bringt jedoch technische Anforderungen mit sich, die für ihren Betrieb erfüllt werden müssen. Für die Teleoperation muss das Fahrzeug einerseits mit weiteren Kameras und der zur Fernsteuerung benötigten Technik ausgestattet werden. Andererseits ist eine stabile Netzwerkverbindung über die gesamte Fahrtstrecke abseits der Autobahn notwendig.

Neben den technischen Anforderungen ist auch eine gesetzliche Regelung zur Teleoperation notwendig.

Die Teleoperation wird ebenfalls im Rahmen der Analysen dieser Arbeit betrachtet.

---

[63] Eng: shuttle vehicle

[64] Eng: relay trip

[65] Eng: trailer switch

[66] Eng: teleoperation

Die vier in dieser Arbeit betrachteten Betriebsstrategien wirken sich in der Betriebskostenanalyse im Wesentlichen auf die Fahrerkosten C_{Fahrer} aus. Ihr genauer Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten wird im Folgenden jeweils detailliert beschrieben, nachdem zuerst der nicht-automatisierte Fall beschrieben wird.

Für den nicht-automatisierten Fall ergeben sich die Fahrerkosten aus der Gesamtfahrzeit T_{Fahrt} in Stunden und dem Stundenlohn des Fahrers C_{Lohn}. Zusätzlich kommen noch Lohnkosten für die Zeit während der Be- und Entladung des Fahrzeugs T_{Ladung} hinzu. Es wird angenommen, dass der Fahrer die Be- und Entladung nicht selbst durchführt und diese Zeiten für den Fahrer Wartezeiten darstellen. Die Wartezeit stellt keine Pausenzeit, sondern eine Bereitschaftszeit dar und wird dementsprechend mit dem Mindestlohn $C_{\mathrm{Mindestlohn}}$. Vergütet

Nicht-automatisiert

$$C_{\mathrm{Fahrer}} = T_{\mathrm{Fahrt}} \cdot C_{\mathrm{Lohn}} + \mathrm{T}_{\mathrm{Ladung}} \cdot \mathrm{C}_{\mathrm{Mindestlohn}} \quad .$$

Gl. 3-9

Für die vier in dieser Arbeit analysierten Betriebsstrategien Stufe 4 automatisierter Lastkraftwagen sind jeweils nur bestimmte Teile der Fahrerkosten des nicht-automatisierten Falls relevant. Eine Zusammenfassung der relevanten Kostenaspekte ist in Tabelle 3-1 gegeben. Die Berechnung der Fahrerkosten der einzelnen Betriebsstrategien wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Die einfachste Berechnung erfolgt für die Staffelfahrt. Für diese werden Lohnkosten für die Fahrzeit des menschlichen Fahrers abseits der Autobahn gezahlt. Wartezeiten während der Be- und Entladung entfallen, da der menschliche Fahrer zu einem anderen Fahrzeug wechseln kann und die Be- und Entladung nicht abwarten muss. Die Lohnkosten für die Bereitschaftszeit entfallen somit

Staffelfahrt

$$C_{\mathrm{Fahrer}} = T_{\mathrm{Fahrt}} \cdot C_{\mathrm{Lohn}} \cdot (1 - p_{\mathrm{automatisiert}}) \quad .$$

Gl. 3-10

Hierbei bezeichnet $p_{\mathrm{automatisiert}}$ den Anteil der Gesamtfahrzeit, der automatisiert ohne menschlichen Fahrer gefahren wird.

Für die Teleoperation erfolgt die Berechnung analog zur Berechnung der Fahrerkosten der Staffelfahrt. Es werden lediglich die Lohnkosten des Fahrers um 10% erhöht, um die Betriebskosten des Teleoperationszentrums abzubilden

Teleoperation

$$C_{\mathrm{Fahrer}} = T_{\mathrm{Fahrt}} \cdot C_{\mathrm{Lohn}} \cdot 1{,}1 \cdot (1 - p_{\mathrm{automatisiert}}) \quad .$$

Gl. 3-11

Wie in Unterabschnitt 3.1.2 beschrieben, wird angenommen, dass die Kosten für die zusätzliche Kommunikationstechnik, die für die Teleoperation benötigt wird, sich mit den Einsparungen durch ein vereinfachtes Kabinendesign im Vergleich zu den Stufe 4

Betriebsstrategien, die weiterhin auf einen menschlichen Fahrer im Fahrzeug angewiesen sind, ausgleichen.

Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug kommen zu den reinen Lohnkosten für den Fahrer noch die Kosten für den Betrieb des Zubringerfahrzeugs hinzu. Diese werden aus den Gesamtbetriebskosten des Zubringerfahrzeugs pro Kilometer $TCO_{\text{Zubringer}}$ inklusive der Fahrerkosten und der mit dem Zubringerfahrzeug zurückgelegten Fahrtstrecke S_{Fahrt} berechnet. Die Fahrtstrecke S_{Fahrt} entspricht dabei der Länge der nicht-automatisierten Fahrt, jedoch nicht mehr als 30 km. Die Begrenzung auf 30 km, also 15 km pro Weg, ist durch eine Standortwahl für das Zubringerfahrzeug nahe des Übergabeorts zu begründen.

Zusätzlich ist für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug die Wartezeit während der Be- und Entladung des Lastkraftwagens relevant, weil der Fahrer während der Be- und Entladung warten muss, bevor er den Lastkraftwagen wieder zum Übergabeort fährt

Zubringerfahrzeug

$$C_{\text{Fahrer}} = T_{\text{Fahrt}} \cdot C_{\text{Lohn}} \cdot (1 - p_{\text{automatisiert}}) + TCO_{\text{Zubringer}} \cdot S_{\text{Fahrt}} + T_{\text{Ladung}} \cdot C_{\text{Mindestlohn}} \quad .$$

Gl. 3-12

Für den Aufliegerwechsel entsprechen die Fahrerkosten denen der Staffelfahrt. Die Gesamtbetriebskosten unterscheiden sich jedoch, da für die Fahrt abseits der Autobahn ein nicht-automatisiertes Fahrzeug verwendet wird und für diese Strecke folglich die Betriebskosten dieses Fahrzeugs relevant sind und nicht die des automatisierten Fahrzeugs. Die Gesamtbetriebskosten sind zusammengesetzt aus den Betriebskosten des vollständig automatisierten Betriebs des automatisierten Fahrzeugs für den Fahrtanteil auf der Autobahn und den Betriebskosten des nicht-automatisierten Fahrzeugs für den nicht-automatisierten Fahrtanteil abseits der Autobahn.

Tabelle 3-1 Relevante Kostenaspekte der Fahrerkosten für den nicht-automatisierten Betrieb und die unterschiedlichen Stufe 4 Betriebsstrategien. Erläuterung der Symbole: X normaler Stundenlohn; (X-) verringerter Stundenlohn / Mindestlohn; (X+) erhöhter Stundenlohn; - keine Kosten.

Kosten-aspekt / Betriebs-strategie	Autobahn	Nicht-Autobahn	Transfer	Be- / Entladezeit
Nicht-automatisiert	X	X	-	(X-)
Staffelfahrt	-	X	-	-
Zubringerfahrzeug	-	X	X	(X-)
Aufliegerwechsel	-	X	-	-
Teleoperation	-	(X+)	-	-
Vollautomatisiert	-	-	-	-

Die in dieser Arbeit für die Berechnung der Gesamtbetriebskosten relevanten Unterschiede zwischen automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen sind in Tabelle 3-2 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-2 Unterschiede in der Berechnung der Gesamtbetriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Fahrzeuge.

Kostenaspekt	Nicht-automatisiert	Automatisiert
Automatisierungssystem (siehe Abbildung 3-2)	-	15.000–40.000 €
Fahrerkabine	In Anschaffungskosten enthalten. Für regionalen Verkehr ohne Schlafkabine -10.000 €	Stufe 4 ohne Schlafkabine -10.000 € Stufe 5 ohne Fahrerkabine -20.000 €
Fahrerkosten (siehe Tabelle 3-1)	Vollständig	Stufe 4 abhängig von Betriebsstrategie Stufe 5 keine
Versicherungskosten in Prozent der Anschaffungskosten	3,2%	Stufe 4 3,2% Stufe 5 0,96% (30% von 3,2%)

Insgesamt werden die Unterschiede zwischen automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen in dieser Arbeit über Änderungen der Anschaffungskosten, Fahrerkosten und Versicherungskosten abgebildet. Versicherungskosten werden für Stufe 5 Fahrzeuge reduziert, weil für diese eine geringere Unfallwahrscheinlichkeit im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall erwartet wird. Fahrerkosten entfallen für Stufe 5 automatisierte Fahrzeuge vollständig und sind für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge abhängig von der jeweiligen Betriebsstrategie. Anschaffungskosten für automatisierte Fahrzeug steigen einerseits durch die Kosten für das Automatisierungssystem, andererseits sinken sie durch den Wegfall der Fahrerkabine für Stufe 5 Fahrzeuge oder zumindest den Wegfall der Schlafkabine für Stufe 4 Fahrzeuge im Fernverkehr.

Im folgenden Unterabschnitt 3.1.4 werden abschließend noch die untersuchten Einsatzprofile der Fahrzeuge vorgestellt.

3.1.4 Untersuchte Einsatzprofile

Die in dieser Arbeit untersuchten Einsatzprofile von Lastkraftwagen unterscheiden sich nach Fahrzeuggrößen/Gewichtsklassen, Aufbauarten sowie Fahrtweiten.

Die Unterscheidung ähnelt dem Ansatz von Ledna et al. [87], die in ihrer Analyse zur Dekarbonisierung des Schwerverkehrs in den USA drei Fahrzeuggrößen und acht Distanzklassen betrachten. Weiterhin unterscheiden sie zwei Einsatzbereiche, den Gütertransport und den „Schwerverkehr für andere Zwecke“. Dabei beschränkt sich der „Schwerverkehr für andere Zwecke“ auf Fahrtweiten bis zu 250 Meilen, während der Güterverkehr Fahrtweiten bis über 2000 Meilen besitzt.

Die Betrachtung unterschiedlicher **Fahrtweiten und Jahresfahrleistungen** für einen einzelnen Fahrzeugtypen stellt eine Erweiterung bisheriger Analysen mit dem verwendeten

Kostenmodell ETHOS.Veh|Cost [103] dar. In einer vorherigen Studie zur Kostenentwicklung von Straßenfahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssträngen wurde eine Reihe spezifischer Fahrzeugtypen für den Güterverkehr untersucht. Diese umfassen Fahrzeuge für innerstädtische Transporte, Müllfahrzeuge und Sattelzugmaschinen im Fernverkehr, für welche jeweils feste Jahresfahrleistungen und Fahrtweiten angenommen wurden [136]. Für Sattelzugmaschinen wurde beispielsweise eine durchschnittliche Jahresfahrleistung von 114.000 km und eine Fahrtweite von 600 km angenommen [136].

Wietschel et al. [88] haben jedoch deutliche Unterschiede in den Jahresfahrleistungen innerhalb einzelner Fahrzeugtypen festgestellt. Bei einer Analyse der Daten zur Jahresfahrleistung von Lastkraftwagen aufgeteilt nach ihrer Gewichtsklasse haben sie einen Anstieg der mittleren Jahresfahrleistung mit steigendem Fahrzeuggewicht festgestellt. Die Standardabweichungen innerhalb der Gewichtsklassen entsprachen dabei jedoch 41–95% der mittleren Jahresfahrleistungen. Sattelzugmaschinen hatten beispielsweise eine mittlere Jahresfahrleistung von 114.000 km, die Standardabweichung betrug jedoch 46.000 km.

In dieser Arbeit werden daher unterschiedliche Fahrtweiten und Jahresfahrleistungen für die verschiedenen Einsatzbereiche eines einzelnen Fahrzeugtypen betrachtet. Die Unterscheidung ist essentiell, da sich die Jahresfahrleistung und Fahrtweite maßgeblich auf die Gesamtbetriebskosten auswirken. Durch die Jahresfahrleistung wird der Anteil der Anschaffungskosten pro Kilometer und durch die Fahrtweite der automatisiert gefahrene Fahrtanteil für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge festgelegt.

Die Analyse unterschiedlicher Einsatzbereiche für die einzelnen Fahrzeugtypen in dieser Arbeit liefert auf Grund der großen Unterschiede zwischen den Einsatzbereichen Ergebnisse, die aussagekräftiger sind als die bisherige Betrachtung der Fahrzeugtypen mit festen Jahresfahrleistungen und Fahrtweiten.

Die Unterscheidung der **Gewichtsklassen** stammt aus dem zugrundeliegenden Gesamtbetriebskostenmodell ETHOS.Veh|Cost [103]. Die Gewichtsklasse bestimmt die Anschaffungskosten sowie den Energiebedarf der Fahrzeuge. Größere Fahrzeuge haben höhere Anschaffungskosten und einen höheren Energiebedarf als kleinere Fahrzeuge. Es werden die Gewichtsklassen S, M und L unterschieden. Die Gewichtsklassen entsprechen Fahrzeugen mit einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5–7,5 t, 7,5–12 t und mehr als 12 t. Weiterhin stellen Sattelzugmaschinen eine eigene Gewichtsklasse dar, die mit „Semi“ bezeichnet wird.

Die Fahrzeuggröße hat weiterhin Einfluss auf die angenommenen Be- und Entladungszeiten der Fahrzeuge. Es wird davon ausgegangen, dass die Be- und Entladung kleinerer Fahrzeuge länger dauert als die Be- und Entladung größerer Fahrzeuge. Dies scheint zuerst widersprüchlich, ist jedoch dadurch begründet, dass die Be- und Entladung kleinerer Fahrzeuge häufig händisch oder mit beschränkten Hilfsmitteln stattfindet, während zur Be- und Entladung großer Fahrzeuge größere Maschinen und Hilfsmittel verwendet werden.

Die Unterscheidung der **Aufbauarten** erfolgt speziell für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit. Es werden zusätzlich zu Sattelzugmaschinen drei verschiedene Aufbauten für Lastkraftwagen betrachtet: Kasten/Planen, Kipper und Container. Die Aufbauarten unterscheiden sich in den Analysen dieser Arbeit in der benötigten Be- und Entladezeit sowie in ihrer Jahresfahrleistung.

Die Jahresfahrleistung wird weiterhin nach dem Einsatzbereich der Lastkraftwagen unterschiedlich angenommen. Als Einsatzbereiche werden der regionale und der

überregionale Verkehr unterschieden. Regionaler Verkehr bezeichnet Fahrtweiten bis zu 50 km, überregionaler Verkehr Fahrtweiten über 50 km. Die Jahresfahrleistung von Lastkraftwagen im regionalen Verkehr wird geringer angenommen als die Jahresfahrleistung von Lastkraftwagen im überregionalen Verkehr.

Die Jahresfahrleistungen ergeben sich aus einer Analyse der Daten der Erhebung *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* (KiD) 2010 [159]. In dem Datensatz lässt sich eine Unterteilung nach Aufbauarten und Einsatzbereichen der Fahrzeuge durchführen. Es zeigt sich, dass regional eingesetzte Fahrzeuge deutlich geringere Jahresfahrleistungen besitzen als überregionale. Darüber hinaus besitzen Kipper die geringste Jahresfahrleistung und Sattelzugmaschinen die höchste.

Die Be- und Entladungszeiten der Fahrzeuge werden mit einer bis drei Stunden nach jeder Fahrt angenommen. Die Be- und Entladungszeiten sind dabei von der Fahrzeuggröße und der Aufbauart abhängig. Die Be- und Entladung kleinerer Fahrzeuge erfolgt häufig händisch oder mit beschränkten Hilfsmitteln, während zur Be- und Entladung großer Fahrzeuge größere Maschinen und Hilfsmittel verwendet werden. Daher wird angenommen, dass für die Be- und Entladung kleinerer Fahrzeuge mehr Zeit benötigt wird. Weiterhin werden die Be- und Entladezeiten für Kipper am größten angenommen, da sie die geringsten Jahresfahrleistungen aufweisen und dementsprechend ein größerer Anteil ihrer Einsatzzeiten auf die Be- und Entladung sowie Wartezeiten entfallen und ein geringerer Anteil auf Fahrzeiten.

Alle in dieser Arbeit verwendeten Kombinationen der Gewichtsklassen, Aufbauten und Fahrtweiten sowie die für die Gesamtbetriebskostenberechnung verwendeten Jahresfahrleistungen und Be- und Entladezeiten sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

Tabelle 3-3 Verwendete Fahrzeug-Einsatzprofile und Unterscheidungsmerkmale. Die Gewichtsklassen werden aus ETHOS.Veh|Cost [103] übernommen. Die Jahresfahrleistungen und Aufbauarten stammen aus Analysen der Erhebung *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* (KiD) 2010 [159].

Aufbau	Gewichtsklasse	Fahrzeug-gewicht [t]	Be- und Entladezeit [h]	Fahrtweiten [km]	Jahres-fahrleistung [km]
Kasten / Plane	S	3,5–7,5	2	≤ 50	25.000
	S	3,5–7,5	2	51–500	60.000
	M	7,5–12	1	≤ 50	35.000
	M	7,5–12	1	51–500	70.000
	L	> 12	1	≤ 50	40.000
	L	> 12	1	51–500	80.000
Kipper	S	3,5–7,5	3	≤ 50	15.000
	M	7,5–12	3	≤ 50	15.000
	L	> 12	2	≤ 50	25.000
	L	> 12	2	51–200	50.000
Container	L	> 12	1	≤ 50	50.000
	L	> 12	1	51–900	100.000
Sattelzugmaschine	Semi	> 12	1	≤ 50	60.000
	Semi	> 12	1	51–1000+	120.000

Die Fahrtweiten werden in weitere Distanzklassen unterteilt, sodass sich 47 Einsatzprofile ergeben. Die verwendeten Distanzklassen basieren dabei auf der Güterverkehrsstatistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen in Deutschland [156].

In der Güterverkehrsstatistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen in Deutschland sind zwölf verschiedene Distanzklassen für die Fahrtweite von Lastkraftwagen spezifiziert [156]. Für die Distanzklassen sind unter anderem Informationen zur Anzahl der Fahrten aufgeteilt in Last- und Leerfahrten, der durchschnittlichen Beladung sowie der durchschnittlichen Fahrtweite und der Transportleistung zusammengefasst.

In dieser Arbeit werden die Distanzklassen aus der Güterverkehrsstatistik übernommen, wobei die ersten beiden Distanzklassen, Fahrtweiten bis zu 25 km und Fahrtweiten von mehr als 25 km bis zu 50 km, zu einer Distanzklasse zusammengefasst werden.

Für die Berechnung der Gesamtbetriebskosten Stufe 4 automatisierter Fahrzeuge ist der automatisiert gefahrene Fahrtanteil relevant.

In dieser Arbeit wird für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge angenommen, dass diese auf Autobahnen automatisiert fahren können und einen menschlichen Fahrer für die Fahrt abseits der Autobahn benötigen. Der automatisiert gefahrene Fahrtanteil entspricht somit in dieser Arbeit dem Autobahnanteil der Fahrt.

Der Autobahnanteil der Fahrt ist dabei maßgeblich von der Länge der einzelnen Fahrten abhängig.

Für die Berechnung des Autobahnanteils p_{Autobahn} einer Fahrtstrecke S wird in dieser Arbeit die von Wietschel et al. [88] mit Hilfe des Verkehrsmodells *PTV Validate* bestimmte Relation verwendet

$$p_{\mathrm{Autobahn}} = 1 - e^{-\frac{S}{127.25\,\mathrm{km}}} \,.$$

Gl. 3-13

Für die Berechnung des Energiebedarfs der Fahrzeuge ist eine weitere Zuordnung der verbleibenden Fahrtanteile zu Fahrten im ländlichen und städtischen Verkehr notwendig. Die Berechnung des Energiebedarfs erfolgt anhand des WHVC Fahrzyklus. Der Fahrzyklus besitzt Segmente für den Autobahnverkehr, den ländlichen und den städtischen Verkehr. Der Energiebedarf wird für alle Segmente einzeln berechnet und der Gesamtenergiebedarf als gewichtete Summe der Energiebedarfe der Segmente bestimmt. Die Gewichtungsfaktoren entsprechen dabei den jeweiligen Fahrtanteilen.

Die Zuordnung der Fahrtanteile abseits der Autobahn erfolgt in dieser Arbeit zu 90% auf den ländlichen und 10% auf den städtischen Verkehr.

Die verwendeten Distanzklassen und die berechneten Fahrtanteile für den Autobahnverkehr sowie den ländlichen und städtischen Verkehr sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

In Tabelle 3-4 und für die Berechnung der Fahrtanteile wurde dabei nur die Fahrleistung des innerdeutschen Verkehrs berücksichtigt. Der Wechselverkehr, Dreiländerverkehr[67] und Durchgangsverkehr wurden nicht berücksichtigt, da sie für die verschiedenen Distanzklassen mittlere Fahrtweiten aufweisen, die außerhalb der jeweiligen Distanzklassen liegen.

[67] Verkehr zwischen zwei Orten in verschiedenen Ländern mit Fahrzeugen aus einem Drittstaat

Für spätere Berechnungen, die sich auf die Gesamtfahrleistung beziehen, wird allerdings der gesamte Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen berücksichtigt. Da die Gesamtfahrleistung auch für die Analyse der verkehrlichen Auswirkungen des automatisierten Fahrens relevant ist, wird auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf Tabelle 3-10 auf Seite 96 in Unterabschnitt 3.3.2 verwiesen.

Tabelle 3-4 Verwendete Distanzklassen zur Berechnung der Gesamtbetriebskosten. Die Fahrtanteile sind mit der erläuterten Methodik berechnet worden. Die restlichen Daten stammen aus der Güterverkehrsstatistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen und beinhalten die Lastfahrten im innerdeutschen Verkehr für das Jahr 2019 [156]. In Anlehnung an [9].

Distanzklasse	Anzahl Fahrten [Tsd.]	Zurückgelegte Entfernung [Tsd. km]	Durchschnittliche Fahrtweite [km]	Fahrtanteile Autobahn / Ländlich / Städtisch
≤ 50 km	268.832	5.472.898	20,4	15% / 76% / 9%
51–100 km	68.398	4.924.047	72,0	43% / 51% / 6%
101–150 km	31.284	3.836.067	122,6	62% / 34% / 4%
151–200 km	16.252	2.814.510	173,2	74% / 23% / 3%
201–300 km	16.701	4.087.915	244,8	85% / 13% / 2%
301–400 km	7.927	2.730.533	344,5	93% / 6% / 1%
401–500 km	4.457	1.995.965	447,8	97% / 3% / 0%
501–700 km	4.435	2.572.459	580,0	99% / 1% / 0%
701–900 km	867	667.064	769,4	100% / 0% / 0%
901–1000 km	74	69.498	939,2	100% / 0% / 0%
> 1000 km	150	224.674	1497,8	100% / 0% / 0%
Gesamt	419.377	29.395.630	70,1	64% / 32% / 4%

Im Rahmen dieser Arbeit werden insgesamt 47 Einsatzprofile untersucht. Die Einsatzprofile unterscheiden sich nach Fahrzeuggrößen/Gewichtsklassen, Aufbauarten sowie Fahrtweiten. Als Aufbauarten werden Kasten/Planen, Kipper, Container und Sattelzugmaschinen unterschieden. Weiterhin werden die Fahrzeuge nach Gewichtsklassen entsprechend ihrer zulässigen Gesamtmasse in 3,5–7,5 t, 7,5–12 t und mehr als 12 t unterteilt. Sattelzugmaschinen stellen eine eigene Gewichtsklasse dar. Zuletzt werden Fahrtdistanzen in 11 Distanzklassen von bis zu 50 km bis mehr als 1000 km unterschieden.

Die Beschreibungen der untersuchten Einsatzprofile schließt die Methodik der Betriebskostenanalyse ab. Methodische Weiterentwicklungen gegenüber der bestehenden Literatur finden an zwei Stellen statt. Einerseits werden die Lohnkosten für den Fahrer explizit über die Fahrzeiten sowie die Be- und Entladungszeiten modelliert. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Betriebsstrategien automatisierter Fahrzeuge und unterschiedliche Fahrtanteile im automatisierten Betrieb abzubilden. Andererseits wird eine Vielzahl an Einsatzprofilen von Fahrzeugen unterschiedlicher Gewichtsklassen mit verschiedenen Fahrtweiten definiert. Dies ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrzeuge.

Im nächsten Abschnitt 3.2 wird die Methodik zur Bestimmung des Energiebedarfs automatisierter Fahrzeuge im Rahmen dieser Arbeit beschrieben.

3.2 Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge

Die nachfolgenden Ausführungen über die Methodik zur Bestimmung des Energiebedarfs automatisierter Fahrzeug basieren auf der Veröffentlichung „Fuel-saving opportunities for automated vehicles: A driving cycle analysis“ [8].

Die Berechnung des Energiebedarfs der Fahrzeuge erfolgt in dieser Arbeit basierend auf dem mechanischen Energiebedarf, um einen bestimmten Fahrzyklus zu absolvieren, und dem zusätzlich benötigten elektrischen Energiebedarf. Die Grundlagen und Gleichungen für die Berechnung wurden in Unterabschnitt 2.4.4 bereits vorgestellt.

Die Unterschiede im Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu nicht-automatisierten Fahrzeugen werden in dieser Arbeit über zwei Faktoren abgebildet. Einerseits wird ein verändertes Fahrverhalten für automatisierter Fahrzeuge angenommen. Die Annahmen dafür werden in Unterabschnitt 3.2.2 vorgestellt. Andererseits wird ein zusätzlicher Energiebedarf für das Automatisierungssystem angenommen. Die Annahmen zum Energiebedarf des Automatisierungssystems sind in Unterabschnitt 2.4.3 bereits detailliert beschrieben. Die Berücksichtigung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems innerhalb der Modellierung über Annahmen zum benötigten Leistungsbedarf stellt dabei eine methodische Weiterentwicklung gegenüber der bestehenden Literatur dar.

Die Methodik ist in Abbildung 3-3 zusammengefasst. Der Ansatz ist im Vergleich zu einem komplexen Fahrzeugmodell bewusst einfach gehalten, um die Änderungen im Energiebedarf besser interpretieren zu können.

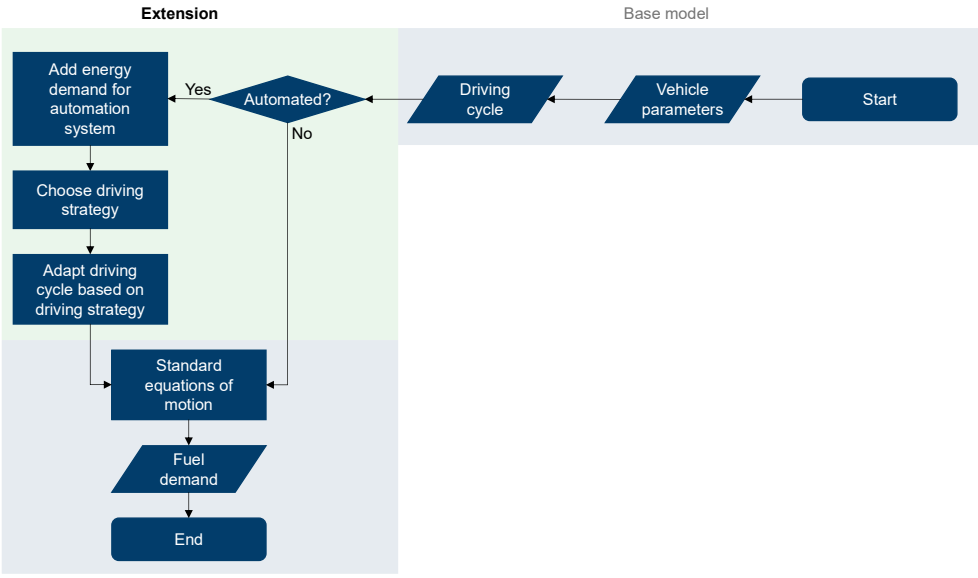


Abbildung 3-3 Methodik für die Berechnung des Energiebedarfs automatisierter Fahrzeuge. Basierend auf [8].

Im Folgenden werden in Unterabschnitt 3.2.1 zuerst die untersuchten Fahrzeuge und ihre für die Berechnung des Energiebedarfs relevanten Fahrzeugparameter vorgestellt. Anschließend werden in Unterabschnitt 3.2.2 die für automatisierte Fahrzeuge durchgeführten Anpassungen der Fahrzyklen vorgestellt.

3.2.1 Fahrzeuge und Fahrzeugparameter

Der Energiebedarf wird in dieser Arbeit für einen Mittelklasse Personenkraftwagen und eine Sattelzugmaschine bestimmt. Personenkraftwagen werden für die Energiebedarfsanalyse in die Betrachtungen dieser Arbeit aufgenommen, weil der Energiebedarf des Automatisierungssystems einen großen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf von Personenkraftwagen hat. Die Analysen in dieser Arbeit werden zeigen, dass der Energiebedarf des Automatisierungssystems eine frühe Einführung automatisierter Personenkraftwagen behindern könnte.

Da der Einfluss der Automatisierung auf den Energiebedarf unabhängig von anderen Faktoren untersucht werden soll, werden konstante Wirkungsgrade und Fahrzeugparameter für alle Analysen angenommen. Für den Personenkraftwagen und die Sattelzugmaschine wird jeweils von einem batterieelektrischen Antriebsstrang ausgegangen. Die Fahrzeugparameter und Wirkungsgrade sind in Tabelle 3-5 und Tabelle 3-6 dargestellt.

Die grundlegenden Fahrzeugparameter und Wirkungsgrade entsprechen dabei denen des Betriebskostenmodells von Kraus [136]. Die Strombedarfe für die Fahrzeugelektronik und das Automatisierungssystem ergeben sich aus Literaturwerten basierend auf den Ausführungen in Unterabschnitt 2.4.4.

Tabelle 3-5 Fahrzeugparameter für den Mittelklasse Personenkraftwagen und die Sattelzugmaschine. Nach [8].

Parameter	Mittelklasse Personenkraftwagen	Sattelzugmaschine
Fahrzeugmasse m_{veh} [kg]	1508 [136]	12243 [136]
Passagier-/Frachtmasse m_{load} [kg]	116 [136]	12491 [136]
Stirnfläche A_{frontal} [m²]	2,25 [136]	8,38 [136]
Luftwiderstandsbeiwert c_{d}	0,267 [136]	0,53 [136]
Rollwiderstandskoeffizient c_{r}	> 0.008668 [135]	0.0068 [136]
Strombedarf der Fahrzeugelektronik P_{elec} [W]	600 [137, 138]	8660 [130]
Strombedarf des Automatisierungssystems P_{aut} [W]	1000 (+2000/-800) [113]	1000 [113]

Tabelle 3-6 Komponentenwirkungsgrade für die untersuchten Fahrzeuge. Nach [8].

Wirkungsgrad	Wert
Elektromotor η_{enginge}	0,885 [136]
Transmission η_{trans}	0.951 [136]
Batterie η_{bat}	0,931 [136]

Die Angabe aller verwendeten Parameter und Gleichungen dient dem Zweck, dass sämtliche Berechnungen dieser Arbeit nachvollzogen und repliziert werden können. Aus demselben

Grund werden im folgenden Unterabschnitt 3.2.2 die exakten Anpassungen der Standardfahrzyklen beschrieben.

3.2.2 Anpassung der Fahrzyklen

Automatisierte Fahrzeuge besitzen ein unterschiedliches Fahrverhalten als Fahrzeuge mit menschlichem Fahrer. Deshalb können die Fahrzyklen für automatisierte Fahrzeuge von den Standardfahrzyklen abweichen. Im Folgenden werden mögliche Änderungen der Fahrzyklen beschrieben und ihre Verwendung für die Analysen in dieser Arbeit begründet.

Um den Einfluss des Automatisierten Fahrens in den Fahrzyklen abzubilden, werden die Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Anzahl der Stopps in den Standardfahrzyklen angepasst.

Für Personenkraftwagen wird in dieser Arbeit der *WLTC-3b* und für Lastkraftwagen der *WHVC* als Standardfahrzyklus verwendet. Diese sind in Unterabschnitt 2.4.2 bereits in Abbildung 2-11 und Abbildung 2-12 auf Seite 34 dargestellt.

Die Analysen in dieser Arbeit beschränken sich für Lastkraftwagen auf den Autobahnverkehr. Lastkraftwagen legen einen wesentlichen Teil ihrer Gesamtfahrtdistanz auf Autobahnen zurück, wie in Tabelle 3-4 auf Seite 76 bereits dargestellt. Weiterhin wird angenommen, dass Lastkraftwagen im Stufe 4 Betrieb zuerst nur auf Autobahnen automatisiert fahren werden.

Für den *WHVC* Fahrzyklus wird somit nur der Autobahnteil[68] genutzt. Dieser dauert 419 s und deckt eine Fahrtdistanz von 8.926 m mit einer Maximalgeschwindigkeit von 87,8 km/h und einer Standzeit von 5 s ab.

Für Personenkraftwagen wird zusätzlich zum Autobahnverkehr auch der Stadtverkehr untersucht, da erwartet wird, dass automatisierte Personenkraftwagen über automatisierte Fahrzeugflotten in Städten eingeführt werden [67].

Für den *WLTC-3b* Fahrzyklus werden der Autobahnteil[69] und der städtische Teil[70] genutzt. Der Autobahnteil dauert 323 s und deckt eine Fahrtdistanz von 8.254 m mit einer Maximalgeschwindigkeit von 131,5 km/h und einer Standzeit von 5s ab. Der städtische Teil dauert 589 s und deckt eine Fahrtdistanz von 3.095 m mit einer Maximalgeschwindigkeit von 56,7 km/h und einer Standzeit von 146 s ab.

Im Folgenden werden zuerst die Anpassungen der Fahrzyklen für Lastkraftwagen und anschließend die Anpassungen der Fahrzyklen für Personenkraftwagen vorgestellt.

Gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr

Automatisiertes Fahren kann auf Autobahnen zu einer gleichmäßigeren Fahrweise im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers führen. Das Fahrzeug beschleunigt und bremst nur so viel wie nötig. Basierend auf seinem Planungshorizont kann das Fahrzeug frühzeitig auf Ereignisse reagieren und somit harte Bremsmanöver vermeiden. Ein solches Verhalten ist bereits durch die Verwendung eines Abstandsregeltempomaten[71] zu erreichen.

---

[68] Bezeichnung des Fahrzyklus Segments: „motorway“

[69] Bezeichnung des Fahrzyklus Segments: „extra high“

[70] Bezeichnung des Fahrzyklus Segments: „low“

[71] Eng: adaptive cruise control, ACC

Eine gleichmäßigere Fahrweise bewirkt eine Glättung der Fahrzyklen. Der Einfluss dieser Fahrweise ist dabei vom Planungshorizont abhängig und lässt sich dadurch beeinflussen. Wird beispielsweise Kommunikation zwischen Fahrzeugen berücksichtigt, kann der Planungshorizont erweitert werden. Im Folgenden wird eine solche Fahrweise als kooperativer Abstandsregeltempomat[72] bezeichnet.

Um den Einfluss der Glättung der Fahrzyklen zu untersuchen, wird für die Fahrzyklen jeweils der gleitende Mittelwert über ein entsprechendes Zeitfenster gebildet. Es wird der gleitende Mittelwert anstelle eines anderen Glättungsverfahrens verwendet, weil die Interpretation des Zeitfensters für die Glättung einfacher ist als die Interpretation der Parameter komplexerer anderer Verfahren.

Für die Glättung werden drei Planungshorizonte angenommen. Der erste Planungshorizont beschreibt den Fall einzelner automatisierter Fahrzeuge und entspricht der Verwendung eines Abstandregeltempomaten. Der zweite Planungshorizont bildet den gemischten Fall nicht-automatisierter und untereinander kommunizierender automatisierter Fahrzeuge ab und entspricht der Verwendung eines kooperativen Abstandsregeltempomaten. Der dritte Planungshorizont entspricht einem Verkehr mit ausschließlich automatisierten und kommunizierenden Fahrzeugen.

Die drei Planungshorizonte werden im Folgenden als *Abstandsregeltempomat*, *kooperativer Abstandsregeltempomat* und *exakte Vorhersage*[73] bezeichnet. Die drei Planungshorizonte werden zu 130 m, 400 m und 2000 m angenommen. Dies entspricht für Lastkraftwagen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h, die dem *WHVC* Fahrzyklus folgen, Planungshorizonten von 6 s, 18 s und 90 s.

Die gewählten Planungshorizonte sind auf die Reichweiten von Radar- und Lidarsensoren von 250 m abgestimmt. Für den Fall des Abstandregeltempomaten entspricht der Planungshorizont der Hälfte der Reichweite der Sensoren, um zu berücksichtigen, dass andere Fahrzeuge und weitere Hindernisse die Reichweite der Sensoren einschränken können. Für den Fall des kooperativen Abstandregeltempomaten können die Fahrzeuge die Daten anderer Fahrzeuge, mit denen sie kommunizieren, nutzen, um ihren Planungshorizont zu erweitern. Der Planungshorizont wird auf 400 m beschränkt, um zu berücksichtigen, dass weiterhin nicht-automatisierte und nicht-kommunizierende Fahrzeuge am Verkehr teilnehmen. Für den Fall der exakten Vorhersage, der einen vollständig automatisierten Verkehr abbildet, wird der Planungshorizont auf 2000 m beschränkt, um die Fahrzyklen nicht auf nur einen einzelnen Geschwindigkeitswert zu reduzieren. Dies wäre nicht sinnvoll, da Geschwindigkeitsveränderungen entlang der Fahrtstrecke durch Kurven, Baustellen oder auf Grund der Beschaffenheit der Straßen entstehen können und diese weiter abgebildet werden müssen.

Für das Fahrprofil des Lastkraftwagens ist bereits für den Fall des Abstandsregeltempomaten mit einer Glättung über 6 s ein Unterschied zu erkennen. Geschwindigkeitsschwankungen, die wenige Sekunden andauern, werden abgeschwächt.

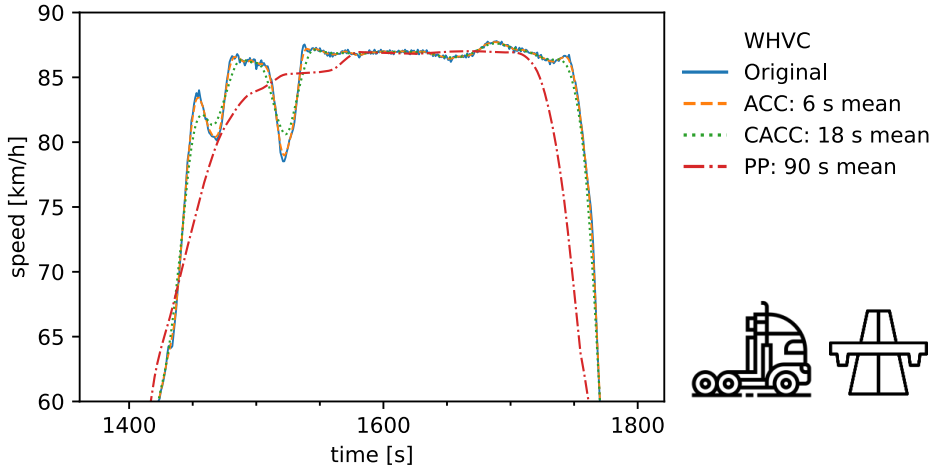
Eine Glättung über 90 s für den Fall der exakten Vorhersage führt zu einer deutlichen Veränderung des Fahrzyklus. Das Geschwindigkeitsprofil folgt nicht mehr dem ursprünglichen Profil bei jedem Beschleunigungs- und Bremsvorgang. Starkes Beschleunigen und Bremsen findet nur noch zu Beginn und am Ende der Fahrzyklen statt. Insbesondere die starke

[72] Eng: cooperative adaptive cruise control, CACC

[73] Eng: Perfect prediction, PP

Geschwindigkeitsreduktion von 84 km/h auf 78 km/h bei einer Zeit von 1520 s findet im geglätteten Fahrzyklus nicht statt.

Die angepassten Fahrzyklen sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist weitestgehend von den anderen Fahrzyklen überdeckt. Die Beschleunigungs- und Bremsphasen zu Beginn und am Ende des Fahrzyklus sind abgeschnitten, da diese kaum Abweichungen zwischen den verschiedenen Varianten des Fahrzyklen aufweisen und die Darstellung einer größeren Geschwindigkeitsspanne die Auflösung der Darstellung verringern würde.



Highway icons created by Darius Dan; Cargo truck icons created by Eucalyp from www.flaticon.com

Abbildung 3-4 Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist als blaue Linie dargestellt. Der Fahrzyklus für den Abstandregeltempomaten ist als gestrichelte orangene Linie dargestellt. Der Fahrzyklus für den kooperativen Abstandsregeltempomaten ist als grüne gepunktete Linie dargestellt. Der Fahrzyklus für die exakte Vorhersage ist als rote gepunktet-gestrichelte Linie dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus basiert auf [119]. Aus [8].

Verringerte Maximalgeschwindigkeit für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr

Geringere Fahrgeschwindigkeiten können dazu beitragen den Energiebedarf für Lastkraftwagen zu senken. Dafür erhöhen sie jedoch die Transportzeiten.

Für Lastkraftwagen mit menschlichem Fahrer führt eine Erhöhung der Transportzeiten zu zwei Gründen, die gegen eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit sprechen. Erstens müssen Einsparungen in den Treibstoffkosten mit höheren Fahrerkosten auf Grund längerer Fahrtdauern aufgewogen werden. Bray und Cebon [125] haben gezeigt, dass bei einer Geschwindigkeitsreduktion die zusätzlichen Fahrerkosten die Einsparungen in den Treibstoffkosten überwiegen können. Zweitens könnte ein menschlicher Fahrer bei einer verringerten Fahrgeschwindigkeit nur noch eine geringere Fahrleistung erbringen und die Anzahl benötigter Fahrer würde zunehmen. Die täglichen Lenkzeiten für Lastkraftwagenfahrer unterliegen zeitlichen Beschränkungen, die in der EU durch die Verordnung (EG) Nr. 561/2006 und nachfolgenden Anpassungen dieser festgelegt sind [105–109]. Die tägliche Lenkzeit eines menschlichen Fahrers darf maximal neun Stunden betragen mit Ausnahme von zwei Tagen pro Woche an denen die tägliche Lenkzeit auf zehn Stunden erhöht werden darf. Weiterhin

darf die Lenkzeit in zwei aufeinander folgenden Wochen 90 Stunden nicht überschreiten. Eine verringerte Fahrgeschwindigkeit bewirkt, dass ein menschlicher Fahrer in seiner Arbeitszeit nur eine geringere Fahrtdistanz zurücklegen kann. Um trotzdem die gleiche Transportleistung zu erbringen, würden mehr Fahrer benötigt. Dies ist insbesondere in Anbetracht des von der *International Road Transport Union* berichteten Fahrermangels nicht vorstellbar [4].

Für Automatisierte Fahrzeuge fallen beide Gründe, die gegen eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit sprechen, weg. Erstens muss kein Fahrer mehr für die zusätzliche Fahrzeit bezahlt werden. Zweitens sind automatisierte Fahrzeuge in ihrer täglichen Gesamtfahrzeit nicht eingeschränkt und können somit auch bei verringerter Fahrgeschwindigkeit die gleiche Tagesfahrleistung erbringen. Weiterhin kann ein Teil der zusätzlichen benötigten Fahrzeit bereits durch den Wegfall der Pausenzeiten des menschlichen Fahrers ausgeglichen werden.

In Anlehnung an Bray und Cebon [125], die die Geschwindigkeit einer Sattelzugmaschine in einem Start-Stopp Fahrzyklus mit konstanter Zielgeschwindigkeit von 90 km/h auf 70 km/h reduziert haben, wird die Maximalgeschwindigkeit des *WHVC* Fahrzyklus von ungefähr 90 km/h auf 70 km/h reduziert.

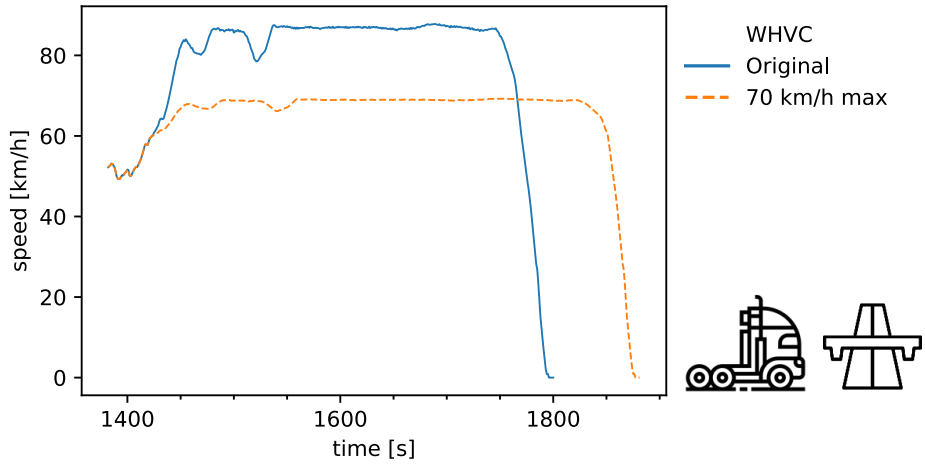
Die Geschwindigkeitsreduktion wird durch eine lineare Skalierung der überschüssigen Geschwindigkeiten oberhalb von 60 km/h auf ein Drittel erreicht

$$v_{70} = \begin{cases} v & , \quad v \leq 60 \\ 60 + \dfrac{v - 60}{3} & , \quad v > 60 \end{cases} .$$

Gl. 3-14

Dieser Ansatz lässt das Fahrverhalten der Lastkraftwagen für niedrige Geschwindigkeiten unverändert und beeinflusst nur höhere Fahrgeschwindigkeiten. Weiterhin führt eine lineare Skalierung im Vergleich zu einem Abschneiden der Geschwindigkeit bei 70 km/h zu einer Anpassung des Beschleunigungsverhaltens und verhindert Knickstellen im Graphen des Geschwindigkeitsverlaufs.

Der angepasste Fahrzyklus ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt nun 69,3 km/h anstatt 87,6 km/h. Jeder Zeitschritt des Fahrzyklus ist weiterhin so angepasst worden, dass der angepasste Fahrzyklus dieselbe Gesamtdistanz abdeckt wie der ursprüngliche Fahrzyklus. Der angepasste Fahrzyklus ist dadurch um 81 s länger, was einer Zunahme um 18,9% entspricht.



Highway icons created by Darius Dan; Cargo truck icons created by Eucalyp from www.flaticon.com

Abbildung 3-5 Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus mit verringerter Maximalgeschwindigkeit. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist als blaue Linie dargestellt. Der Fahrzyklus mit verringerter Maximalgeschwindigkeit ist als gestrichelte orangene Linie dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus basiert auf [119]. Aus [8].

Gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile für Personenkraftwagen im Autobahnverkehr

Automatisiertes Fahren kann für Personenkraftwagen auf Autobahnen in analoger Weise zu Lastkraftwagen eine gleichmäßigere Fahrweise bewirken. Es wird daher das gleiche Verfahren für die Glättung angenommen.

Die räumlichen Planungshorizonte basieren weiterhin auf den Reichweiten der Sensoren und bleiben daher unverändert. Die drei Planungshorizonte werden mit 130 m, 400 m und 2000 m für den *Abstandsregeltempomaten*, den *kooperativen Abstandsregeltempomaten* und die *exakte Vorhersage* angenommen.

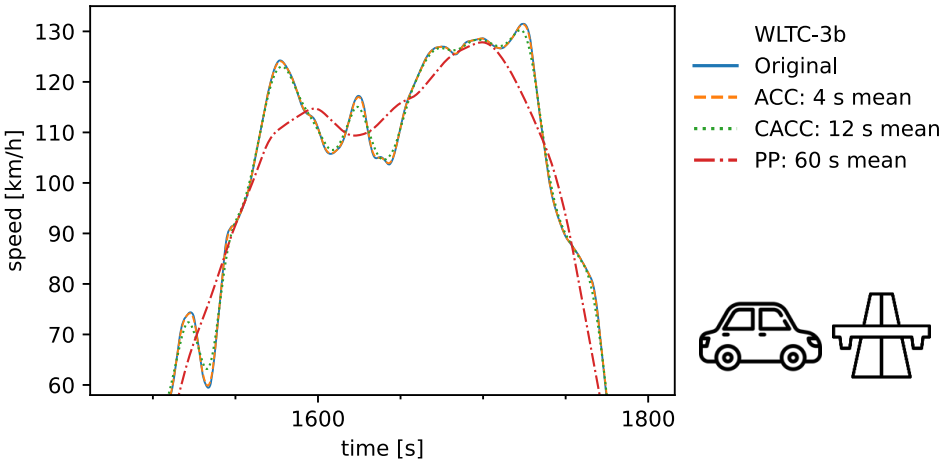
Durch höhere Fahrgeschwindigkeiten von Personenkraftwagen im Vergleich zu Lastkraftwagen reduzieren sich jedoch die zeitlichen Planungshorizonte. Für Personenkraftwagen mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h, die dem *WLTC-3b* Fahrzyklus folgen, ergeben sich Planungshorizonten von 4 s, 12 s und 60 s.

Das Fahrprofil für den Personenkraftwagen unterscheidet sich in seiner über 4 s geglätteten Form kaum von seiner ursprünglichen Form. Erst für eine Glättung über 12 s werden Geschwindigkeitsschwankungen, die wenige Sekunden andauern, sichtbar abgeschwächt.

Der Effekt der Glättung über 60 s ist vergleichbar zu der für den Lastkraftwagen über 90 s. In beiden Fällen kommt es zu einer deutlichen Veränderung der Fahrzyklen. Das Geschwindigkeitsprofil folgt nicht mehr dem ursprünglichen Profil bei jedem Beschleunigungs- und Bremsvorgang. Starkes Beschleunigen und Bremsen findet nur noch zu Beginn und am Ende der Fahrzyklen statt. Insbesondere die lokale Geschwindigkeitsspitze bei einer Zeit von 1620 s ist im geglätteten Fahrzyklus nicht mehr vorhanden.

Die angepassten Fahrzyklen sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist weitestgehend von den anderen Fahrzyklen überdeckt. Die Beschleunigungs- und Bremsphasen zu Beginn und am Ende des Fahrzyklus sind abgeschnitten, da diese kaum

Abweichungen zwischen den verschiedenen Varianten des Fahrzyklen aufweisen und die Darstellung einer größeren Geschwindigkeitsspanne die Auflösung der Darstellung verringern würde.



Highway icons created by Darius Dan; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 3-6 Autobahnsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist als blaue Linie dargestellt. Der Fahrzyklus für den Abstandregeltempomaten ist als gestrichelte orangene Linie dargestellt. Der Fahrzyklus für den kooperativen Abstandsregeltempomaten ist als grüne gepunktete Linie dargestellt. Der Fahrzyklus für die exakte Vorhersage ist als rote gepunktet-gestrichelte Linie dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus basiert auf [118]. Aus [8].

Im Folgenden werden die Anpassungen der Fahrzyklen für Personenkraftwagen im stattverkehr vorgestellt.

Für den Stadtverkehr wird im Vergleich zum Autobahnverkehr keine Glättung des Fahrzyklus durch eine Mittelung des Geschwindigkeitsprofils über bestimmte Zeitfenster vorgenommen. Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern oder Radfahrern im Stadtverkehr erfordern eine Anpassung des Fahrverhaltens und ermöglichen dadurch keine langen Planungshorizonte. Darüber hinaus kann ein Fahrzeug im Stadtverkehr nicht immer mit der gleichen Geschwindigkeit fahren. Wenn ein Fahrzeug abbiegt, verringert es beispielsweise seine Geschwindigkeit. Die Verringerung der Geschwindigkeit ist ortsgebunden. Eine Mittelung der Geschwindigkeit über einen Zeitraum, der das Abbiegen enthält, ist somit nicht sinnvoll.

Stattdessen werden für den Stadtverkehr die Eliminierung von Stopps und eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit betrachtet.

Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr

Im Stadtverkehr führen häufige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zu einem höheren Energiebedarf. Für batterieelektrische Fahrzeuge kann ein Teil der Energie beim Bremsvorgang durch Rekuperation zurückgewonnen werden, jedoch nicht die gesamte

Energie, die für die Beschleunigung aufgebracht wurde. Die Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr kann also dazu beitragen den Energiebedarf zu reduzieren.

Vermeidbare Stopps entstehen im Stadtverkehr durch Ampeln, an denen Fahrzeuge warten müssen oder dadurch, dass anderen Fahrzeugen an Kreuzungen ohne Ampeln Vorfahrt gewährt werden muss.

In einem perfekt geregelten Verkehr, der ausschließlich aus vernetzten automatisierten Fahrzeugen besteht, kann auf Ampeln verzichtet werden und Wartezeiten an Kreuzungen minimiert werden. Die Fahrzeuge können sich so abstimmen, dass sie Kreuzungen passieren können, ohne anhalten zu müssen. Dies stellt jedoch ein weit fortgeschrittenes Szenario dar und ist somit als Optimalfall anzusehen. Weiterhin ist eine vollständige Vermeidung von Stopps nur möglich, sofern das Verkehrsaufkommen nicht bereits die Kapazität der Straßenabschnitte abseits der Kreuzungen überschreitet.

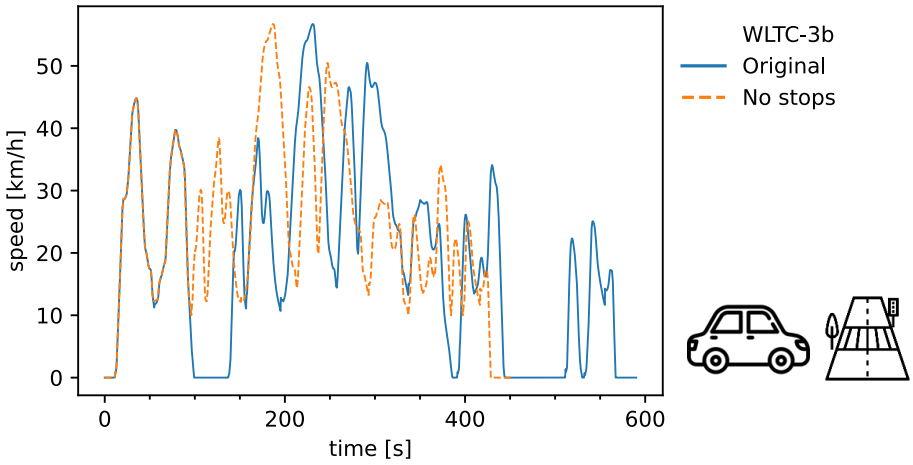
Um Stopps zu eliminieren, wird das Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus so angepasst, dass die Minimalgeschwindigkeit auf 10 km/h begrenzt wird. Die Begrenzung der Minimalgeschwindigkeit wird dabei durch eine lineare Skalierung der Geschwindigkeiten unter 12,5 km/h erreicht

$$v_{\mathrm{no-stop}} = \begin{cases} v & , \quad v \geq 12.5 \\ 10 + \dfrac{v}{5} & , \quad v < 12.5 \end{cases} .$$

Gl. 3-15

Die Geschwindigkeit wird im angepassten Fahrzyklus an Orten, an denen im ursprünglichen Fahrzyklus ein Stopp stattfindet, weiterhin reduziert. Dies soll berücksichtigen, dass an diesen Orten Kreuzungen vorliegen und die Fahrzeuge nicht ungehindert ihre Geschwindigkeiten beibehalten können. Fahrzeuge aus unterschiedlichen Richtungen können sich dort begegnen und müssen ihre Pfade abstimmen. Reduzierte Geschwindigkeiten sind dafür in gewissen Situationen notwendig und können darüber hinaus das Risiko für Unfälle verringern. Die Länge der einzelnen Zeitschritte wird erneut so angepasst, dass der angepasste Fahrzyklus weiterhin dieselbe Distanz abdeckt wie der ursprüngliche Fahrzyklus.

Der resultierende Fahrzyklus ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Für die ersten 100 s unterscheidet sich der angepasste Fahrzyklus nicht vom ursprünglichen Fahrzyklus. Wenn jedoch der erste Stopp im ursprünglichen Fahrzyklus nach 100 s auftritt, fällt die Geschwindigkeit im angepassten Fahrzyklus nicht unter 10 km/h und das Fahrzeug fährt weiter, anstatt ungefähr 50 s zu warten. Insgesamt ist der angepasste Fahrzyklus um 139 s kürzer als der ursprüngliche Fahrzyklus, was einer Abnahme um 24% entspricht.



Street icons created by surang; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 3-7 Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus ohne Stopps. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist als blaue Linie dargestellt. Der Fahrzyklus ohne Stopps ist als gestrichelte orangene Linie dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus basiert auf [118]. Aus [8].

Der perfekt geregelte Verkehr vernetzter automatisierter Fahrzeuge erfordert eine vollständige Marktdurchdringung dieser und stellt somit ein weit fortgeschrittenes Szenario dar. Für die Einführungsphase vernetzter automatisierter Fahrzeuge ist dies nicht umsetzbar und es werden andere Möglichkeiten, den Verkehr zu regeln, benötigt.

Eine Möglichkeit für die Einführungsphase vernetzter automatisierter Fahrzeuge im Stadtverkehr ist eine Anpassung der Fahrgeschwindigkeiten, um Ampeln in ihrer jeweiligen Grünphase zu erreichen. Im Folgenden wird ein solches Szenario durch die Kombination einer Geschwindigkeitsreduktion und Eliminierung der Stopps näherungsweise abgebildet. Bevor die Kombination der Maßnahmen betrachtet wird, wird die Geschwindigkeitsreduktion zuvor noch einzeln betrachtet.

Verringerte Maximalgeschwindigkeit im Stadtverkehr

Für den Stadtverkehr wird untersucht, wie sich eine Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h im Vergleich zu einer Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h verhält. Die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit für den Stadtverkehr findet in analoger Weise zu der Geschwindigkeitsreduktion für den Autobahnverkehr statt.

Die Geschwindigkeitsreduktion wird durch eine lineare Skalierung der überschüssigen Geschwindigkeiten oberhalb von 25 km/h auf ein Drittel erreicht

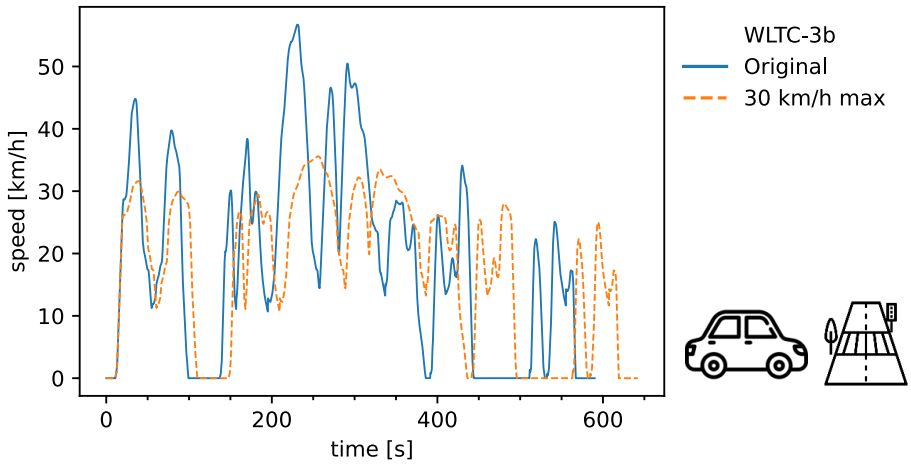
$$v_{30} = \begin{cases} v & , \quad v \leq 25 \\ 25 + \dfrac{v - 25}{3} & , \quad v > 25 \end{cases} .$$

Gl. 3-16

Bei einer ursprünglichen Geschwindigkeit von 50 km/h ergibt sich damit eine Geschwindigkeit von 33 km/h. Somit sind 30 km/h nicht als strikte Maximalgeschwindigkeit zu verstehen,

sondern als Richtwert, der in gegebenem Rahmen überschritten werden kann. Die Länge der einzelnen Zeitschritte wird erneut so angepasst, dass der angepasste Fahrzyklus weiterhin dieselbe Distanz abdeckt wie der ursprüngliche Fahrzyklus.

Der resultierende Fahrzyklus ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Der ursprüngliche Fahrzyklus wird hauptsächlich im Zeitraum von 200–300 s verändert. Die reduzierte Maximalgeschwindigkeit führt dazu, dass die Stärke der Beschleunigungs- und Bremsvorgänge abnimmt. Weiterhin werden die Zeitschritte im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus gestreckt, was die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge weiter abschwächt. Insgesamt dauert der angepasste Fahrzyklus 52 s länger als der ursprüngliche Fahrzyklus, was einer Zunahme um 8,8% entspricht.



Street icons created by surang; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 3-8 Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus mit verringerter Maximalgeschwindigkeit. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist als blaue Linie dargestellt. Der Fahrzyklus mit verringerter Maximalgeschwindigkeit ist als gestrichelte orangene Linie dargestellt. Die Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h ist nicht als strikte Maximalgeschwindigkeit zu verstehen, sondern als Richtwert, der in gegebenem Rahmen überschritten werden kann. Der ursprüngliche Fahrzyklus basiert auf [118]. Aus [8].

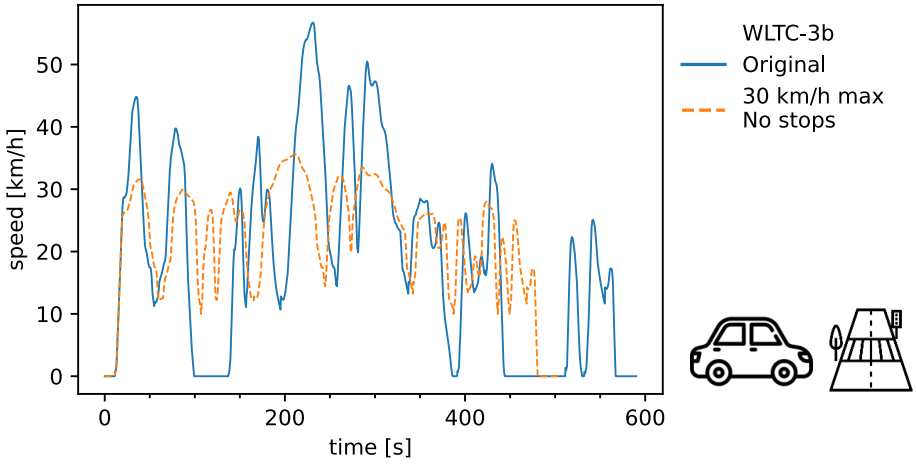
Verringerte Maximalgeschwindigkeit und Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr

In einem letzten Schritt werden die vorherigen beiden Ansätze zur Eliminierung der Stopps und Reduktion der Maximalgeschwindigkeit kombiniert. Es wird erwartet, dass sich die Auswirkungen der Anpassungen addieren, da sie unabhängig voneinander sind.

Die Zeiteinsparungen durch die Eliminierung der Stopps sind größer als der Zeitverlust durch die geringeren Fahrgeschwindigkeiten. Der resultierende Fahrzyklus ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Der angepasste Fahrzyklus ist insgesamt 87 s kürzer als der ursprüngliche Fahrzyklus, was einer Abnahme um 15% entspricht.

Der resultierende Fahrzyklus weicht somit von einem Szenario ab, in dem die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge angepasst werden, um an Ampeln während ihrer jeweiligen Grünphase anzukommen. In einem solchen Szenario wäre keine Zeitersparnis möglich. Fahrzeuge könnten Kreuzungen weiterhin erst zur selben Zeit passieren und auch ihre Zielorte erst nach derselben Zeit erreichen wie im ursprünglichen Fall.

Die Anpassungen des Fahrzyklus gehen darüber hinaus, indem die Gesamtfahrtzeit verkürzt wird. Veränderungen des Gesamtenergiebedarfs werden somit vermutlich überschätzt.



Street icons created by surang; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 3-9 Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus ohne Stopps mit verringerter Maximalgeschwindigkeit. Der ursprüngliche Fahrzyklus ist als blaue Linie dargestellt. Der Fahrzyklus ohne Stopps mit verringerter Maximalgeschwindigkeit ist als gestrichelte orangene Linie dargestellt. Die Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h ist nicht als strikte Maximalgeschwindigkeit zu verstehen, sondern als Richtwert, der in gegebenem Rahmen überschritten werden kann. Der ursprüngliche Fahrzyklus basiert auf [118]. Aus [8].

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Methodik dient der Abschätzung des potentiellen Einflusses des automatisierten Fahrens auf den Energiebedarf von Fahrzeugen in verschiedenen Verkehrsumgebungen. Die Untersuchungen erfolgen anhand eines Mittelklasse Personenkraftwagens und einer Sattelzugmaschine.

Für automatisierte Fahrzeuge wird ein zusätzlicher Energiebedarf für das Automatisierungssystem angenommen. Weiterhin werden Änderungen im Fahrverhalten modelliert. Die Berücksichtigung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems innerhalb einer Fahrzyklussimulation über Annahmen zum benötigten Leistungsbedarf stellt dabei eine methodische Weiterentwicklung gegenüber der bestehenden Literatur dar. Dadurch ist es möglich, zu untersuchen, wie sich der Energiebedarf des Automatisierungssystems unter verschiedenen Anpassungen der Fahrzyklen für automatisierte Fahrzeuge auswirkt.

Für Lastkraftwagen wird der Autobahnverkehr untersucht. In einem ersten Szenario werden gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers angenommen, die ein vorausschauendes Fahrverhalten abbilden sollen. In einem zweiten Szenario wird die Maximalgeschwindigkeit im Autobahnverkehr reduziert.

Für Personenkraftwagen wird der Autobahn- und Stadtverkehr untersucht. Für den Autobahnverkehr werden wie für Lastkraftwagen gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile angenommen. Für den Stadtverkehr werden verschiedene Arten der Verkehrsregelung abgebildet, indem einerseits Stopps eliminiert und andererseits die Maximalgeschwindigkeit reduziert werden.

Im nächsten Abschnitt 3.3 wird die Methodik für die Analyse der verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge vorgestellt.

3.3 Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung

In diesem Abschnitt wird die entwickelte Methodik zur Analyse der Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die Auslastung des Straßennetzwerks beschrieben. Es wird beschrieben, wie die Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr modelliert werden und wie diese auf das Straßennetzwerk umgelegt werden.

In Unterabschnitt 3.3.1 werden dazu zuerst die regionale Auflösung und die geografischen Beschränkungen der Analysen dieser Arbeit vorgestellt. Anschließend werden in Unterabschnitt 3.3.2 die Methodiken zur Modellierung des aktuellen und zukünftigen Personen- und Güterverkehrsaufkommens vorgestellt. In Unterabschnitt 3.3.3 wird das verwendete Straßennetzwerk und dessen Aufbereitung vorgestellt. Abschließend wird in Unterabschnitt 3.3.4 die Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk beschrieben. Die entwickelte Methodik zur Abbildung des Güterverkehrsaufkommens in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene stellt dabei eine methodische Weiterentwicklung gegenüber der bestehenden Literatur dar.

3.3.1 Regionale Auflösung und geografische Beschränkung

Die Analysen zum verkehrlichen Einfluss des automatisierten Fahrens werden in dieser Arbeit für das deutsche Straßennetzwerk durchgeführt. Dazu wird das Verkehrsaufkommen für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland auf Gemeindeverbandsebene modelliert und auf das Straßennetzwerk umgelegt.

Für das Verkehrsaufkommen insbesondere im Güterverkehr sind jedoch auch Transporte, die im Ausland starten oder enden sowie Transitverkehre relevant. Neben Regionen in Deutschland werden daher zur Bestimmung des Güterverkehrsaufkommens auch die Nachbarstaaten Deutschlands in die Betrachtung aufgenommen.

Die räumliche Auflösung der Regionen in den Nachbarstaaten Deutschlands wird mit der NUTS-3[74] Ebene [164] gewählt. Die Wahl der räumlichen Auflösung auf NUTS-3 Ebene für die Nachbarstaaten anstelle der Gemeindeverbandsebene wie für die Regionen in Deutschland reduziert die Komplexität. Der Übergang zwischen dem deutschen Straßennetzwerk und den Straßennetzwerken der Nachbarstaaten findet nur an bestimmten Grenzübergängen statt. Eine genauere Allokation der Ursprünge des Güterverkehrsaufkommens in den Nachbarstaaten hätte somit keinen Einfluss auf die Auslastung des deutschen Straßennetzwerks, welche im Rahmen dieser Arbeit analysiert wird.

Um die Regionen für die Modellierung aufzusetzen, werden in einem ersten Schritt die NUTS-3 Regionen für Deutschland und die Nachbarstaaten Deutschlands verwendet. Eine Liste der NUTS-3 Regionen und ihrer geografischen Begrenzungen wird dazu von Eurostat heruntergeladen [163]. Da das Jahr 2019 als Basisjahr für die Berechnung des Verkehrsaufkommens dient, wird die NUTS-3 Klassifizierung aus dem Jahr 2016 verwendet, welche im Jahr 2019 gültig war. Eine Übersicht der berücksichtigten Länder sowie deren

[74] Nomenclature des Unités territoriales statistiques

Anzahl an NUTS-3 Zonen ist in Tabelle 3-7 dargestellt. Inselregionen werden von der Betrachtung ausgeschlossen, da sie nicht mit dem deutschen Straßennetzwerk verbunden sind. Für Frankreich werden die Insel Korsika[75] sowie die französischen Übersee-Regionen[76] ausgeschlossen. Weiterhin wird für Dänemark die Insel Bornholm[77] ausgeschlossen. Diese Regionen hängen nicht mit dem übrigen Straßennetz zusammen, sodass kein reiner Straßengüterverkehr zwischen diesen Regionen und Regionen in Deutschland stattfinden kann.

Tabelle 3-7 Anzahl der NUTS-3 Regionen für Deutschland und die Nachbarstaaten Deutschlands. * Für Dänemark wird die Region Bornholm nicht berücksichtigt. ** Für Frankreich werden insgesamt sieben Regionen nicht berücksichtigt, die Insel Korsika sowie die Übersee-Regionen. Die Daten entstammen der NUTS-Klassifikation aus dem Jahr 2016 [163].

Land	Länder-NUTS-Code	Anzahl NUTS-3 Regionen
Österreich	AT	35
Belgien	BE	44
Schweiz	CH	26
Tschechische Republik	CZ	14
Deutschland	DE	401
Dänemark	DK	11 (-1)*
Frankreich	FR	101 (-7)**
Luxemburg	LU	1
Niederlande	NL	40
Polen	PL	73
Gesamt	--	746 (-8)

Für Deutschland werden die NUTS-3 Regionen weiterhin in Gemeindeverbände unterteilt. Für diese Unterteilung wird die Übersicht der politisch selbständigen Gemeinden des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2019 verwendet [165]. Im Jahr 2019 gab es 11010 Gemeinden in Deutschland, welche unterschiedliche Größen und Strukturen für die jeweiligen Bundesländer aufweisen. Gemeindeverbände fassen Gemeinden zusammen, die eine Mindestgröße unterschreiten. Insgesamt gab es im Jahr 2019 in Deutschland 4623 Gemeindeverbände.

Für die Analysen in dieser Arbeit werden 4620 Gemeindeverbände berücksichtigt. Es werden die Deutsch-Luxemburgischen Hoheitsgebiete in Rheinland-Pfalz und dem Saarland, welche beide unbewohnte Grenzgebiete darstellen, sowie die Küstengewässer in Mecklenburg-Vorpommern ausgeschlossen.

Die geografischen Lagen und Flächen der Gemeindeverbände werden über ihre zugehörigen Gemeinden bestimmt. Für die Gemeindeverbände sind in der Übersicht des Statistischen Bundesamtes keine Daten zu ihren geografischen Begrenzungen gegeben. Die geografischen Mittelpunkts-Koordinaten und Flächen der jeweils zugehörigen Gemeinden sind allerdings gegeben. Die Gesamtfläche der Gemeindeverbände wird als Summe der Flächen der zugehörigen Gemeinden berechnet. Die Mittelpunkts-Koordinaten der Gemeindeverbände werden als Mittelwerte der Mittelpunkts-Koordinaten der zugehörigen Gemeinden berechnet.

[75] NUTS-Code: FRM
[76] NUTS-Code: FRY
[77] NUTS-Code: DK014

3.3.2 Modellierung des Verkehrsaufkommens in Deutschland

Für die Analyse werden sowohl das Verkehrsaufkommen des Personen- als auch des Güterverkehrs in Deutschland modelliert. Im Folgenden wird zuerst das verwendete Modell zur Modellierung des Personenverkehrsaufkommens und anschließend die entwickelte Methodik zur Modellierung des Güterverkehrsaufkommens beschrieben.

Personenverkehr

Das Verkehrsaufkommen im Personenverkehr wird mit dem im Rahmen der Dissertation von Reul entwickelten Verkehrsnachfragemodell ETHOS.MO|DE [83, 86] für die Jahre 2019, 2030 und 2045 bestimmt. Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik sei an dieser Stelle auf die referenzierten Veröffentlichungen hingewiesen.

In dem Modell werden typische Aktivitätsprofile repräsentativer Haushalte basierend auf soziodemografischen Faktoren wie dem Einkommen, der Haushaltsgröße oder der Anzahl Kinder im Haushalt bestimmt. Anschließend wird eine Verkehrsmittelwahl für die jeweiligen Wegstrecken zwischen den Aktivitäten unter Berücksichtigung der Verfügbarkeiten, Kosten und Zeitbedarfe der Verkehrsmittel durchgeführt.

Die demografischen Parameter sowie die Parameter für die Mobilitätspräferenzen der Personen werden unverändert übernommen. Die Parameter des Modells wurden anhand der Daten aus der Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland 2017“ [84] und dem „Deutschen Mobilitätspanel“ [85] kalibriert.

Für den Personenverkehr wird das Verkehrsaufkommen der Zieljahre 2019, 2030 und 2045 jeweils für 365 Simulationstage für alle 4620 Gemeindeverbände modelliert. Das Verkehrsaufkommen wird mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde modelliert. Es wird sowohl das Verkehrsaufkommen zwischen den Gemeindeverbänden als auch innerhalb der Gemeindeverbände simuliert.

Die Anzahl der simulierten Haushalte wird dabei innerhalb dieser Arbeit abhängig von der Bevölkerungszahl der Gemeindeverbände gewählt. Für Gemeindeverbände mit weniger als 200.000 Einwohnern werden zehn repräsentative Haushalte simuliert. Für Gemeindeverbände mit mehr als 200.000 Einwohnern wird ein Haushalt für jeweils 20.000 Einwohner simuliert. Für das Jahr 2019 gibt es 40 Gemeindeverbände mit mehr als 200.000 Einwohnern. Diese sind ausschließlich Großstädte, die kleinste davon ist Kassel, die größte Berlin.

Die Anpassung der Anzahl simulierter Haushalte für Gemeindeverbände mit hoher Bevölkerungszahl ist für diese Arbeit notwendig, da Mobilitätsentscheidungen eines einzelnen Haushalts ansonsten zu einem unrealistischen Verkehrsaufkommen auf der jeweiligen Route führen würden. Werden für Berlin mit 3.669.491 Einwohnern nur 10 Haushalte simuliert, repräsentiert jeder simulierte Haushalt ungefähr 370.000 Menschen. Trifft eine Person eines solchen Haushalts eine Mobilitätsentscheidung, wählen somit mehrere Hunderttausend Menschen das entsprechende Verkehrsmittel und die entsprechende Route zur exakt selben Zeit. Das Verkehrsaufkommen ist dadurch stark auf einzelne Routen und Zeiten konzentriert. Für eine aggregierte Betrachtung des Verkehrsaufkommens ohne Berücksichtigung der Routen, wie sie zuvor durchgeführt wurde [83, 86], ist eine solche Konzentration nicht relevant.

Güterverkehr

Innerhalb dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, Güterverkehrsströme in Deutschland analog zum Personenverkehr in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene für die Jahre 2019, 2030 und 2045 abzubilden.

Die Daten für das Verkehrsaufkommen im Güterverkehr basieren auf den jährlichen Gütertransportmengen in Tonnen zwischen den NUTS-3 Regionen in Europa für das Jahr 2019. Die Daten wurden von Speth et al. [161] kuratiert und als „Synthetic European Freight Flows“ als Datensatz auf Mendeley bereitgestellt [162]. Der Datensatz enthält die transportierten Gütermengen zwischen den NUTS-3 Regionen Europas auf jährlicher Basis für das Jahr 2019, wobei der lokale Verkehr innerhalb der NUTS-3 Regionen entfernt wurde. Die Autoren haben das Verkehrsaufkommen im europäischen Autobahnnetzwerk[78] untersucht. Eine lokale Betrachtung des Verkehrsaufkommens war für sie auf Grund der groben Auflösung des Straßennetzwerks nicht sinnvoll. Für die Modellierung in dieser Arbeit werden die Gütertransportmengen innerhalb der NUTS-3 Regionen für das Jahr 2019 allerdings benötigt und daher rekonstruiert. Dazu wird die von Speth et al. [161] entwickelte Methodik und die von ihnen verwendete Datenquelle genutzt. Die Daten von Speth et al. basieren auf den Daten des ETISPlus Projektes [167]. Diese beinhalten die Gütertransportmengen für das Jahr 2010 welche Speth et al. für das Jahr 2019 mit Skalierungsfaktoren hochgerechnet haben.

Für die weitere Hochrechnung der Gütertransportmengen für die Jahre 2030 und 2045 werden eigene Skalierungsfaktoren genutzt, weil eine Weiterverwendung der Skalierungsfaktoren der Hochrechnung von 2010 auf 2019 wie bei Speth et al. [161] ein zu starkes Wachstum bedeuten würden. Die Hochrechnung der Gütertransportmengen in Tonnen erfolgt in Anlehnung an die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [2] unterteilt in Binnenverkehr, grenzüberschreitenden Versand/Empfang und Transitverkehr. Die Wachstumsfaktoren werden allerdings so angepasst, dass das Gesamtwachstum der Gütertransportmengen ungefähr dem prognostizierten Wachstum aus der Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022 [3] entspricht. Die Wachstumsfaktoren der beiden Prognosen für die Verkehrsleistung in Tonnenkilometern sind in Tabelle 3-8, und die daraus für diese Arbeit resultierenden Wachstumsfaktoren für die Gütertransportmengen in Tonnen in Tabelle 3-9 dargestellt.

Tabelle 3-8 Jährliche Wachstumsfaktoren für die Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometern nach Verkehrsart.

Verkehrsart	Verkehrsverflechtungs-prognose **2010–2030** [2]	Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose **2019–2051** [3]
Binnenverkehr	1.3%	-
Grenzüberschreitender Versand	1.9%	-
Grenzüberschreitender Empfang	2.2%	-
Transitverkehr	2.2%	-
Gesamt	1.7%	1.2%

[78] E-Straßen

Tabelle 3-9 Jährliche Wachstumsfaktoren für die Gütertransportmengen in Tonnen nach Verkehrsart.

Verkehrsart	Diese Arbeit 2019–2045	Gleitende Langrist-Verkehrsprognose 2019–2051 [3]
Binnenverkehr	0.8%	-
Grenzüberschreitender Versand	0.8%	-
Grenzüberschreitender Empfang	1.0%	-
Transitverkehr	1.0%	-
Gesamt	0.9%	0.8%

Für das Beispiel der Gütertransportmenge G zwischen Hamburg und Stuttgart, die dem Binnenverkehr angehört, erfolgt die Berechnung für das Jahr 2030 in Bezug zum Basisjahr 2019 wie folgt:

$$G^{2030}_{\text{Hamburg,Stuttgart}} = G^{2019}_{\text{Hamburg,Stuttgart}} \cdot (1 + 0.008)^{11} \quad .$$

Gl. 3-17

Die Güterverkehrsströme müssen zuletzt noch auf die in dieser Arbeit verwendete NUTS-3 Klassifikation übertragen werden. Da der ursprüngliche Datensatz für die Gütertransportmengen aus dem Jahr 2010 stammt, entsprechen die NUTS-3 Regionen in dem Datensatz von Speth et al. dem Stand von 2006 [161]. Für diese Arbeit wird jedoch die NUTS-3 Klassifizierung für das Jahr 2019 mit dem Stand von 2016 verwendet. Die Regionen im alten Datensatz müssen dementsprechend den neuen Regionen zugeordnet werden.

Die Zuordnung erfolgt folgendermaßen: Existiert eine Regionsbezeichnung in beiden Datensätzen werden sie einander zugeordnet. Existiert eine alte Region nicht mehr, wird dieser Region die Region des neuen Datensatzes mit dem geringsten geografischen Abstand der Mittelpunkts-Koordinaten zugeordnet.

Mit diesem Verfahren lässt sich für Deutschland jeder der 401 Regionen der 2016er-Klassifizierung mindestens eine alte Region der 2006er-Klassifizierung zuordnen. Für die Nachbarstaaten Deutschlands lassen sich jedoch 14 Regionen der 2016er-Klassifizierung keine alte Region der 2006er-Klassifizierung zuordnen. Sie bleiben somit ohne zugeordnete Gütertransportmenge. Die Gesamttransportmenge bleibt dabei jedoch unverändert, weil anderen Regionen dafür mehrere alte Regionen zugeordnet werden. Die Ungenauigkeit in der Zuordnung des Güterverkehrsaufkommens in den Nachbarländern Deutschland ist dabei, wie zuvor bereits beschrieben, unproblematisch, da das Verkehrsaufkommen nur an ausgewählten Grenzübergängen dem deutschen Straßennetzwerk zugeführt wird.

Um für das Güterverkehrsaufkommen dieselbe räumliche und zeitliche Auflösung wie für das Personenverkehrsaufkommen zu erhalten, muss die räumliche Auflösung von der NUTS-3 Ebene auf die Gemeindeverbandsebene erhöht werden und die zeitliche Auflösung von jährlichen Verkehrsaufkommen auf stündliche Verkehrsaufkommen erhöht werden. Im Folgenden wird zuerst die Methodik zur Erhöhung der zeitlichen Auflösung und anschließend der räumlichen Auflösung vorgestellt.

Für die zeitliche Auflösung werden Daten automatischer Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen für das Jahr 2019 verwendet [175]. Die Daten enthalten in stündlicher Auflösung die Anzahl der Fahrzeuge, die den jeweiligen Autobahnabschnitt passiert haben. In den Daten findet eine Unterscheidung zwischen Lastkraftwagen und Personenkraftwagen statt[79].

Die Daten aller Zählstellen werden zu einem wöchentlichen Fahrprofil für Lastkraftwagen zusammengefasst. Bei der Berechnung der wöchentlichen Fahrprofile findet keine saisonale Unterscheidung statt, das wöchentliche Profil entspricht dem Jahresdurchschnitt. Für jede Zählstelle ist das Datum und die Uhrzeit der Erfassung des Verkehrsaufkommens angegeben. Die Daten lassen sich somit stündlich für jeden Wochentag aggregieren. Das erzeugte Fahrprofil ist in Abbildung 3-10 dargestellt.

Das Profil weist für die Arbeitswoche von Montag bis Freitag jeweils einen ähnlichen täglichen Verlauf auf. Samstags ist das Verkehrsaufkommen deutlich geringer und nimmt ab mittags gegen Sonntag kontinuierlich ab. Entsprechend des Sonntagsfahrverbots ist das Verkehrsaufkommen sonntagsvormittags nahezu null. Nachmittags gibt es ein geringes Aufkommen, welches am Abend, ab 22 Uhr, wieder deutlich zunimmt.

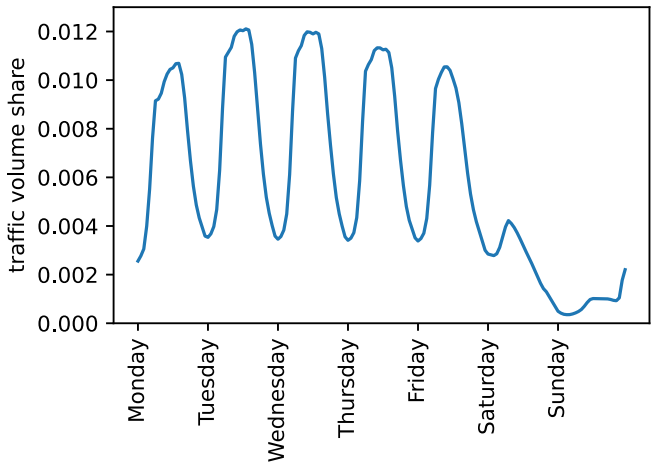


Abbildung 3-10 Wöchentliches Fahrprofil des Straßengüterverkehrs. Basierend auf den Daten automatischer Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen [175].

Für die Modellierung des gesamten Straßengüterverkehrs wird dasselbe zeitliche Profil verwendet, die Bedeutung des Profils ist jedoch für den Verkehr innerhalb eines Gemeindeverbands und den Verkehr zwischen zwei Gemeindeverbänden unterschiedlich. Für den Verkehr zwischen Gemeindeverbänden dient das Fahrprofil als Abfahrtszeitprofil. Für den Verkehr innerhalb eines Gemeindeverbands gibt es keine Routen und Abfahrtszeiten, daher dient das Fahrprofil dort als Profil für die Verkehrsstärke.

[79] Die Unterscheidung erfolgt anhand des Induktionssignals. Es werden im Wesentlichen die Fahrzeugachsen gezählt.

Für die räumliche Auflösung findet eine Aufschlüsselung der Gütertransportmengen der NUTS-3 Regionen auf die zugehörigen Gemeindeverbände über die jeweilige Anzahl der Beschäftigten im produzierenden Gewerbe in den Gemeindeverbänden statt. In der Regionaldatenbank Deutschland ist die Anzahl der Beschäftigten im produzierenden Gewerbe auf Gemeindeebene erfasst [166]. Für jeden Gemeindeverband wird die Anzahl der Beschäftigten als Summe der Beschäftigten der zugehörigen Gemeinden bestimmt. Anschließend wird jedem Gemeindeverband einer NUTS-3 Region abhängig vom Anteil der Beschäftigten im Gemeindeverband im Verhältnis zur Anzahl der Beschäftigten in der NUTS-3 Region der Anteil der Gütertransportmenge der NUTS-3 Region zugeordnet.

Zuletzt müssen die Gütertransportmengen in Tonnen zwischen den einzelnen Zonen noch in tatsächliche Fahrten von Lastkraftwagen umgerechnet werden, um das Güterverkehrsaufkommen abzubilden.

Speth et al. [161] verwenden dazu eine Beladung von 13,6 t für alle Lastfahrten, was dem Mittelwert aller Lastfahrten im europäischen Straßengüterverkehr für das Jahr 2010 entspricht.

Die Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen des Kraftfahrtbundesamtes für das Jahr 2019 [156] zeigt jedoch, dass die Beladung abhängig von der Länge der Transportstrecke ist. Die Beladung der Lastkraftwagen nimmt mit steigender Streckenlänge bis ca. 400 km zu und bleibt danach konstant, bis sie für Fahrten über 1000 km wieder abnimmt. Daher wird die Beladung in dieser Arbeit in Abhängigkeit von der Transportstrecke gewählt. Die Beladung der Lastkraftwagen nach den in dieser Arbeit verwendeten Distanzklassen ist in Tabelle 3-10 dargestellt.

Zusätzlich zu den Lastfahrten führen die Lastkraftwagen auch Leerfahrten durch, welche berücksichtigt werden müssen, um das Gesamtverkehrsaufkommen der Lastkraftwagen abzubilden.

Speth et al. [161] berücksichtigen Leerfahrten mit einem pauschalen Anteil von 25%.

Wie die Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen des Kraftfahrtbundesamtes für das Jahr 2019 [156] zeigt, ist der Anteil der Leerfahrten jedoch ebenfalls von der Fahrtdistanz abhängig. Daher wird auch der Anteil der Leerfahrten in dieser Arbeit in Abhängigkeit von der Fahrtdistanz gewählt. Die Anteile der Leerfahrten sind ebenfalls in Tabelle 3-10 nach den in dieser Arbeit verwendeten Distanzklassen aufgeführt. Der Anteil an Leerfahrten liegt bei kurzen Strecken bis zu 50 km bei über 40% und nimmt mit steigender Fahrtweite kontinuierlich ab. Für Strecken mit einer Länge von mehr als 1000 km beträgt der Anteil der Leerfahrten nur noch ungefähr 2%.

In dieser Arbeit werden die ursprünglichen Gütertransportmengen zwischen den einzelnen Zonen in zwei Schritten in das Güterverkehrsaufkommen umgerechnet. Zuerst wird die Anzahl der Lastfahrten über die durchschnittliche Beladung der Lastfahrten der jeweiligen Distanzklasse bestimmt. Anschließend wird die Anzahl der Lastfahrten mit dem jeweiligen Anteil der Leerfahrten der Distanzklasse skaliert, um das Güterverkehrsaufkommen zu erhalten.

Für das Beispiel des Güterverkehrsaufkommens V zwischen Hamburg und Stuttgart erfolgt die Berechnung für das Jahr 2019 in Bezug zur Gütertransportmengen G wie folgt:

$$V^{2019}_{\text{Hamburg,Stuttgart}} = \frac{G^{2019}_{\text{Hamburg,Stuttgart}}}{14{,}882\ \text{t}} \cdot (1 + 0{,}0718)$$

Gl. 3-18

Die Skalierungsfaktoren entsprechen dabei den Werten der Distanzklasse 501–700 km aus Tabelle 3-10, weil die Distanz zwischen Hamburg und Stuttgart mit ungefähr 660 km in diesem Bereich liegt.

Tabelle 3-10 Verwendete Distanzklassen zur Berechnung des Güterverkehrsaufkommens. Die Daten stammen aus der Güterverkehrsstatistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen für das Jahr 2019 [156].

Distanzklasse	Anzahl Fahrten [Tsd.]	Zurückgelegte Entfernung [Tsd. km]	Beförderungs-leistung [Mio. tkm]	Durchschnittliche Beladung [t] (Lastfahrten)	Anteil Leerfahrten
≤ 50 km	270.930	5.505.544	37.923	11,865	44,75%
51–100 km	71.430	5.038.894	40.591	11,603	31,20%
101–150 km	34.004	4.010.927	35.693	12,248	28,09%
151–200 km	18.825	3.040.186	30.547	13,078	24,06%
201–300 km	21.245	4.637.340	53.687	14,044	18,65%
301–400 km	11.051	3.312.119	42.743	14,653	12,80%
401–500 km	7.117	2.661.607	36.300	14,906	9,36%
501–700 km	9.815	4.382.347	60.845	14,882	7,18%
701–900 km	5.108	2.575.819	35.667	14,701	6,15%
901–1000 km	1.741	922.604	13.069	14,731	3,27%
> 1000 km	9.730	6.925.825	83.219	12,296	2,74%
Gesamt	460.996	43.013.212	470.284	13,327	35,79%

Das Verkehrsaufkommen des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland wird mit der in diesem Unterabschnitt beschriebenen Methodik in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene modelliert. Die Abbildung des Güterverkehrsaufkommens in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene stellt dabei eine methodische Weiterentwicklung gegenüber der bestehenden Literatur dar. Dadurch ist es möglich, in dieser Arbeit Analysen zur Auslastung des Autobahnnetzwerks für einzelne Abschnitte auf Basis des Gesamtverkehrsaufkommens in hoher zeitlicher Auflösung durchzuführen und explizit die verkehrlichen Auswirkungen unterschiedlicher Anteile automatisierter Fahrzeuge im Personen- und Güterverkehr zu untersuchen.

Für die weitere Analyse in dieser Arbeit findet eine Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk statt. Dazu wird im folgenden Unterabschnitt 3.3.3 zuerst das verwendete Straßennetzwerk und anschließend in Unterabschnitt 3.3.4 die Methodik zur Umlegung des Verkehrsaufkommens vorgestellt.

3.3.3 Abbildung des Straßennetzwerks

Für die Analysen dieser Arbeit wird eine Abbildung des deutschen Straßennetzwerks benötigt. Die Methodik deren Erstellung wird in diesem Unterabschnitt erläutert. Die Methodik umfasst das Herunterladen des Roh-Netzwerks sowie dessen Aufbereitung.

Das Roh-Netzwerk wird mit Hilfe der Funktion „graph_from_polygon“ aus der Python Programmbibliothek OSMnx [170] von „OpenStreetMap“ [168] heruntergeladen und in einen gerichteten Graphen umgewandelt. Der genau Workflow inklusive der weiteren verwendeten Funktionen und Parameter, um das deutsche Straßennetzwerk herunterzuladen, sind in Abbildung 3-11 dargestellt und werden im Folgenden genauer beschrieben.

Das Straßennetzwerk wird einmal für Deutschland und einmal für die Nachbarstaaten Deutschlands heruntergeladen. Dies ist notwendig, da das Straßennetzwerk für die Nachbarstaaten Deutschlands in einer geringeren Auflösung abgebildet werden soll.[80]

```
import osmnx as ox
import networkx as nx
# set filters for objects to download from OSM
custom_filter = '
      ["motor_vehicle"!~"no"]
      ["motorcar"!~"no"]
      ["access"!~"private"]
      ["service"!~"parking|parking_aisle|driveway|private|emergency_access"]
      ["highway"~"motorway|primary|secondary|tertiary|trunk|
      motorway_link|primary_link|secondary_link|tertiary_link|trunk_link"]
      ["area"!~"yes"]
'
# download OSM data as graph
G_DE  =  ox.graph_from_polygon(polygon=hull_DE,  custom_filter=custom_filter,
simplify=True, retain_all=True, truncate_by_edge=True, clean_periphery=False)
# keep largest network component only
G_DE =
nx.MultiDiGraph(G_DE.subgraph(max(nx.weakly_connected_components(G_DE),
key=len)))
# remove self-loops
G_DE.remove_edges_from(nx.selfloop_edges(G_DE))
# Get road speeds and travel times
ox.add_edge_speeds(G_DE)
```

Abbildung 3-11 Verwendetes Python-Skript zum Herunterladen des deutschen Straßennetzwerks aus „OpenStreetMap “.

In der Funktion „graph_from_polygon“ wird zuerst mit dem Parameter „polygon“ die Region festgelegt, für die das Straßennetzwerk heruntergeladen wird. Für die Festlegung der

[80] Technische Anmerkung: Um das detaillierte Straßennetzwerk Deutschlands später mit dem weniger detaillierten Straßennetzwerk der Nachbarstaaten Deutschlands verbinden zu können, wird das geringer aufgelöste Straßennetzwerk nicht einzeln für die Nachbarstaaten heruntergeladen, sondern als Gesamtnetzwerk, welches auch das deutsche Straßennetzwerk in geringer Auflösung enthält. Auf diese Weise lassen sich die Übergänge zwischen den Netzwerken direkt identifizieren und die Verbindung der Netzwerke ist einfacher.

geografischen Begrenzungen werden die zuvor beschriebenen geografischen Begrenzungen der europäischen NUTS-3 Regionen von Eurostat verwendet [163].

Anschließend erfolgt die Auswahl der Netzwerkdaten über den Parameter „custom_filter“. Die Definition des „custom_filter“ ist in Abbildung 3-11 mit dargestellt. Dieser wird so eingestellt, dass nur Straßen berücksichtigt werden, die von Autos befahren werden können und öffentlich zugänglich sind. Weiterhin werden für das Deutsche Straßennetzwerk Autobahnen, Kraftfahrstraßen, Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen berücksichtigt. Die Auswahl dieser Straßentypen erfolgt über die jeweiligen „OpenStreetMap“ Straßen-Bezeichnungen, welche in Tabelle 3-11 dargestellt sind. Für das geringer aufgelöste Straßennetzwerk der Nachbarstaaten Deutschlands werden lediglich Autobahnen und Kraftfahrstraßen berücksichtigt.

Tabelle 3-11 „OpenStreetMap“ Straßen-Bezeichnungen und entsprechende deutsche Straßentypen. Abgeleitet von [169]. Die Geschwindigkeitswerte für Personenkraftwagen entsprechen dem Mittelwert der vorhandenen Werte des jeweiligen Straßentyps. Die Geschwindigkeitswerte für Lastkraftwagen werden in dieser Arbeit exogen für die Straßentypen gesetzt.

„OpenStreetMap“ Straßen-Bezeichnung	Deutscher Straßentyp	Standardgeschwindigkeit Pkw [km/h]	Standardgeschwindigkeit Lkw [km/h]
Motorway (-link)	Autobahn	119 (76)	80
Trunk (-link)	Autobahnähnliche Straßen, Kraftfahrstraße, Autostraße (generell Kreuzungsfrei)	89 (68)	80
Primary (-link)	Bundesstraßen, Straßen mit übergeordneter Verkehrsbedeutung (> 10.000 Kfz/Tag)	63 (64)	60
Secondary (-link)	Landes- (Staats-) oder sehr gut ausgebaute Kreisstraßen	58 (58)	50
Tertiary (-link)	Kreisstraße, sehr gut ausgebaute Gemeindeverbindungsstraße, innerstädtische Vorfahrtsstraße	54 (57)	30

Darüber hinaus werden die folgenden Einstellungen für die Funktion „graph_from_polygon“ gewählt:

- **simplify=True**
  Mehrere aufeinanderfolgende Straßenabschnitte werden zu einem zusammengefügt, sofern es keine Abzweigungen gibt. Dies verringert die Netzwerkkomplexität.
- **retain_all=True**
  Es werden alle Komponenten des Netzwerks behalten. Das Netzwerk kann dadurch aus mehreren nicht-zusammenhängenden Teilen bestehen. Dies ist relevant für die Nachbarländer Deutschlands, für die nur Autobahnen und Bundesstraßen betrachtet werden und nicht alle Komponenten zwangsläufig verbunden sind.
- **truncate_by_edge=True**
  Straßenabschnitte, die die geografischen Grenzen schneiden, für die also ein Ende innerhalb der Grenzen und ein Ende außerhalb liegt, werden mit aufgenommen

- **clean_periphery=False**
  Es wird zugelassen, dass Straßen an den geografischen Grenzen bestehen bleiben, auch wenn sie durch das Abschneiden des Netzwerks an den Grenzen zu einer Sackgasse werden.

Anschließend wird jeweils nur die größten verbundenen Komponente des Netzwerks, ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtung der Straßen[81], behalten und das Netzwerk von Schleifen[82] bereinigt. Für das verbleibende Straßennetzwerk werden anschließend mit Hilfe der Funktionen „get_edge_speeds“ und „add_edge_travel_times“ aus der Python Programmbibliothek OSMnx [170] die Geschwindigkeitsbegrenzungen für Personenkraftwagen heruntergeladen und die Reisezeiten für die Straßenabschnitte berechnet.

Nach dem Herunterladen des Roh-Netzwerks muss das deutsche Straßennetzwerk für die Analysen in dieser Arbeit aufbereitet werden. Dies umfasst die Korrektur der Geschwindigkeitswerte für Personenkraftwagen auf ausgewählten Abschnitten und die Einführung von Geschwindigkeitswerten für Lastkraftwagen auf allen Abschnitten.

Die Geschwindigkeitswerte für die Personenkraftwagen müssen für einige Abschnitte korrigiert werden. Einerseits sind nicht für alle Abschnitte Geschwindigkeitswerte vorhanden und diese müssen dementsprechend aufgefüllt werden. Andererseits sind durch die Vereinfachung des Netzwerks mehrere aufeinander folgende Abschnitte ohne Abzweigungen zusammengefasst worden. Diesen neuen Abschnitten sind die Geschwindigkeitswerte aller ursprünglichen Teilabschnitte zugeordnet, sodass kein eindeutiger Geschwindigkeitswert vorliegt.

Die Korrektur der Geschwindigkeitswerte für Personenkraftwagen erfolgt folgendermaßen: In einem ersten Schritt werden für alle Straßentypen die Straßenabschnitte gesammelt, für die ein eindeutiger Geschwindigkeitswert vorliegt. Für diese wird dann pro Straßentyp das arithmetische Mittel der Geschwindigkeitswerte gebildet und als Standardwert des Straßentyps festgelegt. Anschließend werden die uneindeutigen oder fehlenden Werte mit dem jeweiligen Standardwert des Straßentyps aufgefüllt. Besitzt ein Abschnitt keinen eindeutigen Straßentyp, weil der Abschnitt aus mehreren Abschnitten zusammengefasst wurde, wird der geringste Standardwert für den Geschwindigkeitswert des Abschnitts gewählt. Die Standardwerte der Geschwindigkeiten für die Straßentypen sind mit den „OpenStreetMap“ Straßen-Bezeichnungen in Tabelle 3-11 auf Seite 98 dargestellt.

Für Lastkraftwagen gelten andere Geschwindigkeitsbegrenzungen als für Personenkraftwagen. Für Lastkraftwagen müssen daher eigene Geschwindigkeitswerte für die Straßenabschnitte festgelegt werden.

Für Lastkraftwagen werden im Rahmen dieser Arbeit für die verschiedenen Straßentypen Standardwerte für die Geschwindigkeiten festgelegt. Die Werte werden den einzelnen Straßenabschnitten analog zur Korrektur der Geschwindigkeitswerte der Personenkraftwagen zugeordnet. Bei einer eindeutigen Bezeichnung des Straßentyps wird der jeweilige Standardwert verwendet. Bei einer uneindeutigen Bezeichnung wird der geringste

[81] In der Graphentheorie wird dies als „weakly connected component“ bezeichnet.
[82] Eng: self loops

Standardwert verwendet. Die Standardwerte für die Geschwindigkeiten von Lastkraftwagen für die Straßentypen sind ebenfalls in Tabelle 3-11 auf Seite 98 dargestellt.

Anschließend wird für jeden Abschnitt der Geschwindigkeitswert für Lastkraftwagen mit dem Geschwindigkeitswert für Personenkraftwagen verglichen. Für den Fall, dass der Geschwindigkeitswert für Lastkraftwagen größer ist als der Geschwindigkeitswert für Personenkraftwagen, wird er auf den Wert für Personenkraftwagen reduziert. Andernfalls bleibt der Wert unverändert.

Abschließend wird die benötigte Fahrzeit für alle Straßenabschnitte für Personen- und Lastkraftwagen bestimmt. Dazu wird zuerst die jeweilige Geschwindigkeit mit einem Faktor von 0,8 skaliert, um zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuge nicht immer mit der maximal erlaubten Geschwindigkeit fahren. Anschließend wird die Abschnittslänge durch den jeweiligen skalierten Geschwindigkeitswert geteilt.

Um die benötigten Fahrzeiten zu plausibilisieren, werden für vier verschiedene Strecken innerhalb Deutschlands die Routenlängen und benötigte Fahrzeiten für Personenkraftwagen mit denen von Google Maps verglichen. Der Vergleich der Routenlängen und benötigten Fahrzeiten ist in Tabelle 3-12 dargestellt. Das Vorgehen zur Routenfindung in dieser Arbeit wird im nächsten Unterabschnitt 3.3.4 beschrieben.

Tabelle 3-12 Vergleich der mit dem Modell in dieser Arbeit und mit Google Maps bestimmten Streckenlänge und benötigten Fahrzeit für Personenkraftwagen für vier beispielhafte Strecken innerhalb Deutschlands.

Strecke	Streckenlänge Modell [km]	Streckenlänge Google Maps [km]	Fahrzeit Modell [min]	Fahrzeit Google Maps [min]
Aachen – Leipzig	560	564	355	320–440
Hamburg – München	775	778	493	430–600
Biesenthal-Barnim – Werneuchen	16	17	21	19
Düren – Jülich	19	18	24	22

Das in dieser Arbeit verwendete Straßennetzwerk sowie die angepassten Geschwindigkeiten und Fahrzeiten scheinen plausibel. Für die gezeigten Beispiele treten insgesamt keine großen Abweichungen zwischen den Streckenlängen und Reisezeiten des Modells und Google Maps auf. Für die beiden Langstrecken Aachen – Leipzig und Hamburg – München weicht die Streckenlänge des Modells um weniger als 1% von der Streckenlänge von Google Maps ab. Die Reisedauern des Modells liegen ebenfalls innerhalb des von Google Maps angegebenen Intervalls. Für die Kurzstrecken Biesenthal-Barnim – Werneuchen und Düren – Jülich wird die Streckenlänge im ersten Fall um 1 km überschätzt und im zweiten Fall um 1 km unterschätzt. Die Reisedauern sind in beiden Fällen um zwei Minuten überschätzt.

Zuletzt wird das detaillierte Straßennetzwerk Deutschlands mit dem weniger detaillierten Straßennetzwerk der Nachbarstaaten Deutschlands zusammengeführt. Die Netzwerke werden an gemeinsamen Knoten verbunden und Straßenabschnitte, die in beiden Netzwerken vorkommen, werden auf eine einzelne Verbindung reduziert. Dabei wird der kürzere Pfad in Bezug auf die Reisedauer behalten.

Im folgenden Unterabschnitt 3.3.4 wird abschließend noch die Methodik zur Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk erläutert.

3.3.4 Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk

In diesem Unterabschnitt wird zuerst die Routenfindung zwischen den betrachteten Regionen und anschließend die Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk beschrieben.

Routenfindung

Um Routen zwischen den betrachteten Regionen bestimmen zu können, müssen diese in einem ersten Schritt mit dem Straßennetzwerk verbunden werden. Jeder Region wird der Knoten des Straßennetzwerks zugeordnet, der dem geografischen Mittelpunkt der Region am nächsten ist.

Für jeden zugeordneten Knoten muss geprüft werden, ob dieser von allen anderen zugeordneten Knoten erreicht werden kann und ob alle anderen zugeordneten Knoten von diesem erreicht werden können. Ist dies nicht der Fall, wird ein Nachbarknoten des ursprünglichen Knotens gewählt und geprüft, ob dieser die Bedingung erfüllt. Das Vorgehen wird so lange wiederholt, bis die Bedingung erfüllt ist. Der Knoten, der die Bedingung erfüllt wird schließlich der Region zugeordnet.

Anschließend werden mit Hilfe der Funktion „shortest_path“ aus der Python Programmbibliothek NetworkX [174] die kürzesten Pfade zwischen allen Regionspaaren bestimmt. Für die Bestimmung der Netzwerkpfade wird der Dijkstra-Algorithmus verwendet. Dabei werden jeweils die Fahrzeiten der Personen- und Lastkraftwagen für die Straßenabschnitte als Pfadgewichte verwendet.

Die Bestimmung der Routen erfolgt einmalig und ohne Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens auf den Abschnitten. Für die Routen im Personenverkehr werden nur die 4620 Gemeindeverbände in Deutschland betrachtet. Für den Güterverkehr werden zusätzlich die 337 NUTS-3 Regionen der Nachbarstaaten betrachtet und dementsprechend die Routen zwischen 4957 Regionen bestimmt.

Umlegung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk

Die Umlegung des Verkehrsaufkommens erfolgt für eine repräsentative Woche in stündlicher Auflösung. Jedem Straßenabschnitt wird für jedes der 168 Zeitintervalle die Anzahl der Fahrzeuge zugewiesen, die den Abschnitt innerhalb des Zeitintervalls passieren.

Die Methodik unterscheidet sich dabei für den Verkehr zwischen zwei Regionen und innerhalb einer Region.

Für den Verkehr zwischen zwei Regionen wird das Verkehrsaufkommen auf die zuvor bestimmte Route umgelegt. Die Verkehrsumlegung auf das Straßennetzwerk wird im Folgenden detailliert für eine solche Route zwischen zwei Regionen beschrieben.

Zuerst wird die Startzeit festgelegt und die Anzahl an Fahrten zwischen den Regionen für diese Startzeit festgelegt. Es wird angenommen, dass die Fahrten immer zu Beginn eines Stundenintervalls starten, die erste Startzeit ist Montag 00:00 Uhr. Die Anzahl der Fahrten im

Personen- und Güterverkehr für die jeweilige Startzeit ergibt sich wie in Unterabschnitt 3.3.2 beschrieben.

Anschließend wird die aktuelle Zeit auf die Startzeit gesetzt und der erste Straßenabschnitt der Route passiert. Folgende Schritte werden beim Passieren des Streckenabschnitts in der gegebenen Reihenfolge durchgeführt:

- Dem Streckenabschnitt wird für das Stundenintervall, in dem die aktuelle Zeit liegt, die festgelegte Anzahl an Fahrten als Verkehrsaufkommen zugeordnet.
- Die aktuelle Zeit wird um die für den Streckenabschnitt benötigte Fahrzeit erhöht.

Diese Schritte werden für alle Streckenabschnitte der Route wiederholt, bis das Ende der Route erreicht ist. Anschließend wird die Startzeit um eine Stunde erhöht und der Prozess für die Route wiederholt bis die Startzeit die komplette Woche durchlaufen hat.

Für den Güterverkehr werden in dem Prozess zur Umlegung des Verkehrsaufkommens zwischen zwei Regionen noch weitere Schritte durchgeführt, um Pausen- und Ruhezeiten der Fahrer zu berücksichtigen. Dies geschieht auf die folgende Weise:

- Überschreitet die Fahrzeit, nachdem ein Straßenabschnitt passiert worden ist, 4,5 Stunden, wird eine Pause von 45 Minuten eingelegt. Dazu wird die aktuelle Zeit um 45 Minuten erhöht, bevor der nächste Straßenabschnitt passiert wird.
- Überschreitet die Fahrzeit, nachdem ein Straßenabschnitt passiert worden ist, 9 Stunden, wird geprüft, ob die Fahrt innerhalb einer weiteren Stunde beendet werden kann. Ist dies der Fall, wird erneut eine Pause von 45 Minuten eingelegt und die Fahrt anschließend fortgesetzt. Ist die verbleibende Fahrzeit mehr als eine Stunde, wird stattdessen die tägliche Ruhezeit eingelegt. Nach der täglichen Ruhezeit startet das Fahrzeug am nächsten Tag zur gleichen Startzeit wie am Vortag.
- Sollte zu irgendeinem Zeitpunkt die aktuelle Zeit auf einen Sonntag fallen, wird geprüft, ob die Fahrt auf Grund des Fahrverbots an Sonntagen unterbrochen werden muss. Wird der Sonntag während der Fahrt erreicht, also nicht durch die tägliche Ruhezeit, und ist die verbleibende Fahrtdauer weniger als eine Stunde, wird die Fahrt in Einklang mit den regulären Pausen- und Ruhezeiten fortgesetzt. Ist die verbleibende Zeit länger als eine Stunde oder wird der Sonntag durch eine Ruhezeit erreicht, wird die Fahrt unterbrochen und Sonntagabend um 22:00 Uhr fortgesetzt. Ausnahmen davon stellen Fahrten dar, die regulär am Sonntag beginnen. Es wird davon ausgegangen, dass für diese Fahrten eine Ausnahmegenehmigung für Sonntagsfahrten vorliegt.

Die Anzahl der Fahrzeuge, die eine Pause einlegen, wird analog zum Verkehrsaufkommen für jeden Straßenabschnitt und jede Stunde erfasst. Dies kann beispielsweise für die Auslegung der Infrastruktur für Tank- und Ladestellen genutzt werden.

Für die Umlegung des Verkehrsaufkommens für den Verkehr innerhalb einer Region wird ein anderer Ansatz gewählt. Für den Verkehr innerhalb einer Region kann keine Route berechnet werden. Es gibt daher keine konkreten Straßenabschnitte, über die der Verkehr innerhalb einer Region fließt. Das Verkehrsaufkommen innerhalb einer Region wird daher auf das gesamte Straßennetz der Region aufgeteilt.

Dazu wird in einem ersten Schritt ein Stundenintervall festgelegt und die Anzahl der Fahrten innerhalb der jeweiligen Region für dieses Stundenintervall festgelegt. Die Anzahl der Fahrten

im Personen- und Güterverkehr für das jeweilige Stundenintervall ergibt sich wie in Unterabschnitt 3.3.2 beschrieben.

In einem nächsten Schritt wird eine regionsspezifische Fahrtweite festgelegt. Die Fahrtweite entspricht für jede Region dem Radius eines Kreises, der dieselbe Fläche wie die Region besitzt. Dieser Ansatz wurde von Huang und Kockelman [89] für den Straßengütertransport innerhalb von Regionen verwendet. Für die Analysen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass der gewählte Ansatz sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr das regionale Verkehrsaufkommen gut abbildet.

Abschließend wird die Gesamtlänge des Straßennetzwerks der jeweiligen Region bestimmt und jedem Straßenabschnitt abhängig von seiner Länge, der jeweilige Anteil des Gesamtverkehrsaufkommens zugeordnet. Die Straßentypen werden dabei unterschiedlich stark gewichtet. Autobahnen werden stärker gewichtet als andere Straßentypen, Kreisstraßen werden am schwächsten gewichtet.[83]

Die Ausführungen zur Umlegung des Verkehrsaufkommens auf des Straßennetzwerk schließen das Methodenkapitel dieser Arbeit ab. Im nachfolgenden Kapitel 4 werden die Ergebnisse der durchgeführten Analysen präsentiert.

[83] Die genaue Gewichtung erfolgt anhand der „OpenStreetMap“ Straßentypen: „motorway“ 100%, „trunk“ 70%, „primary“ und „secondary“ 40%, „tertiary“ 10%.

4 Modellierungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der drei Analysebereiche dieser Arbeit zur Beurteilung des Einflusses automatisierter Fahrzeuge vorgestellt. In dieser Arbeit werden die Betriebskosten, der Energiebedarf und der verkehrliche Einfluss automatisierter Fahrzeuge untersucht. In Abschnitt 4.1 werden die Ergebnisse der Betriebskostenanalyse dargestellt, in Abschnitt 4.2 die Ergebnisse der Energiebedarfsanalyse und abschließend in Abschnitt 4.3 die Ergebnisse der verkehrlichen Auswirkungen und der Auslastungsanalyse des Straßennetzwerks.

4.1 Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Gesamtbetriebskostenanalyse für die in Unterabschnitt 3.1.4 definierten Einsatzprofile dargestellt. Dabei erfolgt im ersten Unterabschnitt 4.1.1 eine Analyse der Zusammensetzung der Betriebskosten im nicht-automatisierten Fall. Anschließend werden in Unterabschnitt 4.1.2 die Änderungen der Betriebskosten für die Annahmen der Stufe 4 Betriebsstrategien dargestellt. In Unterabschnitt 4.1.3 wird untersucht, welcher Streckenanteil für die jeweiligen Einsatzprofile und Betriebsstrategien automatisiert stattfinden muss, um geringere Betriebskosten als für den nicht-automatisierten Fall zu erzielen. Abschließend werden in Unterabschnitt 4.1.4 die mögliche Gesamtersparnis durch den automatisierten Betrieb für den deutschen Straßengüterverkehr und in Unterabschnitt 4.1.5 die Auswirkungen des automatisierten Betriebs auf den Fahrerbedarf abgeschätzt.

Die Betriebskosten der Lastkraftwagen werden in dieser Arbeit für batterieelektrische Fahrzeuge untersucht. Die Entwicklungen der Kosten verschiedener Antriebsstränge haben einen erheblichen Einfluss auf die jeweiligen Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge. Der Einfluss fällt dabei für jedes Einsatzprofil unterschiedlich aus. Allerdings haben diese Kostenentwicklungen für ein einzelnes Einsatzprofil keinen Einfluss auf die Unterschiede in den Betriebskosten von automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen. Der Fokus dieser Arbeit ist ein Vergleich der Betriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen. Ein Vergleich der verschiedenen Antriebsstränge steht nicht im Vordergrund. Daher wird für die Diskussion in dieser Arbeit für alle Fahrzeuge ein batterieelektrischer Antriebsstrang angenommen. Die Betriebskosten für Fahrzeuge mit Diesel-Verbrennungsmotor und brennstoffzellenelektrischem Antriebsstrang sind in Tabellen in Anhang A zu finden.

4.1.1 Aufschlüsselung der Betriebskosten

In diesem Unterabschnitt wird die Zusammensetzung der Gesamtbetriebskosten für den nicht-automatisierten Fall diskutiert. Es werden zuerst die Ergebnisse aller Einsatzprofile gezeigt und anschließend anhand zweier ausgewählter Einsatzprofile detailliert diskutiert. Die beiden detailliert diskutierten Einsatzprofile werden zur Validierung der Zusammensetzung der Betriebskosten verwendet. In den folgenden Unterabschnitten 4.1.2 und 4.1.3 werden die beiden ausgewählten Einsatzprofile erneut verwendet, um den Einfluss des automatisierten Fahrens auf die Gesamtbetriebskosten zu diskutieren.

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, setzen sich die Gesamtbetriebskosten der Lastkraftwagen aus den Anschaffungskosten, Treibstoffkosten, Wartungskosten, Fahrerkosten und Versicherungskosten zusammen. Der Anteil der jeweiligen Kostenaspekte ist dabei stark von dem jeweiligen Einsatzprofil des Fahrzeugs abhängig.

Die analysierten Einsatzprofile unterscheiden sich in Fahrzeugtyp und -größe, den Fahrtweiten der einzelnen Fahrten sowie den Be- und Entladungszeiten vor und nach jeder Fahrt und der Jahresfahrleistung. Die jeweiligen Parameter der Einsatzprofile sind in Tabelle 3-3 auf Seite 74 in Unterabschnitt 3.1.4 zusammengefasst. Für ein besseres Verständnis der nachfolgenden Diskussion der Gesamtbetriebskosten ist es sinnvoll, sich die Unterscheidungen der Einsatzprofile noch einmal vor Augen zu führen.

Die Betriebskosten der Einsatzprofile lassen sich auf zwei Weisen vergleichen. Einerseits kann ein Vergleich unterschiedlicher Fahrzeugtypen und -größen für dieselbe Distanzklasse durchgeführt werden. Andererseits kann ein Vergleich unterschiedlicher Distanzklassen innerhalb einer Kombination aus Fahrzeugtyp und -größe durchgeführt werden.

Für den Vergleich der Einsatzprofile ist wichtig zu beachten, dass die Distanzklassen nicht der Tagesfahrleistung, sondern der Fahrtweite von Einzelfahrten entsprechen. Ein Fahrzeug mit Einzelfahrtweiten von bis zu 50 km kann beispielsweise mehrere Fahrten pro Tag durchführen und dadurch Tagesfahrleistungen über 100 km erreichen. Ein Fahrzeug mit Einzelfahrtweiten von über 1000 km wird diese Strecke eventuell nicht an einem einzigen Tag zurücklegen, sondern nur einen Teil der Strecke. Die angenommene Jahresfahrleistung ist stattdessen eher ein Indikator für die Tagesfahrleistung.

Die Gesamtbetriebskosten der einzelnen Einsatzprofile zeigen große Unterschiede im Gesamtbetrag sowie in ihrer jeweiligen Zusammensetzung. Die Gesamtbetriebskosten aller untersuchten Einsatzprofile sind für batterieelektrische Fahrzeuge für das Jahr 2023 in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Betriebskosten der Einsatzprofile weisen eine Spannweite von 0,65 €/km bis 3,64 €/km auf.

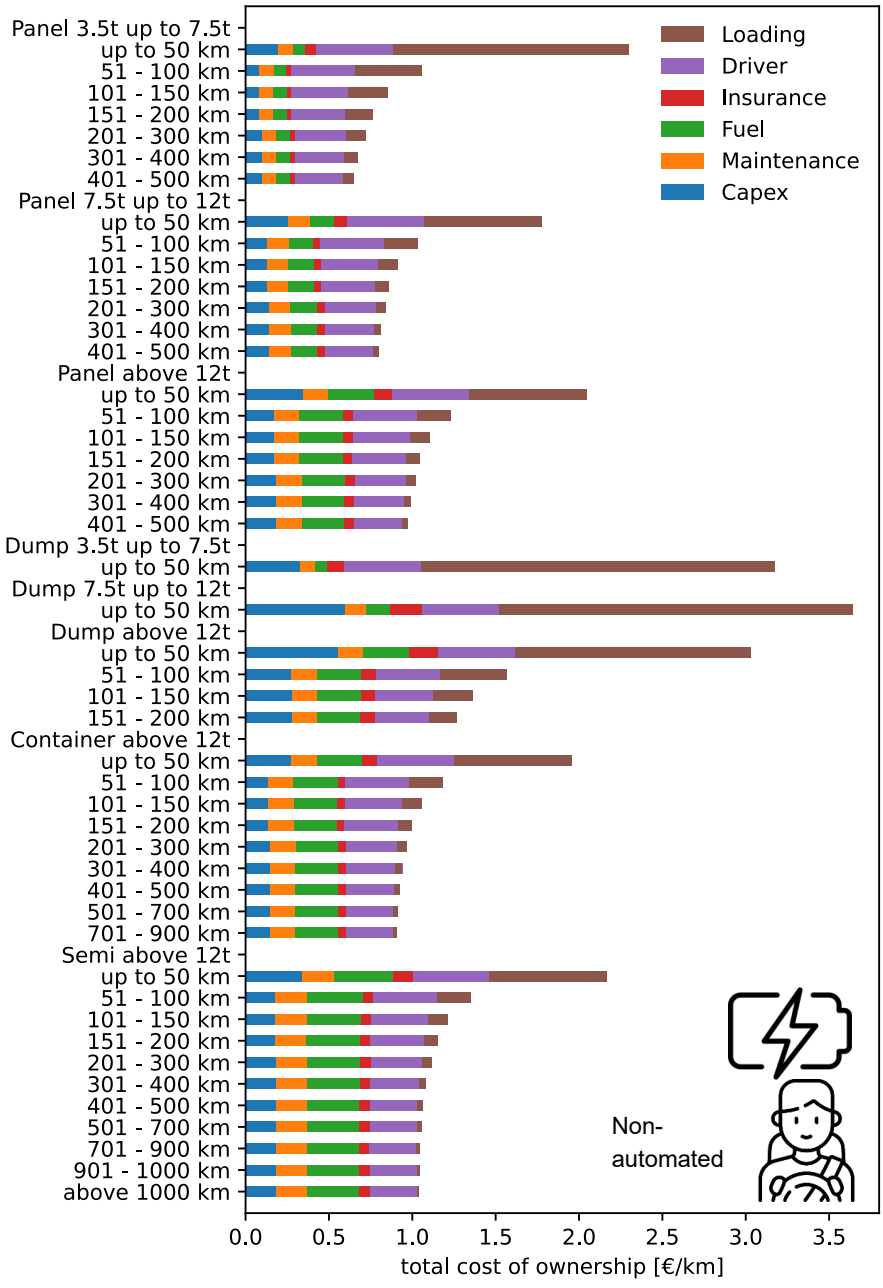
Für den Vergleich unterschiedlicher Fahrzeugtypen und -größen für dieselbe Distanzklasse ergibt sich folgendes Bild:

Die Wartungs- und Treibstoffkosten sind für kleinere Fahrzeuge geringer als für größere Fahrzeuge. Die Wartungskosten werden für kleinere Fahrzeuge geringer angenommen, da sie weniger Komponenten besitzen. Weiterhin ist der Gesamtenergiebedarf für größere Fahrzeuge höher als für kleinere Fahrzeuge, wodurch die Treibstoffkosten zunehmen.

Für die Anschaffungskosten zeigt sich keine klare Relation. Die absoluten Anschaffungskosten sind für kleinere Fahrzeuge geringer, allerdings hängen die Anschaffungskosten pro Kilometer von der Jahresfahrleistung der Fahrzeuge ab. Für den Kipper mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 7,5 t und 12 t sind die Anschaffungskosten pro Kilometer daher größer als für den Kipper mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t. Für alle anderen Einsatzprofile sind die Anschaffungskosten pro Kilometer für die größeren Fahrzeuge höher als für die kleineren Fahrzeuge.

Fahrerkosten sind für alle Einsatzprofile der gleichen Distanzklasse identisch. Dies liegt daran, dass für alle Fahrzeuge die gleichen Fahrtanteile im Autobahnverkehr sowie den ländlichen und städtischen Verkehr angenommen werden. Dadurch ist die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge gleich. Da der Stundenlohn der Fahrer für alle Fahrzeuge gleich angenommen wird, sind die Fahrerkosten insgesamt identisch.

Die Kosten für die Wartezeiten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge fallen für kleinere Fahrzeuge höher aus als für größere Fahrzeuge. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für kleinere Fahrzeuge längere Be- und Entladezeiten angenommen werden als für größere Fahrzeuge. Die Be- und Entladung kleinerer Fahrzeuge erfolgt häufig händisch oder mit beschränkten Hilfsmitteln, während zur Be- und Entladung großer Fahrzeuge größere Maschinen und Hilfsmittel verwendet werden. Daher wird für die Be- und Entladung kleinerer Fahrzeuge mehr Zeit benötigt.



Energy icons created by Pixel perfect; File device driver icons created by Freepik from www.flaticon.com

Abbildung 4-1 Betriebskosten batterieelektrischer Fahrzeuge aller untersuchten Einsatzprofile für das Jahr 2023.

Für den Vergleich unterschiedlicher Distanzklassen für eine feste Kombination aus Fahrzeugtyp und -größe ergibt sich folgendes Bild:

Der größte Unterschied in den Betriebskosten zeigt sich jeweils zwischen den Einsatzprofilen mit Einzelfahrtweiten von bis zu 50 km und Einsatzprofilen mit Einzelfahrtweiten im Bereich von 51 bis 100 km.

Der Unterschied ist zu großen Teilen auf die Unterschiede in den Kosten für die Wartezeiten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge zurückzuführen. Für kurze Fahrtdistanzen fallen diese deutlich höher aus, da Be- und Entladungen häufiger stattfinden.

Ein weiterer Faktor für den Kostenunterschied sind die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer, die für die Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km höher ausfallen. Dies liegt daran, dass die Jahresfahrleistungen für die Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km geringer angenommen werden als für die übrigen Einsatzprofile.

Zwischen den Einsatzprofilen mit Einzelfahrtweiten im Bereich von 51 bis 100 km und den Einsatzprofilen der Distanzklassen mit größeren Einzelfahrtweiten ist kein deutlicher Unterschied in den Betriebskosten festzustellen.

Die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer bleiben nahezu unverändert, da für alle Einsatzprofile einer Kombination aus Fahrzeugtyp und -größe mit Einzelfahrtweiten über 50 km dieselbe Jahresfahrleistung angenommen wird. Ab einer Einzelfahrtweit von mehr als 200 km sind die Anschaffungskosten jedoch leicht erhöht, da angenommen wird, dass ab dieser Fahrtweiten eine Schlafkabine verbaut wird.

Die Kosten für die Wartezeiten während der Be- und Entladung nehmen sichtbar ab. Be- und Entladungen finden mit steigenden Einzelfahrtweiten seltener statt. Dadurch nehmen die Kosten pro Fahrtkilometer ab.

Fahrerkosten und Treibstoffkosten nehmen beide leicht ab. Für längere Fahrtdistanzen nimmt der Autobahnanteil der Fahrten zu. Der Gesamtenergiebedarf von Lastkraftwagen ist im Autobahnverkehr geringer als im städtischen oder ländlichen Verkehr, daher nehmen die Treibstoffkosten ab. Weiterhin ist die Durchschnittsgeschwindigkeit im Autobahnverkehr höher als im städtischen oder ländlichen Verkehr und es wird in der gleichen Zeit eine größere Strecke zurückgelegt. Da die Fahrerkosten in dieser Arbeit über einen festen Stundenlohn berechnet werden, nehmen die Fahrerkosten pro Fahrtkilometer folglich ab.

Nachfolgenden wird die Zusammensetzung der Gesamtbetriebskosten für zwei Einsatzprofile detailliert diskutiert. Die Betriebskosten der Einsatzprofile sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1 Vergleich der Betriebskosten zweier Einsatzprofile nicht-automatisierter Lastkraftwagen aufgeteilt nach Kostenaspekten für das Jahr 2023.

Kostenaspekt [€/km]	Batterieelektrischer Kastenwagen unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km	Batterieelektrische Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten von 201–300 km
Anschaffung	0,20 (22,7%)	0,17 (16,0%)
Wartung	0,09 (10,2%)	0,19 (17,9%)
Treibstoff	0,07 (8,0%)	0,32 (30,2%)
Versicherung	0,06 (6,8%)	0,06 (5,7%)
Fahrer	0,46 (52,3%)	0,32 (30,2%)
Gesamt	0,88 (100%)	1,06 (100%)
Zusatzkosten Be- und Entladung	1,41 (160,2%)	0,06 (5,7%)

Das erste Einsatzprofil stellt ein batterieelektrischer Kastenwagen unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km und einer Jahresfahrleistung von 25.000 km dar.

Für das Jahr 2023 betragen die Gesamtbetriebskosten ohne Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs 0,88 €/km. Mehr als die Hälfte dieser Kosten machen dabei die Fahrerkosten mit 0,46 €/km aus. Den zweitgrößten Anteil haben die Anschaffungskosten mit 0,20 €/km, gefolgt von den Wartungskosten mit 0,09 €/km. Treibstoffkosten haben mit 0,07 €/km den zweitgeringsten Anteil und Versicherungskosten mit 0,06 €/km den geringsten Anteil.

Die Gesamtbetriebskosten sind mehr als doppelt so hoch, wenn die Lohnkosten für den Fahrer während der Be- und Entladung des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Die Lohnkosten für den Fahrer für die Wartezeit während der Be- und Entladung des Fahrzeugs sind größer als die Summe aller anderen Kostenanteile. Es werden Be- und Entladungszeiten des Fahrzeugs von jeweils 2 Stunden pro Fahrt angenommen. Dadurch ergeben sich Kosten von 1,41 €/km.

Das zweite Einsatzprofil stellt eine batterieelektrische Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km und einer Jahresfahrleistung von 120.000 km dar.

Ohne Berücksichtigung der Lohnkosten für den Fahrer während der Be- und Entladung des Fahrzeugs betragen die Gesamtbetriebskosten 1,06 €/km im Jahr 2023. Treibstoffkosten und Fahrerkosten haben dabei jeweils einen Anteil von 30% mit 0,32 €/km. Darauf folgen Wartungskosten mit 0,19 €/km und Anschaffungskosten mit 0,17 €/km. Den geringsten Anteil haben schließlich Versicherungskosten mit 0,04 €/km.

Die Berücksichtigung der Lohnkosten für den Fahrer während der Be- und Entladung des Fahrzeugs hat kaum Auswirkungen auf die Gesamtbetriebskosten. Es werden Be- und Entladungszeiten des Fahrzeugs von jeweils 1 Stunde pro Fahrt angenommen. Dies führt zu zusätzlichen Kosten von 0,06 €/km. Diese Kosten sind gering im Vergleich zu den sonstigen Betriebskosten.

Die Unterschiede zwischen den beiden Einsatzprofilen werden im Folgenden herausgestellt und begründet. Die Unterschiede zwischen den Einsatzprofilen wurden zuvor bereits qualitativ für alle untersuchten Einsatzprofile diskutiert. An dieser Stelle stehen deshalb insbesondere die quantitativen Unterschiede im Vordergrund.

Obwohl die absoluten Anschaffungskosten für die Sattelzugmaschine viereinhalbmal so groß sind wie die des Kastenwagens, sind die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer für die Sattelzugmaschine geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sattelzugmaschine über ihre Lebensdauer eine mehr als fünfmal größere Gesamtfahrleistung aufweist. Die Versicherungskosten entsprechen jährlich einem Anteil von 3,2% der Anschaffungskosten und verhalten sich daher analog zu diesen.

Die Wartungskosten werden insgesamt für die Sattelzugmaschine mehr als doppelt so hoch angenommen wie für den Kastenwagen. Wie zuvor beschrieben, werden die Wartungskosten abhängig von der Fahrzeuggröße und dem Antriebsstrang als feste Absolutbeträge pro Fahrtkilometer angenommen. Größere Fahrzeuge mit mehr Komponenten haben größere Wartungsanforderungen.

Die größere Masse der Sattelzugmaschine führt weiterhin zu einem fast fünfmal größeren Gesamtenergiebedarf verglichen mit dem Kastenwagen, was zu entsprechenden Unterschieden in den Treibstoffkosten führt.

Die Fahrerkosten pro Kilometer sind für den Kastenwagen um 44% höher als für die Sattelzugmaschine. Dies ist durch unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge in ihren jeweiligen Einsatzprofilen zu begründen. Der Kastenwagen hat ein Einsatzprofil mit einer durchschnittlichen Einzelfahrtweite von 20 km und einem durchschnittlichen Autobahnanteil von 15%. Der Kastenwagen ist dementsprechend viel im Land- und Stadtverkehr unterwegs und hat eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 43 km/h. Die Sattelzugmaschine besitzt in ihrem Einsatzprofil hingegen eine durchschnittliche Fahrtweiten von 240 km und einen durchschnittlichen Autobahnanteil von 85%. Sie hat dadurch eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 65 km/h.

Zuletzt sind die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für den Kastenwagen fast 24-mal größer als für die Sattelzugmaschine. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine eine zwölfmal größere durchschnittliche Fahrtweite aufweist. Be- und Entladungen finden dementsprechend seltener statt. Zusätzlich wird die Be- und Entladungsdauer für die Sattelzugmaschine nur halb so lang angenommen wie für den Kastenwagen.

Der Vergleich der Betriebskosten in diesem Unterabschnitt hat gezeigt, dass die Kosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge die größte Variabilität in Abhängigkeit des Einsatzszenarios aufweisen. Für Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km haben sie einen erheblichen Anteil an den Gesamtbetriebskosten. Für Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten über 50 km ist der Anteil jedoch deutlich geringer und nimmt mit steigender Fahrtweite ab.

Für die Fahrerkosten, Treibstoffkosten und Anschaffungskosten lassen sich ebenfalls klare Abhängigkeiten von den Einsatzprofilen feststellen und diese Abhängigkeiten begründen. Hohe Jahresfahrleistungen reduzieren die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer. Der Gesamtenergiebedarf und somit die Treibstoffkosten steigen stark mit der Fahrzeugmasse. Die Fahrerkosten können durch lange Fahrtweiten und damit verbundenen höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten reduziert werden.

Dieses Grundwissen zu den Einflussfaktoren der Betriebskostenzusammensetzung wird insbesondere relevant, wenn im nächsten Unterabschnitt 4.1.2 die Änderungen der Betriebskosten durch das Stufe 4 automatisierte Fahren diskutiert werden.

Bevor im nächsten Unterabschnitt 4.1.2 die Änderungen der Betriebskosten durch die Automatisierung diskutiert werden, findet zum Abschluss dieses Unterabschnitts noch eine Validierung der Betriebskosten anhand von Literaturwerten statt.

Validierung der Betriebskosten

Zur Einordnung der in dieser Arbeit ermittelten Betriebskosten dient die Analyse von Burnham et al. [94]. Die Autoren haben in ihrer Studie die Betriebskosten von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssträngen für verschiedene Fahrzeuggrößen und Einsatzbereiche bestimmt.

Die Gesamtbetriebskosten der beiden detailliert vorgestellten Betriebsstrategien dieser Arbeit werden mit zwei ausgewählten Einsatzprofilen aus der Analyse von Burnham et al. [94] verglichen. Für den Vergleich mit dem batterieelektrischen Kastenwagen unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km dient das Einsatzprofil eines batterieelektrischen Class 4 Trucks im Lieferverkehr[84]. Für den Vergleich mit der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km wird das Einsatzprofil eines batterieelektrischen Class 8 Trucks im Fernverkehr[85] genutzt. Der Vergleich der Betriebskosten ist in Abbildung 4-2 dargestellt. In der Studie von Burnham et al. [94] werden die Kosten in USD/Meile angegeben, um diese Werte in €/km umzurechnen, werden 1,609 km/Meile und 1,07 USD/€ als Umrechnungsfaktoren angenommen.

Die Betriebskosten für den Class 4 Truck im Lieferverkehr sind insgesamt um 19% höher als die Betriebskosten des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Der Hauptunterschied stammt dabei aus Unterschieden in den Fahrerkosten. Die Fahrerkosten für den Class 4 Truck sind um 0,27 €/km höher als die Fahrerkosten des Kastenwagens inklusive der Lohnkosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs. Das entspricht 61% des Gesamtunterschieds von 0,44 €/km.

Die relative Abweichung der Fahrerkosten liegt mit 14% allerdings unterhalb der mittleren Abweichung. Die Fahrerkosten haben nur einen so großen Anteil am Gesamtunterschied, weil sie knapp 80% der Gesamtbetriebskosten ausmachen. Die Wartungskosten werden für den Class 4 Truck um 22% und die Versicherungskosten sogar um 83% höher angenommen als für den Kastenwagen. Dies hat jedoch keine großen Auswirkungen auf die Gesamtbetriebskosten, da ihre jeweiligen Anteile an den Gesamtbetriebskosten gering sind. Darüber hinaus werden für den Class 4 Truck Fahrzeugsteuern und Finanzierungskosten von 0,09 €/km und 0,03 €/km angenommen, welche in den Analysen dieser Arbeit nicht berücksichtigt sind.

Die Betriebskosten für den Class 8 Truck im Fernverkehr sind insgesamt um 12% höher als die Betriebskosten der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km. Es zeigen sich diesmal jedoch zusätzlich zu den Unterschieden bei den Fahrerkosten größere absolute Unterschiede bei den Anschaffungskosten, Wartungskosten und Treibstoffkosten.

[84] Bezeichnung in der Analyse von Burnham et al.: Class 4 delivery truck, electric BEV150

[85] Bezeichnung in der Analyse von Burnham et al.: Class 8 sleeper cab tractor, electric BEV500

Die Abweichungen gehen in beide Richtungen und heben sich dadurch teilweise gegenseitig auf. Die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer werden von Burnham et al. um 47% höher angenommen als in dieser Arbeit. Wartungs- und Treibstoffkosten im Gegensatz dazu um 58% und 41% geringer. Der Unterschied in den Treibstoffkosten ist dabei im Wesentlichen auf geringere Stromkosten zurückzuführen. Burnham et al. [94] nehmen 0,116 €/kWh an, während in dieser Arbeit 0,219 €/kWh angenommen werden.

Nach der Diskussion der Unterschiede kann festgehalten werden, dass die Betriebskosten der Einsatzprofile in dieser Arbeit tendenziell mit denen von Burnham et al. [94] übereinstimmen. Die Höhe der Betriebskosten ist ähnlich und auch die jeweiligen Differenzen zwischen den Einsatzprofilen sind vergleichbar.

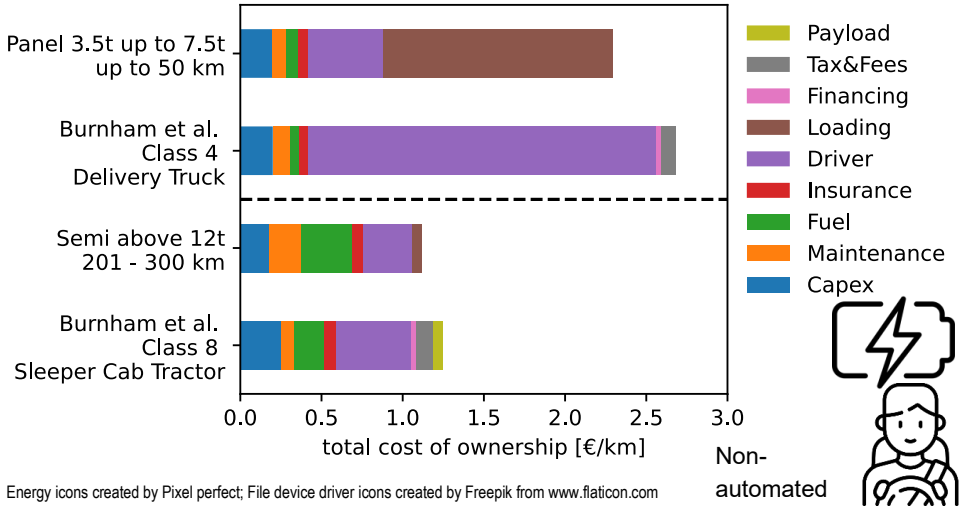


Abbildung 4-2 Vergleich der Betriebskosten zweier Einsatzprofile batterieelektrischer Fahrzeuge dieser Arbeit für das Jahr 2023 mit Literaturwerten aufgeteilt nach Kostenaspekten. Die Vergleichswerte stammen aus der Studie von Burnham et al. [94] für das Jahr 2025. Die ursprünglichen Werte sind in USD/Meile angegeben und wurden mit Faktoren von 1,609 km/Meile und 1,07 USD/€ in €/km umgerechnet.

Da die Fahrerkosten für die Änderungen der Betriebskosten durch das automatisierte Fahren in dieser Arbeit maßgeblich sind, werden sie im Folgenden noch einmal gesondert validiert. Dabei stehen nicht die exakten Werte im Fokus, sondern die verwendete Methodik.

Für die Validierung wird erneut die Studie von Burnham et al. [94] genutzt. Zusätzlich wird jedoch auch die Analyse von Bray und Cebon [125] genutzt.

Burnham et al. [94] verwenden zwei verschiedene Ansätze für die Bestimmung der Fahrerkosten der Einsatzprofile. Für den Fernverkehr verwenden sie eine feste Rate von 0,46 €/km. Für Kurzstrecken berechnen sie die Kosten von 2,14 €/km Top-Down basierend dem Jahreslohn des Fahrers von 56.000 € und der Jahresfahrleistung des Fahrzeugs von 25.800 km.

Für die feste Rate von 0,46 €/km im Fernverkehr geben Burnham et al. [94] keine Begründung oder Quelle an. In einer Erhebung der realisierten Betriebskosten von Sattelzugmaschinen

des American Transportation Research Institute [95] ergeben sich für das Jahr 2021 jedoch ähnliche durchschnittliche Kosten von 0,47 €/km für die Lohnkosten inklusive Sozialleistungen für Fahrer.

Für die Top-Down Berechnung der Kosten für Kurzstrecken wählen Burnham et al. [94] die Jahresfahrleistung basierend auf statistischen Daten zur Fahrzeugnutzung. Den Jahreslohn berechnen sie aus einem angenommenen Stundenlohn von 28 € und einer angenommenen Gesamtarbeitszeit von 2000 Stunden pro Jahr. Bei der Berechnung des Jahreslohns handelt es sich um eine simple Abschätzung, wodurch der gesamte Ansatz ein Top-Down Ansatz bleibt.

Die Annahme fester Lohnkosten pro Fahrtkilometer und der Top-Down Ansatz mit einer festen Jahresfahrleistung und einem festen Jahreslohn ist für die Modellierung der Betriebskosten konventioneller nicht-automatisierter Fahrzeuge praktikabel. Für solche Ansätze sind keine Annahmen über die einzelnen Tätigkeiten des Fahrers notwendig. Die Lohnkosten können einfach über vorhandene statistische Daten bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Fahrerkosten im Rahmen dieser Arbeit ist ein solcher Ansatz allerdings nicht geeignet. Für das automatisierte Fahren müssen Änderungen in den Fahrerkosten modelliert werden können. Die Änderungen wirken sich dabei unterschiedlich aus, je nachdem, wie sich die Fahrerkosten aus den verschiedenen Aufgaben des Fahrers zusammensetzen. Die Lohnkosten müssen daher Bottom-Up bestimmt werden.

Die Werte von Burnham et al. [94] lassen sich jedoch als Referenzwerte für bestimmte Einsatzprofile dieser Arbeit nutzen. Durch den Vergleich kann geprüft werden, ob die Bottom-Up Modellierung in dieser Arbeite Werte in der richtigen Größenordnung liefert. Für den Vergleich ist allerdings wichtig zu beachten, dass in dieser Arbeit der deutsche Straßengüterverkehr betrachtet wird und sich Lohnkosten in Deutschland und den USA unterscheiden.

Aus dem vorherigen Vergleich der ausgewählten Einsatzprofile dieser Arbeit und der Studie von Burnham et al. [94] ist ersichtlich, dass die Annahmen der Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge richtig angesetzt sind. Für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km haben die Lohnkosten während der Be- und Entladung einen Anteil von 62% an den Gesamtbetriebskosten. Zusammen mit den Lohnkosten für die Fahrt ergibt sich ein Anteil von 82%. Dieser ist vergleichbar zu dem Anteil von 78%, der sich in der Studie von Burnham et al. für den Class 4 Truck im Lieferverkehr ergibt. Für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km haben die Lohnkosten während der Fahrt und während der Be- und Entladung zusammen einen Anteil von 34% Dieser ist ebenfalls vergleichbar zu dem Anteil von 37%, der sich in der Studie von Burnham et al. für den Class 8 Truck im Fernverkehr ergibt.

Bray und Cebon [125] berechnen die Lohnkosten für den Fahrer Bottom-Up. Für verschiedene Fahrzyklen berechnen sie die Lohnkosten aus einem angenommenen Stundenlohn von 18,02 €[86] und der Durchschnittsgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzyklus.

Der Ansatz von Bray und Cebon [125] berücksichtigt dabei nur die reine Fahrzeit des Fahrzeugs im Autobahnverkehr. Die Autoren analysieren den Einfluss unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten auf den Energiebedarf und die Betriebskosten im Autobahnverkehr.

[86] Umgerechnet mit einem Faktor von 1,17 €/£

Weitere Aufgaben des Fahrers und Fahrten abseits der Autobahn werden in den Kosten nicht berücksichtig.

In dieser Arbeit ergeben sich für eine reine Autobahnfahrt allerdings deutlich höhere Lohnkosten pro Kilometer als in der Analyse von Bray und Cebon [125]. Bray und Cebon erhalten Lohnkosten von 0,21 €/km. In dieser Arbeit liegen die Lohnkosten für eine reine Autobahnfahrt bei 0,28 €/km.

Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass Bray und Cebon [125] eine deutlich höhere Durchschnittsgeschwindigkeit annehmen. Bray und Cebon betrachten vereinfachte Start-Stopp Fahrzyklen. Für den Basisfall nehmen sie eine Durchschnittgeschwindigkeit von 90 km/h an. In dieser Arbeit wird die Durchschnittsgeschwindigkeit der reinen Autobahnfahrt eines Lastkraftwagens mit 70 km/h angenommen. Diesen Wert nehmen Bray und Cebon im Geschwindigkeitsreduzierten Fall an. Für diesen Fall ergeben sich die Lohnkosten von Bray und Cebon zu 0,26€/km. Sie liegen damit weiterhin etwas unterhalb der Lohnkosten dieser Arbeit. Dies ist auf die unterschiedlich angenommenen Stundenlöhne von 18,02 € in der Studie von Bray und Cebon [125] und 19,94 € in dieser Arbeit zurückzuführen. Die Abweichung der Stundenlöhne liegt bei ungefähr 10%. Für den Vergleich der Annahmen sind erneut nationale Unterschiede zu berücksichtigen. Es kann nicht erwartet werden, dass die Annahmen genau übereinstimmen.

Zusammenfassend lässt sich aus dem Vergleich mit den Literaturwerten für die Berechnung der Lohnkosten in dieser Arbeit festhalten, dass der gewählte Ansatz die Lohnkosten verschiedener Einsatzprofile realistisch abbildet. Die Lohnkosten während der Fahrt über die Durchschnittsgeschwindigkeit abzubilden, bietet die Möglichkeit verschiedene Einsatzbereiche abzudecken. Die Annahmen zur Durchschnittsgeschwindigkeit für die verschiedenen Einsatzbereiche haben dabei einen großen Einfluss auf die berechneten Lohnkosten. Die Berücksichtigung von Be- und Entladezeiten ist insbesondere für den Kurzstreckenbetrieb notwendig, um die Fahrerkosten adäquat abzubilden. Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge machen für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km einen Großteil der Gesamtbetriebskosten aus.

Das verwendete Kostenmodell bildet somit eine solide Grundlage zur Untersuchung der Betriebskosten automatisierter Fahrzeuge. Im nächsten Unterabschnitt 4.1.2 folgt eine Diskussion der Betriebskostenänderungen für automatisierte Fahrzeuge.

4.1.2 Betriebskostenänderungen für automatisierte Fahrzeuge

In diesem Unterabschnitt werden die Änderungen in den Gesamtbetriebskosten durch das automatisierte Fahren erläutert. Dazu werden weiterhin die beiden detailliert diskutierten Einsatzprofile des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km und der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km aus dem vorherigen Unterabschnitt 4.1.1 verwendet.

Die Einzelfahrtweite ist in den folgenden Betrachtungen maßgeblich für die Veränderungen der Betriebskosten für Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge. Für Stufe 4 automatisierte Lastkraftwagen wird angenommen, dass diese auf Autobahnen automatisiert ohne menschlichen Fahrer fahren können, jedoch abseits der Autobahn auf einen menschlichen Fahrer angewiesen sind. Während der Fahrt auf der Autobahn können somit Fahrerkosten

eingespart werden. Der Autobahnanteil der Fahrt ist dabei, wie in Unterabschnitt 3.1.4 diskutiert, von der Fahrtweite abhängig. Die angenommenen Autobahnanteile für die verschiedenen Distanzklassen sind in Tabelle 3-4 auf Seite 76 dargestellt.

Es wird die Betriebskostenentwicklung im Zeitraum von 2023 bis 2050 untersucht, um herauszufinden, ab wann die Kosten des automatisierten Betriebs die des nicht-automatisierten Betriebs unterschreiten und eine Investmententscheidung in automatisierte Fahrzeuge demenentsprechend sinnvoll wäre.

Für die Betrachtung wird davon ausgegangen, dass ab 2035 ein vollständig automatisierter Stufe 5 Betrieb möglich ist. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass Fahrzeuge, die vor 2035 im Stufe 4 Betrieb genutzt werden, ab 2035 ohne weitere Kosten für einen Stufe 5 Betrieb umgerüstet werden können. Die Betriebskosten eines Fahrzeugs, das im Jahr 2028 gekauft wird und eine Nutzungsdauer von zehn Jahren hat, setzt sich beispielsweise aus sieben Jahren im Stufe 4 Betrieb und drei Jahren im Stufe 5 Betrieb zusammen.

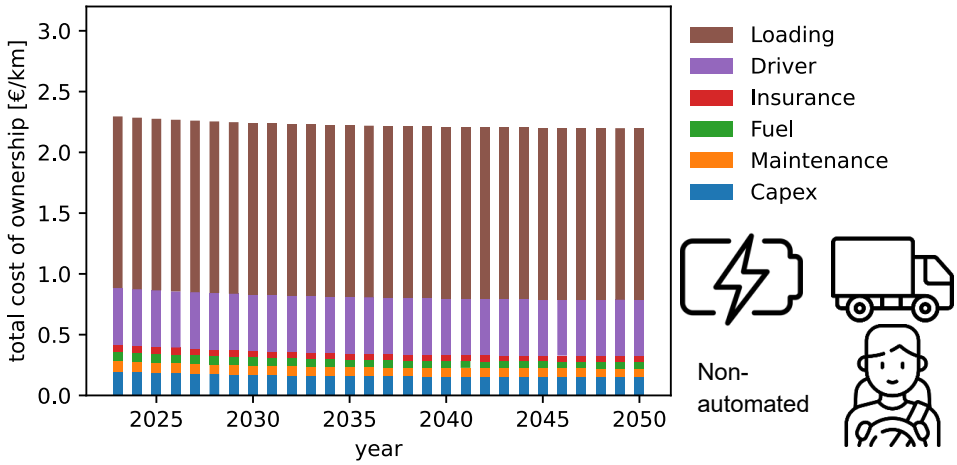
Die Betriebskosten des automatisierten Betriebs werden im Folgenden vorgestellt. Dabei werden zuerst die Betriebskosten für das Einsatzprofil des Kastenwagens und anschließend die Betriebskosten für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine diskutiert. Die Diskussion erfolgt jeweils entlang der verschiedenen Stufe 4 Betriebsstrategien. Abschließend werden für alle Betriebsstrategien und Einsatzprofile die Zeitpunkte ermittelt, ab denen ein automatisierter Betrieb kostengünstiger ist als ein nicht-automatisierter Betrieb.

Betriebskosten für den Kastenwagen im automatisierten Betrieb

Bevor die Änderungen der Betriebskosten durch die Automatisierung betrachtet werden können, ist eine Betrachtung der Kostenentwicklung für den nicht-automatisierten Fall notwendig. Die Kostenentwicklung im nicht-automatisierten Fall ist grundlegend für die Kostenentwicklung im automatisierten Fall. Die Entwicklung der Betriebskosten des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km für den Zeitraum von 2023 bis 2050 ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

Die Gesamtbetriebskosten nehmen von 2,29 €/km im Jahr 2023 auf 2,20 €/km im Jahr 2050 ab. Dies ist auf die Abnahme der Anschaffungs-, Wartungs- und Treibstoffkosten für batterieelektrische Fahrzeuge zurückzuführen, die in der Berechnung angenommen werden. Die Annahmen zu den Kostenentwicklungen stammen aus dem Grundmodell ETHOS.Veh|Cost [103, 136]. Die Fahrerkosten sowie die Kosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs bleiben über den gesamten Zeitraum unverändert.

Die relative Abnahme der Betriebskosten ist gering, da die Lohnkosten den größten Anteil an den Gesamtbetriebskosten ausmachen und diese unverändert bleiben. Werden weder die Lohnkosten für die Fahrt noch die Lohnkosten für die Be- und Entladung des Fahrzeugs berücksichtigt, ist die relative Kostenabnahme deutlich größer. Die Kosten nehmen in diesem Fall von 0,42 €/km im Jahr 2023 auf 0,33 €/km im Jahr 2050 ab, was einer Abnahme von 21% entspricht.



Truck icons created by Smashicons; Energy icons created by Pixel perfect; File device driver icons created by Freepik from www.flaticon.com

Abbildung 4-3 Betriebskosten eines batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km.

Im Folgenden werden nun die Kostenentwicklungen für den automatisierten Betrieb diskutiert. Die Diskussion erfolgt zuerst detailliert mit Bezug auf die einzelnen Kostenkomponenten für den Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug und Staffelfahrten. Abschließend werden für alle Stufe 4 Betriebsstrategien die Zeitpunkte ermittelt, ab denen der automatisierte Betrieb kostengünstiger sein wird als der nicht-automatisierte Betrieb.

Die Zusammensetzung der Betriebskosten für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Für das Jahr 2023 liegen die Kosten bei 2,85 €/km. Bis zum Jahr 2050 nehmen die Betriebskosten durch den Wegfall sämtlicher Fahrerkosten im vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb auf 0,31 €/km ab. Da der Wert für das Jahr 2050 dem Stufe 5 Betrieb entspricht, ist er unabhängig von der jeweiligen Stufe 4 Betriebsstrategie.

Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug haben im Jahr 2023 weiterhin die Lohnkosten für den Fahrer während der Be- und Entladung des Fahrzeugs den größten Anteil an den Gesamtbetriebskosten. Es wird für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug angenommen, dass der menschliche Fahrer während der Be- und Entladung des Fahrzeugs warten muss, bevor er den Lastkraftwagen zurück zum Übergabeort bringt. Die Kosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs sind dadurch unverändert zum nicht-automatisierten Fall.

Den zweitgrößten Anteil an den Lohnkosten haben im Jahr 2023 die Fahrerkosten mit 0.82 €/km. Im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall mit Fahrerkosten von 0,46 €/km sind die Fahrerkosten deutlich erhöht. Dies liegt daran, dass in den Fahrerkosten für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug die Fahrzeiten im Zubringerfahrzeug für die Lohnkosten berücksichtigt werden. Weiterhin werden die Kosten für den Betrieb des Zubringerfahrzeugs ebenfalls in die Fahrerkosten aufgenommen.

Die Anschaffungskosten des Fahrzeugs haben mit 0,35 €/km für das Jahr 2023 den drittgrößten Anteil. Durch die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem sind die Anschaffungskosten im Vergleich zum nicht-automatisierten Fahrzeug mit 0,20 €/km deutlich größer. Die Versicherungskosten steigen analog zu den Anschaffungskosten für das

automatisierte Fahrzeug im Vergleich zum nicht-automatisierten Fahrzeug von 0,06 €/km auf 0,11 €/km im Jahr 2023 an.

Die Treibstoff- und Wartungskosten sind unverändert im Vergleich zum nicht-automatisierten Fahrzeug.

Der Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist für das Einsatzprofil des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km nicht sinnvoll. Die Transferzeiten für den Fahrer, um zu dem Fahrzeug zu gelangen, sind größer als die automatisiert stattfindende Fahrzeit. Bei einer durchschnittlichen Fahrtweite von 20,4 km und einem Autobahnanteil von 15% finden nur 3 km automatisiert auf der Autobahn statt. Diese Strecke ist kürzer als die angenommenen Strecken, die der Fahrer im Zubringerfahrzeug zurücklegen muss, um das Fahrzeug zu erreichen. Dies spiegelt sich auch in den Betriebskosten wider. Die Betriebskosten für den Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug im Jahr 2023 sind mit 2,85 €/km deutlich höher als für den nicht-automatisierten Betrieb mit 2,29 €/km.

Nach dieser Darstellung der Unterschiede zum nicht-automatisierten Fall, wird im Folgenden die Entwicklung der Gesamtbetriebskosten für den Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug diskutiert.

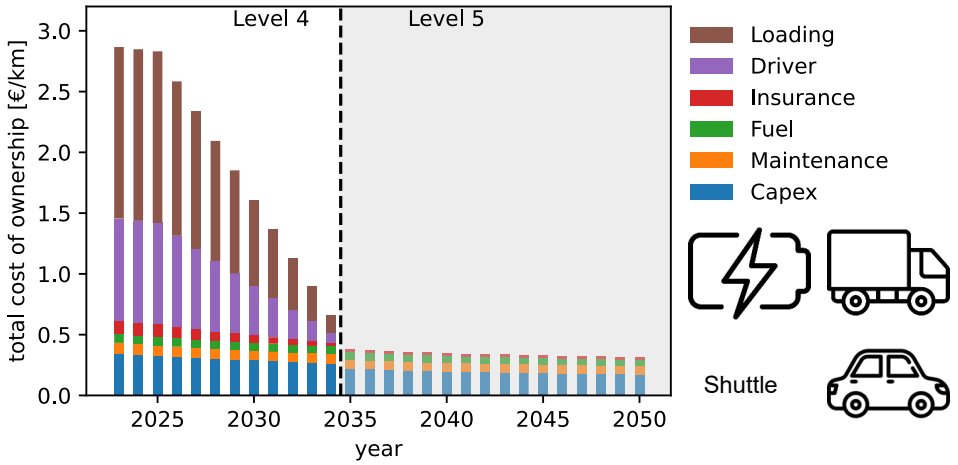
Die Betriebskosten sind für den Zeitraum von 2023 bis 2025 auf einem nahezu konstanten Niveau. Im Zeitraum von 2025 bis 2035 nehmen die Betriebskosten dann jedoch durch eine Abnahme der Fahrerkosten während der Fahrt sowie der Be- und Entladung des Fahrzeugs nahezu linear ab. Ab 2035 sind die Betriebskosten erneut bis zum Jahr 2050 auf einem nahezu konstanten Niveau.

Die lineare Abnahme der Betriebskosten im Zeitraum von 2025 bis 2035 entsteht durch den Übergang zum Stufe 5 Betrieb, der ab dem Jahr 2035 angenommen wird. Die Betriebskosten ab dem Jahr 2035 entsprechen den Betriebskosten für den Stufe 5 Betrieb und sind unabhängig von der jeweiligen Stufe 4 Betriebsstrategie.

Es wird angenommen, dass auch Fahrzeuge, die vor dem Jahr 2035 gekauft wurden, ab dem Jahr 2035 vollständig automatisiert fahren können. Dazu sind möglicherweise ein Softwareupdate und eine Nachrüstung des Sensorsystems notwendig. In der Analyse werden dafür jedoch keine Extrakosten angenommen.

Ein Fahrzeug, das vor 2035 gekauft wurde, dessen Haltedauer jedoch über das Jahr 2035 hinaus geht, wird in den Jahren vor 2035 im Stufe 4 Betrieb betrieben und ab dem Jahr 2035 im Stufe 5 Betrieb. Die Gesamtbetriebskosten sind für diesen Fall also eine lineare Zusammensetzung der Kosten für den Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb.

Für den Übergang von Stufe 4 und Stufe 5 nehmen die Anschaffungskosten des Fahrzeugs durch den Wegfall der Fahrerkabine noch einmal ab.



Truck icons created by Smashicons; Energy icons created by Pixel perfect; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 4-4 Betriebskosten eines Stufe 4 automatisierten batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km im Betrieb mit Zubringerfahrzeug.

Die Zusammensetzung der Gesamtbetriebskosten für den Betrieb mit Staffelfahrten ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Die Gesamtbetriebskosten liegen bei 1,06 €/km für das Jahr 2023. Bis zum Jahr 2050 nehmen die Betriebskosten durch den Wegfall sämtlicher Fahrerkosten im vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb wie zuvor auf 0,31 €/km ab. Da der Wert für das Jahr 2050 dem Stufe 5 Betrieb entspricht, ist er unabhängig von der jeweiligen Stufe 4 Betriebsstrategie.

Im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall fällt für den Betrieb mit Staffelfahrten der größte Kostenaspekt für das Jahr 2023 mit den Lohnkosten während der Be- und Entladung weg. Der Fahrer muss bei dieser Betriebsstrategie nicht warten, während das Fahrzeug be- und entladen wird, sondern kann zu einem anderen Fahrzeug wechseln.

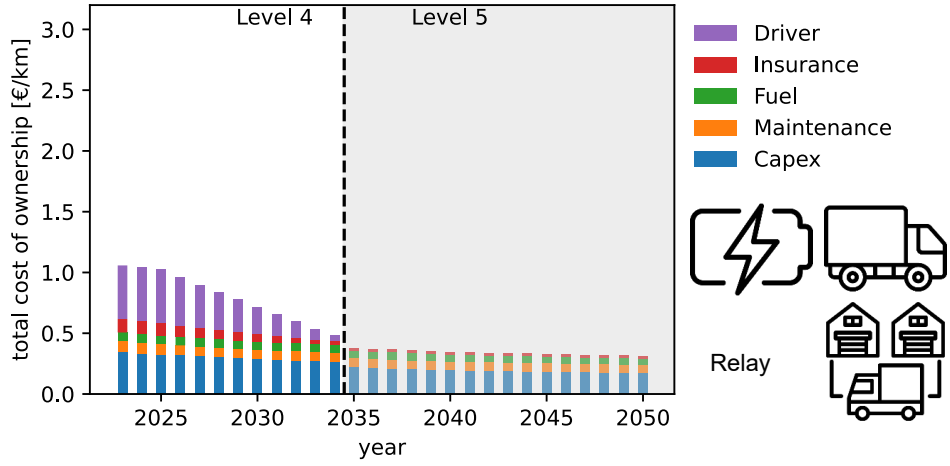
Weiterhin nehmen die Fahrerkosten für das Jahr 2023 im Vergleich zum nicht automatisierten Betrieb leicht ab. Die Fahrerkosten betragen 0,44 €/km statt 0,46 €/km. Die Abnahme ist dadurch zu begründen, dass 15% der Fahrtstrecke automatisiert stattfinden und die Fahrerkosten für diesen Teil der Fahrt wegfallen.

Die Anschaffungskosten des Fahrzeugs sind wie für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug durch die Kosten für das Automatisierungssystem höher als für den nicht-automatisierten Fall.

Der Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten ist für das Einsatzprofil des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km sinnvoll, sofern Lohnkosten während der Be- und Entladezeiten eingespart werden können. Die Lohnkosten während der Be- und Entladung haben mit 1,41 €/km einen erheblichen Anteil an den Gesamtbetriebskosten des nicht-automatisierten Falls von 2,29 €/km. Werden diese Kosten im Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten eingespart, kann dies die Gesamtbetriebskosten senken, obwohl nur 15% der Fahrtdistanz automatisiert gefahren werden. Die Betriebskosten für den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten im Jahr 2023 sind mit 1,06 €/km deutlich geringer als für den nicht-automatisierten Betrieb mit 2,29 €/km. Ein solcher Betrieb ist jedoch nur an Orten mit einem hohen Güterverkehrsaufkommen vorstellbar, an denen der Fahrer zu einem

anderen Fahrzeug wechseln kann, während das ursprüngliche Fahrzeug be- und entladen wird.

Die Kostenentwicklung für den Betrieb mit Staffelfahrten ist analog zu der Kostenentwicklung für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug. Die Betriebskosten sind für den Zeitraum von 2023 bis 2025 auf einem nahezu konstanten Niveau. Im Zeitraum von 2025 bis 2035 nehmen die Betriebskosten durch eine Abnahme der Fahrerkosten nahezu linear ab. Und ab 2035 sind die Betriebskosten erneut bis zum Jahr 2050 auf einem nahezu konstanten Niveau.



Truck icons created by Smashicons; Energy icons created by Pixel perfect; Distribution icons created by xnimrodx from www.flaticon.com

Abbildung 4-5 Betriebskosten eines Stufe 4 automatisierten batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km im Betrieb mit Staffelfahrten.

Die Betriebskosten für den Betrieb mit Teleoperation ergeben sich analog zu denen der Staffelfahrten. Daher wird auf eine explizite Darstellung der Kostenzusammensetzung für die Teleoperation verzichtet. Die Gesamtbetriebskosten liegen bei 1,10 €/km für das Jahr 2023.

Der einzige Unterschied zwischen dem Betrieb mit Teleoperation und Staffelfahrten besteht darin, dass die Fahrerkosten für den Betrieb mit Teleoperation um 10% höher ausfallen. Die höheren Fahrerkosten bilden die Kosten für den Betrieb eines Teleoperationszentrums ab. Die Erhöhung der Fahrerkosten um 10% führt dazu, dass die Fahrerkosten für das Jahr 2023 mit 0,48 €/km insgesamt oberhalb der Fahrerkosten für den nicht-automatisierten Betrieb mit 0,46 €/km liegen.

Der Stufe 4 Betrieb mit Teleoperation ist für das Einsatzprofil des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km sinnvoll, weil Lohnkosten während der Be- und Entladezeiten eingespart werden können. Der Teleoperator kann zu einem anderen Fahrzeug wechseln, während das ursprüngliche Fahrzeug be- und entladen wird. Die Betriebskosten für den Stufe 4 Betrieb mit Teleoperation im Jahr 2023 sind mit 1,10 €/km deutlich geringer als für den nicht-automatisierten Betrieb mit 2,29 €/km.

Abschließend werden die Kostenentwicklungen aller Stufe 4 Betriebsstrategien mit der Entwicklung der Kosten für den nicht-automatisierten Betrieb verglichen und die Zeitpunkte ermittelt, ab denen der automatisierte Betrieb kostengünstiger sein wird als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Kostenentwicklungen des nicht-automatisierten Betriebs und aller Stufe 4 Betriebsstrategien für den batterieelektrischen Kastenwagen unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Fahrtweiten bis zu 50 km sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

Für den Vergleich werden zwei Varianten für die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien unterschieden. In der ersten Variante fallen die Lohnkosten während der Be- und Entladung für den vollständig automatisierten Betrieb und alle Stufe 4 Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug weg. In der zweiten Variante bleiben die Lohnkosten während der Be- und Entladung im automatisierten Betrieb erhalten.

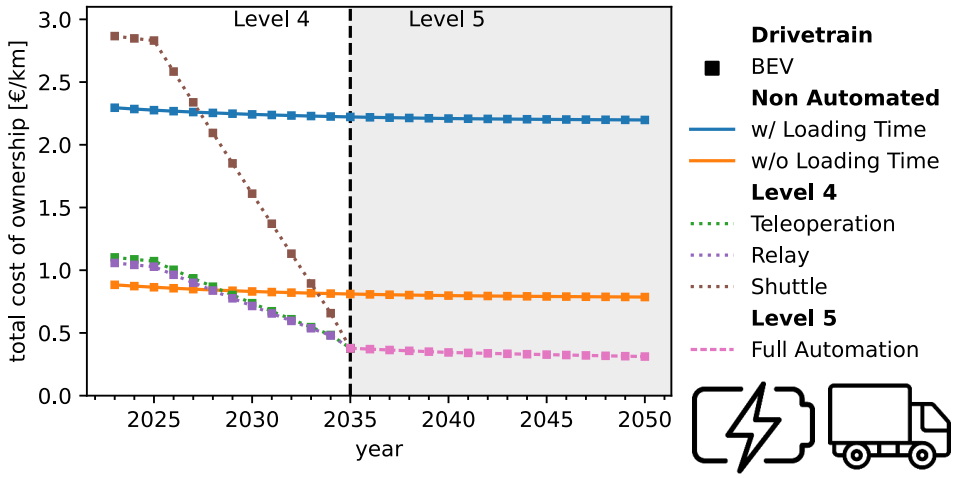
In der bisherigen Betrachtung werden die Lohnkosten während der Be- und Entladung für automatisierte Fahrzeuge, außer für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug, nicht berücksichtigt. Insbesondere für kurze Einzelfahrtweiten, bei denen Lohnkosten während der Be- und Entladung einen großen Anteil an den Gesamtbetriebskosten haben, stellen sie somit ein großes Einsparungspotential für den automatisierten Betrieb dar.

Für die zweite Variante müssen die Lohnkosten während der Be- und Entladung weiterhin für den automatisierten Betrieb berücksichtigt werden. In diesem Fall liegt das Einsparungspotential des automatisierten Betriebs ausschließlich in den Fahrerkosten während der Fahrt.

Für die Darstellung in Abbildung 4-6 findet die Unterscheidung der zwei Varianten für die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Übersicht halber nicht für den automatisierten Betrieb, sondern für den nicht-automatisierten Betrieb statt. Anstatt die Betriebskosten für den automatisierten Betrieb für die zweite Variante um die Lohnkosten während der Be- und Entladung zu erhöhen, ist der nicht-automatisierte Betrieb für die zweite Variante ohne Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung dargestellt.

Der Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug kann nur mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung verglichen werden, da der Betrieb mit Zubringerfahrzeug diese Kosten selbst enthält. Die Option, dass der Fahrer während der Be- und Entladung nicht warten muss, ist für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug nicht vorgesehen.

Für einen Vergleich ohne Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung muss erst ein zweiter Verlauf für den Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug erstellt werden. Die Lohnkosten während der Be- und Entladung müssen für den reinen Stufe 4 Betrieb vollständig und für den Übergang zum Stufe 5 Betrieb anteilig abgezogen werden. Dieser Verlauf ist in Abbildung 4-6 nicht eingezeichnet, um die Abbildung übersichtlich zu halten. Der Verlauf wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit erstellt und der Zeitpunkt bestimmt, ab dem der automatisierte Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte.



Truck icons created by Smashicons; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-6 Vergleich der Gesamtbetriebskosten der Betriebsstrategien eines batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km.

Für die erste Variante mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung für automatisierte Fahrzeuge sind der Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten und Teleoperation bereits ab dem Jahr 2023 günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Einsparungen in den Fahrerkosten während der Fahrt und während der Be- und Entladung sind groß genug, um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem zu übertreffen. Dadurch ist bereits der reine Stufe 4 Betrieb günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb.

Der Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist dagegen erst ab dem Jahr 2028 günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Die reinen Einsparungen der Fahrerkosten während der Fahrt sind nicht ausreichend, um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem auszugleichen. Erst der Übergang in den Stufe 5 Betrieb sorgt dafür, dass der Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb wird. Die Abnahme der Betriebskosten beim Übergang zum Stufe 5 Betrieb ist sehr stark, weil sowohl die Fahrerkosten während der Fahrt als auch die Lohnkosten während der Be- und Entladung sukzessive abnehmen.

Für die zweite Variante ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung für automatisierte Fahrzeuge ist keine Stufe 4 Betriebsstrategie im reinen Stufe 4 Betrieb günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Erst durch den Übergang zum Stufe 5 Betrieb werden die Stufe 4 Betriebsstrategien günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Der Betrieb mit Staffelfahrten ist ab dem Jahr 2028, der Betrieb mit Teleoperation ab dem Jahr 2029 und der Betrieb mit Zubringerfahrzeug ab dem Jahr 2031 günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb.

Der Mischbetrieb aus einem Stufe 4 Betrieb zu Beginn der Haltedauer des Fahrzeugs und einem Stufe 5 Betrieb am Ende der Haltedauer kann dafür sorgen, dass der automatisierte Betrieb eines Fahrzeugs insgesamt kosteneffektiv ist, obwohl der anfängliche Stufe 4 Betrieb es vielleicht noch nicht ist. Investitionen in automatisierte Fahrzeuge sind dadurch eher

möglich. Ein Fahrzeug kann bereits vor der Verfügbarkeit des Stufe 5 Betriebs angeschafft werden, sofern der Stufe 5 Betrieb ab einem gewissen Zeitpunkt in der Haltedauer möglich ist.

Die Kosteneffektivität des Mischbetriebs ist dabei von dem Zeitpunkt abhängig, ab dem ein Stufe 5 Betrieb möglich ist. In dieser Arbeit wird dieser Zeitpunkt mit dem Jahr 2035 angenommen. Sollte der Stufe 5 Betrieb erst zu einem späteren Zeitpunkt realisiert werden, verschiebt sich die Kosteneffektivität entsprechend. Eine Kosteneffektivität im Jahr 2028 in dieser Arbeit bedeutet, dass eine Kosteneffektivität sieben Jahre vor Verfügbarkeit des Stufe 5 Betriebs erreicht wird. Wird der Stufe 5 Betriebs erst ab 2040 realisiert, liegt der Zeitpunkt der Kosteneffektivität für das gewählte Beispiel somit erst im Jahr 2033.

Der Einsatz von Stufe 4 Fahrzeugen kann die Entwicklung von Stufe 5 Fahrzeugen vorantreiben. Stufe 4 Fahrzeuge können in ihrem Betrieb Daten sammeln, die für die Entwicklung der Automatisierungssoftware genutzt werden können. Wie in Unterabschnitt 2.2.1 diskutiert, spielt die große Zahl der möglichen Verkehrssituationen eine Herausforderung in der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge. Wenn mehr Stufe 4 Fahrzeuge eingesetzt werden, können diese in ihrem Betrieb mehr Daten über verschiedene Verkehrssituationen sammeln.

Für einen Mischbetrieb ist es notwendig, dass die Hersteller von Stufe 4 Fahrzeugen diese so konstruieren, dass sie ohne großen Aufwand für einen Stufe 5 Betrieb aufzurüsten sind. Es sollte geprüft werden, ob die verbauten Sensoren und das Computersystem modular für den Stufe 5 Betrieb nachgerüstet werden können. Der Stufe 5 Betrieb kann dann durch eine Aktualisierung der Automatisierungssoftware ermöglicht werden.

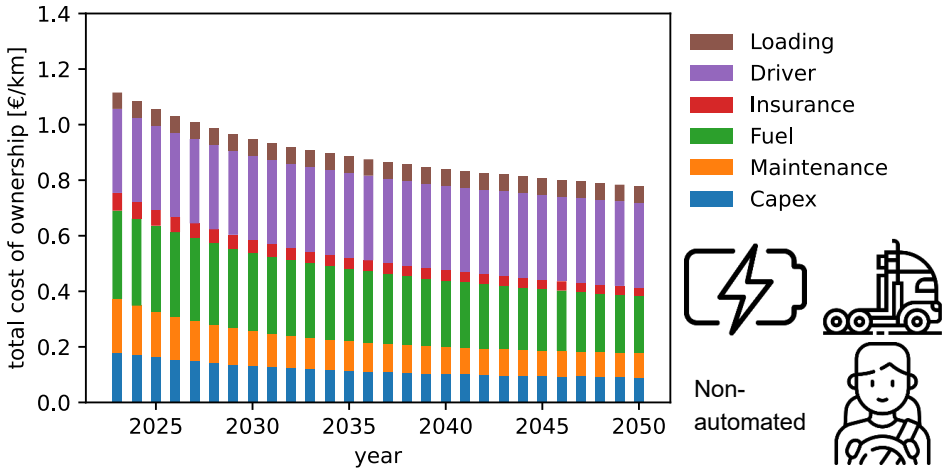
Betriebskosten für die Sattelzugmaschine im automatisierten Betrieb

Im Folgenden wird nun die Kostenentwicklung für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km vorgestellt. Dabei werden insbesondere die Unterschiede zum zuvor diskutierten Einsatzprofil des Kastenwagens herausgestellt.

Bevor die Änderungen der Betriebskosten durch die Automatisierung betrachtet werden, wird erneut eine Betrachtung der Kostenentwicklung für den nicht-automatisierten Fall durchgeführt. Die Kostenentwicklung im nicht-automatisierten Fall ist grundlegend für die Kostenentwicklung im automatisierten Fall. Die Entwicklung der Betriebskosten der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km für den Zeitraum von 2023 bis 2050 ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

Die Gesamtbetriebskosten nehmen von 1,12 €/km im Jahr 2023 auf 0,78 €/km im Jahr 2050 ab. Dies ist wie für den Kastenwagen auf die Abnahme der Anschaffungs-, Wartungs- und Treibstoffkosten für batterieelektrische Fahrzeuge zurückzuführen, die in der Berechnung angenommen werden. Die Annahmen zu den Kostenentwicklungen stammen aus dem Grundmodell ETHOS.Veh|Cost [103, 136]. Die Fahrerkosten sowie die Kosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs bleiben über den gesamten Zeitraum unverändert.

Die Abnahme der Betriebskosten ist deutlich größer als für den Kastenwagen. Die Sattelzugmaschine hat einen deutlich höheren Gesamtenergiebedarf als der Kastenwagen. Dadurch fallen die Treibstoffkosten ebenfalls höher aus und Einsparungen in den Treibstoffkosten führen folglich zu einer höheren Abnahme der Gesamtbetriebskosten.



Cargo truck icons created by Eucalyp; Energy icons created by Pixel perfect; File device driver icons created by Freepik from www.flaticon.com

Abbildung 4-7 Betriebskosten einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km.

Im Folgenden werden nun die Kostenentwicklungen für den automatisierten Betrieb diskutiert. Die Diskussion erfolgt zuerst detailliert mit Bezug auf die einzelnen Kostenkomponenten für den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten. Abschließend werden für alle Stufe 4 Betriebsstrategien die Zeitpunkte ermittelt, zu denen der automatisierte Betrieb kostengünstiger sein wird als der nicht-automatisierte Betrieb.

Die Zusammensetzung der Gesamtbetriebskosten für den Betrieb mit Staffelfahrten ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Die Gesamtbetriebskosten liegen bei 0,86 €/km für das Jahr 2023. Bis zum Jahr 2050 nehmen die Betriebskosten im vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb auf 0,39 €/km ab. Da der Wert für das Jahr 2050 dem Stufe 5 Betrieb entspricht, ist er unabhängig von der jeweiligen Stufe 4 Betriebsstrategie.

Für den Betrieb mit Staffelfahrten haben im Jahr 2023 die Treibstoffkosten mit 0,32 €/km den größten Anteil an den Gesamtbetriebskosten. Die Treibstoffkosten sind dabei unverändert zum nicht-automatisierten Fall.

Darauf folgen die Wartungs- und Anschaffungskosten mit jeweils 0,19 €/km für das Jahr 2023. Die Wartungskosten sind wie die Treibstoffkosten unverändert zum nicht-automatisierten Fall. Die Anschaffungskosten nehmen jedoch durch die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem von 0,17 €/km im nicht-automatisierten Fall auf 0,19 €/km zu. Die Anschaffungskosten steigen für die Sattelzugmaschine deutlich geringer an als für das zuvor diskutierte Einsatzprofil des Kastenwagens, weil die Sattelzugmaschine einen deutlich höheren Grundpreis hat als der Kastenwagen. Der Aufpreis für das Automatisierungssystem erhöht die Anschaffungskosten der Sattelzugmaschine um 12%, während es die Anschaffungskosten des Kastenwagens um 75% erhöht.

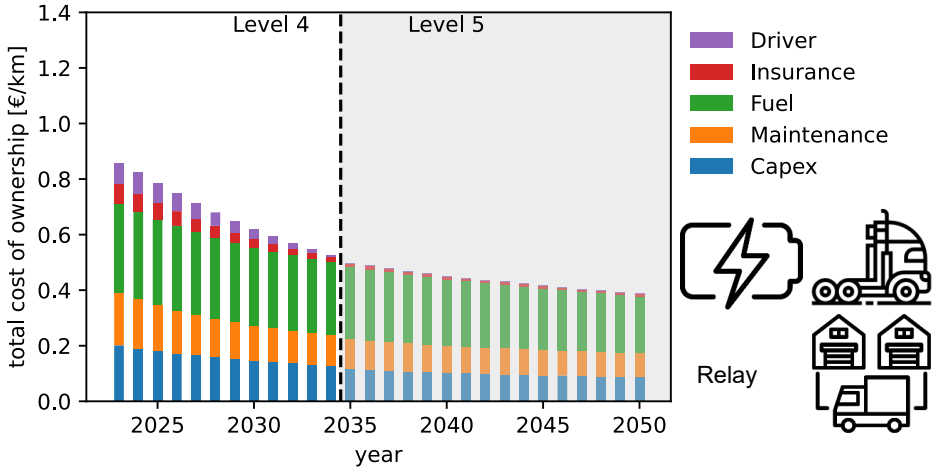
Die Fahrerkosten nehmen im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall stark ab. Für das Jahr 2023 liegen die Fahrerkosten bei 0,09 €/km im Vergleich zu 0,32 €/km für den nicht-

automatisierten Fall. Die Abnahme ist sehr groß, da 85% der Fahrtstrecke automatisiert stattfinden und die Fahrerkosten für diesen Teil der Fahrt wegfallen.

Kosten für die Wartezeiten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs sind für den automatisierten Betrieb nicht zu berücksichtigen.

Die Kostenentwicklung für den Zeitraum von 2023 bis 2050 beruht maßgeblich auf den Entwicklungen der Anschaffungs-, Wartungs- und Treibstoffkosten. Die Abnahme der Lohnkosten hat nur einen geringen Einfluss auf die Entwicklung der Gesamtbetriebskosten. Dies stellt einen Gegensatz zum zuvor diskutierten Einsatzprofil des Kastenwagens dar, für welches die Kostenentwicklung maßgeblich auf der Entwicklung der Fahrerkosten beruht.

Die Fahrerkosten nehmen weiterhin für den Übergang zum Stufe 5 Betrieb linear ab. Dieser Effekt fällt allerdings nicht so stark auf, weil im reinen Stufe 4 Betrieb bereits 85% der Fahrtstrecke automatisiert stattfinden und die Fahrerkosten für diesen Fahrtanteil wegfallen.



Cargo truck icons created by Eucalyp; Energy icons created by Pixel perfect; Distribution icons created by xnimrodx from www.flaticon.com

Abbildung 4-8 Betriebskosten einer Stufe 4 automatisierten batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km im Betrieb mit Staffelfahrten.

Die Betriebskosten der anderen Stufe 4 Betriebsstrategien ergeben sich größtenteils analog zu denen der Staffelfahrt. Daher werden die Kostenzusammensetzungen nicht noch einmal explizit dargestellt. Im Folgenden werden allerdings die Unterschiede kurz angesprochen.

Für den Betrieb mit Teleoperation fallen die Fahrerkosten 10% höher aus als für den Betrieb mit Staffelfahrten. Da 85% der Fahrtstrecke jedoch bereits im Stufe 4 Betrieb automatisiert stattfinden ist der Anteil der Fahrerkosten und somit die absolute Änderung gering. Bei einer Rundung auf volle Cent-Beträge bleiben die Fahrerkosten mit 0,09 €/km für das Jahr 2023 im Vergleich zum Betrieb mit Staffelfahrten unverändert.

Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug erhöhen sich die Fahrerkosten im Vergleich zum Betrieb mit Staffelfahrten durch die Transferfahrten mit dem Zubringerfahrzeug. Die Transferfahrten erhöhen die Fahrerkosten auf 0,14 €/km für das Jahr 2023. Damit liegen die Fahrerkosten noch deutlich unterhalb der Fahrerkosten für den nicht-automatisierten Betrieb

von 0,32 €/km für das Jahr 2023. Zusätzlich sind auch die Lohnkosten während der Be- und Entladung von 0,06 €/km für das Jahr 2023 zu berücksichtigen.

Der Betrieb mit Aufliegerwechsel unterscheidet sich in den Anschaffungskosten vom Betrieb mit Staffelfahrten. Für den nicht-automatisierten Teil der Fahrt wird beim Aufliegerwechsel eine nicht-automatisierte Sattelzugmaschine eingesetzt. Die Gesamtbetriebskosten sind zusammengesetzt aus den Betriebskosten des vollständig automatisierten Betriebs einer automatisierten Sattelzugmaschine für den Fahrtanteil auf der Autobahn und den Betriebskosten einer nicht-automatisierten Sattelzugmaschine für den nicht-automatisierten Fahrtanteil abseits der Autobahn. Die Anschaffungskosten der nicht-automatisierten Sattelzugmaschine unterscheiden sich dabei von denen der automatisierten Sattelzugmaschine.

Die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine hat geringere absolute Anschaffungskosten als die automatisierte Sattelzugmaschine, weil sie kein Automatisierungssystem benötigt. Die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer sind jedoch stark von der jeweiligen Jahresfahrleistung abhängig.

Für das betrachtete Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km sind die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer für die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine höher als für die automatisierte Sattelzugmaschine. Für die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine wird eine Jahresfahrleistung von 60.000 km angenommen, dadurch ergeben sich Anschaffungskosten von 0,34 €/km. Die automatisierte Sattelzugmaschine hat hingegen eine Jahresfahrleistung von 120.000 km, wodurch sich Anschaffungskosten von 0,19 €/km ergeben. Die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine erhöht dadurch die Gesamtanschaffungskosten.

Insgesamt sind die Betriebskosten für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km für den Betrieb mit Aufliegerwechsel höher als für den Betrieb mit Staffelfahrten. Im Gegensatz dazu sind beispielsweise für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer für den Betrieb mit Aufliegerwechsel niedriger als für den Betrieb mit Staffelfahrten.

Für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km besitzen die automatisierte und nicht-automatisierte Sattelzugmaschine dieselbe Jahresfahrleistung von 60.000 km. Die Anschaffungskosten ergeben sich damit zu 0,34 €/km für die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine und 0,38 €/km für die automatisierte Sattelzugmaschine. Die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine reduziert dadurch die Gesamtanschaffungskosten.

Darüber hinaus kann die Jahresfahrleistung für den Betrieb mit Aufliegerwechsel theoretisch zunehmen, dies ist in den Analysen dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt. Die automatisierte Sattelzugmaschine ist für den Betrieb mit Aufliegerwechsel ausschließlich auf der Autobahn unterwegs. Auf der Autobahn kann die Sattelzugmaschine in derselben Zeit eine größere Strecke zurücklegen als im Land- oder Stadtverkehr. Die Jahresfahrleistung der automatisierten Sattelzugmaschine kann dadurch erhöht werden. Der Anstieg der Fahrleistung ist jedoch davon abhängig, wie viel der Gesamtfahrleistung des jeweiligen Einsatzprofils auf der Autobahn stattfindet. Ist der Anteil hoch, so ist der Unterschied für die automatisierte

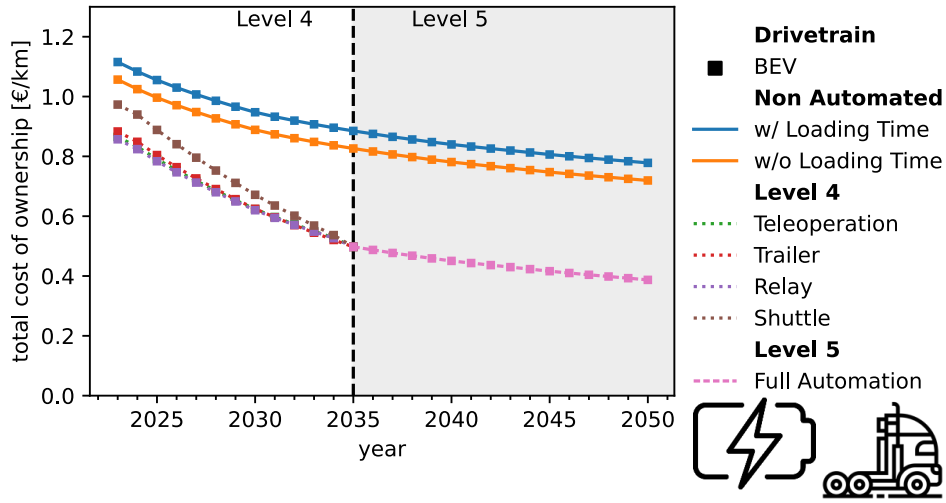
Sattelzugmaschine gering und die Jahresfahrleistung kann dementsprechend nur geringfügig zunehmen. Für die automatisierte Sattelzugmaschine wird in dieser Arbeit für den Betrieb mit Aufliegerwechsel dieselbe Jahresfahrleistung angenommen wie für alle anderen Betriebsstrategien.

Für einen vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb kann die Jahresfahrleistung der automatisierten Fahrzeuge weiterhin durch eine Ausweitung der Fahrzeiten erhöht werden. Nicht-automatisierte Fahrzeuge sind durch die Lenkzeiten des menschlichen Fahrers eingeschränkt. Die Lenkzeit eines menschlichen Fahrers darf täglich 9 Stunden und in zwei aufeinander folgenden Wochen 90 Stunden nicht überschreiten [105–109]. In der gegebenen Lenkzeit ist somit nur eine gewisse maximale Jahresfahrleistung zu erreichen. Automatisierte Fahrzeuge sind von dieser Vorgabe befreit. Die Fahrzeit kann erhöht werden und damit letztendlich die Jahresfahrleistung.

Eine erhöhte Jahresfahrleistung reduziert die Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer für automatisierte Fahrzeuge. Der Stufe 5 Betrieb ist bereits für alle untersuchten Einsatzprofile günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Eine Erhöhung der Jahresfahrleistung ist daher für einen kosteneffektiven Betrieb nicht notwendig. Die Einsparungen in den Fahrerkosten reichen auch ohne erhöhte Jahresfahrleistung aus, um die Zusatzkosten des Automatisierungssystems zu decken. Für den Stufe 5 Betrieb wird in dieser Arbeit dieselbe Jahresfahrleistung angenommen wie für den nicht-automatisierten Betrieb.

Abschließend werden die Kostenentwicklungen aller Stufe 4 Betriebsstrategien mit der Entwicklung der Kosten für den nicht-automatisierten Betrieb verglichen und die Zeitpunkte ermittelt, ab denen der automatisierte Betrieb kostengünstiger sein wird als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Kostenentwicklung des nicht-automatisierten Betriebs und aller Stufe 4 Betriebsstrategien für die batterieelektrische Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km ist in Abbildung 4-9 dargestellt.

Für den Vergleich werden erneut die zwei Varianten für die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien unterschieden. In der ersten Variante fallen die Lohnkosten während der Be- und Entladung für den vollständig automatisierten Betrieb und alle Stufe 4 Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug weg. In der zweiten Variante bleiben die Lohnkosten während der Be- und Entladung im automatisierten Betrieb erhalten.



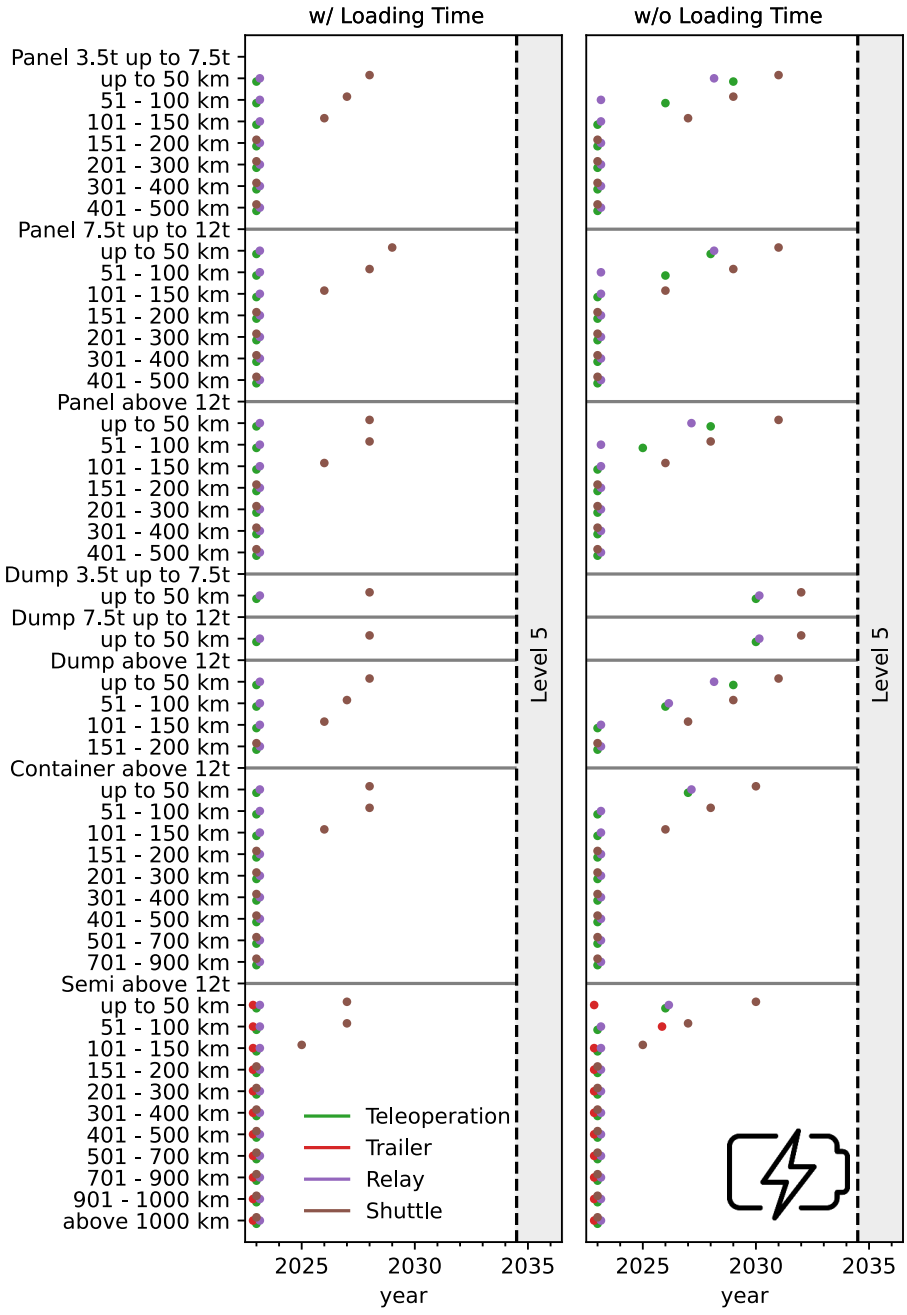
Cargo truck icons created by Eucalyp; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-9 Vergleich der Gesamtbetriebskosten der Betriebsstrategien einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km.

Es lässt sich erkennen, dass die Betriebskosten aller Stufe 4 Betriebsstrategien ab dem Jahr 2023, also bereits für den reinen Stufe 4 Betrieb, für beide Varianten unterhalb derer des nicht-automatisierten Betriebs liegen. Dies liegt daran, dass im Stufe 4 Betrieb bereits 85% der Fahrtstrecke automatisiert gefahren werden. Die Einsparungen in den Fahrerkosten sind dadurch größer als die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem. Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung sind für die Kosteneffektivität des automatisierten Betriebs nicht notwendig.

Zeitpunkte der Kosteneffektivität des automatisierten Betriebs aller Einsatzprofile

Zum Abschluss des Unterabschnitts sind in Abbildung 4-10 für alle in dieser Arbeit untersuchten Betriebsstrategien und Einsatzprofile die Zeitpunkte dargestellt, ab denen ein automatisierter Betrieb kostengünstiger ist als ein nicht-automatisierter Betrieb. Die Zeitpunkte wurden für alle Betriebsstrategien und Einsatzprofile so bestimmt, wie es zuvor explizit an den Beispielen der Einsatzprofile des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km und der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km gezeigt wurde.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-10 Zeitpunkte, ab denen der automatisierte Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb mit und ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung, für alle in dieser Arbeit untersuchten Betriebsstrategien und Einsatzprofile.

Für den Vergleich ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung ist der automatisierte Betrieb für viele Einsatzprofile und Betriebsstrategien bereits im reinen Stufe 4 Betrieb ab dem Jahr 2023 günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb.

Ausnahmen davon stellen Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten von bis zu 150 km dar. Für diese Einsatzprofile sind die automatisiert gefahrenen Distanzen und somit die Einsparungen in den Fahrerkosten nicht ausreichend, um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem auszugleichen. Der automatisierte Betrieb wird für diese Einsatzprofile erst durch einen Mischbetrieb des Stufe 4 und Stufe 5 Betriebs günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb.

Der Zeitpunkt der Kosteneffektivität für den Mischbetrieb aus dem Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb ist für die verschiedenen Stufe 4 Betriebsstrategien unterschiedlich. Für den Betrieb mit Staffelfahrten tritt der Zeitpunkt zuerst auf, für den Betrieb mit Teleoperation als zweites und für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug zuletzt. Prinzipiell tritt der Zeitpunkt mit steigender Einzelfahrtweite früher auf.

Der Betrieb mit Aufliegerwechsel für die Sattelzugmaschine stellt in der Betrachtung einen Sonderfall dar. Für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km ist der Aufliegerwechsel bereits im reinen Stufe 4 Betrieb ab dem Jahr 2023 günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Für Einzelfahrtweiten im Bereich 51–100 km ist der Aufliegerwechsel jedoch im reinen Stufe 4 Betrieb teurer als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Gesamtbetriebskosten setzen sich für den Betrieb mit Aufliegerwechsel aus den Betriebskosten des vollständig automatisierten Betriebs einer automatisierten Sattelzugmaschine für den Fahrtanteil auf der Autobahn und den Betriebskosten einer nicht-automatisierten Sattelzugmaschine für den nicht-automatisierten Fahrtanteil abseits der Autobahn zusammen. Die Betriebskosten für den automatisierten Fahrtanteil sind günstiger als die Betriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs, weil die Einsparungen in den Fahrerkosten größer sind als die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem. Die Betriebskosten für den nicht-automatisierten Fahrtanteil sind, wie auf Seite 125 bereits diskutiert, auf die Betriebskosten einer nicht-automatisierten Sattelzugmaschine mit einer Jahresfahrleistung von 60.000 km festgelegt. Dadurch entsprechen die Betriebskosten des nicht-automatisierten Fahrtanteils denen des nicht-automatisierten Betriebs für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Die Gesamtbetriebskosten im Stufe 4 Betrieb mit Aufliegerwechsel sind dadurch für dieses Einsatzprofil geringer als die des nicht-automatisierten Betriebs. Im Gegensatz dazu sind die Betriebskosten des nicht-automatisierten Fahrtanteils größer als die des nicht-automatisierten Betriebs für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51–100 km. Die Zusatzkosten für den nicht-automatisierten Fahrtanteil übertreffen für dieses Einsatzprofil die Einsparungen im automatisierten Fahrtanteil. Die Gesamtbetriebskosten im Stufe 4 Betrieb mit Aufliegerwechsel sind dadurch für dieses Einsatzprofil höher als die des nicht-automatisierten Betriebs.

Für den Vergleich mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung ist der automatisierte Betrieb für fast alle Einsatzprofile und Betriebsstrategien bereits im reinen Stufe 4 Betrieb ab dem Jahr 2023 günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Dies liegt daran, dass die Lohnkosten während der Be- und Entladung insbesondere für Einsatzprofile mit kurzen Einzelfahrtweiten einen Großteil der Gesamtbetriebskosten ausmachen. Die zusätzlichen Kosten für das Automatisierungssystem können durch den Wegfall dieser Kosten

im automatisierten Betrieb bereits für Einsatzprofile mit kurzen Einzelfahrtweiten ausgeglichen werden.

Die einzige Ausnahme davon stellt der Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug bei Einsatzprofilen mit Einzelfahrtweiten von bis zu 150 km dar. Die Lohnkosten während der Be- und Entladung werden für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug weiterhin berücksichtigt. Einsparungen entstehen für diesen Betrieb nur aus den Fahrerkosten während der Fahrt. Diese sind, wie für den Fall ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung bereits diskutiert, für kurze Fahrtdistanzen nicht ausreichend, um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem auszugleichen. Erst der Übergang in den Stufe 5 Betrieb sorgt dafür, dass der Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug günstiger wird als der nicht-automatisierte Betrieb.

In diesem Unterabschnitt wurde gezeigt, wie die Stufe 4 und Stufe 5 Automatisierung die Gesamtbetriebskosten beeinflussen. Dabei konnte insbesondere herausgestellt werden, dass der Einfluss der Automatisierung auf die Betriebskosten für verschiedene Einsatzprofile und Stufe 4 Betriebsstrategien ganz unterschiedlich aussieht.

Die Auswirkungen der Zusatzkosten des Automatisierungssystems sind dabei von der Jahresfahrleistung abhängig. Das Automatisierungssystem erhöht die Anschaffungskosten um einen festen Absolutbetrag ungeachtet des Einsatzprofils, die Anschaffungskosten pro Kilometer ändern sich jedoch abhängig von der Jahresfahrleistung. Für eine geringe Jahresfahrleistung ist der Anstieg der Anschaffungskosten pro Fahrtkilometer größer.

Die Abnahme der Fahrerkosten im Stufe 4 automatisierten Betrieb ist dagegen von der Einzelfahrtweite abhängig. Für längere Einzelfahrtweiten findet ein größerer Teil der Fahrt auf Autobahnen statt. Im Stufe 4 Betrieb findet nur der Autobahnverkehr automatisiert statt. Mit steigendem Autobahnanteil kann also ein größerer Teil der Fahrerkosten eingespart werden.

Weiterhin bringen einzelne Stufe 4 Betriebsstrategien Extrakosten mit sich, die dazu führen können, dass die Fahrerkosten im Stufe 4 Betrieb sogar zunehmen. Für die Teleoperation sind die Fahrerkosten für den nicht-automatisierten Teil der Fahrt um 10% erhöht, um die Kosten für das Teleoperationszentrum abzubilden. Für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km steigen die Fahrerkosten dadurch um 4% im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb. Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug fallen zusätzlich Kosten für den Transfer des Fahrers im Zubringerfahrzeug an. Bei kurzen Einzelfahrtweiten finden Transferfahrten häufiger statt und die Kosten steigen entsprechend. Dies führt für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km dazu, dass die Fahrerkosten im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb um 78% zunehmen.

Für den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb liegen die Betriebskosten für alle untersuchten Einsatzprofile unterhalb der Kosten für den nicht-automatisierten Betrieb. Die vollständige Eliminierung der Fahrerkosten ist für alle Einsatzprofile ausreichend, um die Zusatzkosten des Automatisierungssystems zu übertreffen.

Der Stufe 4 Betrieb ist ab Einzelfahrtweiten von über 150 km für alle Betriebsstrategien und Einsatzprofile kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Für den Betrieb mit Staffelfahrten, Teleoperation und Aufliegerwechsel gilt dies schon für Einzelfahrtweiten über 100 km. Die Kosten für die Transferfahrten sorgen dafür, dass der Betrieb mit Zubringerfahrzeug erst für Einzelfahrtweiten über 150 km für alle Einsatzprofile kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug

muss folglich ein größerer Teil der Strecke automatisiert gefahren werden, um die Gesamtkosten reduzieren zu können.

Für die Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km kann der automatisierte Betrieb durch einen Mischbetrieb aus einem Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb über die Haltedauer des Fahrzeugs günstiger werden als der nicht-automatisierte Betrieb. Ein Fahrzeug mit einer Haltedauer von zehn Jahren, das im Jahr 2028 angeschafft wird, kann beispielsweise sieben Jahre im Stufe 4 Betrieb und drei Jahre im Stufe 5 Betrieb betrieben werden. Für einen Mischbetrieb ist es jedoch notwendig, dass die Hersteller von Stufe 4 Fahrzeugen diese so konstruieren, dass sie ohne großen Aufwand für einen Stufe 5 Betrieb aufzurüsten sind. Dies kann durch einen modularen Aufbau erreicht werden, der eine Nachrüstung neuer und anderer Sensoren sowie des Computersystems erlaubt und den Stufe 5 Betrieb anschließend durch eine Aktualisierung der Automatisierungssoftware ermöglicht.

Der Zeitpunkt der Verfügbarkeit des vollständig automatisierten Stufe 5 Betriebs entscheidet für einen solchen Mischbetrieb, ab wann sich der automatisierte Betrieb gegenüber dem nicht-automatisierten Betrieb lohnt. Für eine Investmententscheidung vor dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit des Stufe 5 Betriebs ist Vertrauen in die Entwicklung des automatisierten Fahrens notwendig und es entsteht ein Investmentrisiko, durch mögliche Verzögerungen in der Entwicklung.

Stufe 5 automatisiertes Fahren umfasst sämtliche Verkehrssituationen und ist durch die Vielfalt der Verkehrsszenarien, die ein solches System eigenständig beherrschen muss, schwer zu erreichen.

Der reine Stufe 4 Betrieb ist allerdings bereits ab Einzelfahrtweiten von über 150 km für alle Betriebsstrategien und Einsatzprofile kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Für Einzelfahrtweiten von über 150 km liegt der Anteil der Fahrtdistanz, die automatisiert gefahren wird, bei mindestens 74%. Der Anteil der Fahrtstrecke, der während des Stufe 4 Betriebs automatisiert stattfinden kann, ist ein entscheidender Faktor dafür, ob sich der automatisierte Betrieb gegenüber dem nicht-automatisierten Betrieb lohnt.

Es muss eventuell keine vollständige Automatisierung stattfinden, sondern nur ein ausreichend großer Teil der Fahrt automatisiert stattfinden, damit ein Stufe 4 Betrieb für das jeweilige Einsatzprofilen günstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb.

Um die Bestimmung dieses ausreichend großen Teils der Fahrt geht es im folgenden Unterabschnitt 4.1.3.

4.1.3 Bestimmung des kosteneffektiven Automatisierungsanteils

In diesem Unterabschnitt wird für jedes Einsatzprofil der Streckenanteil der Fahrt bestimmt, der in einem Stufe 4 Betrieb automatisiert stattfinden muss, damit der automatisierte Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Der Streckenanteil der Fahrt, der automatisiert stattfindet, wird im Folgenden als Automatisierungsanteil bezeichnet.

In den Betrachtungen außerhalb dieses Unterabschnitts entspricht der Automatisierungsanteil für alle Einsatzprofile ihrem Autobahnanteil, da angenommen wird, dass Stufe 4 automatisierte Lastkraftwagen auf Autobahnen automatisiert ohne menschlichen Fahrer fahren können. Für kurze Einzelfahrtweiten bis zu 150 km sind die möglichen Einsparungen in den Fahrerkosten durch einen automatisierten Betrieb auf der Autobahn in manchen Fällen nicht ausreichend,

um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem zu decken. Die Betriebskosten des Stufe 4 Betriebs sind für diese Fälle höher als für den nicht-automatisierten Betrieb.

In den Betrachtungen in diesem Unterabschnitt wird der Automatisierungsanteil von dem Autobahnanteil gelöst und geschaut, welcher Streckenanteil automatisiert gefahren werden muss, damit der Stufe 4 Betrieb kostengünstiger wird als der nicht-automatisierte Betrieb.

Anhand der in Unterabschnitt 4.1.1 und Unterabschnitt 4.1.2 detailliert diskutierten Einsatzprofile des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km und der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km wird der Einfluss des Automatisierungsanteils detailliert diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse für alle Einsatzprofile vorgestellt.

Für den Vergleich werden erneut zwei Varianten für die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien unterschieden. In der ersten Variante fallen die Lohnkosten während der Be- und Entladung für alle Stufe 4 Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug weg. In der zweiten Variante bleiben die Lohnkosten während der Be- und Entladung im automatisierten Betrieb erhalten.

Die Unterscheidung der Varianten findet dabei ebenfalls erneut der Übersicht halber nicht für den automatisierten Betrieb, sondern für den nicht-automatisierten Betrieb statt. Anstatt die Betriebskosten für den automatisierten Betrieb für die zweite Variante um die Lohnkosten während der Be- und Entladung zu erhöhen, ist der nicht-automatisierte Betrieb für die zweite Variante ohne Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung dargestellt.

Benötigter Automatisierungsanteil für den Kastenwagen

Die Gesamtbetriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien für den batterieelektrischen Kastenwagen unter 7,5 t mit Fahrtweiten von bis zu 50 km in Abhängigkeit des Automatisierungsanteils sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Bevor auf die konkreten Kosten der Betriebsstrategien für dieses Einsatzprofil eingegangen wird, werden zunächst allgemeine Aspekte bezüglich der Abhängigkeit der Betriebskosten vom Automatisierungsanteil anhand der Darstellung diskutiert.

Die Randwerte bei einem Automatisierungsanteil von 0% und 100% entsprechen dem nicht-automatisierten Betrieb und dem vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb. Die Betriebskosten für einen Automatisierungsanteil von 0% enthalten jedoch zusätzlich die Kosten für das Automatisierungssystem in den Anschaffungskosten. Dadurch sind die Gesamtbetriebskosten höher als für den nicht-automatisierten Betrieb. Erst ab einem Automatisierungsanteil > 0% werden die tatsächlichen Betriebsstrategien berücksichtigt.

Für die Teleoperation und den Staffelbetrieb fallen die Kosten bereits für einen Automatisierungsanteil von 1% deutlich, da die Lohnkosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs für diese Betriebsstrategien nicht berücksichtigt werden. Durch die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem liegen sie weiterhin oberhalb der Kosten für den nicht-automatisierten Betrieb ohne Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung. Die Betriebskosten der Teleoperation liegen auf Grund der höheren Lohnkosten für die Teleoperation leicht oberhalb derer des Staffelbetriebs.

Im Gegensatz dazu steigen die Kosten für einen Betrieb mit Zubringerfahrzeug. Dies liegt daran, dass die Lohnkosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs für diese

Betriebsstrategie weiter berücksichtigt werden und zusätzlich Kosten für die Transferfahrten des Fahrers im Zubringerfahrzeug hinzukommen.

Die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien nehmen weiterhin mit dem Automatisierungsanteil ab. Mit steigendem Automatisierungsanteil nehmen die Fahrerkosten ab, da der Fahrer für einen geringeren Anteil der Fahrtstrecke benötigt wird. Die Abnahme in den Fahrerkosten ist dabei zuerst geringer, da angenommen wird, dass zuerst der Autobahnanteil der Fahrt automatisiert wird. Für den gleichen Streckenanteil auf der Autobahn wird auf Grund höherer Fahrgeschwindigkeiten weniger Zeit benötigt als für den gleichen Streckenanteil abseits der Autobahn. Die Fahrerkosten pro Fahrtkilometer auf der Autobahn sind dementsprechend geringer. Überschreitet der Automatisierungsanteil den Autobahnanteil, so werden auch Fahrtanteile abseits der Autobahn automatisiert. Die Einsparungen der Fahrerkosten fallen für diesen Bereich größer aus.

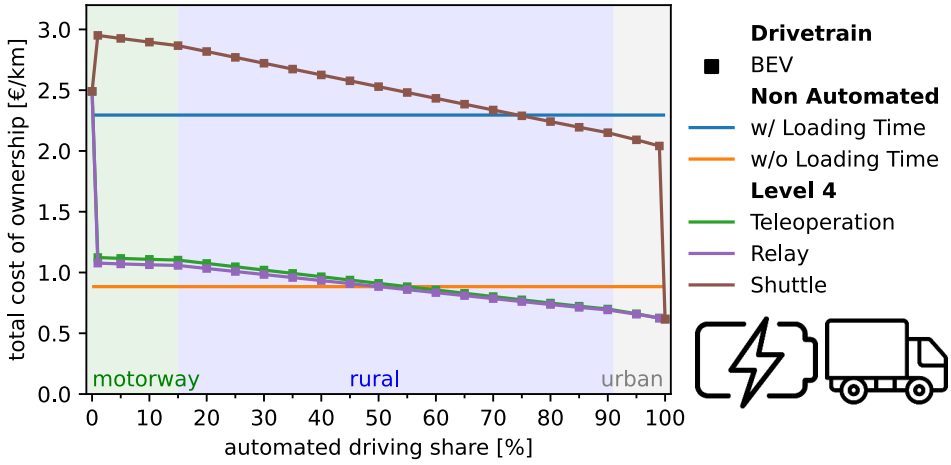
Die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien laufen mit steigendem Automatisierungsanteil auf denselben Kostenwert für den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb zusammen. Eine Ausnahme davon stellt der Betrieb mit Zubringerfahrzeug dar. Für diesen werden unabhängig vom Automatisierungsanteil die Lohnkosten während der Be- und Entladung berücksichtigt. Erst für den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb fallen diese dann weg. Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug ergibt sich daher ein Sprung in den Betriebskosten von einem 99% automatisierten zu einem 100% automatisierten Betrieb.

Die Abnahme der Betriebskosten der verschiedenen Betriebsstrategien mit dem Automatisierungsanteil ist unterschiedlich. Betriebsstrategien mit höheren Betriebskosten zeigen eine stärkere Abnahme mit steigendem Automatisierungsanteil. Für den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten, Teleoperation und Aufliegerwechsel schneiden sich die Betriebskostenkurven jedoch an keinem Punkt. Es gibt also je nach Einsatzprofil eine feste Rangordnung der Betriebsstrategien. Eine Betriebsstrategie, die für einen geringeren Automatisierungsanteil teurer ist, ist auch für einen höheren Automatisierungsanteil teurer.

Liegt der Automatisierungsanteil, bei dem die Betriebskosten des automatisierten Betriebs die des nicht-automatisierten Betriebs erstmalig unterschreiten unterhalb des Autobahnanteils, ist der Stufe 4 automatisierte Betrieb unter der ursprünglichen Annahme, dass Fahrten im Stufe 4 Betrieb auf Autobahnen automatisiert ohne menschlichen Fahrer stattfinden können und abseits der Autobahn ein menschlicher Fahrer benötigt wird, kosteneffektiv.

Für die Betrachtung ist anzumerken, dass ein Automatisierungsanteil unterhalb des Autobahnanteils, sprich eine teilweise Automatisierung der Autobahnfahrt, Schwierigkeiten für die reale Umsetzung aufweist. Ein Übergang vom automatisierten zum nicht-automatisierten Betrieb kann nicht einfach mitten auf der Autobahn stattfinden. Für den Übergang muss der menschliche Fahrer an den Übergabeort kommen. Der Übergang vom automatisierten zum nicht-automatisierten Betrieb kann an Raststätten oder Parkplätzen entlang der Autobahn oder abseits der Autobahn stattfinden. Anschlussstellen bieten sich als Übergabeorte an, Parkplätze und Raststätten entlang der Autobahn sind hingegen schwerer zu erreichen. Durch die Teleoperation werden auch Parkplätze und Raststätten entlang der Autobahn als Übergabeorte möglich, weil der Fahrer nicht physisch zum Fahrzeug kommen muss. Dies bedeutet jedoch nicht, dass für die Teleoperation eine Übergabe zu jeder Zeit und an jedem Ort möglich ist. Die Kontrolle kann aus Sicherheitsgründen nicht während der Fahrt übernommen werden. Ein Teleoperator kann beispielsweise nicht die Kontrolle während der Fahrt übernehmen, um das Fahrzeug durch eine Baustelle zu steuern. In den Analysen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge den gesamten

Autobahnverkehr inklusive Baustellen automatisiert ohne menschlichen Fahrer bewältigen können.



Truck icons created by Smashicons; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-11 Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien für den batterieelektrischen Kastenwagen unter 7,5 t mit Fahrtweiten bis zu 50 km in Abhängigkeit des Automatisierungsanteils für das Jahr 2023. Die Randwerte bei einem Automatisierungsanteil von 0% und 100% entsprechen dem nicht-automatisierten Betrieb und dem vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb. Außerhalb dieses Unterabschnitts entspricht der Automatisierungsanteil im Stufe 4 Betrieb dem Autobahnanteil.

Nach diesen Ausführungen zu den allgemeinen Aspekten der Abhängigkeit der Betriebskosten vom Automatisierungsanteil werden nun die konkreten Kosten der Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5t mit Fahrtweiten bis zu 50 km diskutiert.

Die Betriebskosten für den Betrieb mit Teleoperation und Staffelfahrten liegen unabhängig vom Automatisierungsanteil unterhalb derer für den nicht-automatisierten Fall, wenn Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung erzielt werden können. Die Einsparungen der Lohnkosten während der Be- und Entladung im automatisierten Betrieb sind groß genug, um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem zu übertreffen. Einsparungen in den Fahrerkosten durch automatisiert gefahrene Fahrtanteile sind nicht notwendig.

Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist hingegen ein Automatisierungsanteil von 75% notwendig, um die Betriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs zu unterschreiten. Die Lohnkosten während der Be- und Entladung können im Betrieb mit Zubringerfahrzeug nicht eingespart werden. Zusätzlich entstehen Kosten für die Transferfahrten des menschlichen Fahrers im Zubringerfahrzeug. Um die Kosten des Automatisierungssystems und der Fahrten im Zubringerfahrzeug auszugleichen, ist ein hoher Automatisierungsanteil notwendig.

Der benötigte Automatisierungsanteil von 75% bedeutet, dass für eine Kosteneffektivität des Stufe 4 Betriebs mit Zubringerfahrzeug für das Einsatzprofil des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5t mit Fahrtweiten bis zu 50 km zusätzlich zum Autobahnverkehr auch Fahrtanteile abseits der Autobahn im ländlichen Verkehr automatisiert stattfinden müssen. Der

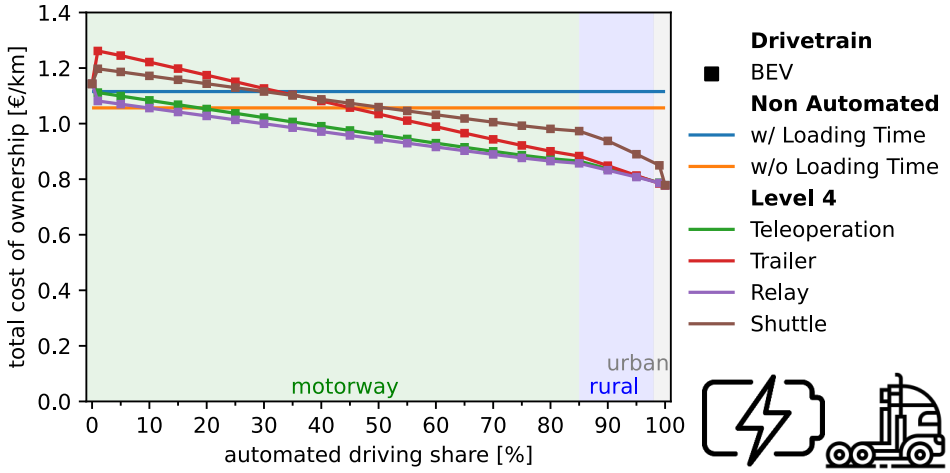
Autobahnanteil des Einsatzprofils liegt bei 15%. Für einen kosteneffektiven Betrieb muss der Einsatzbereich für die automatisierte Fahrt daher auf Teile des ländlichen Verkehrs ausgeweitet werden.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung müssen auch für den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten und Teleoperation Teile des ländlichen Verkehrs automatisiert stattfinden, damit der automatisierte Betrieb günstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Erst ab einem Automatisierungsanteil von 50% ist der automatisierte Betrieb für die beiden Betriebsstrategien günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Dies liegt oberhalb des Autobahnanteils von 15%.

Die Ergebnisse zum benötigten Automatisierungsanteil spiegeln die Ergebnisse des vorherigen Unterabschnitts 4.1.2 wider. Für das Einsatzprofil des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5t mit Fahrtweiten bis zu 50 km waren für den Fall, dass Einsparungen der Lohnkosten während der Be- und Entladung erzielt werden können, nur der Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten und Teleoperation im reinen Stufe 4 Betrieb kosteneffektiv im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb. Dies zeigt sich hier dadurch, dass der benötigte Automatisierungsanteil für diese Fälle unterhalb des Autobahnanteils liegt. Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug sowie für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung war ein Mischbetrieb aus dem Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb notwendig, um eine Kosteneffektivität zu erreichen. Dies zeigt sich hier dadurch, dass der benötigte Automatisierungsanteil für diese Fälle oberhalb des Autobahnanteils liegt.

Benötigter Automatisierungsanteil für die Sattelzugmaschine

Für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km sind die Betriebskosten in Abhängigkeit des Automatisierungsanteils in Abbildung 4-12 dargestellt. In der Betrachtung für die Sattelzugmaschine kommt der Stufe 4 Betrieb mit Aufliegerwechsel hinzu. Dieser Betrieb verändert die Gesamtbetriebskosten durch Veränderungen in den Anschaffungskosten auf unterschiedliche Weise für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km und Einzelfahrtweiten von mehr als 50 km. Dies wurde auf Seite 125 bereits ausführlich diskutiert.



Cargo truck icons created by Eucalyp; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-12 Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien für die batterieelektrische Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km in Abhängigkeit des Automatisierungsanteils für das Jahr 2023. Die Randwerte bei einem Automatisierungsanteil von 0% und 100% entsprechen dem nicht-automatisierten Betrieb und dem vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb. Außerhalb dieses Unterabschnitts entspricht der Automatisierungsanteil im Stufe 4 Betrieb dem Autobahnanteil.

Die Betriebskosten für den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten und Teleoperation liegen erneut unabhängig vom Automatisierungsanteil unterhalb derer des nicht-automatisierten Betriebs für den Fall, dass Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung des Fahrzeugs erzielt werden können. Obwohl die Lohnkosten während der Be- und Entladung für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine deutlich geringer ausfallen als für das Einsatzprofil des Kastenwagens, sind die Einsparungen der Lohnkosten während der Be- und Entladung im automatisierten Betrieb groß genug, um die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem zu übertreffen. Einsparungen in den Fahrerkosten durch automatisiert gefahrene Fahrtanteile sind nicht notwendig.

Im Gegensatz dazu liegen die Betriebskosten für den Betrieb mit Aufliegerwechsel und Zubringerfahrzeug für geringe Automatisierungsanteile oberhalb der Betriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs. Der Stufe 4 Betrieb wird für die beiden Betriebsstrategien erst ab einem Automatisierungsanteil von 35% günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung unterscheiden sich die benötigten Automatisierungsanteile für einen kostengünstigeren Stufe 4 Betrieb für die einzelnen Betriebsstrategien stark. Für den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten ist ein Automatisierungsanteil von 10%, für den Betrieb mit Teleoperation ein Anteil von 20% und für den Betrieb mit Aufliegerwechsel ein Anteil von 50% notwendig.

Für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich 201–300 km ist eine Beschränkung der Automatisierung auf den Autobahnverkehr ausreichend, um im Stufe 4 Betrieb unabhängig von der Betriebsstrategie niedrigere Kosten als im nicht-automatisierten Betrieb zu erzielen. Der benötigte Automatisierungsanteil liegt für alle Betriebsstrategien unterhalb des Autobahnanteils von 85%.

Die Ergebnisse zum benötigten Automatisierungsanteil spiegeln erneut die Ergebnisse des vorherigen Unterabschnitts 4.1.2 wider. Für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t mit Fahrtweiten im Bereich von 201–300 km waren alle Betriebsstrategien im reinen Stufe 4 Betrieb kosteneffektiv im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb. Dies zeigt sich hier dadurch, dass der benötigte Automatisierungsanteil für alle Fälle unterhalb des Autobahnanteils liegt.

Benötigter Automatisierungsanteil für alle Einsatzprofile

Im Folgenden werden die benötigten Automatisierungsanteile für alle untersuchten Einsatzprofile und Betriebsstrategien diskutiert.

Für die beiden vorgestellten Einsatzprofile des batterieelektrischen Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km und der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201–300 km konnte durch eine teilweise Automatisierung des ländlichen Verkehrs ein kosteneffektiver Stufe 4 Betrieb für alle Betriebsstrategien erreicht werden. Eine vollständige Automatisierung war für diese Einsatzprofile also nicht notwendig. Allerdings muss der Einsatzbereich des Stufe 4 Betriebs im Vergleich zur Grundannahme, dass ein automatisierter Betrieb auf der Autobahn möglich ist, erweitert werden.

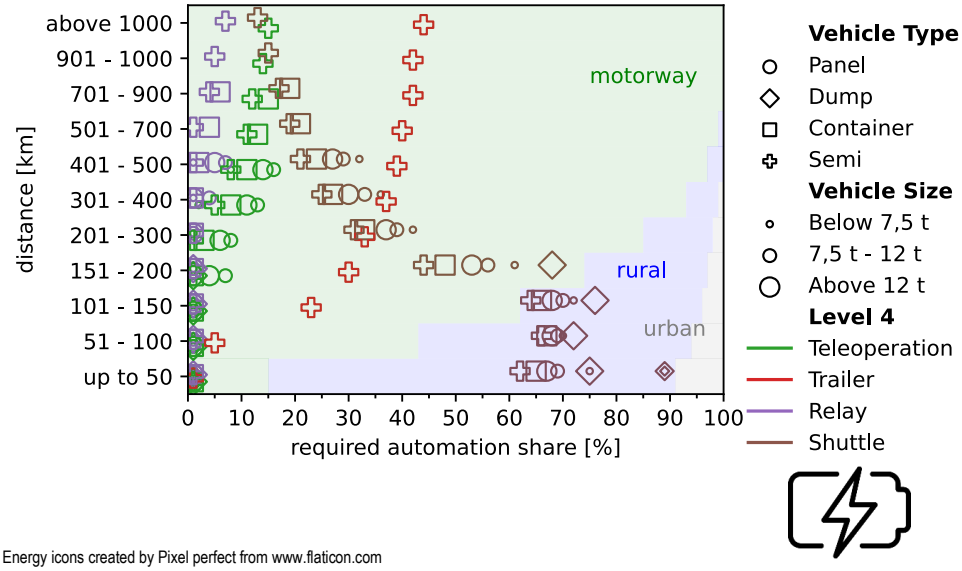
Ob der erweiterte Stufe 4 Betrieb für alle Einsatzprofile ausreicht, oder ob eine vollständige Automatisierung notwendig ist, wird im Folgenden diskutiert. Dazu findet zuerst ein Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung und anschließend ein Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung statt.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge sind die benötigten Automatisierungsanteile für alle Einsatzprofile und Betriebsstrategien in Abbildung 4-13 dargestellt.

Es lässt sich erkennen, dass alle Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug einen gleichen Trend aufweisen. Der benötigte Automatisierungsanteil ist für kurze Einzelfahrtweiten gering und nimmt mit steigender Fahrtweite zu. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für kurze Einzelfahrtweiten groß sind und mit steigender Fahrtweite abnehmen (siehe Abbildung 4-1 auf Seite 107). Die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge werden für den automatisierten Betrieb nicht berücksichtigt und senken dadurch die Kosten des automatisierten Betriebs, sodass für einen kosteneffektiven Betrieb ein geringerer Fahrtanteil automatisiert stattfinden muss.

Der Betrieb mit Zubringerfahrzeug weist hingegen ein anderes Verhalten auf. Für kurze Fahrtweiten ist ein hoher Automatisierungsanteil notwendig und der benötigte Automatisierungsanteil nimmt mit der Fahrtweite ab. Dies liegt daran, dass in dieser Betriebsstrategie die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge berücksichtigt werden und die Einsparungen für diese Betriebsstrategie somit lediglich aus dem automatisiert gefahrenen Anteil der Strecke kommen. Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug sind zusätzlich Transferfahrten notwendig, die die Betriebskosten erhöhen. Die Anzahl der Transferfahrten nimmt mit steigender Einzelfahrtweite ab. Dadurch ist mit

steigender Einzelfahrtweite ein geringerer Automatisierungsanteil notwendig, um die zusätzlichen Kosten zu decken.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-13 Benötigter Automatisierungsanteil, damit der Stufe 4 Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Darstellung beinhaltet alle untersuchten Fahrzeugtypen, Fahrzeuggrößen und Stufe 4 Betriebsstrategien und bezieht sich auf Fahrzeuge mit einem batterieelektrischen Antriebsstrang für das Jahr 2023. Für den automatisierten Betrieb, mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug, wird angenommen, dass die Lohnkosten für den Fahrer während der Be- und Entladung der Fahrzeuge wegfallen. Außerhalb dieses Unterabschnitts entspricht der Automatisierungsanteil dem Autobahnanteil.

Für alle Einsatzprofile und Betriebsstrategien ist ein erweiterter Stufe 4 Betrieb für einen kosteneffektiven Betrieb im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb ausreichend. Für die meisten Einsatzprofile und Betriebsstrategien ist bereits eine reine Automatisierung des Autobahnverkehrs für einen kosteneffektiven Betrieb ausreichend. Eine Ausnahme davon bildet der Betrieb mit Zubringerfahrzeug für Einsatzprofile mit Fahrtweiten von bis zu 150 km. Für diese sind zusätzlich Teile des ländlichen Verkehrs zu automatisieren. Auf eine vollständige Automatisierung kann in allen Fällen verzichtet werden.

Für die Betrachtung ist dabei zu berücksichtigen, dass für jede Distanzklasse jeweils der Autobahnanteil gemäß der durchschnittlichen Fahrtweite der Distanzklasse gewählt wurde. Die tatsächlichen Fahrtweiten jeder Distanzklasse unterliegen jedoch einer gewissen statistischen Schwankung. Die Verteilung der Fahrtanteile auf den Autobahnverkehr sowie den ländlichen und städtischen Verkehr ist für die einzelnen Distanzklassen nicht so strikt, wie in der Betrachtung dargestellt. Falls der benötigte Automatisierungsanteil nah an einer Grenze zwischen den Fahrtanteilen liegt, wird er für einen Teil der Fahrten oberhalb und für einen anderen Teil unterhalb liegen. Für solche Fälle wäre somit keine binäre Entscheidung zu treffen, sondern eine definierte Verteilung anzunehmen. Dies bedeutet für die zwei Einsatzprofile der Kipper unter 12 t mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km, dass eventuell auch eine Automatisierung des Stadtverkehrs für eine Kosteneffektivität notwendig ist. Eine Entscheidung darüber ist jedoch einzelfallabhängig. Eine Automatisierung des Stadtverkehrs

würde praktisch einer vollständigen Automatisierung entsprechen. Der Stadtverkehr stellt im Alltag die anspruchsvollste Verkehrsumgebung für automatisierte Fahrzeuge dar. Fahrzeuge, die automatisiert im Stadtverkehr fahren können, sollten alle alltäglichen Fahrsituationen selbstständig bewältigen können.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge sind die benötigten Automatisierungsanteile für alle Einsatzprofile und Betriebsstrategien in Abbildung 4-14 dargestellt.

Der Verlauf für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug entspricht exakt dem Verlauf wie bei dem vorherigen Vergleich mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Dies liegt daran, dass Lohnkosten für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug nicht wegfallen und daher bereits in der ersten Betrachtung enthalten sind.

Für alle anderen Betriebsstrategien ergibt sich ein komplett anderes Bild als zuvor.

Für alle Betriebsstrategien mit Ausnahme des Aufliegerwechsels wird für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km der größte Automatisierungsanteil benötigt. Weiterhin nimmt der Automatisierungsanteil mit steigender Einzelfahrtweite ab, bis er ab einer Einzelfahrtweite von 200 km konstant bleibt. Dieser Verlauf beruht auf mehreren Effekten, die zusammenwirken.

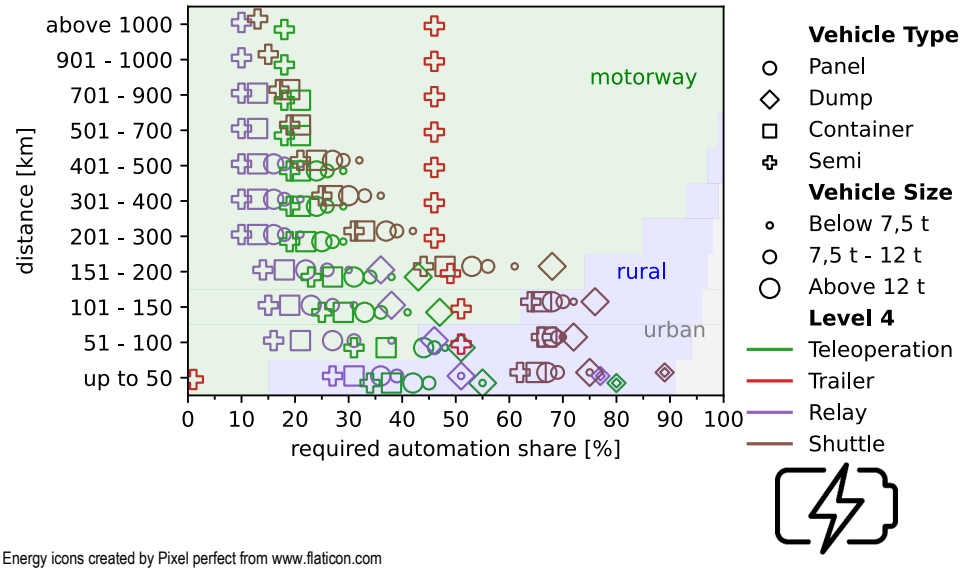
Für Einzelfahrtweiten über 50 km ist ein erhöhter Automatisierungsanteil notwendig, weil die Zusatzkosten des Automatisierungssystems pro Fahrtkilometer für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km höher sind als für Einzelfahrtweiten über 50 km. Das Automatisierungssystem erhöht die Anschaffungskosten um einen festen Absolutbetrag. Die Anschaffungskosten pro Kilometer ändern sich jedoch abhängig von der Jahresfahrleistung. Wie in Tabelle 3-3 auf Seite 74 dargestellt, wird für Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km die Jahresfahrleistung geringer angenommen als für Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten über 50 km. Dadurch sind die Anschaffungskosten des Automatisierungssystems pro Fahrtkilometer für Einzelfahrtweiten bis 50 km größer.

Für die weitere Abnahme des benötigten Automatisierungsanteils für Einzelfahrtweiten über 50 km sind die Einsparungen in den Fahrerkosten durch den automatisierten Betrieb relevant. Die Einsparungen in den Fahrerkosten bei gleichem Automatisierungsanteil nehmen mit steigender Einzelfahrtweite zu. Dies liegt daran, dass sich der Automatisierungsanteil auf die Fahrtdistanz bezieht, die Fahrerkosten sich jedoch aus der Fahrzeit ergeben. Es wird angenommen, dass mit steigendem Automatisierungsanteil zuerst der Autobahnverkehr, anschließend der ländliche Verkehr und abschließend der städtische Verkehr automatisiert wird. Es wird also zuerst der Verkehr mit höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten automatisiert. Der automatisiert gefahrene Streckenanteil ist dadurch größer als der automatisiert gefahrene Zeitanteil. Für kürzere Einzelfahrtweiten sind die Anteile des städtischen und ländlichen Verkehrs und somit die Anteile des langsamen Verkehrs größer. Um den gleichen Streckenanteil automatisiert zurückzulegen wird dadurch ein kleinerer Anteil der Gesamtfahrzeit benötigt, als es für längere Einzelfahrtweiten der Fall ist. Die Einsparungen in den Fahrerkosten fallen daher bei gleichem Automatisierungsanteil für kürzere Einzelfahrtweiten geringer aus.

Dieser Effekt ist insbesondere für Einzelfahrtweiten bis zu 300 km relevant, da sich für diese Fahrtweiten die Anteile des Autobahnverkehrs sowie des städtischen und ländlichen Verkehrs zwischen den Distanzklassen stark unterscheiden. Für größere Einzelfahrtweiten hat der

Autobahnverkehr hingegen einen Anteil von mindestens 93%, sodass sich keine großen Unterschiede zwischen den Distanzklassen ergeben.

Zuletzt nimmt der benötigte Automatisierungsanteil für Einzelfahrtweiten ab 200 km durch die Verwendung einer Schlafkabine für den nicht-automatisierten Fall noch einmal sprunghaft ab. Es wird angenommen, dass nicht-automatisierte Lastkraftwagen ab Einzelfahrtweiten von 200 km mit einer Schlafkabine ausgestattet werden. Die Schlafkabine erhöht die Anschaffungskosten des Fahrzeugs. Für den automatisierten Betrieb wird angenommen, dass auf die Schlafkabine verzichtet werden kann. Dadurch können Kosten im automatisierten Betrieb gegenüber dem nicht automatisierten Betrieb eingespart werden. Der benötigte Automatisierungsanteil, um im automatisierten Betrieb geringere Betriebskosten als im nicht-automatisierten Betrieb zu erzielen, verringert sich dadurch.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-14 Benötigter Automatisierungsanteil, damit der Stufe 4 Betrieb kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Darstellung beinhaltet alle untersuchten Fahrzeugtypen, Fahrzeuggrößen und Stufe 4 Betriebsstrategien und bezieht sich auf Fahrzeuge mit einem batterieelektrischen Antriebsstrang für das Jahr 2023. Für den automatisierten Betrieb wird angenommen, dass die Lohnkosten für den Fahrer während der Be- und Entladung der Fahrzeuge erhalten bleiben. Außerhalb dieses Unterabschnitts entspricht der Automatisierungsanteil dem Autobahnanteil.

In diesem Unterabschnitt wurden für alle Einsatzprofile und Stufe 4 Betriebsstrategien die jeweiligen Fahrtanteile bestimmt, die automatisiert stattfinden müssen, damit der Stufe 4 automatisierte Betrieb günstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Der Vergleich erfolgte für den nicht-automatisierten Betrieb mit und ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung.

Für beide Vergleiche lag der benötigte Automatisierungsanteil, abgesehen von wenigen Ausnahmen bei Fahrtweiten bis zu 100 km und für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug, unterhalb des jeweiligen Autobahnanteils.

Für die Ausnahmefälle war allerdings eine Automatisierung des ländlichen Verkehrs für einen kosteneffektiven Stufe 4 Betrieb ausreichend. Die Automatisierung des Stadtverkehrs war für kein Einsatzprofil für einen kosteneffektiven Stufe 4 Betrieb notwendig.

Die Analysen dieser Arbeit zeigen somit, dass eine vollständige Automatisierung für kein Einsatzprofil notwendig ist. Für alle untersuchten Einsatzprofile ist die Automatisierung des Autobahnverkehrs und des ländlichen Verkehrs ausreichend, um geringere Betriebskosten als für den nicht-automatisierten Betrieb zu erreichen.

Im nächsten Unterabschnitt 4.1.4 werden die Gesamtbetriebskosten des automatisierten und nicht-automatisierten Betriebs verglichen und die möglichen Einsparungspotentiale bestimmt.

4.1.4 Mögliche Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr

In diesem Unterabschnitt werden die Gesamtbetriebskosten für den automatisierten und nicht-automatisierten Betrieb bestimmt und die möglichen Einsparungen durch den automatisierten Betrieb diskutiert.

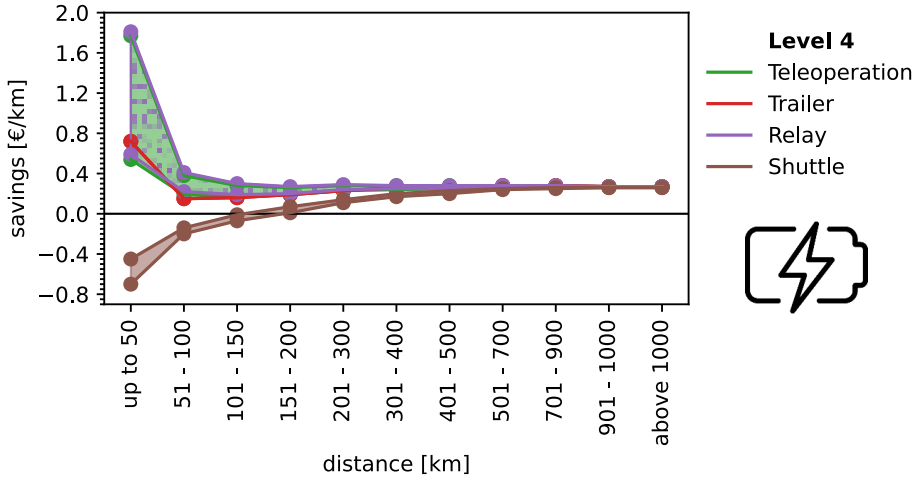
In den bisherigen Analysen konnte gezeigt werden, dass der Stufe 4 automatisierte Betrieb von Lastkraftwagen für bestimmte Einsatzprofile und Fahrzeugtypen kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb und der Stufe 5 automatisierte Betrieb sogar für alle Einsatzprofile und Fahrzeugtypen. Die Einsparungen sind dabei jedoch stark von dem Einsatzprofil und den Fahrtweiten abhängig. Die mögliche Gesamtersparnis durch den automatisierten Betrieb wird daher in diesem Unterabschnitt basierend auf den jeweiligen Fahrleistungen für die Distanzklassen abgeschätzt.

Im Folgenden werden zuerst die Einsparungspotentiale pro Kilometer bestimmt und über die Jahresfahrleistungen die möglichen jährlichen Gesamteinsparungen berechnet. Anschließend wird die Entwicklung der möglichen Einsparungen betrachtet und die berechneten Einsparungen mit den Ergebnissen anderer Studien verglichen.

Betriebskosteneinsparungen pro Kilometer durch den Stufe 4 Betrieb

Das Einsparungspotential der verschiedenen Stufe 4 Betriebsstrategien lässt sich für jedes Einsatzprofil aus der Differenz der Betriebskosten der jeweiligen Betriebsstrategie und denen des nicht-automatisierten Betriebs bestimmen. Die möglichen Einsparungen werden im Folgenden zuerst für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge und anschließend ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge betrachtet.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge sind die möglichen Einsparungen der Betriebsstrategien für die jeweiligen Distanzklassen in Abbildung 4-15 dargestellt. Dabei wird jeweils der Maximal- und Minimalwert der verschiedenen Einsatzprofile der Distanzklasse angegeben. Für den Aufliegerwechsel gibt es jeweils nur ein Einsatzprofil pro Distanzklasse, daher sind der Maximal- und Minimalwert identisch.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-15 Minimale und maximale Differenz der Stufe 4 Betriebskosten und der Betriebskosten für den nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für das Jahr 2023. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf batterieelektrische Fahrzeuge.

Für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km sind die Einsparungspotentiale aller Stufe 4 Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug am größten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für diese Distanzklasse einen großen Teil der Betriebskosten ausmachen. Für alle Stufe 4 Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug fallen die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge weg.

Die Spannweite zwischen den Minimal- und Maximalwerten der Einsparungen der einzelnen Betriebsstrategien ist jedoch für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km groß. Zwischen den minimalen und maximalen Einsparungen innerhalb der Betriebsstrategien liegt ein Faktor drei. Der Faktor drei zwischen den Minimal- und Maximalwerten ist auf die Unterschiede in den Beladungszeiten der verschiedenen Fahrzeugtypen zurückzuführen. Für die Sattelzugmaschine beträgt die Be- und Entladungsdauer eine Stunde. Für Kipper bis zu 12 t wird hingegen eine Be- und Entladungsdauer von 3 Stunden angenommen (siehe Tabelle 3-3 auf Seite 74). Die Be- und Entladezeit für Kipper wird höher als für die Sattelzugmaschine angenommen, weil Kipper eine deutlich geringere Jahresfahrleistung aufweisen und dementsprechend ein größerer Anteil ihrer Einsatzzeit auf die Be- und Entladung sowie Wartezeiten entfallen und ein geringerer Anteil auf die Fahrzeiten. Wie in Abbildung 4-1 auf Seite 107 dargestellt, liegen die Lohnkosten während der Be- und Entladung für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km bei 0,71–2,12 €/km. Dies führt zu Gesamteinsparungen durch den Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten von 0,59 €/km bis zu 1,81 €/km.

Für Einzelfahrtweiten im Bereich 51–100 km sind die Einsparungen durch die einzelnen Stufe 4 Betriebsstrategien bereits deutlich geringer als für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Dies liegt einerseits daran, dass die Lohnkosten während der Be- und Entladung für diese Distanzklasse einen deutlich geringeren Anteil der Gesamtbetriebskosten ausmachen, weil Be- und Entladungen im Verhältnis zur Fahrtweite seltener stattfinden. Andererseits gibt es für diese Distanzklasse keine Einsatzprofile von Fahrzeugen mit Be- und Entladungsdauern von

drei Stunden mehr. Die Beladungsdauern der Fahrzeuge liegen bei einer oder zwei Stunden. Dadurch nimmt das maximale Einsparungspotential deutlich ab und zwischen Maximal- und Minimalwert liegt nur noch ein Faktor zwei.

Für steigende Fahrtweiten nimmt die Differenz zwischen dem Minimal- und Maximalwert der Einsparungen der einzelnen Stufe 4 Betriebsstrategien weiter ab. Dies ist auf drei Faktoren zurückzuführen. Einerseits nimmt der Anteil der Lohnkosten während der Be- und Entladung weiter ab, weil Be- und Entladungen mit steigender Fahrtweite seltener stattfinden. Zweitens nehmen die Einsparungen in den Fahrerkosten während der Fahrt zu, weil ein größerer Anteil der Fahrtstrecke automatisiert stattfindet. Drittens nimmt die Anzahl der betrachteten Fahrzeuge ab. Ab Fahrtweiten von 200 km werden keine Kipper mehr betrachtet, ab Fahrtweiten von 500 km keine Kastenwagen und ab Fahrtweiten von 900 km keine Containerfahrzeuge. Für Fahrtweiten oberhalb von 900 km werden nur noch Sattelzugmaschinen betrachtet und es gibt folglich nur noch ein Einsatzprofil, sodass der Minimal- und Maximalwerte identisch sind.[87]

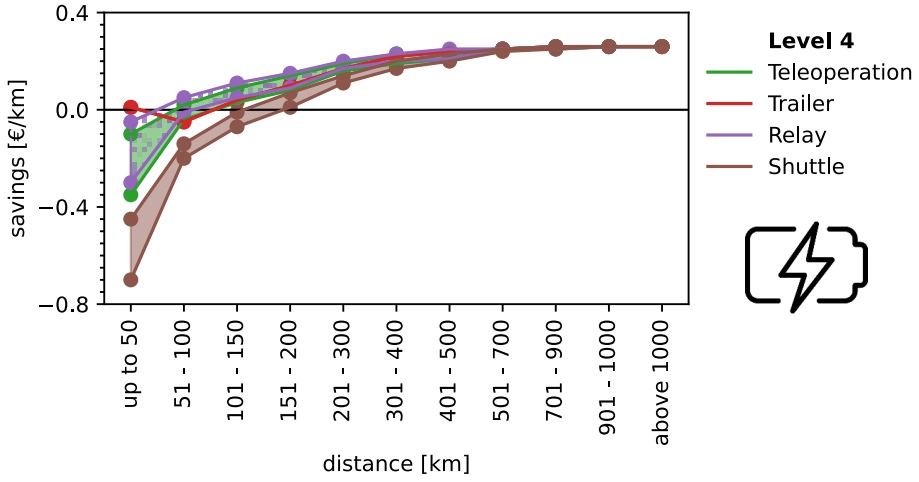
Im Vergleich zwischen den Betriebsstrategien ist festzustellen, dass die Teleoperation und die Staffelfahrten sehr ähnliche Einsparungspotentiale besitzen, wobei sowohl das minimale als auch das maximale Einsparungspotential für die Staffelfahrten anfänglich wenige Cent oberhalb der jeweiligen Einsparungspotentiale für die Teleoperation liegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fahrerkosten für den nicht-automatisierten Teil der Fahrt abseits der Autobahn für die Teleoperation um 10% erhöht sind, um die Betriebskosten des Teleoperationszentrums abzubilden.

Der Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist als einzige Stufe 4 Betriebsstrategie für Einzelfahrtweiten bis zu 150 km teuer als der nicht-automatisierte Betrieb. Dies liegt daran, dass in dieser Betriebsstrategie die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge weiterhin berücksichtigt sind. Das große Einsparungspotential der anderen Betriebsstrategien für geringe Einzelfahrtweiten durch den Wegfall der Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge existiert für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug somit nicht. Das einzige Einsparungspotential ergibt sich aus den Einsparungen der Fahrerkosten während des automatisiert stattfindenden Teils der Fahrt auf der Autobahn, welcher mit der Fahrtweite zunimmt. Die Einsparungen für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug nehmen mit steigender Fahrtweite monoton zu. Ab Einzelfahrtweiten von über 150 km ist der Betrieb mit Zubringerfahrzeug kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb.

Für höhere Fahrtweiten streben alle Betriebsstrategien gegen ein Einsparungspotential von 0,27 €/km. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Einsparungen für große Fahrtweiten im Wesentlichen aus den Einsparungen der Fahrerkosten während der Fahrt entstehen. Für lange Fahrtweiten wird der Autobahnanteil und dementsprechend der Teil der Fahrt, der automatisiert stattfindet, größer. Der Einfluss der Betriebsstrategie nimmt dabei ab, da der Fahrtanteil, in dem sich die Betriebsstrategien unterscheiden, abnimmt. Die Kosten für den menschlichen Fahrer im nicht-automatisierten Betrieb liegen für Fahrtweiten über 1000 km bei 0,29 €/km und die Lohnkosten während der Be- und Entladung bei 0,01 €/km. Dies erklärt im Wesentlichen das Einsparungspotential der Betriebsstrategien von 0,26–0,27 €/km.

[87] Für eine Übersicht der Einsatzprofile sei an dieser Stelle auf Tabelle 3-3 auf Seite 73 verwiesen.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge sind die möglichen Einsparungen der Betriebsstrategien für die jeweiligen Distanzklassen in Abbildung 4-16 dargestellt.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-16 Minimale und maximale Differenz der Stufe 4 Betriebskosten und der Betriebskosten für den nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für das Jahr 2023. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf batterieelektrische Fahrzeuge.

Die Einsparungen für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug sind identisch zu denen der vorherigen Betrachtung. Dies liegt daran, dass angenommen wird, dass die Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug auch in der vorherigen Betrachtung nicht wegfallen, weil der Fahrer beim Fahrzeug bleiben muss.

Für die übrigen Betriebsstrategien ergibt sich für Fahrtweiten über 500 km ebenfalls das gleiche Bild wie für die Betrachtung mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die Gesamtersparnis ist nun jedoch für Fahrtweiten über 1000 km um 0,01 €/km geringer, was den Lohnkosten während der Be- und Entladung entspricht.

Für geringe Fahrtweiten ergibt sich jedoch ein komplett verschiedenes Bild im Vergleich zur Betrachtung mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge.

Mit Ausnahme des Aufliegerwechsels bietet keine Betriebsstrategie für Fahrtweiten bis zu 50 km ein Einsparungspotential. Diese Fahrtweite war in der vorherigen Betrachtung mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge die Fahrtweite mit dem größten Einsparungspotential.

Weiterhin nimmt das Einsparungspotential für alle Betriebsstrategien mit der Fahrtweite zu. Dies ist dadurch zu begründen, dass die einzige Einsparungsmöglichkeit der Stufe 4 Betriebsstrategien in den Fahrerkosten liegt. Je länger die Fahrtweite ist, desto größer ist der Autobahnanteil und somit der automatisiert stattfindende Teil der Fahrt.

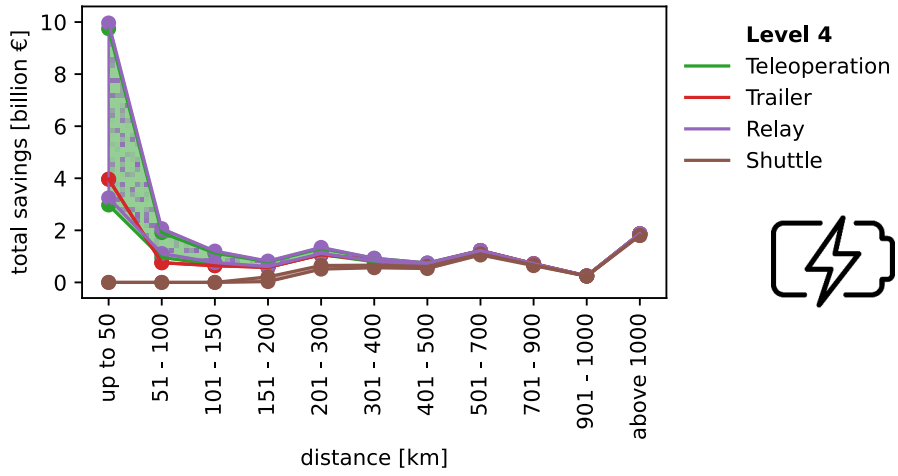
Mögliche jährliche Gesamteinsparungen im deutschen Straßengüterverkehr durch den Stufe 4 Betrieb

Aus den Einsparungspotentialen der Stufe 4 Betriebsstrategien pro Kilometer werden nun die möglichen jährlichen Gesamteinsparungen im deutschen Straßengüterverkehr bestimmt.

Für die Berechnung der möglichen Gesamteinsparungen wird davon ausgegangen, dass alle Lastkraftwagen, für die eine Automatisierung die Betriebskosten im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb reduzieren kann, automatisiert sind. Es werden die Einsparungspotentiale der Stufe 4 Betriebsstrategien pro Kilometer für die jeweiligen Distanzklassen mit der jährlichen Gesamtfahrleistung der Distanzklassen aus Tabelle 3-10 auf Seite 96 multipliziert. Dabei werden nur die positiven Einsparungspotentiale berücksichtigt.

Die möglichen jährlichen Gesamteinsparungen werden im Folgenden zuerst für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge und anschließend ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge betrachtet.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge sind die möglichen jährlichen Gesamteinsparungen der Betriebsstrategien für die jeweiligen Distanzklassen in Abbildung 4-17 dargestellt.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-17 Minimale und maximale jährliche Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch die Stufe 4 Betriebsstrategien verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf batterieelektrische Fahrzeuge im Jahr 2023 und die zugrundeliegende Fahrleistung auf das Jahr 2019.

Die größten Einsparungen treten für alle Stufe 4 Betriebsstrategien mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km auf. Die Einsparungen liegen für diese Distanzklasse für die Teleoperation und die Staffelfahrten bei 3,0 – 10,0 Milliarden € und haben damit einen Anteil von 25–50% an der Gesamtersparnis.

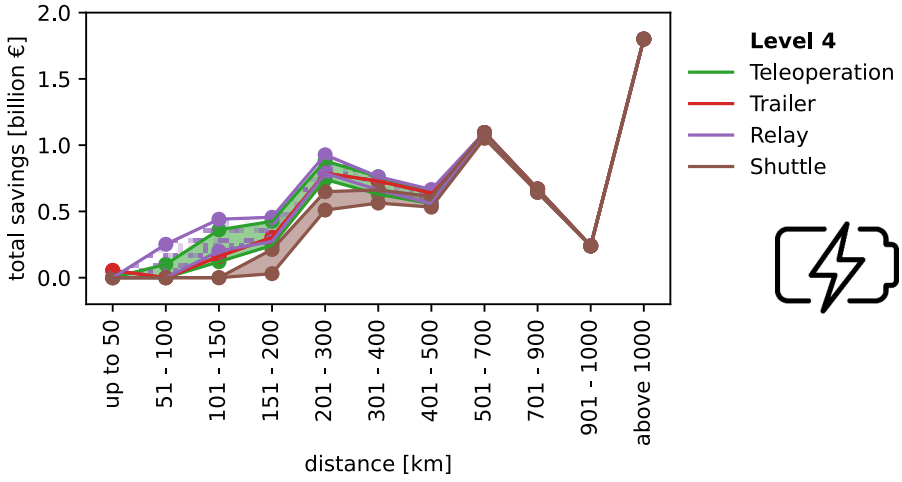
Die Fahrleistung der Distanzklasse entspricht 12,8% der Gesamtfahrleistung aller Distanzklassen. Die Einsparungen von 25–50% ergeben sich daher nicht auf Grund einer hohen Fahrleistung, sondern auf Grund hoher Einsparungen pro Kilometer für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km.

Für den Stufe 4 Betrieb mit Zubringerfahrzeug treten für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km keine Einsparungen auf. Die Gesamteinsparungen aller Distanzklassen für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug liegen mit 5,4–5,9 Milliarden € unterhalb der Einsparungen der anderen Stufe 4 Betriebsstrategien allein für die Distanzklasse mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km.

Für Einzelfahrtweiten über 150 km entstehen die Unterschiede zwischen den Ersparnissen der einzelnen Distanzklassen durch Unterschiede in den jeweiligen Fahrleistungen der Distanzklassen. Wie in Abbildung 4-15 auf Seite 142 dargestellt, sind die Einsparungspotentiale der einzelnen Stufe 4 Betriebsstrategien pro Kilometer mit Ausnahme des Betriebs mit Zubringerfahrzeug für die Distanzklassen mit Einzelfahrtweiten über 150 km nahezu identisch[88]. Die einzigen Unterschiede in den Einsparungen der Distanzklassen können daher nur aus den jeweiligen Fahrleistungen entstehen. Wie in Tabelle 3-10 auf Seite 96 dargestellt, unterscheiden sich die Fahrleistungen der Distanzklassen deutlich.

Für den Vergleich mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge sind die möglichen jährlichen Gesamteinsparungen der Betriebsstrategien für die jeweiligen Distanzklassen in Abbildung 4-18 dargestellt.

[88] Für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug gilt das Gleiche für Einzelfahrtweiten ab 300 km.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-18 Minimale und maximale jährliche Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch die Stufe 4 Betriebsstrategien verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf batterieelektrische Fahrzeuge im Jahr 2023 und die zugrundeliegende Fahrleistung auf das Jahr 2019.

Die Einsparungen für den Betrieb mit Zubringerfahrzeug bleiben im Vergleich zur vorherigen Betrachtung mit Berücksichtigung der Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge unverändert, weil die Einsparungspotentiale pro Kilometer unverändert sind.

Für alle übrigen Betriebsstrategien zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede zur vorherigen Betrachtung.

Während kurze Fahrtweiten unter 100 km zuvor einen wesentlichen Anteil an den Gesamteinsparungen gehabt haben, lassen sich nun für alle Betriebsstrategien nahezu keine Einsparungen für Fahrtweiten unter 100 km erzielen.

Die größten Einsparungen ergeben sich für alle Betriebsstrategien für Fahrtweiten über 1000 km auf Grund der hohen Fahrleistung in dieser Distanzklasse. Wie in Abbildung 4-16 auf Seite 144 dargestellt, sind die Einsparungspotentiale pro Kilometer für die einzelnen Betriebsstrategien für Einzelfahrtweiten über 300 km mit steigender Fahrtweite nahezu konstant. Die einzigen Unterschiede in den Einsparungen der Distanzklassen können daher erneut nur aus den jeweiligen Fahrleistungen entstehen Wie in Tabelle 3-10 auf Seite 96 dargestellt, ist die Fahrleistung der Distanzklasse mit Einzelfahrtweiten über 1000 km mit 6,9 Mrd. km am höchsten, während die Fahrleistung der Distanzklasse mit Einzelfahrtweiten im Bereich 901–1000 km mit 0,9 Mrd. km am niedrigsten ist.

Zur Bestimmung der möglichen Gesamteinsparungen im deutschen Straßengüterverkehr durch den Stufe 4 automatisierten Betrieb ist zusätzlich die Eignung der einzelnen Betriebsstrategien für die verschiedenen Einsatzbereiche zu berücksichtigen.

Bei der Einführung der Stufe 4 Betriebsstrategien in Unterabschnitt 3.1.3 wurden der Betrieb mit Staffelfahrten und Aufliegerwechsel als mögliche Betriebsstrategien für Übergabeorte mit hohem Verkehrsaufkommen, die beispielsweise ein Logistikzentrum in der Nähe haben,

beschrieben. Sie sind somit nicht für den gesamten Güterverkehr geeignet. In der Analyse des Einsparungspotentials wurde dies allerdings bisher nicht weiter berücksichtigt.

Die Staffelfahrt stellt mit Ausnahme von einem einzigen Einsatzprofil, für das der Aufliegerwechsel die günstigste Betriebsstrategie ist, die günstigste Stufe 4 Betriebsstrategie dar. Abschätzungen des maximal möglichen Einsparungspotentials beziehen sich somit auf diese.

Im Gegensatz zum Betrieb mit Staffelfahrten und Aufliegerwechsel ist der Betrieb mit Zubringerfahrzeug und Teleoperation unabhängig vom Güterverkehrsaufkommen.

Der Betrieb mit Zubringerfahrzeug ist überall möglich, besitzt jedoch die höchsten Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien. Die Anwendung des Betriebs mit Zubringerfahrzeug wird sich daher auf die Fälle beschränken, in denen die anderen Betriebsstrategien nicht anwendbar sind.

Der Betrieb mit Teleoperation ist theoretisch ebenfalls überall möglich, vorausgesetzt es kann eine stabile Verbindung durch eine durchgängige Netzabdeckung entlang der Route abseits der Autobahn, auf der die Teleoperation stattfindet, sichergestellt werden. Die automatisierten Fahrfunktionen und die Teleoperation können sich jedoch ergänzen, um die Anforderungen an die Netzabdeckung zu reduzieren und die möglichen Anwendungsbereiche der Teleoperation zu erweitern. Der menschliche Fahrer muss das Fahrzeug nicht während der gesamten Fahrt abseits der Autobahn fernsteuern, sondern kann lediglich als Sicherheitsfahrer dienen und die tatsächliche Kontrolle über das Fahrzeug nur in bestimmten Situationen übernehmen. Das Fahrzeug sollte in der Lage sein, selbstständig unfallfrei zu fahren. Bei einem Verbindungsabbruch kann sich das Fahrzeug, falls es in eine Situation gerät, die es nicht selbstständig bewältigen kann, in eine sichere Position bringen. Die Fahrt kann dann fortgesetzt werden, nachdem die Verbindung wieder hergestellt ist und der menschliche Fahrer die Situation für das Fahrzeug gelöst hat.

Auf die möglichen Gesamteinsparungen im deutschen Straßengüterverkehr hat die Berücksichtigung der Verfügbarkeit der Stufe 4 Betriebsstrategien keinen großen Einfluss. Wird der Betrieb mit Staffelfahrten komplett ignoriert und stattdessen angenommen, dass alle Fahrten im Betrieb mit Teleoperation stattfinden, nehmen die maximalen Gesamteinsparungen um 4,5% ab. Die Abweichungen sind damit deutlich geringer als die Spannweite zwischen den minimalen und maximalen Einsparungen durch den Staffelbetrieb von 17,2%.

Entwicklung der relativen Gesamteinsparungen im deutschen Straßengüterverkehr durch automatisierte Lastkraftwagen

Die Einsparungen in den Gesamtbetriebskosten durch den automatisierten Betrieb sind den Gesamtbetriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs entgegenzustellen. Wie in den Analysen in Unterabschnitt 4.1.2 gezeigt, nehmen die Betriebskosten des automatisierten Betriebs insbesondere durch den Übergang zum vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb im zeitlichen Verlauf von 2023 bis 2050 deutlich ab, während die Betriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs weniger stark abnehmen. Dies führt dazu, dass die möglichen jährlichen Gesamteinsparungen im Zeitraum von 2023 bis 2050 zunehmen.

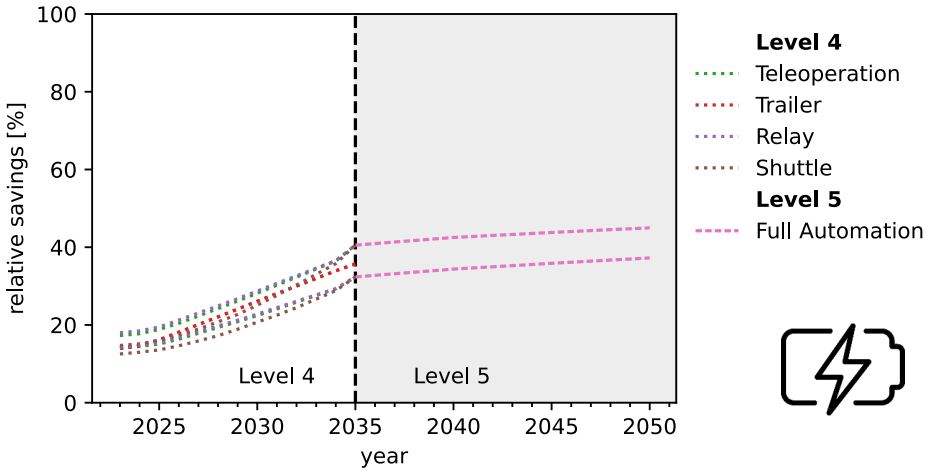
Im Folgenden wird die zeitliche Entwicklung der relativen Gesamteinsparungen im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb automatisierter Lastkraftwagen betrachtet. Dafür wird weiterhin davon ausgegangen, dass alle Lastkraftwagen, für die eine Automatisierung die Betriebskosten im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb reduzieren kann, automatisiert

sind. Es findet somit keine Modellierung des Markthochlaufs automatisierter Lastkraftwagen statt. Stattdessen wird durch den gewählten Ansatz die zeitliche Entwicklung der Einsparungspotentiale der einzelnen Betriebsstrategien pro Kilometer abgebildet.

Die Bestimmung der relativen Gesamteinsparungen bezieht sich weiterhin ausschließlich auf Fahrzeuge mit batterieelektrischen Antriebssträngen. Die Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge sind abhängig vom jeweiligen Antriebsstrang. Die absoluten Einsparungen in den Betriebskosten durch die Automatisierung der Fahrzeuge sind jedoch unabhängig vom Antriebsstrang, weil die unterschiedlichen Kosten der Antriebsstränge gleichermaßen für die automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeuge gelten. Die relativen Gesamteinsparungen fallen dadurch insgesamt unterschiedlich für die verschiedenen Antriebsstränge aus. Die relativen Gesamteinsparungen für Fahrzeuge mit Diesel-Verbrennungsmotoren sowie für brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge sind im Anhang in Abbildung A-1 bis Abbildung A-4 dargestellt.

Als Vergleichswert für die Bestimmung der relativen Gesamteinsparungen dienen die Gesamtbetriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs. Es findet erneut ein Vergleich mit und ein Vergleich ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge statt.

Die Entwicklung des relativen Einsparungspotentials des automatisierten Betriebs im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für den Zeitraum von 2023 bis 2050 ist in Abbildung 4-19 dargestellt.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

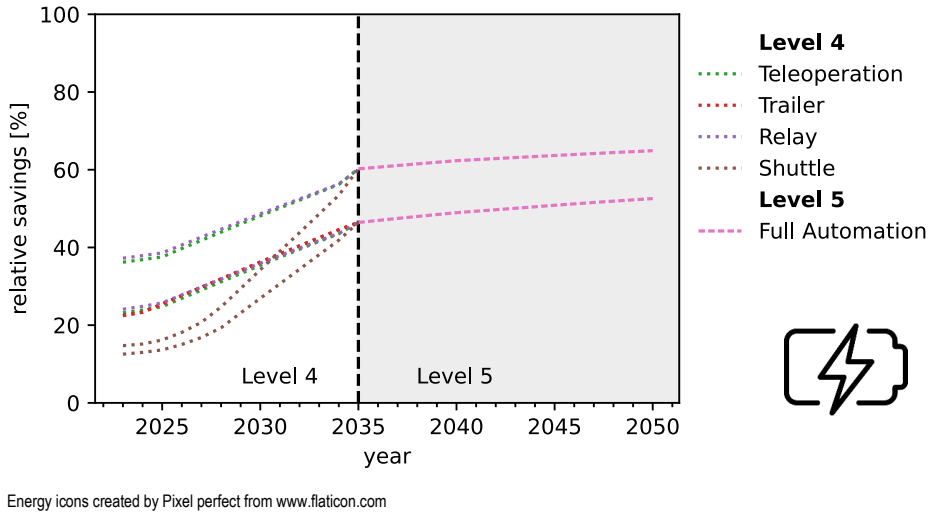
Abbildung 4-19 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf batterieelektrische Fahrzeuge.

Der größte Unterschied in der Kostenentwicklung ergibt sich dabei für den Übergang vom Stufe 4 zum Stufe 5 Betrieb. Für den reinen Stufe 4 Betrieb im Jahr 2023 liegen die Einsparungen bei 12,5–18,0%. Für den Stufe 5 Betrieb im Jahr 2035 liegen die Einsparungen bei 32,4–40,5%. Der Übergang vom Jahr 2024 bis 2035 stellt eine Kombination aus einem Stufe 4 automatisierten Betrieb der Fahrzeuge am Anfang ihrer Haltedauer und einem Stufe 5 automatisiertem Betrieb am Ende ihrer Haltedauer dar. Unterschiede zwischen dem Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb ergeben sich aus dem Wegfall der Fahrerkosten, dem Wegfall der Fahrerkabine und der Abnahme der Kosten des Automatisierungssystems im Zeitraum von 2023 bis 2035.

Im Zeitraum von 2035 bis 2050 nimmt das relative Einsparungspotential für vollständig automatisierte Fahrzeuge weiterhin leicht zu. Für den Stufe 5 Betrieb im Jahr 2050 liegen die Einsparungen bei 37,2–45,0%. Die Zunahme der relativen Einsparungen im Zeitraum von 2035 bis 2050 um 11,1–14,8% ist auf eine Abnahme der Kosten des Automatisierungssystems und eine Abnahme der Gesamtbetriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs als Referenzgröße zurückzuführen. Die Kosten des Automatisierungssystems nehmen von 2035 bis 2050 von 25.000 € auf 15.000 € ab, wodurch die Absoluten Einsparungen um 4,0–4,9% zunehmen. Die Zunahme der Absoluten Einsparungen entspricht weniger als der Hälfte der Zunahme der relativen Einsparungen, sodass die Zunahme der relativen Einsparungen zu größeren Teilen auf die geringeren Gesamtbetriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs zurückzuführen ist.

Die beschriebene Entwicklung der Einsparungen lässt darauf schließen, dass die wesentlichen Einsparungen automatisierter Fahrzeuge in den Fahrerkosten liegen und die Kosten für das Automatisierungssystem einen geringeren Einfluss haben. Wie in Unterabschnitt 4.1.2 bereits diskutiert, haben die Zusatzkosten für das Automatisierungssystem nur für kleine Fahrzeuge einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebskosten, doch auch für diese bieten die Fahrerkosten einen größeren Hebel für die Kostenreduktion. Weiterhin lasen sich, wie in Unterabschnitt 4.1.3 gezeigt, die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien durch einen höheren Automatisierungsanteil deutlich reduzieren. Für die zukünftige Entwicklung des Einsparungspotential ist somit weniger eine Kostenreduktion für das Automatisierungssystem bedeutend als die Erhöhung des Streckenanteils, der automatisiert stattfinden kann.

Die Entwicklung des relativen Einsparungspotentials des automatisierten Betriebs im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge für den Zeitraum von 2023 bis 2050 ist in Abbildung 4-20 dargestellt.



Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-20 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf batterieelektrische Fahrzeuge.

Im Vergleich zur Betrachtung ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge fallen die relativen Einsparungen nun deutlich größer aus. Für den reinen Stufe 4 Betrieb im Jahr 2023 liegen die Einsparungen bei 12,5–37,2%. Die Untergrenze ist dabei unverändert, da diese durch den Betrieb mit Zubringerfahrzeug zustande kommt und dieser für die beiden Betrachtungen die gleichen Kosten besitzt. Die Untergrenze der anderen Stufe 4 Betriebsstrategien liegt hingegen bei 22,5%. Für den Stufe 5 Betrieb im Jahr 2035 liegen die Einsparungen bei 46,4–60,2%. Die Untergrenze der Einsparungen liegt damit oberhalb der Obergrenze der Einsparungen für die Betrachtung ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Im Jahr 2050 liegen die Einsparungen sogar bei 52,6–64,9%.

Validierung der relativen Einsparungen mit Literaturwerten

Zur Einordnung der in dieser Arbeit ermittelten Einsparungen im Straßengüterverkehr durch automatisierte Fahrzeuge dienen die Studien von Ghandriz et al. [102], dem *International Transport Forum* [6], *Roland Berger* [97] und Wadud [101]. Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit und der anderen Studien ist in Abbildung 4-21 dargestellt.

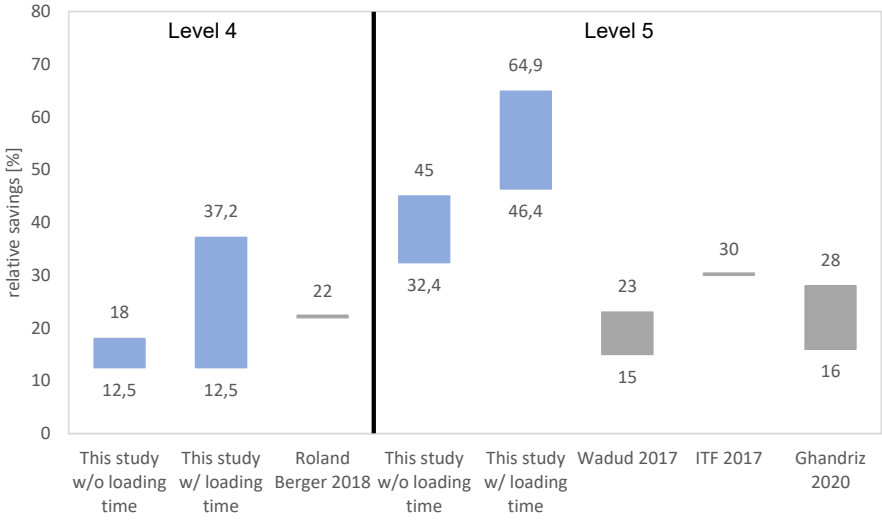


Abbildung 4-21 Vergleich der ermittelten Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen mit Literaturwerten. Referenzen: Ghandriz 2020 [102], ITF 2017 [6], Roland Berger 2018 [97], Wadud 2017 [101].

Für den Stufe 4 Betrieb lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeit mit den Ergebnissen von *Roland Berger* vergleichen [97]. In der Studie von *Roland Berger* wurde für den Stufe 4 Betrieb im Fernverkehr mit einer Fahrtweite von 800 km und einem automatisiert gefahrenem Streckenanteil von 60% ein Einsparungspotential von 22% berechnet [97].

Das von *Roland Berger* berechnete Einsparungspotential lässt sich mit keinem Einsparungspotential eines einzelnen Einsatzprofils dieser Arbeit direkt vergleichen, weil die von *Roland Berger* gewählte Kombination aus Fahrtweite und automatisiert gefahrenem Streckenanteil stark von den Annahmen in dieser Arbeit abweicht. In dieser Arbeit wird angenommen, dass Fahrtanteile auf Autobahnen im Stufe 4 Betrieb automatisiert stattfinden können. Für eine Fahrtweite von 800 km wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Fahrt nahezu vollständig auf der Autobahn und dadurch nahezu vollständig automatisiert stattfindet. Dies steht im Gegensatz zur Annahme von *Roland Berger*, dass nur 60% der Fahrt automatisiert stattfinden.

Die Berechnung von *Roland Berger* lässt sich jedoch mit den Gesamteinsparungen aller Einsatzprofile dieser Arbeit vergleichen. Der von *Roland Berger* angenommene automatisiert gefahrene Streckenanteil von 60% liegt unterhalb des mittleren Autobahnanteils aller Fahrten in dieser Arbeit von 74,6%[89]. Da der automatisiert gefahrene Teil der Fahrten für diese Arbeit größer ist als von *Roland Berger* angenommen, sollten die berechneten Einsparungen in dieser Arbeit ebenfalls größer sein.

Für den Fall, dass im automatisierten Betrieb keine Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge erzielt werden können, liegen die in dieser Arbeit

[89] Berechnet aus den Autobahnanteilen der Distanzklassen aus Tabelle 3-4 auf Seite 75 und den jeweiligen Fahrleistungen der Distanzklassen aus Tabelle 3-10 auf Seite 95.

bestimmten maximalen Gesamteinsparungen aller Einsatzprofile bei 18% und somit etwa ein Fünftel unterhalb des berechneten Werts von *Roland Berger* von 22%. Abweichungen können dadurch entstehen, dass in der Studie von *Roland Berger* eine größere Fahrtweite von 800 km angenommen wurde, während die durchschnittliche Fahrtweite der in dieser Arbeit modellierten Lastkraftwagen 93,3 km beträgt. Eine kürzere Fahrtweite bedingt häufigere Be- und Entladungen der Fahrzeuge und erhöht damit die Gesamtbetriebskosten. Die relativen Einsparungen durch den Wegfall der Fahrerkosten für die automatisierte Fahrt auf der Autobahn fallen dadurch insgesamt geringer aus.

Werden in dieser Arbeit hingegen für automatisierte Fahrzeuge Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge angenommen, liegt der von *Roland Berger* bestimmte Wert von 22% innerhalb der Spannweite der modellierten Einsparungen von 12,5–37,2%. Einsparungen in den Kosten für die Be- und Entladung werden von *Roland Berger* nicht berücksichtigt, weshalb die in dieser Arbeit bestimmten Einsparungen höher ausfallen sollten als die von *Roland Berger*.

Für den Stufe 5 Betrieb lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeit mit den Ergebnissen von Ghandriz et al. [102], dem *International Transport Forum* [6], und Wadud [101] vergleichen.

Wadud [101] hat in seiner Analyse Einsparungspotentiale von 15–23% für vollständig automatisierte Lastkraftwagen berechnet. Für seine Berechnung hat er Zusatzkosten für das Automatisierungssystem von etwa 20.000 USD und Einsparungen in den Treibstoffkosten von 5% und den Fahrerkosten von 60% angenommen. Die Fahrerkosten werden nur um 60% reduziert angenommen, weil Wadud annimmt, dass die übrigen 40% der Fahrerkosten auf die Zeit für die Be- und Entladung der Fahrzeuge entfallen und daher erhalten bleiben.

Das *International Transport Forum* [6] hat in seiner Studie für den Stufe 5 Betrieb im Fernverkehr Einsparungen in den Gesamtbetriebskosten in Höhe von 30% angenommen. Es wurde dabei angenommen, dass 50% der Fahrerkosten eingespart werden können. Die verbleibenden 50% der Fahrerkosten entfallen dabei auf Fahrtaufgaben, die nicht automatisiert werden können, und Aufgaben abseits der Fahrtaufgaben, die auch für den automatisierten Fall erhalten bleiben. Beide Aufgabentypen werden jedoch nicht weiter spezifiziert.

Ghandriz et al. [102] haben Einsparungen im Bereich von 16–28% durch den automatisierten Betrieb berechnet. Diese entstehen größtenteils aus Einsparungen der Fahrerkosten, welche für den automatisierten Betrieb komplett eliminiert werden. Dafür werden jedoch Kosten für einen Fahrdienstleiter, der die Fahrten plant und koordiniert eingeführt, die 43–44% der ursprünglichen Fahrerkosten entsprechen. In diesen Kosten sind auch die Kosten für die benötigte Kommunikationstechnik und -infrastruktur enthalten, es ist jedoch nicht spezifiziert, wie sich diese Kosten zusammensetzen und wie sie im Verhältnis zu den sonstigen Kosten des Fahrzeugs stehen. Die Kosten können also nicht über ihre einzelnen Kostenaspekte mit denen in dieser Arbeit verglichen werden.

Die möglichen Einsparungen der drei Studien liegen alle unterhalb des in dieser Arbeit berechneten Minimalwerts der Einsparungen durch den vollständig automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge von 32,4%.

Die Annahmen der drei Studien, dass mindestens 40% der Fahrerkosten im automatisierten Betrieb erhalten bleiben, weichen deutlich von den Annahmen in dieser Arbeit ab. In dieser

Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Lohnkosten für die Fahrtzeit für den Stufe 5 automatisierten Betrieb vollständig eingespart werden können, die Lohnkosten während der Be- und Entladung jedoch erhalten bleiben. Wie in Abbildung 4-1 auf Seite 107 dargestellt, haben die Lohnkosten während der Be- und Entladung nur für Einzelfahrtweiten bis zu 100 km für einzelne Einsatzprofile einen Anteil von mehr als 40% an den Fahrerkosten. Für Einzelfahrtweiten über 100 km liegt der Anteil der Lohnkosten während der Be- und Entladung an den Fahrerkosten für alle Einsatzprofile unter 40%. Durch die Automatisierung kann nach den Annahmen dieser Arbeit also ein größerer Teil der Fahrerkosten eingespart werden als von den drei Studien angenommen.

Die Modellierung der Fahr- sowie Be- und Entladezeiten in dieser Arbeit ermöglicht eine nachvollziehbare Abschätzung der Einsparungspotentiale in den Fahrerkosten durch die Automatisierung. In den anderen Studien wird hingegen ein pauschaler Wert für die Einsparungen angenommen.

Die Abschätzung der Gesamteinsparungen in den Betriebskosten in dieser Arbeit scheint insgesamt plausibel. Die Abweichungen zu den anderen Studien lassen sich durch unterschiedliche Annahmen zu den möglichen Einsparungen in den Fahrerkosten erklären. Die Annahmen in dieser Arbeit beruhen auf einer Bottom-Up Modellierung der Fahrzeiten sowie Annahmen zu den Be- und Entladungsprozesse der Fahrzeuge. Für diese Modellierung lassen sich einzelne Annahmen zu den Be- und Entladungszeiten hinterfragen, der gewählte Ansatz liefert jedoch spezifische Kosten für einzelne Einsatzprofile in einem hohen Detaillierungsgrad.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt haben gezeigt, dass bereits durch den Stufe 4 automatisierten Betrieb fast ein Fünftel der Betriebskosten im deutschen Straßengüterverkehr im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb eingespart werden können. Für den reinen Stufe 4 Betrieb im Jahr 2023 liegen die Einsparungen bei 12,5–18,0% ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Für den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb können weitere Teile der Fahrerkosten eliminiert werden, wodurch die Einsparungen auf mehr als eine Drittel der Kosten des nicht-automatisierten Betriebs ansteigen. Für den Stufe 5 Betrieb im Jahr 2035 liegen die Einsparungen bei 32,4–40,5% ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge.

4.1.5 Bestimmung des Fahrerbedarfs

Über die Betriebskosten hinaus, hat die Verwendung automatisierter Fahrzeuge auch eine Auswirkung auf den Fahrerbedarf. Für den vollständig automatisierten Fall kann gänzlich auf menschliche Fahrer zur Durchführung der Fahraufgabe verzichtet werden, für den Stufe 4 automatisierten Betrieb in reduziertem Maße. Das Potential der Reduktion des Fahrerbedarfs durch Stufe 4 automatisierte Fahrzeuge ist dabei besonders interessant, da es bereits in den nächsten Jahren dem vorherrschenden Fahrermangel im Transportsektor entgegenwirken kann. Das Ausmaß der möglichen Reduktion des Fahrerbedarfs durch den automatisierten Betrieb wird daher in diesem Unterabschnitt abgeschätzt.

Die nachfolgenden Ausführungen in diesem Unterabschnitt basieren auf der Veröffentlichung „The Impact of Automated Trucking on the Demand for Human Drivers” [9].

Im Folgenden wird zuerst der Fahrerbedarf für den nicht-automatisierten Betrieb abgeschätzt und validiert, bevor anschließend der Fahrerbedarf für den automatisierten Betrieb abgeschätzt wird.

Abschätzung des Fahrerbedarfs im nicht-automatisierten Betrieb

Für die Berechnung des Fahrerbedarfs ist zuerst die Gesamtfahrzeit abzuschätzen. Dafür wird in einem ersten Schritt die Durchschnittgeschwindigkeit für jede Distanzklasse bestimmt. Diese ergibt sich aus den Fahrtanteilen für den Stadt-, Land- und Autobahnverkehr mit angenommenen Geschwindigkeiten von jeweils 25 km/h, 40 km/h und 70 km/h. Die Fahrtanteile für den Stadt-, Land- und Autobahnverkehr werden dabei für die Distanzklassen entsprechend Tabelle 3-4 auf Seite 76 basierend auf der Fahrtweite gewählt. Aus der Fahrleistung und der Durchschnittsgeschwindigkeit lässt sich dann die Gesamtfahrzeit für jede Distanzklasse berechnen.

Für die Berechnung der Anzahl benötigter Fahrer aus der Gesamtfahrzeit werden eine tägliche Fahrzeit von neun Stunden und 220 Arbeitstage pro Jahr angenommen. Die Abschätzung bezieht sich dabei auf die reine Fahrzeit der Fahrzeuge. Die Be- und Entladezeiten werden für eine erste Betrachtung außer Acht gelassen. In der Validierung der Methodik wird sich jedoch zeigen, dass die Be- und Entladezeiten berücksichtigt werden müssen, um den Fahrerbedarf adäquat abzubilden. Be- und Entladezeiten der Fahrzeuge fallen nicht in die Fahrzeit, müssen jedoch in der Gesamtarbeitszeit der Fahrer berücksichtigt werden.

Der Gesamtfahrerbedarf basierend auf der reinen Fahrzeit ergibt sich für das Jahr 2019 zu 359.000 Fahrern. Davon entfallen ungefähr 18% auf Fahrten mit Fahrtweiten bis zu 50 km. Die nächstgrößeren Anteile von 14% haben jeweils Fahrten mit Fahrtweiten im Bereich 51–100 km und über 1.000 km. Die Abschätzung des Fahrerbedarfs ist in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2 Gesamtfahrzeit und Anzahl benötigter Fahrer im deutschen Straßengüterverkehr für den nicht-automatisierten Betrieb und den Stufe 4 Betrieb nach Distanzklassen. Die Berechnung des Fahrerbedarfs bezieht auf die reine Fahrzeit, Be- und Entladezeiten sind nicht berücksichtigt. Die zurückgelegten Entfernungen stammen aus der Güterverkehrsstatistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen für das Jahr 2019 [156].

Distanzklasse	Zurückgelegte Entfernung [Tsd. km]	Fahrzeit [Tsd. h]	Benötigte Fahrer	Stufe 4 nicht-automatisierte Fahrzeit [Tsd. h]	Stufe 4 benötige Fahrer
≤ 50 km	5.505.544	127.590,8	64.440	121.830,2	61.530
51–100 km	5.038.894	96.901,8	48.940	74.755,1	37.755
101–150 km	4.010.927	69.153,9	34.926	39.669,7	20.035
151–200 km	3.040.186	49.233,8	24.866	20.654,9	10.432
201–300 km	4.637.340	71.124,8	35.922	18.305,3	9.245
301–400 km	3.312.119	48.887,4	24.691	6.124,3	3.093
401–500 km	2.661.607	38.518,2	19.454	1.996,2	1.008
501–700 km	4.382.347	60.908,2	30.762	165,4	84
701–900 km	2.575.819	36.797,4	18.585	0,0	-
901–1000 km	922.604	13.180,1	6.657	0,0	-
> 1000 km	6.925.825	98.940,4	49.970	0,0	-
Gesamt	43.013.212	711.236,8	359.213	283.501,1	143.182

Validierung der Methodik zur Abschätzung des Fahrerbedarfs

Laut den Daten des Bundesamts für Güterverkehr sind für das Jahr 2019 in Deutschland insgesamt 572.000 Berufskraftfahrer sozialversicherungspflichtig gemeldet, 538.215 in Vollzeit und 34.033 in Teilzeit [110]. Der Gesamtwert liegt knapp 59% oberhalb des in dieser Arbeit berechneten Werts von 359.213 Fahrern. Die Abweichungen können sowohl aus der Berechnung der Gesamtfahrzeiten aller Transporte als auch aus den Annahmen zu den täglichen/jährlichen Fahr- und Arbeitszeiten der Fahrer entstehen. Im Folgenden werden die Fahr- und Arbeitszeiten der Fahrer genauer diskutiert.

Die Fahrzeiten der Fahrer werden in dieser Arbeit mit neun Stunden pro Tag an 220 Tagen pro Jahr angenommen. Es ergeben sich dadurch insgesamt 1980 Fahrstunden pro Fahrer pro Jahr. Die gewählten Annahmen zu den Fahrzeiten lassen sich mit den Annahmen anderer Studien vergleichen.

Bray und Cebon nehmen an, dass ein Fahrer elf Stunden pro Tag an 230 Tagen im Jahr fährt [125]. Dadurch ergeben sich 2530 Fahrstunden pro Fahrer pro Jahr. Unter dieser Annahme würde sich der Fahrerbedarf für das Jahr 2019 in dieser Arbeit auf 281.121 Fahrer reduzieren. Der Fahrerbedarf entspräche dann nur noch weniger als der Hälfte der laut den Daten des Bundesamts für Güterverkehr im Jahr 2019 in Deutschland sozialversicherungspflichtig gemeldeten 572.000 Berufskraftfahrern [110].

In der Studie des *International Transport Forum* wird der Fahrerbedarf im Vergleich zu dieser Arbeit nicht über die Fahrzeit, sondern über die Jahresfahrleistung bestimmt [6]. Es wird angenommen, dass ein Fahrer eine gewisse Jahresfahrleistung erbringt. Für einen Fahrer in Europa wird eine Jahresfahrleistung von 58.824 km angenommen und für einen Fahrer in den

USA eine Jahresfahrleistung von 123.457 km. Wird der Ansatz des *International Transport Forum* auf die in dieser Arbeit verwendete Gesamtfahrleistung in Deutschland für das Jahr 2019 übertragen, ergibt sich ein Fahrerbedarf von 348.405 bis 731.221 Fahrern. Diese Spanne beinhaltet sowohl die in dieser Arbeit bestimmte Anzahl von 359.213 Fahrern als auch die Anzahl von 572.000 Berufskraftfahrern, die laut den Daten des Bundesamts für Güterverkehr im Jahr 2019 in Deutschland sozialversicherungspflichtig gemeldet waren [110].

Die Jahresfahrleistung eines Fahrers wird in dieser Arbeit zu hoch abgeschätzt. Aus der in dieser Arbeit bestimmten Anzahl an Fahrern und der gegebenen Gesamtfahrleistung aller Fahrzeuge ergibt sich eine Jahresfahrleistung pro Fahrer von 119.743 km. Dieser Wert liegt mit Ausnahme des Einsatzprofils der Sattelzugmaschine oberhalb der Jahresfahrleistung aller in dieser Arbeit analysierten Einsatzprofile. Das bedeutet, dass ein Fahrer die gesamte Jahresfahrleistung für ein Fahrzeug erbringt und darüber hinaus noch Teile der Jahresfahrleistung für andere Fahrzeuge.

Die Überschätzung der Jahresfahrleistung der Fahrer ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass eine Fahrzeit von neun Stunden pro Tag für die meisten Einsatzprofile zu viel ist. Insbesondere bei kürzeren Fahrten kommt es zu vielen Pausen- und Wartezeiten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Dadurch wird ein Fahrer für ein solches Einsatzprofil keine neun Stunden reine Fahrzeit pro Tag erreichen.

Im Folgenden sollen deshalb auch die Wartezeiten während der Be- und Entladung berücksichtigt werden. Die Beladungsdauern werden nach jeder Fahrt entsprechend der Einsatzprofile mit einer bis drei Stunden angenommen (siehe Tabelle 3-3 auf Seite 74). Es wird nicht mehr die reine Fahrzeit, sondern die gesamte Arbeitszeit der Fahrer betrachtet.

Dazu wird angenommen, dass ein Fahrer insgesamt zwölf Stunden pro Tag als Arbeitszeit zur Verfügung hat. Die Arbeitszeit setzt sich dabei aus einer beliebigen Anzahl an Stunden für die Be- und Entladezeiten und einer maximalen Fahrzeit von neun Stunden zusammen.

Für die Berechnung des Fahrerbedarfs wird zuerst erneut über die reine Gesamtfahrzeit die Anzahl benötigter Fahrer bestimmt. Anschließend wird geprüft, welchen Anteil der Be- und Entladungszeiten diese Fahrer bereits übernehmen können. Abschließend wird berechnet, wie viele Fahrer für die überschüssigen Be- und Entladungszeiten zusätzlich benötigt werden. Die Abschätzung des Fahrerbedarfs inklusive der Be- und Entladezeiten ist in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3 Gesamtfahrzeit und Anzahl benötigter Fahrer im deutschen Straßengüterverkehr für den nicht-automatisierten Betrieb nach Distanzklassen unter Berücksichtigung der Be- und Entladezeiten. Der Fahrerbedarf für die reine Fahrzeit stammt aus Tabelle 4-2 auf Seite 156. In Anlehnung an [9].

Distanzklasse	Benötigte Fahrer (reine Fahrzeit)	Minimale Be- und Entladezeit [Tsd. h]	Zusätzlich Benötigte Fahrer (für Be- und Entladung)	Maximale Be- und Entladezeit [Tsd. h]	Zusätzlich Benötigte Fahrer (für Be- und Entladung)
≤ 50 km	64.440	269.880	86.117	809.639	290.571
51–100 km	48.940	69.985	14.274	139.969	40.784
101–150 km	34.926	32.716	3.661	65.431	16.053
151–200 km	24.866	17.553	432	35.106	7.081
201–300 km	35.922	18.943	0	37.887	5.371
301–400 km	24.691	9.614	0	19.229	1.111
401–500 km	19.454	5.944	0	11.887	0
501–700 km	30.762	7.556	0	7.556	0
701–900 km	18.585	3.348	0	3.348	0
901–1000 km	6.657	982	0	982	0
> 1000 km	49.970	4.625	0	4.625	0
Gesamt	359.213	441.146	104.484	1.135.659	360.971

Mit diesem Ansatz ergibt sich die Anzahl benötigter Fahrer zu 463.697 bis 720.184 Fahrern. Der obere Wert liegt leicht unterhalb der höchsten Abschätzung von 731.221 Fahrern, die sich unter Verwendung des Ansatzes der Studie des *International Transport Forum* ergibt [6]. Die Anzahl von 572.000 Berufskraftfahrern, die laut den Daten des Bundesamts für Güterverkehr im Jahr 2019 in Deutschland sozialversicherungspflichtig gemeldet waren [110], liegt nun auch in der berechneten Spanne. Der größte Anteil zusätzlich benötigter Fahrer entfällt dabei auf Fahrten mit Fahrtweiten bis zu 50 km. Dies liegt daran, dass Be- und Entladungen im Vergleich zu längeren Fahrtstrecken häufiger stattfinden und somit einen größeren Anteil an der Gesamtarbeitszeit haben. Für Fahrten mit Fahrtweiten über 400 km entsteht auch unter Annahme maximaler Be- und Entladezeiten kein Zusatzbedarf an Fahrern für die Be- und Entladung der Fahrzeuge.

Insgesamt zeigt die Validierung, dass der gewählte Ansatz eine plausible Abschätzung des Fahrerbedarfs liefert. Für die Abschätzung des Fahrerbedarfs ist es notwendig neben der reinen Fahrzeit auch die Be- und Entladungszeiten im Rahmen der möglichen Gesamtarbeitszeit der Fahrer zu betrachten.

Abschätzung des Fahrerbedarfs im Stufe 4 automatisierten Betrieb

Für die Abschätzung des Fahrerbedarfs für die Stufe 4 Betriebsstrategien wird davon ausgegangen, dass der Autobahnanteil der Fahrten automatisiert stattfindet und für diese Zeit kein Fahrer benötigt wird. Ansonsten findet die Abschätzung auf die gleiche Weise statt wie für den nicht-automatisierten Fall.

Die Betrachtung des Fahrerbedarfs erfolgt zuerst erneut nur für die reine Fahrzeit und ist in Abbildung 4-22 sowie Tabelle 4-2 auf Seite 156 dargestellt.

Insgesamt werden für den Stufe 4 Betrieb über alle Distanzklassen 143.182 Fahrer für die reine Fahrzeit benötigt. Der Fahrerbedarf ließe sich also durch eine Stufe 4 Automatisierung um 60,1% im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall reduzieren.

Durch die unterschiedlichen Autobahnanteile der Distanzklassen nimmt der Fahrerbedarf für den Stufe 4 automatisierten Betrieb im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb unterschiedlich stark für die einzelnen Distanzklassen ab. Für kurze Einzelfahrtweiten bleibt ein großer Teil des Fahrerbedarfs erhalten. Für Einzelfahrtweiten bis zu 50 km beträgt der Autobahnanteil 15%, die Anzahl der benötigten Fahrer nimmt daher nur um 4,5% ab. Für Einzelfahrtweiten im Bereich 51–100 km nimmt der Fahrerbedarf bereits um 22,9% ab und für Einzelfahrtweiten über 700 km wird angenommen, dass 100% der Fahrt auf der Autobahn stattfinden und somit keine Fahrer mehr benötigt werden.

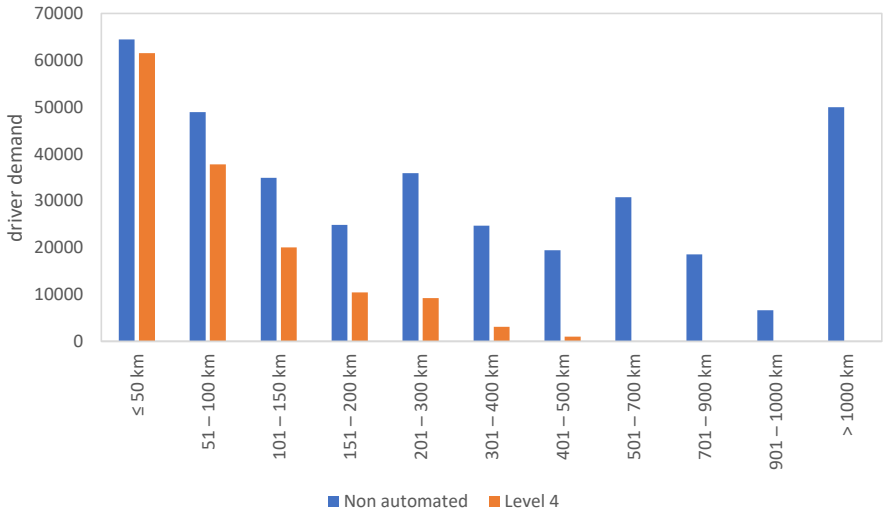


Abbildung 4-22 Anzahl benötigter Fahrer für die reine Fahrzeit im deutschen Straßengüterverkehr für den nicht-automatisierten Betrieb und den Stufe 4 Betrieb nach Distanzklassen. In Anlehnung an [9].

Die bisherige Betrachtung vernachlässigt die Wirtschaftlichkeit der Betriebsstrategien. Wie in Abbildung 4-10 auf Seite 128 gezeigt, ist der Stufe 4 Betrieb für einige Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 150 km nicht kosteneffektiv im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb. In einer weiteren Betrachtung wird deshalb der Fahrerbedarf noch einmal für den Stufe 4 Betrieb abgeschätzt unter der Annahme, dass Stufe 4 Betriebsstrategien nur verwendet werden, wenn sie kosteneffektiv sind.

Der Einfluss der Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit auf die Einsparungen im Fahrerbedarf durch den Stufe 4 automatisierten Betrieb ist gering. Werden automatisierte Fahrzeuge erst ab Einzelfahrtweiten von 150 km eingesetzt, liegt der Fahrerbedarf bei 172.168 Fahrern. Es können insgesamt noch 52,1% des Fahrerbedarfs im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb eingespart werden. Die Änderungen sind damit gering gegenüber den Einsparungen von 60,1% ohne Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit den Stufe 4 Betrieb für kurze Fahrtweiten

ausschließt. Für kurze Fahrtweiten ist der automatisiert gefahrene Teil der Fahrten jedoch ohnehin gering, sodass der Stufe 4 Betrieb den Fahrerbedarf für diese nur in geringem Ausmaß verringern würde. Die Einsparungen im Fahrerbedarf sind dadurch robust gegenüber Änderungen in den Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen, die darüber entscheiden, ob der Stufe 4 automatisierte Betrieb für kurze Einzelfahrtweiten kosteneffektiv gegenüber dem nicht-automatisierten Betrieb ist oder nicht.

Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit der Betriebsstrategien wieder außer Acht gelassen. Es wird wieder angenommen, dass alle Fahrzeuge in allen Distanzklassen automatisiert sind.

Für die Betrachtung der Be- und Entladezeiten gibt es zwei Varianten, die sich unterschiedlich auf den Fahrerbedarf im automatisierten Betrieb auswirken. In der ersten Variante stellen die Be- und Entladezeiten im nicht-automatisierten Betrieb Wartezeiten für den Fahrer dar. Der Fahrerbedarf könnte dementsprechend im automatisierten Betrieb um diesen Anteil reduziert werden. Diese Variante entspricht der Kostenbetrachtung mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. In der zweiten Variante ist der Fahrer aktiv an der Be- und Entladung der Fahrzeuge beteiligt. In diesem Fall bleibt der Fahrerbedarf für die Be- und Entladung auch für den automatisierten Betrieb erhalten. Diese Variante entspricht der Kostenbetrachtung ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge.

Für die erste Variante, dass Be- und Entladezeiten im automatisierten Betrieb wegfallen, weil sie im nicht-automatisierten Betrieb lediglich Wartezeiten für den Fahrer darstellen, bleibt der Fahrerbedarf für den automatisierten Betrieb im Vergleich zur Betrachtung der reinen Fahrzeit unverändert bei 143.182 Fahrern. Dies würde eine Reduktion des Fahrerbedarfs gegenüber dem nicht-automatisierten Betrieb um 69,1–80,1% bedeuten.

Für die zweite Variante, dass der Fahrer aktiv an der Be- und Entladung der Fahrzeuge beteiligt ist, erhöht sich der Fahrerbedarf für den automatisierten Betrieb im Vergleich zur Betrachtung der reinen Fahrzeit zu 274.487 bis 537.561 Fahrern. Die Einsparungen im Fahrerbedarf liegen damit bei 40,8% und 25,4% im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb. Der Mehrbedarf an Fahrern für die Be- und Entladung ist dabei für den automatisierten Fall größer als für den nicht-automatisierten Fall, weil die Gesamtanzahl an Fahrern, die für die reine Fahrzeit benötigt werden, geringer ist, die Be- und Entladezeiten jedoch gleichbleiben. Es kann folglich nur ein geringerer Teil der Be- und Entladezeiten bereits von den für die reine Fahrzeit benötigten Fahrern bewältigt werden und Zusatzbedarf an Fahrern, die für die Be- und Entladung benötigt werden, nimmt zu. Die Abschätzung des Fahrerbedarfs inklusive der Be- und Entladezeiten ist in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4 Gesamtfahrzeit und Anzahl benötigter Fahrer im deutschen Straßengüterverkehr für den Stufe 4 automatisierten Betrieb nach Distanzklassen unter Berücksichtigung der Be- und Entladezeiten. Der Fahrerbedarf für die reine Fahrzeit stammt aus Tabelle 4-2 auf Seite 156. In Anlehnung an [9].

Distanzklasse	Benötigte Fahrer (reine Fahrzeit)	Minimale Be- und Entladezeit [Tsd. h]	Zusätzlich Benötigte Fahrer (für Be- und Entladung)	Maximale Be- und Entladezeit [Tsd. h]	Zusätzlich Benötigte Fahrer (für Be- und Entladung)
≤ 50 km	61.530	269.880	86.845	809.639	291.299
51–100 km	37.755	69.985	17.071	139.969	43.58
101–150 km	20.035	32.716	7.383	65.431	19.776
151–200 km	10.432	17.553	4.041	35.106	10.69
201–300 km	9.245	18.943	4.864	37.887	12.04
301–400 km	3.093	9.614	2.869	19.229	6.51
401–500 km	1.008	5.944	1.999	11.887	4.251
501–700 km	84	7.556	2.841	7.556	2.841
701–900 km	-	3.348	1.268	3.348	1.268
901–1000 km	-	982	372	982	372
> 1000 km	-	4.625	1.752	4.625	1.752
Gesamt	143.182	441.146	131.305	1.135.659	394.379

Für den Fall, dass der Fahrer aktiv an der Be- und Entladung beteiligt ist, kann der Zusatzbedarf an Fahrern für die Be- und Entladung für den automatisierten Betrieb weiter reduziert werden, indem an Logistikzentren Lagerarbeiter die Be- und Entladung der Fahrzeuge übernehmen. Die Fahrer können in diesem Fall direkt das Fahrzeug wechseln und mit einem anderen Fahrzeug weiterfahren, während die Lagerarbeiter die Be- und Entladung des Fahrzeugs durchführen. Der Fahrerbedarf lässt sich dadurch reduzieren, während der Bedarf an Lagerarbeitern zunimmt. Für die Tätigkeit der Lagerarbeiter ist dabei eine geringere Qualifikation notwendig als für das Fahren eines Lastkraftwagens.

Die Einsparungen im Fahrerbedarf durch den Stufe 4 automatisierten Betrieb liegen in jedem betrachteten Fall oberhalb der 10% unbesetzten Stellen, welche für das Jahr 2021 von der *International Road Transport Union* für Europa gemeldet wurden [4]. Das automatisierte Fahren kann somit nicht nur langfristig für den Fall der vollständigen Automatisierung, sondern auch schon während des Stufe 4 Betriebs eine Lösung sein, dem Fahrermangel zu begegnen. Darüber hinaus kann der Stufe 4 automatisierte Betrieb auch ohne eine direkte Senkung des Fahrerbedarfs dem Fahrermangel entgegenwirken, indem es den Beruf des Kraftfahrers attraktiver macht. Langstreckenfahrten können mit Stufe 4 automatisierten Fahrzeugen durchgeführt werden, ohne dass ein menschlicher Fahrer mehrere Tage unterwegs sein und von zuhause wegbleiben muss. Menschliche Fahrer haben in einem solchen Stufe 4 automatisierten Betrieb ausschließlich regionale Einsatzbereiche und können dementsprechend am Ende eines Arbeitstages nach Hause fahren. Der Beruf wird somit besser vereinbar mit einem Familien- und Privatleben.

Die Ausführungen in diesem Unterabschnitt haben gezeigt, dass bereits der Stufe 4 Betrieb einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Fahrerbedarfs leisten und dem Fahrermangel entgegenwirken kann. Für den Stufe 4 Betrieb lässt sich der Fahrerbedarf um mindestens ein Viertel gegenüber dem nicht-automatisierten Fall reduzieren. Die Einsparungen im Fahrerbedarf sind dabei robust gegenüber Änderungen in den Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen, die darüber entscheiden, ob der Stufe 4 automatisierte Betrieb für kurze Einzelfahrtweiten kosteneffektiv gegenüber dem nicht-automatisierten Betrieb ist oder nicht, weil die Einsparungen im Fahrerbedarf durch die Automatisierung kurzer Fahrtweiten gering sind.

In diesem Abschnitt wurde der Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Betriebskosten und den Fahrerbedarf im Straßengüterverkehr untersucht.

Für den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb liegen die Betriebskosten für alle untersuchten Einsatzprofile unterhalb der Kosten für den nicht-automatisierten Betrieb. Die vollständige Eliminierung der Fahrerkosten ist für alle Einsatzprofile ausreichend, um die Zusatzkosten des Automatisierungssystems zu übertreffen. Der Einfluss der Automatisierung auf die Betriebskosten für verschiedene Einsatzprofile und Stufe 4 Betriebsstrategien sieht jedoch ganz unterschiedlich aus. Unter der Annahme, dass der Autobahnverkehr im Stufe 4 Betrieb automatisiert stattfindet und für Fahrten abseits der Autobahn ein menschlicher Fahrer benötigt wird, ist der Stufe 4 Betrieb für den Betrieb mit Staffelfahrten, Teleoperation und Aufliegerwechsel für alle Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten von über 100 km kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Kosten für die Transferfahrten sorgen hingegen dafür, dass der Betrieb mit Zubringerfahrzeug erst für Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten über 150 km kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb. Für Einsatzprofile, die im reinen Stufe 4 Betrieb höhere Betriebskosten haben als der nicht-automatisierte Betrieb, kann der automatisierte Betrieb durch einen Mischbetrieb aus einem Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb über die Haltedauer des Fahrzeugs günstiger werden als der nicht-automatisierte Betrieb. Für alle untersuchten Einsatzprofile ist bereits eine Automatisierung des Autobahnverkehrs und des ländlichen Verkehrs für einen kosteneffektiven Stufe 4 Betrieb im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb ausreichend. Die Automatisierung des Stadtverkehrs ist für kein Einsatzprofil für einen kosteneffektiven Stufe 4 Betrieb notwendig.

Der Stufe 4 Betrieb kann weiterhin einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Fahrerbedarfs leisten und dem Fahrermangel entgegenwirken. Der Fahrerbedarf kann durch den Stufe 4 Betrieb um mindestens ein Viertel gegenüber dem nicht-automatisierten Fall reduziert werden. Die Einsparungen im Fahrerbedarf sind dabei robust gegenüber Änderungen in den Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen, die darüber entscheiden, ob der Stufe 4 automatisierte Betrieb für kurze Einzelfahrtweiten kosteneffektiv gegenüber dem nicht-automatisierten Betrieb ist oder nicht, weil die Einsparungen im Fahrerbedarf durch die Automatisierung kurzer Fahrtweiten gering sind.

4.2 Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Analyse zum Gesamtenergiebedarf automatisierter Fahrzeuge vorgestellt. Dabei werden zuerst die Auswirkungen angepasster

Fahrweisen automatisierter Lastkraftwagen im Autobahnverkehr und anschließend die Auswirkungen angepasster Fahrweisen automatisierter Personenkraftwagen im Autobahn- und Stadtverkehr vorgestellt. Für Lastkraftwagen werden in Unterabschnitt 4.2.1 die Auswirkungen einer gleichmäßigeren Fahrweise automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers und in Unterabschnitt 4.2.2 die Auswirkungen einer verringerten Maximalgeschwindigkeit im Autobahnverkehr diskutiert. Für Personenkraftwagen werden in Unterabschnitt 4.2.3 wie für Lastkraftwagen die Auswirkungen einer gleichmäßigeren Fahrweise automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers im Autobahnverkehr diskutiert. Anschließend wird der Stadtverkehr für Personenkraftwagen betrachtet. In Unterabschnitt 4.2.4 wird der Einfluss der Eliminierung von Stopps, in Unterabschnitt 4.2.5 der Einfluss einer verringerten Maximalgeschwindigkeit und in Unterabschnitt 4.2.6 der Einfluss der Kombination beider Anpassungen diskutiert.

Die Berechnung des Gesamtenergiebedarfs und die Anpassung der Fahrzyklen erfolgen dabei wie in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Personenkraftwagen werden für diese Analyse in die Betrachtungen dieser Arbeit aufgenommen, weil der Energiebedarf des Automatisierungssystems einen großen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf von Personenkraftwagen hat. Die Analysen in dieser Arbeit zeigen, dass der Energiebedarf des Automatisierungssystems eine frühe Einführung automatisierter Personenkraftwagen behindern kann.

Die nachfolgenden Ausführungen in diesem Abschnitt basieren auf der Veröffentlichung „Fuel-saving opportunities for automated vehicles: A driving cycle analysis“ [8].

Für alle betrachteten Szenarien werden die Auswirkungen der angepassten Fahrweisen auf den Energiebedarf für batterieelektrische Fahrzeuge bestimmt. Es wird jeweils der Energiebedarf der Fahrzeuge in Form des Gesamtenergiebedarfs sowie aufgeteilt in den mechanischen Energiebedarf, die rekuperierte Energie und den Nebenenergiebedarf für die Fahrzeugelektronik und das Automatisierungssystem angegeben. Um den Gesamtenergiebedarf aus den einzelnen Energiebedarfen zu bestimmen, müssen diese wie in Unterabschnitt 2.4.4 beschrieben mit den jeweiligen Wirkungsgraden verrechnet werden. Der Energiebedarf wird jeweils für ein nicht-automatisiertes Fahrzeug und ein automatisiertes Fahrzeug angegeben. Die Angaben unterscheiden sich für das automatisierte und nicht-automatisierte Fahrzeug in der Berücksichtigung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems.

4.2.1 Gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr

Für den Autobahnverkehr wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge zu einer gleichmäßigeren Fahrweise im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers führen. Dies wird über eine Glättung der Fahrzyklen mit einem gleitenden Mittelwert abgebildet. Das Zeitfenster der Mittelung ist dabei an einen festen räumlichen Planungshorizont und die jeweilige Fahrgeschwindigkeit angepasst.

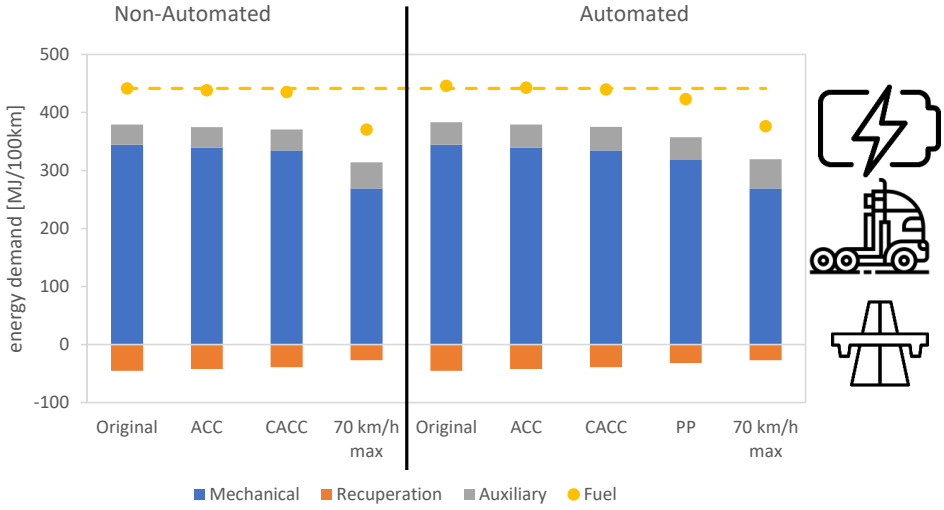
Es werden drei Planungshorizonte betrachtet. Der erste Planungshorizont beschreibt den Fall einzelner automatisierter Fahrzeuge und entspricht der Verwendung eines Abstandregeltempomaten[90]. Der zweite Planungshorizont bildet den gemischten Fall nicht-

[90] Eng: adaptive cruise control, ACC

automatisierter und untereinander kommunizierender automatisierter Fahrzeuge ab und entspricht der Verwendung eines kooperativen Abstandsregeltempomaten[91]. Der dritte Planungshorizont entspricht dem Fall eines Verkehrs aus rein automatisierten und kommunizierenden Fahrzeugen. Die drei Planungshorizonte werden im Folgenden als *Abstandsregeltempomat*, *kooperativer Abstandsregeltempomat* und *exakte Vorhersage*[92] bezeichnet.

Die drei Planungshorizonte werden zu 130 m, 400 m und 2000 m angenommen. Dies entspricht für Lastkraftwagen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h, die dem *WHVC* Fahrzyklus folgen, Planungshorizonten von 6 s, 18 s und 90 s. Die Annahmen zu den Planungshorizonten sind in Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben.

Die Energiebedarfe der Sattelzugmaschine sind in Abbildung 4-23 und in Tabelle B-1 im Anhang für den ursprünglichen Fahrzyklus sowie für die drei über die Planungshorizonte geglätteten Fahrzyklen automatisierter Fahrzeuge im Autobahnverkehr dargestellt. Im Folgenden werden zuerst die Auswirkungen der Glättung der Fahrzyklen für eine nicht-automatisierte Sattelzugmaschine und anschließend für eine automatisierte Sattelzugmaschine vorgestellt.



Highway icons created by Darius Dan; Cargo truck icons created by Eucalyp; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Abbildung 4-23 Energiebedarf einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine für das Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus. Erläuterung der Abkürzungen: ACC, Abstandsregeltempomat (6 s gleitender Mittelwert); CACC kooperativer Abstandsregeltempomat (18 s gleitender Mittelwert); PP, Exakte Vorhersage (90 s gleitender Mittelwert). In Anlehnung an [8].

Nicht-automatisierte Sattelzugmaschine

Für die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine beträgt der Gesamtenergiebedarf für den ursprünglichen Fahrzyklus 441,44 MJ_{el}/100km. Der mechanische Energiebedarf beträgt dabei

[91] Eng: cooperative adaptive cruise control, CACC
[92] Eng: Perfect prediction, PP

344,23 MJ_{mech}/100km, wovon 45,20 MJ_{el}/100km rekuperiert werden können und der Nebenenergiebedarf beträgt 34,95 MJ_{el}/100km.

Die Verwendung des Abstandregeltempomaten verringert den Gesamtenergiebedarf um 0,7%. Wobei der mechanische Energiebedarf um 1,3% und die Energie, die rekuperiert werden kann, um 6,7% abnehmen. Weiterhin nimmt der Nebenenergiebedarf auf Grund der geringeren Rekuperation um 0,7% zu.

Die Verwendung des kooperativen Abstandsregeltempomaten führt zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs um 1,4%. Dabei sinkt der mechanische Energiebedarf um 2,8% und die Energie, die rekuperiert werden kann, um 13,3%. Der Nebenenergiebedarf steigt erneut auf Grund der geringeren Rekuperation um 3,3% an.

Die Abnahme der rekuperierten Energie reduziert die möglichen Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers. Rekuperation sorgt dafür, dass die Teile der überschüssigen Bewegungsenergie des Fahrzeugs bei Bremsvorgängen zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwendet werden können. Ohne Rekuperation würde diese Energie verloren gehen. Die angenommene gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Fahrzeuge reduziert Beschleunigungs- und Bremsphasen. Dadurch wird der Energiebedarf reduziert, da Energieverluste durch Bremsvorgänge reduziert werden. Für Fahrzeuge mit Rekuperation ist die Abnahme im Energiebedarf durch eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Fahrzeuge geringer als für Fahrzeuge ohne Rekuperation, weil durch die Rekuperation ein Teil der Energieverluste durch Bremsvorgänge bereits ausgeglichen wird.

Automatisierte Sattelzugmaschine

Für die automatisierte Sattelzugmaschine nimmt der Gesamtenergiebedarf durch den Energiebedarf des Automatisierungssystems um 1,0% im Vergleich zur nicht-automatisierten Sattelzugmaschine zu. Der mechanische Energiebedarf und die Energie, die rekuperiert werden kann, bleiben unverändert. Der Energiebedarf des Automatisierungssystems erhöht den Nebenenergiebedarf allerdings um 4,07 MJ_{el}/100km, was einem Anstieg von 11,6% entspricht.

Die Verwendung des Abstandsregeltempomaten und kooperativen Abstandsregeltempomaten reduziert den Gesamtenergiebedarf um 0,7% und 1,3% im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus der automatisierten Sattelzugmaschine. Das Fahrverhalten der Exakten Vorhersage reduziert den Gesamtenergiebedarf sogar um 5,1%.

Im Vergleich zu dem ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Fahrzeugs gleicht der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems die Einsparungen im Energiebedarf durch die gleichmäßigere Fahrweise der automatisierten Sattelzugmaschinen für die Verwendung des Abstandregeltempomaten und kooperativen Abstandregeltempomaten jedoch aus. Der Gesamtenergiebedarf der automatisierten Sattelzugmaschine ist für den Fall mit Abstandregeltempomat um 0,3% höher und für den Fall mit kooperativem Abstandsregeltempomaten um 0,4% niedriger als für den ursprünglichen Fahrzyklus der nicht-automatisierten Sattelzugmaschine.

Für den Fall der Exakten Vorhersage ist die Einsparung durch das Fahrverhalten größer als der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems. Der Gesamtenergiebedarf der automatisierten Sattelzugmaschine nimmt im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus der nicht-automatisierten Sattelzugmaschine um 4,1% ab.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt zeigen, dass der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W den Gesamtenergiebedarf der Sattelzugmaschine nur geringfügig erhöht. Der Gesamtenergiebedarf nimmt durch das Automatisierungssystem um 1,0% zu.

Eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Sattelzugmaschinen im Vergleich zum Fahrverhalten menschlicher Fahrer kann den Gesamtenergiebedarf ebenfalls nur geringfügig reduzieren. Für Planungshorizonte von 6 s und 18 s gleichen sich die Einsparungen durch die Fahrweise und der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems aus. Erst für einen Planungshorizont von 90 s übertreffen die Einsparungen den zusätzlichen Energiebedarf und der Gesamtenergiebedarf nimmt um 4,1% ab.

4.2.2 Verringerte Maximalgeschwindigkeit für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr

In diesem Unterabschnitt werden die Auswirkung einer Geschwindigkeitsreduktion von Lastkraftwagen im Autobahnverkehr untersucht. Zuerst werden die Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf ermittelt. Anschließend findet eine Beurteilung der Praktikabilität einer Geschwindigkeitsreduktion anhand ihrer Auswirkungen auf die Gesamtbetriebskosten für den automatisierten und nicht-automatisierten Betrieb statt.

Der Einfluss einer Geschwindigkeitsreduktion von 90 km/h auf 70 km/h im Autobahnsegment des WHVC Fahrzyklus auf den Energiebedarf der Sattelzugmaschine ist in Abbildung 4-23 auf Seite 164 und in Tabelle B-1 im Anhang dargestellt.

Die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit führt für die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs von 16,0%. Der mechanische Energiebedarf nimmt um 21,8% ab. Die rekuperierte Energie nimmt allerdings um 40,7% ab und wirkt damit der Reduktion des mechanischen Energiebedarfs entgegen. Weiterhin steigt der Nebenenergiebedarf um 28,8% an. Der Anstieg im Nebenenergiebedarf ist auf zwei Faktoren zurückzuführen. Erstens nimmt die Fahrzeit um 18,9% zu. Der Leistungsbedarf der Fahrzeugelektronik wird als konstant angenommen, sodass der Nebenenergiebedarf proportional zur Fahrzeit zunimmt. Zweitens wird durch die Abnahme der rekuperierten Energie ein geringerer Teil des Nebenenergiebedarfs durch die Rekuperation direkt abgedeckt.

Für die automatisierte Sattelzugmaschine übertreffen die Einsparungen im mechanischen Energiebedarf den zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems deutlich. Der Gesamtenergiebedarf ist um 14,7% geringer als für den ursprünglichen Fahrzyklus der nicht-automatisierten Sattelzugmaschine. Der Energiebedarf für die automatisierte Sattelzugmaschine unterscheidet sich für den geschwindigkeitsreduzierten Fall nur im erhöhten Nebenenergiebedarf vom Energiebedarf der nicht-automatisierten Sattelzugmaschine.

Die Reduktion der Geschwindigkeit stellt somit eine Möglichkeit dar, den Gesamtenergiebedarf für Lastkraftwagen im Autobahnverkehr deutlich zu reduzieren

Validierung der Einsparungen im mechanischen Energiebedarf

Die Einsparungen im mechanischen Energiebedarf lassen sich mit den Ergebnissen der Analyse von Bray und Cebon [125] vergleichen. Die Autoren haben den mechanischen Energiebedarf eines 29,5 t schweren Lastkraftwagens, mittels physikalischer Bewegungsgleichungen, für einen vereinfachten Start-Stopp Fahrzyklus berechnet. Für eine Reduktion der Richtgeschwindigkeit von 90 km/h auf 70 km/h haben sie eine Abnahme des mechanischen Energiebedarfs von 26% berechnet.

Die von Bray und Cebon [125] bestimmte Abnahme im mechanischen Energiebedarf um 26% fällt um etwa ein Fünftel höher aus als die in dieser Arbeit bestimmte Abnahme für das WHVC Autobahnsegment von 21,8%.

Der Unterschied entsteht dabei nicht durch Unterschiede in den verwendeten Fahrzyklen. Werden die vereinfachten Start-Stopp Fahrzyklen von Bray und Cebon in das Energiebedarfsmodell dieser Arbeit übertragen, ergeben sich durch die Geschwindigkeitsreduktion Einsparungen im mechanischen Energiebedarf von 21,4%. Diese sind vergleichbar zu den berechneten Einsparungen für das WHVC Autobahnsegment von 21,8%.

Stattdessen ändert sich der mechanische Energiebedarf durch die gewählten Luft- und Rollwiderstandswerte in der Analyse von Bray und Cebon bei Geschwindigkeitsänderungen stärker als in den Analysen dieser Arbeit. Im Vergleich zu den in dieser Arbeit verwendeten Fahrzeugparametern der Sattelzugmaschine verwenden Bray und Cebon einen niedrigeren Rollwiderstandskoeffizienten. Wie in Gl. 2-2 auf Seite 42 beschrieben, ist der Rollwiderstand unabhängig von der Geschwindigkeit. Der geschwindigkeitsunabhängige Teil des mechanischen Energiebedarfs fällt bei Bray und Cebon somit geringer aus als in dieser Arbeit. Weiterhin ist bei Bray und Cebon das Produkt aus Stirnfläche und Luftwiderstandbeiwert größer als in dieser Arbeit. Wie in Gl. 2-1 auf Seite 41 beschrieben, nimmt der Luftwiderstand quadratisch mit der Geschwindigkeit zu. Der geschwindigkeitsabhängige Teil des mechanischen Energiebedarfs fällt bei Bray und Cebon somit höher aus als in dieser Arbeit. Der mechanische Energiebedarf ändert sich dadurch in der Analyse von Bray und Cebon bei Geschwindigkeitsänderungen stärker als in den Analysen dieser Arbeit.

Werden die Fahrzeugparameter von Bray und Cebon für die Analysen dieser Arbeit übernommen, ergeben sich vergleichbare Einsparungen im mechanischen Energiebedarf wie in der Studie von Bray und Cebon. Für die Analysen dieser Arbeit werden jedoch die ursprünglichen Parameter des Energiebedarfsmodells beibehalten, da diese für Fahrzeuge auf dem deutschen Markt ausgelegt sind [136].

Im Folgenden findet nun eine ökonomische Betrachtung der Geschwindigkeitsreduktion statt.

Veränderte Betriebskosten durch eine verringerte Maximalgeschwindigkeit

Laut Bray und Cebon [125] kann eine Geschwindigkeitsreduktion die Gesamtbetriebskosten für automatisierte Lastkraftwagen reduzieren jedoch nicht für nicht-automatisierte Lastkraftwagen. Bray und Cebon haben die Gesamtbetriebskosten automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen verglichen und für eine Reduktion der Richtgeschwindigkeit von 90 km/h auf 70 km/h eine Abnahme in den Gesamtbetriebskosten automatisierter Lastkraftwagen um 4% und eine Zunahme in den Gesamtbetriebskosten nicht-automatisierter Lastkraftwagen um 3% festgestellt.

Im Folgenden werden die Annahmen von Bray und Cebon [125] detailliert analysiert und anschließend mit einer vergleichbaren Abschätzung mit Hilfe des in dieser Arbeit verwendeten Kostenmodells verglichen. Für den Vergleich wird das Einsatzprofils der batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit Fahrtweiten im Bereich 200–300 km verwendet (siehe Tabelle 4-1 auf Seite 109 und Abbildung 4-7 auf Seite 123).

In den Gesamtbetriebskosten betrachten Bray und Cebon [125] Treibstoffkosten, Fahrerkosten, Anschaffungskosten sowie Kosten für den Transport der Ware. Die Treibstoffkosten nehmen durch die Geschwindigkeitsreduktion ab, während die anderen drei Kostenaspekte zunehmen. Die Abnahme der Treibstoffkosten wurde zuvor bereits diskutiert. Die Fahrerkosten nehmen durch die längere Fahrzeit um 27% zu. Die Anschaffungskosten nehmen zu, weil eine vollständige Auslastung der Lastkraftwagen im Basisfall angenommen wird und durch eine Geschwindigkeitsreduktion die Gesamttransportleistung der Lastkraftwagen abnimmt und die Kosten pro Kilometer dementsprechend steigen. Zuletzt wird angenommen, dass die Kosten für den Transport der Ware mit steigender Transportdauer zunehmen, um beispielsweise die Verderblichkeit von Produkten oder die Finanzierungskosten des in die transportierten Güter investierten Kapitals abzubilden.

Bray und Cebon [125] nehmen an, dass die Anschaffungskosten sowie die Kosten für den Transport der Ware bei einer Geschwindigkeitsreduktion gleichermaßen für automatisierte und nicht-automatisierte Lastkraftwagen ansteigen.

Diese Annahme vernachlässigt, dass automatisierte Lastkraftwagen nicht mehr an die Lenkzeiten des menschlichen Fahrers gebunden sind und sich ihre Fahrzeiten dementsprechend verändern können. Bray und Cebon [125] nehmen an, dass die Anschaffungskosten der Lastkraftwagen durch eine Geschwindigkeitsreduktion zunehmen, weil die Lastkraftwagen auf Grund der geringeren Geschwindigkeit in der gleichen Betriebszeit nur noch eine geringere Gesamttransportleistung erbringen können. Automatisierte Lastkraftwagen können ihre Betriebszeit jedoch ausweiten und dadurch die gleiche Gesamttransportleistung erzielen. Die Anschaffungskosten blieben in einem solchen Fall bei einer Geschwindigkeitsreduktion unverändert. Weiterhin nehmen Bray und Cebon an, dass die Kosten für den Transport der Ware und somit die Transportdauer für automatisierte und nicht-automatisierte Lastkraftwagen bei einer Geschwindigkeitsreduktion gleichermaßen zunehmen. Für automatisierte Lastkraftwagen kann jedoch auf die vorgeschriebenen Pausenzeiten des menschlichen Fahrers von 45 Minuten nach 4,5 Stunden Lenkzeit verzichtet werden [105–109]. Für das Autobahnsegment des WHVC beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit 76,7 km/h. Nach einer Reduktion der Maximalgeschwindigkeit von 90 km/h auf 70 km/h, wie sie in den Analysen dieser Arbeit angenommen wird, liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit bei 64,3 km/h. Die Einsparung einer Pausenzeit von 45 Minuten kann für diesen Fall den zusätzlichen Zeitbedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion für eine Autobahnstrecke von bis zu 300 km ausgleichen.

Die Einsparungen in den Gesamtbetriebskosten müssten daher durch eine Geschwindigkeitsreduktion für automatisierte Lastkraftwagen stärker abnehmen als von Bray und Cebon [125] angenommen.

Wird der Anstieg in den Anschaffungskosten sowie den Kosten für den Transport der Ware in der Analyse von Bray und Cebon [125] vernachlässigt, sinken die Gesamtbetriebskosten bei einer Geschwindigkeitsreduktion selbst unter steigenden Fahrerkosten. Der reine Anstieg in

den Fahrerkosten ist in der Analyse von Bray und Cebon geringer als die Abnahme in den Treibstoffkosten.

Die vergleichbare Abschätzung der Veränderung der Gesamtbetriebskosten mit Hilfe des in dieser Arbeit verwendeten Kostenmodells erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Einsparungen in den Treibstoffkosten und anschließend für den nicht-automatisierten Fall die Zusatzkosten in den Fahrerkosten abgeschätzt.

Die Einsparungen in den Treibstoffkosten werden entsprechend der Einsparungen im Gesamtenergiebedarf für die Fahrt mit verringerter Geschwindigkeit auf der Autobahn und dem Fahrtanteil auf der Autobahn angenommen. Der Autobahnanteil liegt für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit Fahrtweiten im Bereich 200–300 km bei 85% (siehe Tabelle 3-4 auf Seite 76). Der Gesamtenergiebedarf für die Fahrt auf der Autobahn nimmt für die nicht-automatisierte Sattelzugmaschine um 16,0% und für die automatisierte Sattelzugmaschine um 14,7% ab (siehe Abbildung 4-23 auf Seite 164 und Tabelle B-1 im Anhang). Die Einsparungen in den Treibstoffkosten ergeben sich damit zu 13,6% und 12,5%. Dies entspricht bei Treibstoffkosten von 0,32 €/km für das Jahr 2023 (siehe Tabelle 4-1 auf Seite 109) für beide Fälle Einsparungen von 0,04 €/km.

Der gewählte Ansatz geht vereinfachend davon aus, dass der Fahrtanteil auf der Autobahn dem Anteil des Gesamtenergiebedarfs und damit dem Anteil der Treibstoffkosten entspricht. Der Gesamtenergiebedarf ist jedoch für Fahrtanteile im Autobahnverkehr, Landverkehr und im Stadtverkehr unterschiedlich. Für die Sattelzugmaschine ist der Energiebedarf im Autobahnverkehr am geringsten und im Stadtverkehr durch viele Beschleunigungs- und Bremsvorgänge am höchsten. Die Energiebedarfe liegen bei 441 MJ_{el}/100km im Autobahnverkehr, 546 MJ_{el}/100km im Landverkehr und 640 MJ_{el}/100km im Stadtverkehr. Bei einem Autobahnanteil von 85% liegt der Anteil des Autobahnverkehrs am Gesamtenergiebedarf bei 82%.

Die Gesamtbetriebskosten einer automatisierten batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit Fahrtweiten im Bereich 200–300 km im Stufe 4 Betrieb mit Staffelfahrten nehmen durch die Geschwindigkeitsreduktion insgesamt um 4,7% ab. Die Treibstoffkosten sind die einzigen Kosten, die sich für die automatisierte Sattelzugmaschine bei einer Geschwindigkeitsreduktion verändern. Die Gesamtbetriebskosten des Stufe 4 Betriebs mit Staffelfahrten liegen ohne Geschwindigkeitsreduktion bei 0,86 €/km für das Jahr 2023 (siehe Seite 123).

Für den nicht-automatisierten Fall werden die Zusatzkosten in den Fahrerkosten über die Veränderung der Gesamtfahrzeit abgeschätzt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit für das WHVC Autobahnsegment nimmt durch die Geschwindigkeitsreduktion um 16,2% ab. Der Autobahnanteil liegt für das Einsatzprofil der batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit Fahrtweiten im Bereich 200–300 km bei 85% (siehe Tabelle 3-4 auf Seite 76). Die Durchschnittsgeschwindigkeit der gesamten Fahrt nimmt damit um 14,8% ab. Die Gesamtfahrzeit nimmt dadurch insgesamt um 17,3% zu. Bei Fahrerkosten von 0,32 €/km für das Jahr 2023 nehmen diese um 0,06€/km zu (siehe Tabelle 4-1 auf Seite 109).

Die Gesamtbetriebskosten einer nicht-automatisierten batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit Fahrtweiten im Bereich 200–300 km nehmen durch die Geschwindigkeitsreduktion insgesamt um 1,8% zu. Die Treibstoffkosten nehmen um 0,04 €/km ab, die Fahrerkosten nehmen jedoch um 0,06 €/km zu. Die Gesamtbetriebskosten liegen ohne Geschwindigkeitsreduktion bei 1,12 €/km für das Jahr 2023 (siehe Tabelle 4-1 auf Seite 109).

Neben höheren Gesamtbetriebskosten ist eine Geschwindigkeitsreduktion für den nicht-automatisierten Betrieb durch einen erhöhten Fahrerbedarf nicht praktikabel. Die Lenkzeit menschlicher Fahrer ist auf täglich neun Stunden begrenzt [105–109]. Wird die Geschwindigkeit reduziert, kann in derselben Lenkzeit nur noch eine geringere Strecke zurückgelegt werden. Fahrer können dadurch insgesamt nur noch eine geringere Fahrleistung erbringen. Um dieselbe Gesamttransportleistung zu erzielen, werden dementsprechend mehr Fahrer benötigt.

Für den automatisierten Betrieb ist eine Geschwindigkeitsreduktion hingegen praktikabel. Die Gesamtbetriebskosten nehmen durch die Geschwindigkeitsreduktion ab. Weiterhin bleibt der Fahrerbedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion unverändert, weil die Geschwindigkeitsreduktion im automatisierten Teil der Fahrt stattfindet.

Die Abschätzung mit Hilfe des Kostenmodells dieser Arbeit liefert dasselbe Ergebnis wie die Analyse von Bray und Cebon [125]. Eine Geschwindigkeitsreduktion führt im automatisierten Betrieb zu einer Reduktion der Gesamtbetriebskosten. Für einen nicht-automatisierten Betrieb steigen die Gesamtbetriebskosten hingegen.

Das Ergebnis wird jedoch in den Abschätzungen dieser Arbeit und von Bray und Cebon [125] auf zwei unterschiedliche Weisen erreicht. Für die Abschätzung in dieser Arbeit sind nur die Treibstoff- und Fahrerkosten von der Geschwindigkeitsreduktion betroffen. Der Anstieg in den Fahrerkosten übertrifft im nicht-automatisierten Fall die Einsparungen in den Treibstoffkosten, sodass die Gesamtbetriebskosten insgesamt zunehmen. In der Analyse von Bray und Cebon werden Veränderungen in den Treibstoffkosten, den Fahrerkosten, den Anschaffungskosten und den Kosten für den Transport der Ware berücksichtigt. Werden in der Analyse von Bray und Cebon nur Veränderungen der Treibstoff- und Fahrerkosten betrachtet, nehmen die Betriebskosten für eine Geschwindigkeitsreduktion insgesamt ab. Die Einsparungen in den Treibstoffkosten übertreffen die zusätzlichen Fahrerkosten. Dies liegt daran, dass Bray und Cebon den Treibstoffbedarf ausschließlich basierend auf dem mechanischen Energiebedarf berechnen. Dadurch nehmen die Treibstoffkosten in ihrer Analyse um 26% ab im Vergleich zu einer Abnahme von 16% in den Analysen dieser Arbeit.

Insgesamt zeigen die Analysen in dieser Arbeit, dass eine Geschwindigkeitsreduktion den Energiebedarf für automatisierte und nicht-automatisierte Sattelzugmaschinen im Autobahnverkehr deutlich senken kann. Eine Geschwindigkeitsreduktion von 90 km/h auf 70 km/h senkt den Gesamtenergiebedarf einer nicht-automatisierten Sattelzugmaschine um 16,0%.

Für einen nicht-automatisierten Betrieb ist eine Geschwindigkeitsreduktion jedoch nicht-praktikabel, da sowohl die Gesamtbetriebskosten als auch der Fahrerbedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion steigen.

Für einen automatisierten Betrieb sieht es hingegen anders aus. Der Fahrerbedarf ist von der Geschwindigkeitsreduktion unbeeinflusst, da die Geschwindigkeitsreduktion im automatisierten Teil der Fahrt ohne menschlichen Fahrer stattfindet. Weiterhin führt der geringere Energiebedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion für einen automatisierten Betrieb zu geringeren Gesamtbetriebskosten. Die Abnahme der Gesamtbetriebskosten ist dabei abhängig vom Fahrtanteil auf der Autobahn. Für lange Einzelfahrtweiten mit einem

größeren Fahrtanteil auf der Autobahn, nehmen die Gesamtbetriebskosten stärker ab als für kurze Einzelfahrtweiten. Die Betriebskosten der Stufe 4 Betriebsstrategien für die Einsatzprofile der batterieelektrischen Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten über 150 km, die bereits im reinen Stufe 4 Betrieb günstiger als der nicht-automatisierte Betrieb sind, nehmen durch die Geschwindigkeitsreduktion stärker ab als die Betriebskosten der Betriebsstrategien für die Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten bis zu 150 km, die im reinen Stufe 4 Betrieb teurer als der nicht-automatisierte Betrieb sind. Die Abnahme der Gesamtbetriebskosten führt daher nicht dazu, dass der reine Stufe 4 Betrieb für weitere Betriebsstrategien und Einsatzprofile kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb wird.

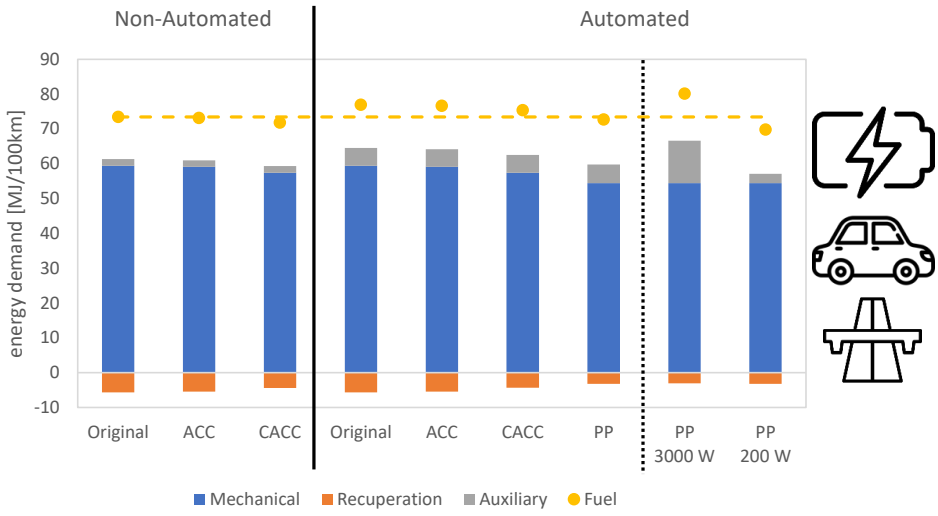
In den folgenden Unterabschnitten werden Personenkraftwagen betrachtet. Dabei wird zuerst in Unterabschnitt 4.2.3 der Autobahnverkehr und anschließend in den Unterabschnitten 4.2.4, 4.2.5 und 4.2.6 der Stadtverkehr betrachtet.

4.2.3 Gleichmäßigere Geschwindigkeitsprofile für Personenkraftwagen im Autobahnverkehr

Wie für die Sattelzugmaschine wird angenommen, dass die Automatisierung von Personenkraftwagen im Autobahnverkehr zu einer gleichmäßigeren Fahrweise im Vergleich zur Fahrweise eines menschlichen Fahrers führt.

Es werden erneut die drei Planungshorizonte des *Abstandsregeltempomaten*, *kooperativen Abstandsregeltempomaten* und der *exakten Vorhersage* von 130 m, 400 m und 2000 m verwendet. Dies entspricht für Personenkraftwagen mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h, die dem *WLTC-3b* Fahrzyklus folgen, Planungshorizonten von 4 s, 12 s und 60 s.

Die Energiebedarfe des Mittelklasse Personenkraftwagens sind in Abbildung 4-24 und in Tabelle B-2 im Anhang für den ursprünglichen Fahrzyklus sowie für die drei über die Planungshorizonte geglätteten Fahrzyklen automatisierter Fahrzeuge im Autobahnverkehr dargestellt. Im Folgenden werden zuerst die Auswirkungen der Glättung der Fahrzyklen für einen nicht-automatisierten Personenkraftwagen und anschließend für einen automatisierten Personenkraftwagen vorgestellt.



Highway icons created by Darius Dan; Energy icons created by Pixel perfect; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 4-24 Energiebedarf eines batterieelektrischen Mittelklasse Personenkraftwagens für das Autobahnsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. Erläuterung der Abkürzungen: ACC, Abstandsregeltempomat (4 s gleitender Mittelwert); CACC kooperativer Abstandsregeltempomat (12 s gleitender Mittelwert); PP, Exakte Vorhersage (60 s gleitender Mittelwert). In Anlehnung an [8].

Nicht-automatisierter Personenkraftwagen

Für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen beträgt der Gesamtenergiebedarf für den ursprünglichen Fahrzyklus 73,45 MJ_{el}/100km. Dieser ergibt sich aus einem mechanischen Energiebedarf von 59,45 MJ_{mech}/100km, von dem 5,69 MJ_{el}/100km rekuperiert werden können und einem Nebenenergiebedarf von 1,90 MJ_{el}/100km für die Fahrzeugelektronik.

Im Vergleich zur Sattelzugmaschine kann nur ein geringerer Anteil der mechanischen Energie rekuperiert werden. Dies liegt an dem geringeren Fahrzeuggewicht und der höheren Fahrgeschwindigkeit des Personenkraftwagens im Vergleich zur Sattelzugmaschine. Durch diese Faktoren ist der Anteil der Beschleunigung am mechanischen Energiebedarf kleiner und der Anteil des Luftwiderstands größer, sodass ein kleinerer Anteil der mechanischen Energie rekuperiert werden kann. Der Nebenenergiebedarf hat ebenfalls einen kleineren Anteil am Gesamtenergiebedarf.

Die Verwendung des Abstandsregeltempomaten führt zu einer Abnahme im Gesamtenergiebedarf von 0,4%. Der mechanische Energiebedarf nimmt um 0,6% und die Energie, die rekuperiert werden kann, um 3,9% ab. Der Nebenenergiebedarf bleibt unverändert.

Die Verwendung des kooperativen Abstandregeltempomaten führt zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs von 2,2%. Der mechanische Energiebedarf nimmt um 3,4% ab und die Energie, die rekuperiert werden kann, um 22,5%.

Automatisierter Personenkraftwagen

Für den automatisierten Personenkraftwagen nimmt der Gesamtenergiebedarf für den ursprünglichen Fahrzyklus im Vergleich zum nicht-automatisierten Personenkraftwagen durch den Energiebedarf des Automatisierungssystems um 4,7% zu. Dabei bleibt der mechanische Energiebedarf unverändert. Der Nebenenergiebedarf nimmt jedoch durch den Energiebedarf des Automatisierungssystems um 169% auf 5,11 MJ_{el}/100km zu. Die Energie, die rekuperiert werden kann, nimmt um 0,7% ab, weil ein Teil der ursprünglichen Energie nun direkt den erhöhten Nebenenergiebedarf ausgleicht.

Die Verwendung des Abstandsregeltempomaten und kooperativen Abstandsregeltempomaten reduziert den Gesamtenergiebedarf um 0,4% und 2,0% im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus des automatisierten Personenkraftwagens. Das Fahrverhalten der Exakten Vorhersage reduziert den Gesamtenergiebedarf sogar um 5,5%.

Für das Fahrverhalten der Exakten Vorhersage wird der mechanische Energiebedarf um 8,4% und die Energie, die rekuperiert werden kann, um 43,0% reduziert. Der Nebenenergiebedarf nimmt hingegen um 4,5% zu. Die Zunahme des Nebenenergiebedarfs ist rein bilanziell. Der Nebenenergiebedarf und die Energie, die rekuperiert werden kann, werden für jeden Zeitschritt gegeneinander aufgewogen und nur der jeweilige Überschuss vermerkt. Dadurch, dass die Energie, die rekuperiert werden kann, auf Grund des gleichmäßigeren Geschwindigkeitsprofils stark abnimmt, nimmt der Nebenenergiebedarf zu.

Im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Fahrzeugs übertrifft der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems die Einsparungen im Energiebedarf durch die gleichmäßigere Fahrweise des automatisierten Personenkraftwagens für die Verwendung des Abstandregeltempomaten und kooperativen Abstandregeltempomaten. Der Gesamtenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens ist für den Fall mit Abstandregeltempomat um 4,3% und für den Fall mit kooperativem Abstandsregeltempomaten um 2,6% höher als für den ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens.

Für den Fall der Exakten Vorhersage gleicht der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems die Einsparungen im Energiebedarf durch die gleichmäßigere Fahrweise größtenteils aus. Der Gesamtenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens ist für den Fall mit Exakter Vorhersage um 1,0% niedriger als für den ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens.

Validierung der Änderungen des Gesamtenergiebedarfs

Zur Einordnung der in dieser Arbeit ermittelten Änderungen des Gesamtenergiebedarfs durch eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Personenkraftwagen im Vergleich zu der Fahrweise menschlicher Fahrer dient die Analyse von Liu et al. [122]. Die Autoren haben in ihrer Studie die Emissionsraten von automatisierten und nicht-automatisierten Personenkraftwagen[93] für verschiedene Fahrzyklen modelliert. Sie haben dazu angenommen, dass automatisierte Personenkraftwagen weniger stark beschleunigen als nicht-automatisierte Personenkraftwagen und ihre Geschwindigkeitsprofile dementsprechend kleinere Schwankungen aufweisen.

[93] Eng: light-duty passenger vehicles

Für Personenkraftwagen, die einem Standard-Autobahnfahrzyklus[94] folgen, nahmen die CO_2-Emissionen um 1,77% für ein Fahrzeug mit Benzinmotor und 1,82% für ein Fahrzeug mit Dieselmotor ab [122]. Die Veränderungen der CO_2-Emissionen sind ein guter Indikator für die Änderungen des Energiebedarfs, da für Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren die CO_2-Emissionen direkt proportional zum Kraftstoffbedarf sind [124].

Die von Liu et al. [122] angenommene Glättung entspricht optisch der in dieser Arbeit für den kooperativen Abstandsregeltempomaten durchgeführten Glättung mit einem Planungshorizont von 12 s. Liu et al. verwenden zur Glättung der Fahrzyklen Polynomzüge. Die Parameter dieser Methode sind schwer interpretierbar und lassen sich nicht in reale Größen wie einen Planungshorizont übersetzen. Daher kann ein Vergleich der Glättungen nur basierend auf der optischen Veränderung der Fahrzyklen stattfinden.

Die Einsparungen im Gesamtenergiebedarf werden in dieser Arbeit höher abgeschätzt als durch Liu et al. [122]. Für einen Planungshorizont von 12 s ergibt sich in dieser Arbeit eine Abnahme des Gesamtenergiebedarfs von 2,2% für einen batterieelektrischen Personenkraftwagen. Damit liegen die Einsparungen in dieser Arbeit mehr als 20% oberhalb der von Liu et al. bestimmten Einsparungen für Personenkraftwagen mit Benzin- und Dieselverbrennungsmotoren.

Dies entspricht nicht der Erwartung. Auf Grund der Betrachtung eines batterieelektrischen Antriebsstrangs in dieser Arbeit im Vergleich zu Antriebsträngen mit Benzin- und Dieselverbrennungsmotoren in der Analyse von Liu et al. [122] sollten die Einsparungen in dieser Arbeit geringer ausfallen. Die Rekuperation von mechanischer Energie bei Bremsvorgängen senkt den Gesamtenergiebedarf batterieelektrischer Fahrzeuge für Fahrzyklen mit starken Geschwindigkeitsschwankungen. Der Effekt einer Glättung der Fahrzyklen auf den Energiebedarf fällt dadurch geringer aus als für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ohne Möglichkeit zur Rekuperation.

Zusätzlich wird die Energieersparnis für den Personenkraftwagen in dieser Arbeit durch eine gering angenommene Fahrzeugmasse eher konservativ abgeschätzt. Die Fahrzeugmasse von 1508 kg liegt am unteren Ende der Fahrzeugmassen aktuell verfügbarer batterieelektrischer Fahrzeuge [139]. Ein höheres Fahrzeuggewicht erhöht den mechanischen Energiebedarf und insbesondere den für die Beschleunigung benötigten Energiebedarf. Durch eine gleichmäßigere Fahrweise wird dementsprechend bei höherem Fahrzeuggewicht mehr Energie für Beschleunigungsprozesse eingespart.

Im Gegensatz zur Analyse von Liu et al. [122] wird in dieser Arbeit allerdings der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems berücksichtigt. Dieser erhöht den Gesamtenergiebedarf und gleicht die möglichen Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise aus. Im Folgenden wird der Leistungsbedarf noch einmal genauer betrachtet.

Variation des Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems

Da der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems einen großen Einfluss auf den Nebenenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens hat, wird der Energiebedarf des Automatisierungssystem für zwei weitere Vergleiche variiert.

[94] Eng: highway fuel economy test driving schedule, HWFET

Der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems wird in dieser Arbeit standardmäßig mit 1000 W angenommen. Durch den Leistungsbedarf des Automatisierungssystems erhöht sich der Nebenenergiebedarf des Personenkraftwagens im Autobahnverkehr um 169% und der Gesamtenergiebedarf um 4,7%. Der Anstieg des Gesamtenergiebedarfs ist damit vergleichbar zu den Werten von Lin et al. [59], die für einen Chevrolet Bolt einen Anstieg des Gesamtenergiebedarfs von 6% durch einen zusätzlichen Leistungsbedarf von 1000 W angeben.

Für die beiden Variationen des Leistungsbedarfs werden die Ober- und Untergrenze der Literaturwerte für den Leistungsbedarf des Automatisierungssystems gewählt (siehe Abbildung 2-13 auf Seite 40). Die Obergrenze beträgt 3000 W und die Untergrenze 200 W. Die Obergrenze von 3000 W entspricht dem maximalen Leistungsbedarf aktueller Automatisierungssysteme und stammt aus der Studie von Schall et al. [129]. Die Untergrenze von 200 W entspricht einem potentiellen Leistungsbedarf zukünftiger Automatisierungssysteme und stammt aus der Studien von Gawron et al. [126]. Ein solcher Wert ist nur durch eine starke Entwicklung der Recheneffizienz und der Verwendung spezialisierter Hardware-Architekturen für zukünftige Computersysteme automatisierter Fahrzeuge zu erreichen. Gegen eine Reduktion des Energiebedarfs spricht jedoch, dass mit steigender Leistungsfähigkeit des Computersystems auch die Anforderungen an das Automatisierungssystem erhöht werden.

Der erhöhte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 3000 W führt dazu, dass sich der Nebenenergiebedarf des Personenkraftwagens im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall mehr als versechsfacht. Der reduzierte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 200 W führt hingegen nur zu einer Zunahme des Nebenenergiebedarfs um ein Drittel.

Die Auswirkungen der variierten Leistungsbedarfe auf den Gesamtenergiebedarf werden anhand des Falls der Exakten Vorhersage diskutiert.

Für den Fall des erhöhten Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems von 3000 W übertrifft der Energiebedarf des Automatisierungssystems die Einsparungen im Energiebedarf durch die gleichmäßigere Fahrweise für den Fall der Exakten Vorhersage deutlich. Der Gesamtenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens ist für den Fall der Exakten Vorhersage um 9,1% höher als für den ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens.

Für den Fall des reduzierten Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems von 200 W übertreffen die Einsparungen im Energiebedarf durch die gleichmäßigere Fahrweise für den Fall der Exakten Vorhersage hingegen den Energiebedarf des Automatisierungssystems. Der Gesamtenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens ist für den Fall der Exakten Vorhersage um 5,0% niedriger als für den ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt zeigen, dass der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W den Gesamtenergiebedarf des Personenkraftwagens merklich erhöht. Der Gesamtenergiebedarf nimmt durch das Automatisierungssystem um 4,7% zu.

Eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Personenkraftwagen im Vergleich zum Fahrverhalten menschlicher Fahrer kann den Gesamtenergiebedarf erst für einen langen

Planungshorizont ausgleichen. Für Planungshorizonte von 4 s und 12 s übertrifft der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems die Einsparungen durch die Fahrweise. Für einen Planungshorizont von 60 s gleichen die Einsparungen jedoch den zusätzlichen Energiebedarf aus.

Durch eine Verbesserung der Recheneffizienz von Computersystemen und der Verwendung spezialisierter Hardware kann der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems zukünftig jedoch geringer ausfallen als die angenommenen 1000 W. Gegen eine Reduktion des Energiebedarfs spricht allerdings, dass die Anforderungen an das Automatisierungssystem mit steigender Leistungsfähigkeit des Computersystems ebenfalls erhöht werden.

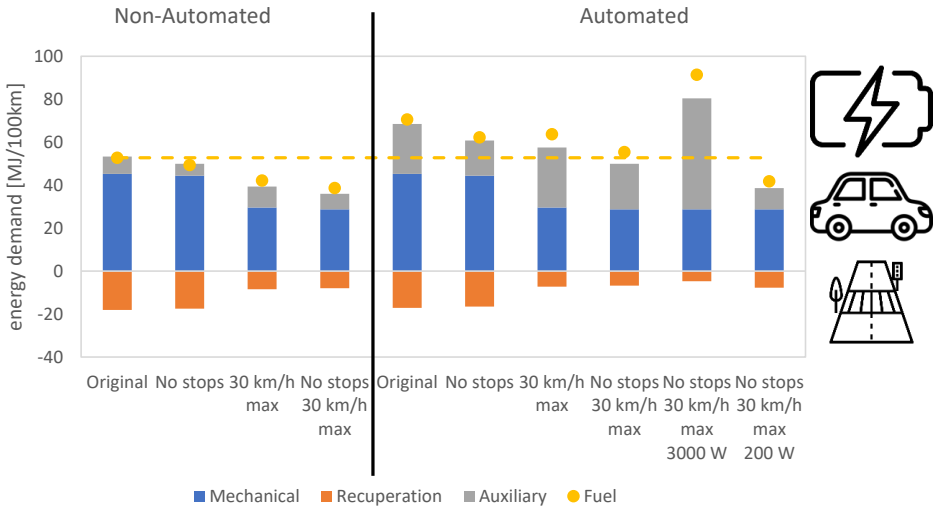
Für einen angenommenen Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 200 W nimmt der Gesamtenergiebedarf des Personenkraftwagens nur um 1,1% zu. Die Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise übertreffen in diesem Fall den zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems.

Im Folgenden wird der Stadtverkehr für Personenkraftwagen analysiert.

4.2.4 Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr

Als erstes Szenario für den Stadtverkehr wird ein weit fortgeschrittenes Szenario untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge automatisiert und miteinander vernetzt sind. Der Verkehr wird optimal geregelt und die Fahrzeuge müssen nicht mehr an Kreuzungen anhalten. Die Minimalgeschwindigkeit wird wie in Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben auf 10 km/h begrenzt. Die Auswirkungen dieser Anpassung auf den Energiebedarf sind in Abbildung 4-25 und Tabelle B-3 im Anhang dargestellt.

Im Folgenden werden zuerst die Auswirkungen der Eliminierung der Stopps für einen nicht-automatisierten Personenkraftwagen und anschließend für einen automatisierten Personenkraftwagen vorgestellt.



Street icons created by surang; Energy icons created by Pixel perfect; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

Abbildung 4-25 Energiebedarf eines batterieelektrischen Mittelklasse Personenkraftwagens für das Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. In Anlehnung an [8].

Nicht-automatisierter Personenkraftwagen

Für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen beträgt der Gesamtenergiebedarf für den ursprünglichen Fahrzyklus 52,31 MJ_{el}/100km. Der Energiebedarf ergibt sich mit 45,28 MJ_{mech}/100km zu großen Teilen aus dem mechanischen Energiebedarf, wovon 18,04 MJ_{el}/100km rekuperiert werden können. Der Anteil der rekuperierten Energie ist für den Stadtverkehr deutlich größer als für den Autobahnverkehr, weil die Anteile der Beschleunigung am mechanischen Energiebedarf im Stadtverkehr größer und die Anteile von Luft- und Rollwiderständen im Stadtverkehr geringer sind als im Autobahnverkehr. Weiterhin ist der Nebenenergiebedarf auf Grund der geringeren Fahrgeschwindigkeit bei unverändertem Leistungsbedarf mit 8,07 MJ_{el}/100km mehr als viermal größer als für den Autobahnverkehr.

Die Eliminierung der Stopps aus dem Fahrzyklus verringert den Gesamtenergiebedarf für ein nicht-automatisiertes Fahrzeug um 6,4%. Diese Abnahme entsteht zum größten Teil aus einer Abnahme des Nebenenergiebedarfs um 30,1%. Diese Abnahme ergibt sich daraus, dass der ursprüngliche Fahrzyklus 139 s enthält, in denen das Fahrzeug steht. Der angepasste Fahrzyklus ist um diese 139 s kürzer als der ursprüngliche Fahrzyklus. Der Nebenenergiebedarf, für den eine konstante Leistung angenommen wird, ist dementsprechend geringer. Für den mechanischen Energiebedarf und die Energie, die rekuperiert werden kann, ergeben sich mit 2,1% und 3,2% nur geringfügige Abnahmen durch die Eliminierung der Stopps.

Automatisierter Personenkraftwagen

Für den automatisierten Personenkraftwagen ist der Gesamtenergiebedarf für den ursprünglichen Fahrzyklus durch den Energiebedarf des Automatisierungssystems um 32,4% höher als für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen. Der Nebenenergiebedarf wird

durch das Automatisierungssystem nahezu verdreifacht auf 15,09 MJ_{el}/100km. Die Energie, die rekuperiert werden kann, nimmt weiterhin um 5,4% ab, da ein größerer Teil dieser Energie dafür genutzt wird, den erhöhten Nebenenergiebedarf zu decken.

Die Eliminierung der Stopps führt für den automatisierten Personenkraftwagen zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs von 11,5%. Die Abnahme ergibt sich erneut zu großen Teilen aus dem Nebenenergiebedarf, der um 29,0% abnimmt. Der mechanische Energiebedarf und die Energie, die rekuperiert werden kann, nehmen um 2,1% und 3,0% ab.

Im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens ist der Gesamtenergiebedarf um 17,2% höher. Die Einsparungen im Nebenenergiebedarf durch die verkürzte Fahrzeit werden deutlich von dem zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems übertroffen.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt zeigen, dass der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W den Gesamtenergiebedarf von Personenkraftwagen deutlich erhöht. Der Gesamtenergiebedarf nimmt durch das Automatisierungssystem um 32,4% zu. Auf Grund dieses großen Einflusses wird am Ende der Analysen des Stadtverkehrs in Unterabschnitt 4.2.6 noch einmal eine Variation des Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems betrachtet.

Für nicht-automatisierte Personenkraftwagen, kann durch die Eliminierung von Stopps eine Einsparung im Gesamtenergiebedarf erzielt werden.

Für automatisierte Personenkraftwagen fallen die Einsparungen im Energiebedarf durch die Eliminierung von Stopps auf Grund des höheren Nebenenergiebedarfs deutlich höher aus.

Der Energiebedarf automatisierter Personenkraftwagen ist jedoch selbst ohne Stopps höher als der Energiebedarf des nicht-automatisierten Personenkraftwagens im ursprünglichen Fahrzyklus. Für automatisierte Personenkraftwagen werden die Einsparungen durch die Eliminierung der Stopps deutlich durch den Energiebedarf des Automatisierungssystems übertroffen.

Im nächsten Unterabschnitt 4.2.5 werden die Auswirkungen einer Geschwindigkeitsreduktion im Stadtverkehr auf den Energiebedarf von Personenkraftwagen diskutiert.

4.2.5 Verringerte Maximalgeschwindigkeit im Stadtverkehr

In diesem Unterabschnitt wird der Einfluss einer verringerten Maximalgeschwindigkeit im Stadtverkehr untersucht. Die Maximalgeschwindigkeit wird wie in Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben auf 30 km/h begrenzt. Die Auswirkungen dieser Anpassung auf den Energiebedarf sind in Abbildung 4-25 auf Seite 177 und Tabelle B-3 im Anhang dargestellt.

Im Folgenden werden zuerst die Auswirkungen der reduzierten Geschwindigkeit für einen nicht-automatisierten Personenkraftwagen und anschließend für einen automatisierten Personenkraftwagen vorgestellt.

Nicht-automatisierter Personenkraftwagen

Für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen führt die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs um 20,5%. Der

mechanische Energiebedarf nimmt um 34,6% ab und die Energie, die rekuperiert werden kann, um 52,9%. Dies liegt daran, dass die Beschleunigungs- und Bremsphasen im Fahrzyklus nicht mehr so stark ausgeprägt sind. Im Gegensatz dazu nimmt der Nebenenergiebedarf um 20,7% zu. Die Zunahme des Nebenenergiebedarfs ist teilweise auf die längere Fahrzeit zurückzuführen, welche um 8,8% zunimmt. Die Zunahme des Nebenenergiebedarfs geht jedoch über die Zunahme der Fahrzeit hinaus, weil die rekuperierte Energie deutlich abnimmt und somit ein geringerer Teil des Nebenenergiebedarfs direkt abgedeckt werden kann.

Automatisierter Personenkraftwagen

Für den automatisierten Personenkraftwagen führt eine Reduktion der Geschwindigkeit zu einer Abnahme des Gesamtenergiebedarfs um 11,5%. Im Vergleich zum nicht-automatisierten Personenkraftwagen fällt die Abnahme im Energiebedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion deutlich geringer aus. Dies liegt daran, dass der Nebenenergiebedarf für den automatisierten Personenkraftwagen deutlich größer ist als für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen. Der Anstieg des Nebenenergiebedarfs gleicht somit einen größeren Teil der Abnahme im mechanischen Energiebedarf aus.

Im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens nimmt der Gesamtenergiebedarf um 17,2% zu. Der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems übersteigt die Einsparungen im mechanischen Energiebedarf deutlich.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt zeigen, dass eine reduzierte Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h im Stadtverkehr den Energiebedarf nicht-automatisierter Personenkraftwagen deutlich reduzieren kann.

Für automatisierte Personenkraftwagen fallen die Einsparungen im Energiebedarf durch eine reduzierte Maximalgeschwindigkeit auf Grund des höheren Nebenenergiebedarfs wesentlich geringer aus.

Der Energiebedarf automatisierter Personenkraftwagen ist selbst bei reduzierter Geschwindigkeit höher als der Energiebedarf nicht-automatisierter Personenkraftwagen im ursprünglichen Fahrzyklus. Für automatisierte Personenkraftwagen werden die Einsparungen durch die Geschwindigkeitsreduktion durch den Energiebedarf des Automatisierungssystems deutlich übertroffen.

Im folgenden Unterabschnitt 4.2.6 werden die Eliminierung der Stopps und die Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit für ein letztes Szenario kombiniert.

4.2.6 Verringerte Maximalgeschwindigkeit und Eliminierung von Stopps im Stadtverkehr

In diesem Unterabschnitt werden die Anpassungen der vorherigen beiden Unterabschnitte 4.2.4 und 4.2.5 kombiniert. Wie in Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben werden die Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h begrenzt und Stopps aus dem Fahrzyklus eliminiert, indem die Minimalgeschwindigkeit auf 10 km/h begrenzt wird. Die Auswirkungen dieser

Anpassung auf den Energiebedarf sind in Abbildung 4-25 auf Seite 177 und Tabelle B-3 im Anhang dargestellt.

Da die beiden Anpassungen unabhängig voneinander sind, lassen sich die Auswirkungen der Anpassungen auf den Energiebedarf jeweils addieren. Der mechanische Energiebedarf und die Energie, die rekuperiert werden kann, nehmen beide durch die Geschwindigkeitsreduktion deutlich ab, der Einfluss der Eliminierung der Stopps ist dagegen für diese vernachlässigbar. Für den Nebenenergiebedarf bewirken die Eliminierung der Stopps und die Geschwindigkeitsreduktion gegensätzliche Effekte. Während die Geschwindigkeitsreduktion zu einer längeren Fahrzeit und somit einem höheren Nebenenergiebedarf führt, senkt die Eliminierung der Stopps die Fahrzeit und den Nebenenergiebedarf. Die zeitlichen Einsparungen durch die Stopps überwiegen die zusätzliche Fahrzeit auf Grund der geringeren Fahrgeschwindigkeit, sodass der Nebenenergiebedarf insgesamt abnimmt.

Der Gesamtenergiebedarf des nicht-automatisierten Personenkraftwagens nimmt durch die Eliminierung der Stopps und die Geschwindigkeitsreduktion insgesamt um 26,8% ab. Die größten Unterschiede entstehen dabei aus dem mechanischen Energiebedarf und der Energie, die rekuperiert werden kann. Der Nebenenergiebedarf nimmt insgesamt um 9,4% ab.

Der Gesamtenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens nimmt durch die Eliminierung der Stopps und die Geschwindigkeitsreduktion insgesamt um 21,8% ab. Die Abnahme ist geringer als für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen, da der Anteil des Nebenenergiebedarfs für den automatisierten Personenkraftwagen größer ist als für den nicht-automatisierten Personenkraftwagen und der Nebenenergiebedarf weniger stark abnimmt als der mechanische Energiebedarf.

Im Vergleich zum ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens nimmt der Gesamtenergiebedarf des automatisierten Personenkraftwagens weiterhin um 3,5% zu. Der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems überwiegt die Einsparungen beider Fahrzyklusanpassungen.

Variation des Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems

Der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems wird in dieser Arbeit standardmäßig mit 1000 W angenommen. Durch den Leistungsbedarf des Automatisierungssystems erhöht sich der Nebenenergiebedarf des Personenkraftwagens im Stadtverkehr um 189% und der Gesamtenergiebedarf um 32,4%.

Da der Nebenenergiebedarf einen so großen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf hat, wird der Energiebedarf des Automatisierungssystems für diese Analyse, wie zuvor für den Autobahnverkehr, zu 200 W und 3000 W variiert (siehe Unterabschnitt 4.2.3). Diese Werte entsprechen den Ober- und Untergrenzen der Literaturwerte (siehe Abbildung 2-13 auf Seite 40).

Für den erhöhten Energiebedarf des Automatisierungssystems von 3000 W liegt der Gesamtenergiebedarf inklusive beider Anpassungen des Fahrzyklus um 69,2% oberhalb des Energiebedarfs für den ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens. Der Nebenenergiebedarf ist in diesem Fall sogar um 80% größer als der mechanische Energiebedarf.

Im Gegensatz dazu liegt der Gesamtenergiebedarf für den reduzierten Energiebedarf des Automatisierungssystems von 200 W inklusive beider Anpassungen des Fahrzyklus um 21,2% unterhalb des Energiebedarfs für den ursprünglichen Fahrzyklus des nicht-automatisierten Personenkraftwagens. Die Einsparungen durch die Anpassungen des Fahrzyklus übertreffen in diesem Fall den zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems.

Für die Betrachtung des Stadtverkehrs lässt sich insgesamt festhalten, dass die Eliminierung von Stopps und die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h beides Optionen sind, den Energiebedarf für Personenkraftwagen zu senken. Die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit senkt den Energiebedarf durch einen verringerten mechanischen Energiebedarf erhöht allerdings die Fahrzeit und damit den Nebenenergiebedarf. Im Gegensatz dazu senkt die Eliminierung von Stopps den Energiebedarf hauptsächlich durch einen verringerten Nebenenergiebedarf auf Grund einer kürzeren Fahrzeit. Werden beide Anpassungen kombiniert, addieren sich die jeweiligen Einsparungen im Gesamtenergiebedarf.

Die Maßnahmen bewirken sowohl für nicht-automatisierte Personenkraftwagen als auch für automatisierte Personenkraftwagen eine Abnahme des Gesamtenergiebedarfs. Die Abnahme durch die Eliminierung der Stopps ist für automatisierte Personenkraftwagen größer, da diese einen höheren Nebenenergiebedarf haben. Aus demselben Grund ist die Abnahme durch die Geschwindigkeitsreduktion für nicht-automatisierte Personenkraftwagen größer.

Die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit stellt für heutige nicht-automatisierte Fahrzeuge eine Möglichkeit dar ihren Gesamtenergiebedarf deutlich zu senken. Durch eine Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h lässt sich der Gesamtenergiebedarf von Personenkraftwagen um 20,5% senken.

Für automatisierte Fahrzeuge führt der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems allerdings zu einem starken Anstieg des Gesamtenergiebedarfs. Der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems mit 1000 W, erhöht den Gesamtenergiebedarf eines Personenkraftwagens im Stadtverkehr um 32,4%.

Der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems hebt sämtliche Einsparungen durch die Eliminierung von Stopps und die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h auf.

Bei einer Reduktion des Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems auf 200 W nimmt der Gesamtenergiebedarf nur noch um 6,2% zu. In diesem Fall können durch die Eliminierung von Stopps und die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h insgesamt Einsparungen im Gesamtenergiebedarf erzielt werden.

Ein Leistungsbedarf von 1000 W für das Automatisierungssystem macht den Betrieb automatisierter Personenkraftwagen im Stadtverkehr energieintensiv und dadurch unattraktiv. Ein erhöhter Energiebedarf sorgt für höhere Betriebskosten und im Fall von batterieelektrischen Fahrzeugen auch für eine Abnahme der Reichweite und einen häufigeren Ladebedarf. Der Leistungsbedarf für das Automatisierungssystem kann zu Beginn eine Hürde für die Einführung automatisierter Personenkraftwagen darstellen. Auf lange Sicht kann der Leistungsbedarf auf Grund besserer Recheneffizienzen und spezialisierter Hardware für das Computersystem automatisierter Fahrzeuge jedoch abnehmen. Ein Leistungsbedarf von 200 W stellt beispielsweise keine Hürde mehr da. Gegen eine solche Reduktion des

Energiebedarfs spricht jedoch, dass mit steigender Leistungsfähigkeit des Computersystems auch die Anforderungen an das Automatisierungssystem erhöht werden.

In diesem Abschnitt wurde der Einfluss einer Fahrzeugautomatisierung auf den Energiebedarf von Personen- und Lastkraftwagen untersucht.

Der Energiebedarf von Lastkraftwagen wurde für eine Sattelzugmaschine im Autobahnverkehr untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W den Gesamtenergiebedarf einer Sattelzugmaschine im Autobahnverkehr um 1% erhöht. Eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Sattelzugmaschinen im Vergleich zum Fahrverhalten menschlicher Fahrer hat ebenfalls nur geringfügige Auswirkungen auf den Energiebedarf und gleicht den zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems aus. Eine Geschwindigkeitsreduktion von 90 km/h auf 70 km/h kann den Energiebedarf hingegen um bis zu 16% senken. Für einen nicht-automatisierten Betrieb ist eine Geschwindigkeitsreduktion allerdings nicht-praktikabel, da sowohl die Gesamtbetriebskosten als auch der Fahrerbedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion steigen. Für einen automatisierten Betrieb ist eine Geschwindigkeitsreduktion hingegen praktikabel, da der Fahrerbedarf unbeeinflusst ist und die Gesamtbetriebskosten durch den geringeren Energiebedarf sogar reduziert werden können.

Der Energiebedarf von Personenkraftwagen wurde für einen Mittelklasse Personenkraftwagen im Autobahn- und Stadtverkehr untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W den Gesamtenergiebedarf eines Personenkraftwagens im Autobahnverkehr um 4,7% und im Stadtverkehr um 32,4% erhöht. Für den Autobahnverkehr übertrifft der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems die möglichen Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise automatisierter Personenkraftwagen im Vergleich zur Fahrweise menschlicher Fahrer.

Der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems hebt für den Stadtverkehr sämtliche Einsparungen durch die Eliminierung von Stopps und die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h auf, obwohl diese Maßnahmen den Energiebedarf für nicht-automatisierte Personenkraftwagen deutlich reduzieren können. Durch eine Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h lässt sich der Gesamtenergiebedarf von nicht-automatisierten Personenkraftwagen im Stadtverkehr um 20,5% senken.

Erst eine Reduktion des Leistungsbedarfs des Automatisierungssystems kann dazu führen, dass der Gesamtenergiebedarf automatisierter Fahrzeuge im Stadtverkehr im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall abnimmt. Durch einen Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 200 W nimmt der Gesamtenergiebedarf nur noch um 6,2% zu. In diesem Fall können durch die Eliminierung von Stopps und die Reduktion der Maximalgeschwindigkeit auf 30 km/h insgesamt Einsparungen im Gesamtenergiebedarf erzielt werden.

Der zusätzliche Energiebedarf für das Automatisierungssystem kann zu Beginn eine Hürde für die Einführung automatisierter Personenkraftwagen darstellen. Auf lange Sicht kann eine Steigerung der Recheneffizienz von Computersystemen und die Verwendung spezialisierter Hardware für das Computersystem automatisierter Fahrzeuge den Energiebedarf jedoch senken. Dagegen spricht allerdings, dass die Anforderungen an das Automatisierungssystem mit steigender Leistungsfähigkeit des Computersystems ebenfalls erhöht werden.

4.3 Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung

In diesem Abschnitt wird der verkehrliche Einfluss automatisierter Fahrzeuge diskutiert. Dabei werden zuerst die modellierten Verkehrsaufkommen des Personen- und Güterverkehrs in Unterabschnitt 4.3.1 sowie die Umlegung der Verkehrsaufkommen auf das Straßennetzwerk und die resultierenden räumlichen und zeitlichen Verteilungen in Unterabschnitt 4.3.2 validiert. Anschließend wird in Unterabschnitt 4.3.3 die Auslastung des Autobahnnetzwerks durch einen Vergleich der Straßenkapazitäten mit dem jeweiligen Verkehrsaufkommen untersucht und besonders stark belastete Autobahnabschnitte herausgestellt. In Unterabschnitt 4.3.4 wird anschließend der Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Autobahnnetzwerks diskutiert. Abschließend findet in Unterabschnitt 4.3.5 ein Vergleich des Einflusses automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Autobahnnetzwerks mit dem Einfluss anderer Maßnahmen wie der Erweiterung überlasteter Autobahnabschnitte um eine Spur und der Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs statt.

4.3.1 Modelliertes Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr

Das modellierte Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr stellt die Grundlage für die Analysen der verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge und der Auslastung des Straßennetzwerks in dieser Arbeit dar. Die Betrachtung des Verkehrsaufkommens bezieht sich ausschließlich auf den Straßenverkehr. Für den Güterverkehr wird der Straßengüterverkehr von Lastkraftwagen über 3,5 t betrachtet. Für den Personenverkehr wird der private Verkehr mit Personenkraftwagen betrachtet.

In diesem Unterabschnitt wird das modellierte Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr validiert. Für den Personenverkehr wird dazu die jährliche Gesamtfahrleistung verwendet. Für die Validierung des Güterverkehrs wird neben der jährlichen Gesamtfahrleistung auch die Transportleistung sowie eine Aufteilung der Fahr- und Transportleistung nach Fahrtdistanzen verwendet. Die Validierung des Güterverkehrs findet im Vergleich zum Personenverkehr ausführlicher statt, weil der gesamte Ansatz zur Modellierung des Güterverkehrsaufkommens in dieser Arbeit erarbeitet wurde, während die Modellierung des Personenverkehrs auf dem Verkehrsnachfragemodell ETHOS.MO|DE [83, 86] basiert.

Validierung der modellierten Fahrleistung im Personenverkehr für das Jahr 2019

Die Validierung des modellierten Personenverkehrsaufkommens beschränkt sich in dieser Arbeit auf die Abbildung der Fahrleistung im Personenverkehr innerhalb der modellierten Regionen, weil der in dieser Arbeit gewählte Ansatz von dem Ansatz aus ETHOS.MO|DE abweicht. Die Validierung erfolgt durch einen Vergleich der modellierten Gesamtfahrleistung im Personenverkehr.

Für die Modellierung des Personenverkehrsaufkommens in dieser Arbeit werden Quelle-Ziel-Matrizen mit dem Verkehrsnachfragemodell ETHOS.MO|DE [83, 86] erzeugt. Dieses Modell ist anhand der Daten der Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland 2017“ [84] sowie dem „Deutschen Mobilitätspanel“ [85] kalibriert und validiert. Für das Personenverkehrsaufkommen

werden zwei Fälle unterschieden: Verkehr zwischen zwei Regionen und Verkehr innerhalb einer Region.

Für den Verkehr zwischen zwei Regionen kann eine Route zwischen den Regionen berechnet und das modellierte Personenverkehrsaufkommen auf diese umgelegt werden. Es ist somit eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Personenverkehrsaufkommen der Quelle-Ziel-Matrizen aus ETHOS.MO|DE und der Fahrleistung gegeben. Es wird daher angenommen, dass die Fahrleistung zwischen zwei Regionen bereits korrekt abgebildet wird. Innerhalb dieser Arbeit findet dementsprechend keine gesonderte Validierung der Fahrleistung für den Verkehr zwischen verschiedenen Regionen statt.

Für das Personenverkehrsaufkommen innerhalb einer Region kann hingegen keine Route berechnet werden. In dieser Arbeit werden daher für die Berechnung der Fahrleistung innerhalb von Regionen artifizielle Fahrtstrecken angenommen. Die Länge der Fahrtstrecke entspricht dabei für jede Region dem Radius eines Kreises, der dieselbe Fläche wie die Region besitzt. Anschließend werden die artifiziellen Fahrten auf das Straßennetzwerk umgelegt. Dieser Ansatz weicht von dem Ansatz aus ETHOS.MO|DE ab und muss daher validiert werden.

Die modellierte Gesamtfahrleistung des Personenverkehrs lässt sich mit Angaben aus „Verkehr in Zahlen“ vergleichen [155]. Für das Jahr 2019 lag die Personenverkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr laut „Verkehr in Zahlen“ bei 917,4 Mrd. Personenkilometern. Die Personenverkehrsleistung beinhaltet Fahrten als Fahrer und Mitfahrer. Der durchschnittliche Besetzungsgrad von Personenkraftwagen wird in „Verkehr in Zahlen“ mit 1,44 angegeben. Dadurch ergibt sich eine Gesamtfahrleistung von 637,1 Mrd. km.

Die modellierte Gesamtfahrleistung für das Jahr 2019 entspricht der Gesamtfahrleistung aus „Verkehr in Zahlen“ [155]. Die modellierte Gesamtfahrleistung beträgt 620,6 Mrd. km und liegt somit nur 2,6% unterhalb des Werts aus „Verkehr in Zahlen“.

Insgesamt zeigt die Validierung, dass der in dieser Arbeit verwendete Ansatz zur Berechnung der Fahrleistung innerhalb von Regionen plausible Ergebnisse liefert.

Validierung der Güterverkehrsleistung für das Jahr 2019

Für die Validierung des modellierten Güterverkehrsaufkommens werden die Fahrleistung und die Transportleistung berücksichtigt. Es werden sowohl die Gesamtwerte verglichen als auch Vergleiche aufgelöst nach Distanzklassen durchgeführt.

Die modellierte Gesamtfahrleistung und Gesamttransportleistung entsprechen jeweils den in der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156] erfassten Werten. Die modellierte Fahrleistung liegt bei 43.566 Mio. km und ist nur um 1,3% größer als der Referenzwert von 43.013 Mio. km, während die modellierte Transportleistung bei 467.836 Mio. tkm liegt und um 0,5% kleiner als der Referenzwert von 470.284 Mio. tkm ist.

Dass die modellierte Fahrleistung größer ist als in der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156], während die modellierte Transportleistung kleiner ist, ist auf Unterschiede in der durchschnittlichen Beladung von Lastkraftwagen je nach Fahrtweite zurückzuführen. Die Fahrleistung und Transportleistung werden daher im Folgenden noch einmal aufgeteilt nach Distanzklassen analysiert. Die Distanzklassen entsprechen dabei den elf Distanzklassen, die bereits in Abschnitt 4.1 für die Einsatzprofile der Betriebskostenanalyse verwendet wurden (siehe Tabelle 3-10 auf Seite 96).

Ein Vergleich zwischen der modellierten und der in der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156] erfassten Transportleistung nach Distanzklassen ist in Abbildung 4-26 dargestellt.

Für die einzelnen Distanzklassen weicht die modellierte Transportleistung teilweise stark von der statistisch erfassten Transportleistung ab. Die modellierte Transportleistung nimmt für die einzelnen Distanzklassen Werte im Bereich von 44,4–183,4% der statistisch erfassten Transportleistung an.

Für die Abweichungen lässt sich jedoch kein klares Muster erkennen. Für Fahrtweiten bis zu 50 km ist die modellierte Transportleistung kleiner als die statistisch erfasste Transportleistung, für Fahrtweiten im Bereich 51–200 km jedoch deutlich größer und anschließend im Bereich 201–700 km erneut kleiner. In einer kumulativen Betrachtung ist die modellierte Transportleistung lediglich für Fahrtweiten bis zu 50 km geringer als die statistisch erfasste Transportleistung und im sonstigen Verlauf immer größer. Dabei ist die kumulierte modellierte Transportleistung aller Fahrten bis zu 500 km und bis zu 700 km nahezu identisch zu der kumulierten statistischen Transportleistung.

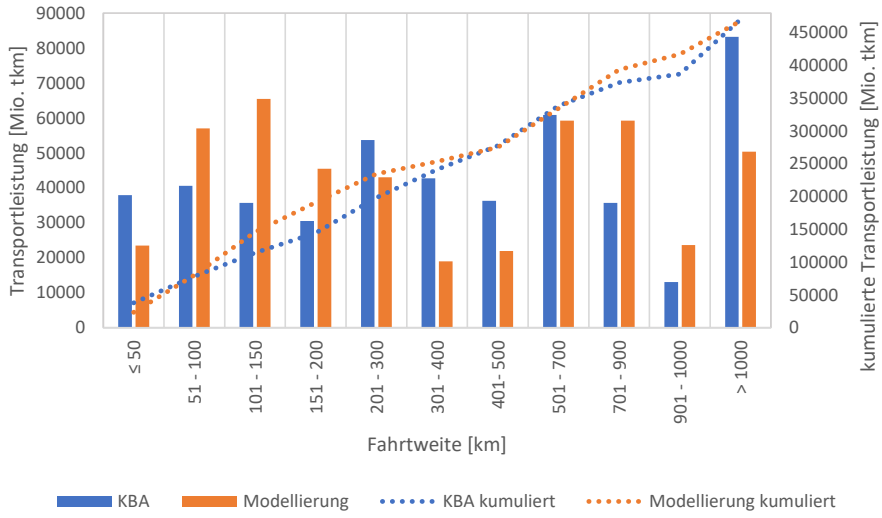


Abbildung 4-26 Vergleich der modellierten und vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) statistisch erfassten Transportleistung für das Jahr 2019 nach Distanzklassen. Die Werte des Kraftfahrtbundesamtes stammen aus der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156].

Für die Fahrleistung wird derselbe Vergleich wie für die Transportleistung durchgeführt. Ein Vergleich zwischen der modellierten und der in der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156] erfassten Fahrleistung nach Distanzklassen ist in Abbildung 4-27 dargestellt.

Innerhalb der Distanzklassen entspricht das Verhältnis der modellierten und statistisch erfassten Fahrleistung dem Verhältnis der jeweiligen Transportleistungen. Dies liegt daran, dass die modellierte Fahrleistung direkt aus der modellierten Transportleistung unter Berücksichtigung der Beladung für Lastfahrten und Anzahl der Leerfahrten berechnet wird. Die

Berechnung findet dabei für jede Distanzklasse statt und basiert auf den Angaben aus der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156] zur durchschnittlichen Beladung für Lastfahrten und Anzahl an Leerfahrten für die jeweilige Distanzklasse. Somit ergibt sich innerhalb der Distanzklassen für die Fahrleistungen dasselbe Verhältnis zwischen den modellierten und statistisch erfassten Werten wie für die Transportleistungen.

Die Aufteilung der Fahrleistung auf die Distanzklassen unterscheidet sich jedoch von der Aufteilung der Transportleistung auf die Distanzklassen. Während beispielsweise 5,0% der modellierten Transportleistung auf Fahrten im Bereich bis zu 50 km entfallen, sind es 7,8% der Fahrleistung. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die Beladung für Lastfahrten als auch die Anzahl an Leerfahrten der Fahrzeuge für jede Distanzklasse unterschiedlich sind. Aus der Beladung für Lastfahrten und der Anzahl der Leerfahrten lässt sich eine durchschnittliche Beladung für alle Fahrten einer Distanzklasse bestimmen. Das Verhältnis der Fahrleistungen verschiedener Distanzklassen ergibt sich aus dem Verhältnis der Transportleistungen und dem Verhältnis der durchschnittlichen Beladungen. Bei einer identischen Transportleistung für zwei Distanzklassen kann die Fahrleistung beispielsweise auf Grund einer geringeren durchschnittlichen Beladung für eine der beiden Distanzklassen höher ausfallen. Fahrten im Bereich bis 50 km weisen unter Berücksichtigung von Leerfahrten mit 6.888 kg die geringste durchschnittliche Beladung auf, Fahrten im Bereich 901–1000 km mit 14.165 kg die höchste. Dadurch ist die Fahrleistung von Fahrten im Bereich bis zu 50 km größer als die Fahrleistung von Fahrten im Bereich 901–1000 km, obwohl die Transportleistung von Fahrten im Bereich bis 50 km kleiner ist als die Transportleistung von Fahrten im Bereich 901–1000 km. Die geringe durchschnittliche Beladung für Fahrten im Bereich bis zu 50 km ist dabei im Wesentlichen auf den hohen Anteil an Leerfahrten von 41,9% für diese zurückzuführen.

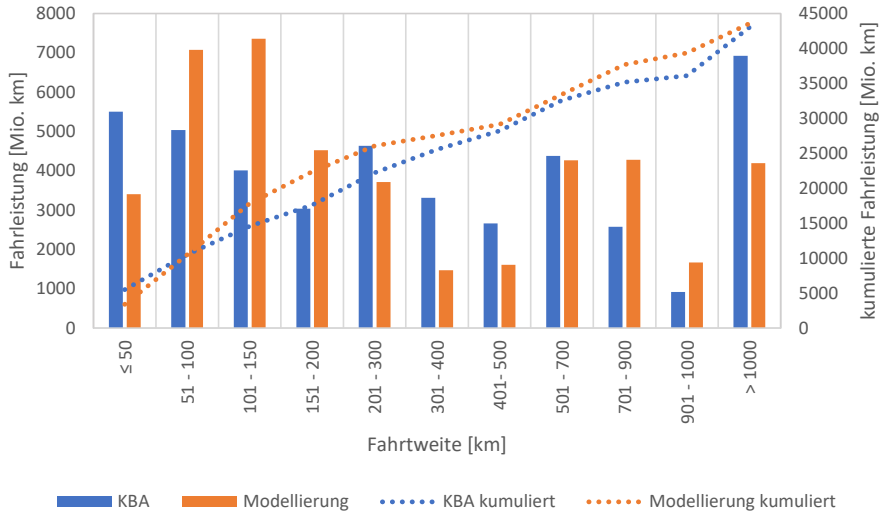


Abbildung 4-27 Vergleich der modellierten und vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) statistisch erfassten Fahrleistung inklusive Leerfahrten für das Jahr 2019 nach Distanzklassen. Die Werte des Kraftfahrtbundesamtes stammen aus der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156].

Dass die modellierte Fahrleistung größer ist als der Wert aus der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156], während die modellierte Transportleistung kleiner ist, ist nun folgendermaßen zu erklären. In der Modellierung entfällt auf Distanzklassen mit einer höheren durchschnittlichen Beladung ein geringerer Anteil der Transportleistung als in der Statistik, während auf Distanzklassen mit einer geringeren durchschnittlichen Beladung ein höherer Anteil entfällt. Dadurch ist die modellierte Fahrleistung insgesamt höher als die statistisch erfasste Fahrleistung, während die modellierte Transportleistung insgesamt kleiner ist als die statistisch erfasste Transportleistung. Der Unterschied ist jedoch gering. Die modellierte Fahrleistung ist um 1,3% größer als die statistisch erfasste Fahrleistung und die modellierte Transportleistung um 0,5% kleiner als die statistisch erfasste Transportleistung. Die Gesamtabweichung liegt dadurch bei weniger als 2%.

Insgesamt zeigt die Validierung, dass der in dieser Arbeit verwendete Ansatz zur Modellierung des Güterverkehrsaufkommens plausible Ergebnisse liefert. Die modellierte Gesamtfahrleistung und Gesamttransportleistung entsprechen jeweils den in der Statistik über den Inlandsverkehr europäischer Lastkraftwagen [156] erfassten Werten. Für die Verteilung der Transport- und Fahrleistung auf die Distanzklassen zeigen sich teilweise große Abweichungen zwischen den modellierten und statistisch erfassten Werten. Individuelle Abweichungen in einer Distanzklasse werden jedoch durch entgegengesetzte Abweichungen in den folgenden Distanzklassen ausgeglichen, sodass sich kein fortlaufender Trend in der Abweichung entwickelt. Es liegt keine systematische Über- oder Unterschätzung der Werte für große oder kleine Fahrtweiten vor. Stattdessen ist lediglich die Aufteilung auf die exakten Distanzklassen unscharf.

Im Folgenden wird abschließend die modellierte Entwicklung des Personen- und Güterverkehrsaufkommens anhand der jeweiligen Fahrleistungen für die Jahre 2030 und 2045 validiert.

Validierung der Entwicklung der Fahrleistung im Personen- und Güterverkehr

Die Gesamtfahrleistungen für den Personen- und Güterverkehr sind für die Jahre 2019, 2030 und 2045 in Tabelle 4-5 dargestellt. Im Folgenden wird zuerst die Entwicklung des Personenverkehrs und anschließend die Entwicklung des Güterverkehrs diskutiert.

Für den Personenverkehr nimmt die modellierte Gesamtfahrleistung für die Jahre 2030 und 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 ab. Für den Personenverkehr ergibt sich für das Jahr 2019 eine Gesamtfahrleistung von 620,6 Milliarden km. Diese nimmt bis zum Jahr 2030 um 3,7% und bis zum Jahr 2045 um 5,0% ab.

Die modellierte Abnahme der Fahrleistung im Personenverkehr für das Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 deckt sich nicht mit aktuellen Prognosen zur Entwicklung des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr. In der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022“ von Intraplan und Trimode im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr wird für das Jahr 2046 ein 2,5% höheres Personenverkehrsaufkommen im Vergleich zum Jahr 2019 erwartet [3]. In dem Bericht „Verkehrswende als Mehrwert“ von Agora Verkehrswende wird sogar ein Anstieg des Personenverkehrsaufkommens um 4,1% vom Jahr 2019 bis zum Jahr 2045 angenommen [178].

Die modellierte Anzahl der Fahrten im Personenverkehr wird deshalb mit einem Skalierungsfaktor angepasst. Für die Skalierung der modellierten Fahrleistung wird die Entwicklung der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022“ [3] als Referenzwert genutzt. Die modellierte Fahrleistung im Personenverkehr ergibt sich für das Jahr 2045 mit einem Skalierungsfaktor von 1,083 zu 638.701 Mio. km. Für die Skalierung wird angenommen, dass die Entwicklung der Fahrleistung der Entwicklung der Verkehrsleistung entspricht. Diese Annahme setzt einen festen Besetzungsgrad von Personenkraftwagen unabhängig von ihrer Fahrtweite voraus.

Für den Güterverkehr nimmt die modellierte Gesamtfahrleistung für die Jahre 2030 und 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 zu. Für den Güterverkehr ergibt sich für das Jahr 2019 eine Gesamtfahrleistung von 43,4 Milliarden km. Diese nimmt bis zum Jahr 2030 um 9,8% und bis zum Jahr 2045 um 24,7% zu.

Die modellierte Zunahme der Fahrleistung im Güterverkehr basiert auf aktuellen Prognosen zur Entwicklung des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr und deckt sich dementsprechend mit diesen. In der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022“ wird für das Jahr 2046 ein 27,2% höheres Güterverkehrsaufkommen im Vergleich zum Jahr 2019 erwartet [3]. In dem Bericht „Verkehrswende als Mehrwert“ liegt der Anstieg der Güterverkehrsleistung vom Jahr 2019 bis zum Jahr 2045 bei 22,6% [178].

Tabelle 4-5 Modellierte Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs für die Jahre 2019, 2030 und 2045.

Jahr	Fahrleistung im Personenverkehr [Mio. km]	Fahrleistung im Güterverkehr [Mio. km]
2019	620.559	43.433
2030	597.850	47.678
2045	589.752 (*638.701)	54.153

* Skalierte Fahrleistung, um aktuelle Prognosen für die Entwicklung des Personenverkehrsaufkommens abzubilden

Die Validierung in diesem Unterabschnitt hat gezeigt, dass das Gesamtverkehrsaufkommen des Personen- und Güterverkehrs in der Modellierung dieser Arbeit realistisch abgebildet wird.

Im folgenden Unterabschnitt 4.3.2 wird das modellierte Verkehrsaufkommen weiter validiert, diesmal mit einem Fokus auf die räumliche und zeitliche Verteilung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk.

4.3.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Verkehrsaufkommens

In diesem Unterabschnitt wird die Verteilung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk validiert. Dazu wird in einem ersten Schritt das verwendete Straßennetzwerk validiert. Anschließend wird die Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die verschiedenen Straßentypen validiert. Abschließend wird die räumliche und zeitliche Verteilung des Personen- und Güterverkehrsaufkommens auf einzelne Autobahnabschnitte validiert.

Validierung des verwendeten Straßennetzwerks

Das Straßennetzwerk wurde von „OpenStreetMap“ unter der Angabe verschiedener Ausschlusskriterien, wie in Unterabschnitt 3.3.3 beschrieben, heruntergeladen. Um sicherzustellen, dass das Straßennetzwerk repräsentativ abgebildet wurde, wird die Netzwerklänge der einzelnen Straßentypen sofern möglich mit den vorhandenen statistischen Daten abgeglichen.

Die Gesamtlänge des verwendeten Netzwerks ist in Tabelle 4-6 nach Straßentypen aufgeteilt aufgeführt. Für die Berechnung der Gesamtlänge wurde die Fahrtrichtung berücksichtigt. Ein 20 km langer Autobahnabschnitt, der zwei Fahrtrichtungen aufweist, geht dadurch mit 40 km in die Gesamtlänge des Straßennetzwerks ein.

Autobahnen machen nur einen geringen Teil des verwendeten Straßennetzwerks aus, während untergeordnete Straßentypen dominieren. Die Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks beträgt 510.428 km. Davon entfallen ungefähr 5,1% auf Autobahnen. Den größten Anteil mit 41,1% hat der Straßentyp „Tertiary“, welcher Kreisstraßen und sehr gut ausgebaute Gemeindeverbindungsstraßen sowie innerstädtische Vorfahrtsstraßen bezeichnet.

Tabelle 4-6 Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks nach Straßentypen.

„OpenStreetMap“ Straßentyp	Gesamtlänge [km]	Reduzierte Gesamtlänge ohne Doppelzählung [km]
Motorway	26.075	13.067
Motorway Link	5.761	5.451
Trunk	8.236	5.616
Trunk Link	2.305	2.064
Primary	71.637	38.285
Primary Link	1.385	1.136
Secondary	184.022	94.805
Secondary Link	749	638
Tertiary	209.772	106.230
Tertiary Link	486	372
Gesamt	510.428	267.664

Die Gesamtlänge des in der Modellierung verwendeten Straßennetzwerks lässt sich mit der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr vergleichen. Die Längenstatistik vom 1. Januar 2023 [171] ist in Tabelle 4-7 abgebildet.

Tabelle 4-7 Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs in Deutschland. Stand: 1. Januar 2023 [171].

Straßentyp	Länge [km]
Bundesautobahnen	13.172
Bundesstraßen	37.810
Landesstraßen	86.751
Kreisstraßen	91.823
Gesamt	229.556

Die jeweiligen Anteile der Straßentypen an der Gesamtlänge des Straßennetzwerks decken sich für das verwendete Straßennetzwerk mit den Angaben der Längenstatistik. Autobahnen haben in der Längenstatistik mit 5,7% den geringsten Anteil und Kreisstraßen mit 40,0% den größten [171].

Die Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks weicht jedoch stark von der Gesamtlänge des Straßennetzwerks in der Längenstatistik ab. Die Gesamtlänge des Straßennetzwerks beträgt in der Längenstatistik 229.556 km und entspricht damit 45,0% der Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks [171]. Ein expliziter Vergleich nach Straßentypen ist nur für Autobahnen möglich, da sich die verwendeten Straßentypen von „OpenStreetMap“ ansonsten nicht eindeutig den Straßentypen aus der Längenstatistik zuordnen lassen. Die Gesamtlänge der Autobahnen in der Längenstatistik entspricht 50,5% der Länge der Autobahnen des verwendeten Straßennetzwerks.

Der Unterschied in der Gesamtlänge der Straßennetzwerke ergibt sich im Wesentlichen aus einer unterschiedlichen Erfassung der Netzwerklänge. Während für das verwendete Straßennetzwerk jeder Straßenabschnitt richtungsabhängig erfasst wird, wird in der Statistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs nicht nach Fahrtrichtungen unterschieden. Für das

verwendete Straßennetzwerk werden dadurch im Vergleich zur Statistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs viele Straßenabschnitte doppelt erfasst.

Um die Erfassungsmethode für die Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks an die Erfassungsmethode der Statistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs anzugleichen, müssen Doppelzählungen durch die Richtungsabhängigkeit vermieden werden. Die Doppelzählung der Netzwerklänge des verwendeten Straßennetzwerks ergibt sich für verschiedene Straßentypen auf unterschiedliche Weise. Um die Doppelzählung durch die Richtungsabhängigkeit auszugleichen, wird die Länge der Straßenabschnitte, die sowohl von Punkt A zu Punkt B führen als auch andersherum, mit einem Faktor 0,5 gewichtet. Dies funktioniert jedoch nicht für Autobahnen und den Straßentyp „Trunk“. Für diese gibt es getrennte Fahrspuren für die Richtungen. Während die eine Richtung die Punkte A und B verbindet, verbindet die entgegengesetzte Richtung die Punkte B* und A*, welche nahe an B und A liegen, jedoch nicht identisch sind. Um dieses Problem zu umgehen, wird für diese Straßentypen die Länge der Straßenabschnitte mit einem Faktor 0,5 gewichtet, falls der Straßenabschnitt das Attribut „oneway = True“ besitzt, da dies auf getrennte Fahrspuren hinweist.

Die reduzierte Gesamtlänge des verwendeten Straßennetzwerks ohne Doppelzählung liegt weiterhin um 16,6% oberhalb der Gesamtlänge des Straßennetzwerks in der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs [171]. Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass der Straßentyp „Tertiary“ des verwendeten Straßennetzwerks Kreisstraßen und sehr gut ausgebaute Gemeindeverbindungsstraßen sowie innerstädtische Vorfahrtsstraßen bezeichnet. Letztere sind in der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs nicht berücksichtigt, da diese, wie der Name bereits sagt, nur Straßen des überörtlichen Verkehrs erfasst. Innerstädtische Vorfahrtsstraßen müssten aus der Betrachtung des verwendeten Straßennetzwerks ebenfalls ausgeschlossen werden. Dies ist allerdings mit der vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Ein genauer Vergleich ist nur für Autobahnabschnitte möglich, da sie sowohl in der Längenstatistik als auch im verwendeten Straßennetzwerk eindeutig bezeichnet sind.

Die reduzierte Gesamtlänge der Autobahnabschnitte des verwendeten Straßennetzwerks ohne Doppelzählung entspricht der Gesamtlänge der Autobahnabschnitte in der Längenstatistik [171]. Die reduzierte Gesamtlänge der Autobahnabschnitte ist mit 13.067 km nur um 0,8% geringer ist als die Gesamtlänge der Autobahnabschnitte in der Längenstatistik.

Eine weitere Möglichkeit zur Validierung des verwendeten Autobahnnetzwerks stellen die Berichte zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr des Bundesamts für Logistik und Mobilität und der Toll Collect GmbH dar [172, 173].

Die Länge der Autobahnabschnitte des verwendeten Straßennetzwerks entsprechen den Angaben der Berichte zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr. In den Berichten für das Jahr 2022 ist die tarifierte Netzlänge der Bundesautobahnen im ersten Halbjahr mit 26.373 km und im zweiten Halbjahr mit 26.411 km angegeben [172, 173]. Für die Berechnung der Netzlänge ist dabei die Richtungsabhängigkeit berücksichtigt. Die Länge der Autobahnabschnitte des verwendeten Straßennetzwerks liegt nur 1,1–1,3% unterhalb der Werte der Berichte.

Die Validierung des verwendeten Straßennetzwerks zeigt, dass das reale Straßennetzwerk und insbesondere das Autobahnnetzwerk adäquat abgebildet sind. Das verwendete Straßennetzwerk ist somit für die weiteren Analysen geeignet.

Als nächstes wird nun die Verteilung des Verkehrsaufkommens auf das Straßennetzwerk validiert. Dazu wird zuerst die Verteilung der Fahrleistung auf die verschiedenen Straßentypen diskutiert, bevor anschließend das modellierte Verkehrsaufkommen einzelner Autobahnabschnitte betrachtet und mit dem real gemessenen Verkehrsaufkommen verglichen wird.

Verteilung der Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs auf die Straßentypen

Im Folgenden wird zuerst die Verteilung der modellierten Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs auf die verschiedenen Straßentypen diskutiert. Anschließend findet eine Validierung der Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs auf Autobahnen statt.

Die Verteilung der modellierten Fahrleistung des Personen- und Güterverkehrs auf die verschiedenen Straßentypen ist für das Jahr 2019 in Tabelle 4-8 dargestellt. Für eine Einordnung der Straßentypen des verwendeten Straßennetzwerks sei an dieser Stelle auf Tabelle 3-11 auf Seite 98 verwiesen.

Die Fahrleistung des Personenverkehrs verteilt sich breit auf die verschiedenen Straßentypen. Die größten Anteile entfallen dabei mit 30,8% auf den Straßentyp „Secondary“, welcher Landes- und sehr gut ausgebaute Kreisstraßen bezeichnet, und Autobahnen mit 28,0%. Darauf folgt der Straßentyp „Primary“, welcher Bundesstraßen bezeichnet, mit einem Anteil von 18,8%. Alle übrigen Straßentypen haben jeweils Anteile von maximal 10,8%.

Die Fahrleistung des Güterverkehrs ist hingegen stark auf Autobahnen konzentriert. Auf Autobahnen entfallen 70,3% der Gesamtfahrleistung. Der nächstgrößere Anteil entfällt auf den Straßentyp „Primary“ mit einem Anteil von 14,0%. Alle weiteren Straßentyp haben Anteile von maximal 7,2%, wobei der Straßentype „Tertiary“, welcher Kreisstraßen und sehr gut ausgebaute Gemeindeverbindungsstraßen sowie innerstädtische Vorfahrtsstraßen bezeichnet, nur einen Anteil von 0,9% hat.

Der Güterverkehr hat für die verschiedenen Straßentypen jeweils einen stark unterschiedlichen Anteil an der kombinierten Gesamtfahrleistung des Personen- und Güterverkehrs. Während der Güterverkehr insgesamt einen Anteil von 6,5% an der kombinierten Gesamtfahrleistung des Personen- und Güterverkehrs hat, variiert dieser Anteil für die verschiedenen Straßentypen von 0,6% für den Straßentyp „Tertiary“ bis hin zu 14,9% für Autobahnen. Der Anteil des Güterverkehrs an der kombinierten Gesamtfahrleistung des Personen- und Güterverkehrs ist für die Berechnung der Straßenkapazitäten in der Betrachtung der Auslastung des Autobahnnetzwerks im nächsten Unterabschnitt 4.3.3 von großer Bedeutung.

Tabelle 4-8 Modellierte Fahrleistungen des Personen- und Güterverkehrs für das Jahr 2019 nach Straßentypen.

„OpenStreetMap“ Straßentyp	Fahrleistung im Personenverkehr [Mio. km]	Fahrleistung im Güterverkehr [Mio. km]	Anteil des Güterverkehrs an der kombinierten Gesamtfahrleistung des Personen- und Güterverkehrs [%]
Motorway	174.030	30.516	14,92
Motorway Link	24.922	880	3,41
Trunk	35.690	2.248	5,92
Trunk Link	7.622	112	1,44
Primary	116.462	6.081	4,96
Primary Link	2.393	38	1,56
Secondary	190.907	3.136	1,62
Secondary Link	1.362	13	0,92
Tertiary	66.948	407	0,60
Tertiary Link	223	2	0,85
Gesamt	620.559	43.433	6,54

Die modellierte Fahrleistung auf Autobahnen lässt sich anhand der Verkehrs- und Unfalldaten der Bundesanstalt für Straßenwesen [176] und der Mautstatistik des Bundesamts für Güterverkehr [177] validieren. Die Verkehrs- und Unfalldaten der Bundesanstalt für Straßenwesen umfassen dabei die kombinierte Fahrleistung des Personen- und Güterverkehrs, während die Mautstatistik des Bundesamts für Güterverkehr nur die Fahrleistung des Güterverkehrs beinhaltet.

Die modellierte Fahrleistung des Personen- und Güterverkehrs deckt sich mit den Werten der Verkehrs- und Unfalldaten der Bundesanstalt für Straßenwesen [176]. Für die Jahre 2015 bis 2022 fanden laut den Verkehrs- und Unfalldaten 31,4–33,4% der Fahrleistung des Personen- und Güterverkehrs auf Autobahnen statt, mit einer Fahrleistung von 213,9 Mrd. km für das Jahr 2020. Die modellierte Fahrleistung für das Jahr 2019 liegt mit einem Anteil von 30,8% weniger als 2% und einer Fahrleistung von 204,5 Mrd. km weniger als 5% unterhalb dieser Werte.

Im Vergleich zu den erfassten Werten der Mautstatistik des Bundesamts für Güterverkehr [177] ist die modellierte Fahrleistung des Güterverkehrs auf Autobahnen allerdings etwas zu gering. Für das Jahr 2019 ergibt sich aus der Mautstatistik eine Fahrleistung von 33 Mrd. km für den Güterverkehr auf Autobahnen. Die modellierte Verkehrsleistung für das Jahr 2019 ist mit 30,5 Mrd. km um 7,5% geringer als dieser Wert.

Die Validierung der Fahrleistungen zeigt, dass die reale Fahrleistung auf Autobahnen adäquat abgebildet wird und das modellierte Verkehrsaufkommen somit für die weiteren Analysen des Autobahnverkehrs geeignet ist.

Im Folgenden wird nun das modellierte Verkehrsaufkommen einzelner Autobahnabschnitte betrachtet und mit dem real gemessenen Verkehrsaufkommen verglichen. Es wird zuerst das Güterverkehrsaufkommen und anschließend das Personenverkehrsaufkommen betrachtet.

Güterverkehrsaufkommen auf einzelnen Autobahnabschnitten

Das modellierte durchschnittliche Aufkommen an Lastkraftwagen einer typischen Woche ist in Abbildung 4-28 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass es stark frequentierte Korridore gibt. Insbesondere die A2 als Ost-West-Verbindung vom Ruhrgebiet über Hannover nach Berlin, die A1 als Nord-Süd-Verbindung vom Ruhrgebiet nach Hamburg sowie die A4 bei Dresden und die A5 bei Karlsruhe stechen hervor. Das höchste Aufkommen mit fast 90.000 Lastkraftwagen pro Woche liegt auf einem Autobahnabschnitt nahe Dresden vor. Das Aufkommen liegt deutlich oberhalb des mittleren Aufkommens aller Abschnitte von 22.500 Lastkraftwagen pro Woche. Der Mittelwert ergibt sich dabei als gewichteter Mittelwert aller Autobahnabschnitte mit der Länge der Autobahnabschnitte als Gewichtungsfaktor.

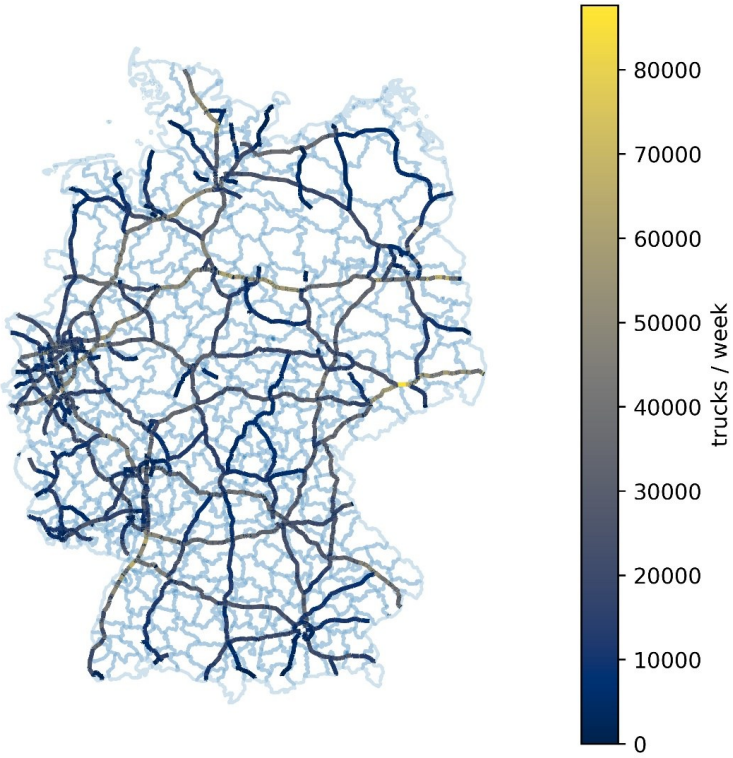


Abbildung 4-28 Modelliertes durchschnittliches wöchentliches Aufkommen an Lastkraftwagen auf deutschen Autobahnen für das Jahr 2019.

Die modellierte Verteilung des Güterverkehrsaufkommens lässt sich in einem ersten Schritt anhand der Werte aus den Berichten zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr des Bundesamts für Logistik und Mobilität und der Toll Collect GmbH validieren [172, 173].

Ohne eine Unterscheidung der verschiedenen Wochentage entspricht das modellierte mittlere tägliche Aufkommen an Lastkraftwagen aller Autobahnabschnitte dem in den Berichten zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr erfassten Aufkommen. In den Berichten für das Jahr 2022 wird das Aufkommen mit 3.127 und 3.262 Lastkraftwagen pro Tag angegeben [172, 173]. In der Modellierung sind es 3.215 Lastkraftwagen pro Tag für das Jahr 2019.

Für die Verteilung der Spitzenverkehrsaufkommen treten jedoch Unterschiede zwischen der Modellierung und den Berichten zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr auf. Laut den Berichten zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr weisen Autobahnabschnitte nahe Hannover mit durchschnittlich 11.136 und 11.603 Lastkraftwagen pro Tag das höchste Verkehrsaufkommen auf [172, 173]. In der Modellierung weist ein Autobahnabschnitt nahe Dresden mit durchschnittlich 12.518 Lastkraftwagen pro Tag das höchste Verkehrsaufkommen auf. Für Autobahnabschnitte nahe Hannover liegt das durchschnittliche modellierte Verkehrsaufkommen bei 8.900 Lastkraftwagen pro Tag.

Die modellierte Verteilung des Güterverkehrsaufkommens lässt sich weiterhin mit den gemessenen Daten von automatischen Dauerzählstellen auf Autobahnen vergleichen. Im Jahr 2019 wurde das Güterverkehrsaufkommen auf Autobahnen von 772 Zählstellen in stündlicher Auflösung erfasst [175]. Im Folgenden wird einerseits das wöchentliche Gesamtverkehrsaufkommen jeder einzelnen Zählstelle und andererseits das zeitlich aufgelöste Verkehrsaufkommen aller Zählstellen mit dem modellierten Verkehrsaufkommen der zugehörigen Autobahnabschnitte verglichen.

Das modellierte wöchentliche Güterverkehrsaufkommen liegt für die zugehörigen Autobahnabschnitte deutlich unterhalb des an den Zählstellen real gemessenen Aufkommens. Der Vergleich der Verkehrsaufkommen ist in Abbildung 4-29 dargestellt.[95] Für ungefähr 80% aller Zählstellen liegt das modellierte Verkehrsaufkommen unterhalb des gemessenen Verkehrsaufkommens. Insgesamt beträgt das modellierte Verkehrsaufkommen nur 73,1% des gemessenen Verkehrsaufkommens.

Die Abweichung zwischen dem modellierten und dem gemessenen Güterverkehrsaufkommen entsteht dabei nicht durch ein insgesamt zu geringes modelliertes Güterverkehrsaufkommen, sondern durch eine von der realen Verteilung abweichenden Verteilung des modellierten Güterverkehrsaufkommens auf die Autobahnabschnitte. Der Vergleich mit den Berichten zum Mautnetz und Lastkraftwagen-Verkehr [172, 173] hat gezeigt, dass das modellierte mittlere Aufkommen an Lastkraftwagen aller Autobahnabschnitte dem statistisch erfassten Wert entspricht. Das modellierte Verkehrsaufkommen der Autobahnabschnitte, für die das Verkehrsaufkommen durch Dauerzählstellen erfasst wurde, entspricht jedoch nur 73,1% des erfassten Verkehrsaufkommens. Die modellierte räumliche Verteilung weicht folglich von der gemessenen Verteilung ab. Das modellierte Güterverkehrsaufkommen findet verstärkt auf Autobahnabschnitten statt, die nicht von den Zählstellen erfasst werden.

[95] Das maximale wöchentliche Verkehrsaufkommen ist auf Grund einer unterschiedlichen Darstellungsweise in Abbildung 4-29 fast doppelt so hoch wie in Abbildung 4-28. In Abbildung 4-28 wird das Verkehrsaufkommen der einzelnen Fahrtrichtungen getrennt betrachtet. Für den Vergleich mit den Werten der Zählstellen in Abbildung 4-29 werden jedoch beide Fahrtrichtungen zusammengefasst. Die Zusammenfassung der Fahrtrichtungen ist notwendig, weil die Zählstellendaten zwar richtungsweise vorliegen, eine Zuordnung der Fahrtrichtungen der Zählstellen zu denen der Modellierung allerdings nicht möglich ist. Dies gilt auch für die Betrachtung des Personenverkehrsaufkommens in Abbildung 4-31 und Abbildung 4-32.

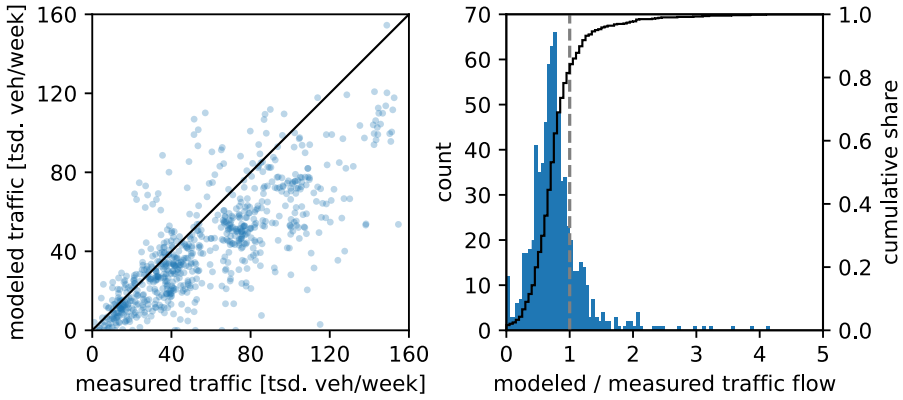


Abbildung 4-29 Vergleich des modellierten und gemessenen wöchentlichen Aufkommens an Lastkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. Die gemessenen Werte stammen von 772 Dauerzählstellen auf deutschen Bundesautobahnen, welche von der Bundesanstalt für Straßenwesen in stündlicher Auflösung bereitgestellt werden [175]. Es sind jeweils die Werte beider Fahrtrichtungen zusammengefasst.

Nach dieser Betrachtung der räumlichen Verteilung des Verkehrsaufkommens geht es nun um die zeitliche Verteilung des Verkehrsaufkommens.

In Abbildung 4-30 sind das an den Zählstellen gemessene stündliche Güterverkehrsaufkommen und das modellierte Güterverkehrsaufkommen der zugehörigen Autobahnabschnitte für das Jahr 2019 als Wochenprofile dargestellt.

Das zeitliche Profil des modellierten Güterverkehrsaufkommens unterscheidet sich für die Tage der Arbeitswoche[96] und das Wochenende. Für die Tage der Arbeitswoche ist das Verkehrsaufkommen um 2:00 Uhr am geringsten und nimmt bis um 15:00 Uhr auf mehr als das Doppelte zu, bevor es erneut bis um 2:00 Uhr des nächsten Tages abnimmt. Samstags nimmt das Verkehrsaufkommen hingegen bis um 10:00 Uhr nur leicht zu und fällt danach zum Sonntag hin fast vollständig bis auf null ab. Am Sonntag gibt es nahezu kein Verkehrsaufkommen. Ab 22:00 Uhr steigt das Verkehrsaufkommen sonntags wieder stark an. Dieser Anstiegt geht direkt in den beschriebenen Verlauf der Tage der Arbeitswoche über.

Das zeitliche Profil des modellierten Güterverkehrsaufkommens erscheint insgesamt plausibel. Das größte Verkehrsaufkommen findet tagsüber an den Tagen der Arbeitswoche statt. Samstags ist das Güterverkehrsaufkommen reduziert und sonntags gibt es auf Grund des Fahrverbots für Lastkraftwagen nahezu kein Güterverkehrsaufkommen, was sich jedoch mit dem Ende des Fahrverbots um 22:00 Uhr ändert.

Die modellierte zeitliche Verteilung des Güterverkehrsaufkommens entspricht der an den Zählstellen real gemessenen zeitlichen Verteilung des Güterverkehrsaufkommens [175], allerdings gibt es eine Zeitverschiebung um wenige Stunden zwischen den beiden Verteilungen. Die Verteilungen zeigen das gleiche wöchentliche Muster mit deutlichen Spitzen

[96] Montag bis Freitag

tagsüber an den Tagen der Arbeitswoche und einem geringeren Verkehrsaufkommen nachts und am Wochenende. Die modellierte Verteilung hängt jedoch zeitlich hinterher. Dies fällt insbesondere für das Verkehrsaufkommen samstags deutlich auf. Die Verschiebung ist dadurch zu begründen, dass die an den Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen gemessene zeitliche Verteilung des Güterverkehrsaufkommens, wie in Unterabschnitt 3.3.2 beschrieben, in der Modellierung als Zeitprofil der Abfahrtszeiten für den Güterverkehr verwendet wird. Fahrten mit einer Dauer von mehr als einer Stunde führen auch zu einem späteren Zeitpunkt noch zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen und verschieben dadurch die Verteilung.

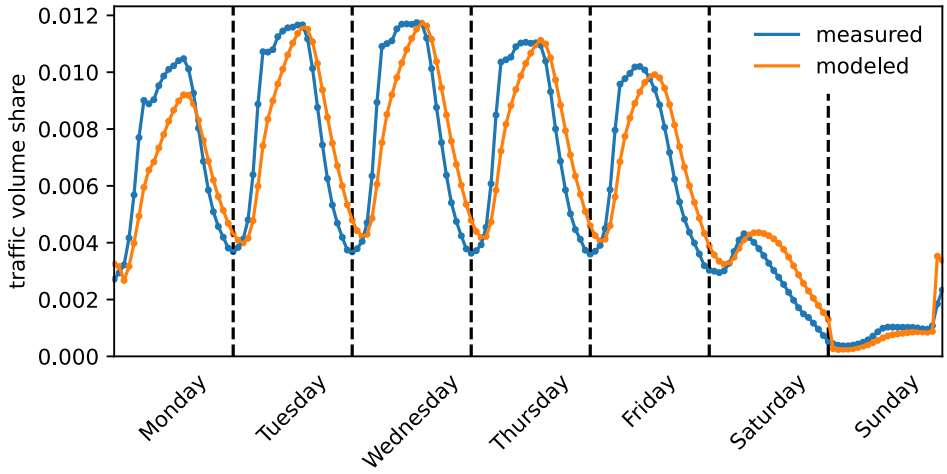


Abbildung 4-30 Vergleich des modellierten und gemessenen stündlichen Aufkommens an Lastkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. Die gemessenen Werte stammen von 772 Dauerzählstellen auf deutschen Bundesautobahnen, welche von der Bundesanstalt für Straßenwesen in stündlicher Auflösung bereitgestellt werden [175].

Zusammenfassend lässt sich für das Güterverkehrsaufkommen festhalten, dass das durchschnittliche Verkehrsaufkommen aller Autobahnabschnitte den statistischen Werten entspricht. Das Verkehrsaufkommen ist jedoch stark ungleich auf die einzelnen Autobahnabschnitte verteilt. Das modellierte Verkehrsaufkommen der einzelnen Autobahnabschnitte weicht dabei von dem im Mautsystem sowie dem durch Zählstellen erfassten Verkehrsaufkommen ab. Die modellierte zeitliche Verteilung entspricht allerdings der von den Zählstellen erfassten zeitlichen Verteilung.

Personenverkehrsaufkommen auf einzelnen Autobahnabschnitten

Das modellierte durchschnittliche Aufkommen an Personenkraftwagen einer typischen Woche ist in Abbildung 4-31 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass Großstädte wie Köln, Hamburg, München und Frankfurt ein hohes Verkehrsaufkommen aufweisen. Das höchste Aufkommen mit über 990.000 Personenkraftwagen pro Woche liegt auf einem Autobahnabschnitt östlich von Köln vor. Das Aufkommen liegt deutlich oberhalb des mittleren Aufkommens aller

Abschnitte von 120.000 Personenkraftwagen pro Woche. Der Mittelwert ergibt sich dabei als gewichteter Mittelwert aller Autobahnabschnitte mit der Länge der Autobahnabschnitte als Gewichtungsfaktor.

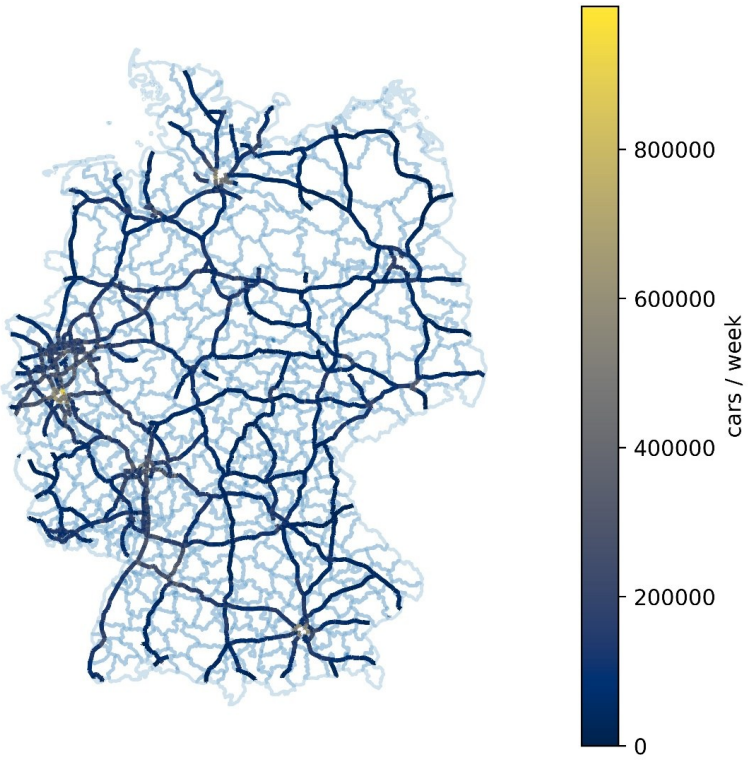


Abbildung 4-31 Modelliertes durchschnittliches wöchentliches Aufkommen an Personenkraftwagen auf deutschen Autobahnen für das Jahr 2019.

Die modellierte Verteilung des Personenverkehrsaufkommens lässt sich wie die modellierte Verteilung des Güterverkehrsaufkommens mit den gemessenen Daten von automatischen Dauerzählstellen vergleichen. Im Jahr 2019 wurde das Personenverkehrsaufkommen auf Autobahnen von 729 Zählstellen in stündlicher Auflösung erfasst [175]. Es wird erneut einerseits das wöchentliche Gesamtverkehrsaufkommen jeder einzelnen Zählstelle und andererseits das zeitlich aufgelöste Verkehrsaufkommen aller Zählstellen mit dem modellierten Verkehrsaufkommen verglichen.

Das modellierte wöchentliche Personenverkehrsaufkommen entspricht für die zugehörigen Autobahnabschnitte näherungsweise dem an den Zählstellen real gemessenen Aufkommen. Der Vergleich der Verkehrsaufkommen ist in Abbildung 4-32 dargestellt. Für ungefähr 55% aller Zählstellen liegt das modellierte Verkehrsaufkommen unterhalb des gemessenen Verkehrsaufkommens. Insgesamt ist das das modellierte Verkehrsaufkommen jedoch um 0,7% größer als das gemessene Verkehrsaufkommen. Für große Verkehrsaufkommen übertrifft das modellierte Verkehrsaufkommen das gemessene Verkehrsaufkommen tendenziell und in einigen Fällen sogar deutlich.

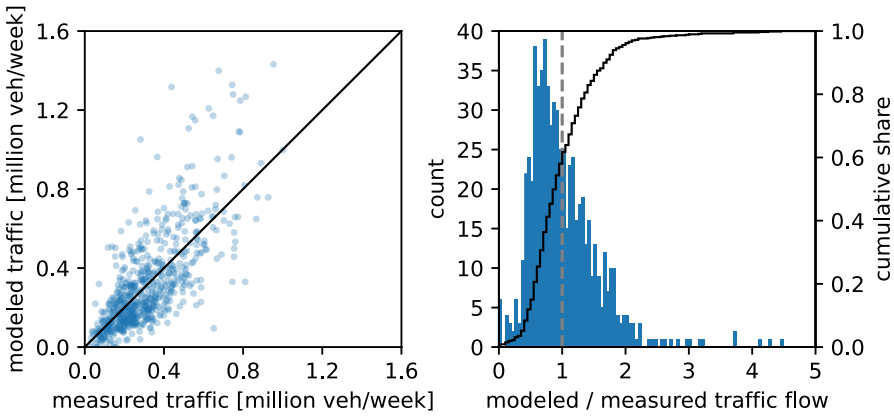


Abbildung 4-32 Vergleich des modellierten und gemessenen wöchentlichen Aufkommens an Personenkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. Die gemessenen Werte stammen von 729 Dauerzählstellen auf deutschen Bundesautobahnen, welche von der Bundesanstalt für Straßenwesen in stündlicher Auflösung bereitgestellt werden [175]. Es sind jeweils die Werte beider Fahrtrichtungen zusammengefasst

Nach der Betrachtung der räumlichen Verteilung des Verkehrsaufkommens geht es nun erneut um die zeitliche Verteilung des Verkehrsaufkommens.

In Abbildung 4-33 sind das an den Zählstellen gemessene stündliche Personenverkehrsaufkommen und das modellierte Personenverkehrsaufkommen der zugehörigen Autobahnabschnitte für das Jahr 2019 als Wochenprofile dargestellt.

Das zeitliche Profil des modellierten Personenverkehrsaufkommens besitzt für alle Tage zwischen 2:00 Uhr und 3:00 Uhr ein Minimum mit nahezu keinem Verkehrsaufkommen. Weiterhin zeigen sich für alle Tage zwei Spitzen im Verkehrsaufkommen, eine vormittags und eine nachmittags bis abends. Die Ausprägung der Spitzen unterscheidet sich jedoch für die Tage der Arbeitswoche und das Wochenende. Für die Tage der Arbeitswoche tritt die erste Spitze vormittags gegen 7:00 Uhr und die zweite Spitze abends gegen 20:00 Uhr auf. Die zweite Spitze ist dabei deutlich stärker ausgeprägt als die erste Spitze. Im Gegensatz dazu tritt die erste Spitze am Wochenende zwischen 7:00 Uhr und 9:00 Uhr auf und die zweite Spitze zwischen 16:00 Uhr und 20:00 Uhr. Die erste Spitze ist dabei stärker ausgeprägt als die zweite.

Das zeitliche Profil des modellierten Personenverkehrsaufkommens lässt sich für die Tage der Arbeitswoche zu Teilen durch den Berufsverkehr erklären. Personen fahren morgens zu ihrer Arbeitsstätte und verlassen diese nachmittags wieder, was jeweils zu einer Spitze im Verkehrsaufkommen führt. Das späte Auftreten der zweiten Spitze gegen 20:00 Uhr ist jedoch verwunderlich, da dieser Zeitpunkt weit nach dem üblichen Arbeitsende liegt und das Verkehrsaufkommen zu diesem Zeitpunkt erfahrungsgemäß geringer ausfallen sollte.

Das zeitliche Profil des modellierten Personenverkehrsaufkommens am Wochenende lässt sich nicht erklären. Insbesondere die erste Spitze im Verkehrsaufkommen zwischen 7:00 Uhr

und 9:00 Uhr erscheint unwahrscheinlich. Erfahrungsgemäß fällt das Verkehrsaufkommen am Wochenende geringer aus als an den Tagen der Arbeitswoche. Eine Spitze im Verkehrsaufkommen am Samstagmorgen, die über die Spitze des morgendlichen Berufsverkehrs an den Tagen der Arbeitswoche hinausgeht, ist nahezu undenkbar.

Die modellierte zeitliche Verteilung des Personenverkehrsaufkommens weicht deutlich von der an den Zählstellen real gemessenen zeitlichen Verteilung des Personenverkehrsaufkommens ab [175]. Für das Wochenende unterscheiden sich die modellierte und gemessene Verteilung strukturell voneinander. Während die modellierte Verteilung weiterhin zwei Spitzen vor- und nachmittags mit einem Tal in der Mittagszeit aufweist, zeigt die gemessene Verteilung nur eine einzige breite Spitze zur Mittagszeit.

Für die Tage der Arbeitswoche zeigen die modellierte und gemessene Verteilung jeweils täglich zwei Spitzen mit einem Tal zur Mittagszeit. Die modellierte und die gemessene Verteilung unterscheiden sich jedoch für die Tage der Arbeitswoche weiterhin in mehreren Aspekten. Erstens tritt die zweite tägliche Spitze in der modellierten Verteilung erst gegen 20:00 Uhr auf und somit einige Stunden später als für die gemessene Verteilung, für welche die zweite Spitze um 16:00 Uhr auftritt. Zweitens ist das Tal zur Mittagszeit für die modellierte Verteilung viel stärker ausgeprägt als für die gemessene Verteilung. Drittens ist die zweite tägliche Spitze in der modellierten Verteilung deutlich stärker ausgeprägt als die erste tägliche Spitze, während die Ausprägung der Spitzen in der gemessenen Verteilung weniger stark voneinander abweicht. Viertens tritt die größte Spitze des modellierten Verkehrsaufkommens montags machmittags auf und das modellierte Verkehrsaufkommen nimmt insgesamt von Montag bis Freitag ab, während die größte Spitze im gemessenen Verkehrsaufkommen freitags nachmittags auftritt.

Das zeitliche Profil des modellierten Personenverkehrsaufkommens erscheint in der gesamten Betrachtung insgesamt unplausibel.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell jedoch nicht korrigiert, da sich durch eine Korrektur keine für die Ziele dieser Arbeit relevanten Erkenntnisse gewinnen ließen. Die Korrektur der Zeitprofile würde zwar die Analyse von Anpassungen im Mobilitätsverhalten zur Minderung von Verkehrsspitzen ermöglichen, solche Analysen liegen jedoch außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Die Korrekturen hätten eine Fehlersuche und anschließende Neukalibrierung des Modells erfordert, was einen erheblichen Arbeitsaufwand bedeutet hätte, ohne einen Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfragen zu leisten. Das Modell wurde daher nicht korrigiert und die Einschränkungen an dieser Stelle anerkannt. Der Umgang mit diesen Einschränkungen für die weiteren Analysen dieser Arbeit wird am Ende dieses Unterabschnitts erläutert.

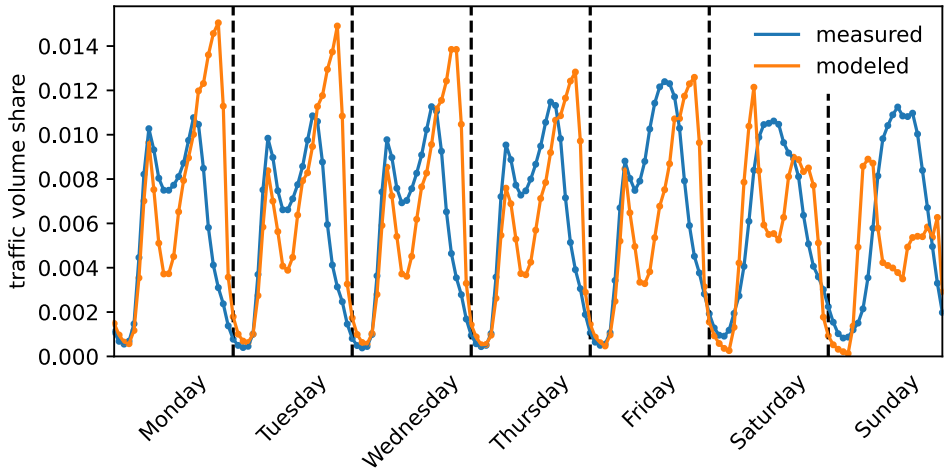


Abbildung 4-33 Vergleich des modellierten und gemessenen stündlichen Aufkommens an Personenkraftwagen an ausgewählten Zählstellen auf Autobahnen für das Jahr 2019. Die gemessenen Werte stammen von 729 Dauerzählstellen auf deutschen Bundesautobahnen, welche von der Bundesanstalt für Straßenwesen in stündlicher Auflösung bereitgestellt werden [175].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Personenverkehrsaufkommen stark auf Stadtregionen konzentriert ist. Das modellierte wöchentliche Verkehrsaufkommen der einzelnen Autobahnabschnitte entspricht dabei dem durch Zählstellen erfassten Verkehrsaufkommen. Die modellierte zeitliche Verteilung erscheint allerdings unplausibel und weicht stark von der durch Zählstellen erfassten zeitlichen Verteilung ab.

Die räumlichen und zeitlichen Verteilungen der modellierten Verkehrsaufkommen der Jahre 2030 und 2045 entsprechen denen des Jahres 2019. Auf eine explizite Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Die Analyse in diesem Unterabschnitt hat insgesamt gezeigt, dass es notwendig ist, das Verkehrsaufkommen für jeden Autobahnabschnitt und jede Stunde einzeln zu betrachten, um die Auslastung des Autobahnnetzwerks abschätzen zu können. Sowohl die räumliche Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die einzelnen Abschnitte als auch die zeitliche Verteilung innerhalb einer Woche zeigen große Variationen. Mittelwerte über mehrere Abschnitte oder einen Zeitraum mehrerer Stunden sind daher wenig aussagekräftig.

Die Validierung des modellierten Verkehrsaufkommens im Personen- und Güterverkehr hat jedoch weiterhin gezeigt, dass das modellierte Verkehrsaufkommen teilweise stark von dem an Zählstellen real erfassten Verkehrsaufkommen abweicht. Das modellierte Güterverkehrsaufkommen weicht dabei in der räumlichen Verteilung und das modellierte Personenverkehrsaufkommen in der zeitlichen Verteilung ab.

Auch wenn die genaue Zuordnung des modellierten Güterverkehrsaufkommens auf die Autobahnabschnitte von der real erfassten Verteilung abweicht, ist das modellierte

Güterverkehrsaufkommen plausibel. Es lassen sich im modellierten Güterverkehrsaufkommen Hauptkorridore für den Gütertransport erkennen, die sinnvoll erscheinen.

Im Gegensatz dazu sind die Abweichungen in der zeitlichen Verteilung des modellierten Personenverkehrsaufkommens im Vergleich zur zeitlichen Verteilung des real erfassten Personenverkehrsaufkommens gravierend. Verkehrsspitzen treten an den Tagen der Arbeitswoche in der modellierten Verteilung um 20:00 Uhr und damit deutlich verspätet zum Berufsverkehr auf. Am Wochenende zeigt die modellierte Verteilung weiterhin morgens zwischen 7:00 Uhr und 9:00 Uhr eine Verkehrsspitze, welche weder zum real erfassten Personenverkehrsaufkommen passt noch sinnvoll erscheint.

Im folgenden Unterabschnitt 4.3.3 wird eine Betrachtung der Auslastung des Autobahnnetzwerks erfolgen. Es stellt sich die Frage, wie eine sinnvolle Beurteilung der Auslastung bei den zuvor beschriebenen großen Unstimmigkeiten in der zeitlichen Verteilung des modellierten Verkehrsaufkommens überhaupt möglich ist.

Das Problem der Unstimmigkeiten in der zeitlichen Verteilung lässt sich umgehen, indem der Fokus für die Untersuchung der Auslastung des Autobahnnetzwerks auf die Identifizierung häufig überlasteter Autobahnabschnitte gelegt wird. Es findet keine Prognose statt, die angibt, wann eine Überlastung welcher Autobahnabschnitte zu erwarten ist. Stattdessen werden die Autobahnabschnitte identifiziert, für die das Verkehrsaufkommen über das Jahr gesehen die Kapazität des jeweiligen Abschnitts mit einer gewissen Häufigkeit überschreitet. Dafür ist nur die Anzahl und nicht die exakte zeitliche Zuordnung von Stunden mit hohem Verkehrsaufkommen relevant. Wird das erfasste Personenverkehrsaufkommen des Berufsverkehrs donnerstags morgens als Schwellwert für die Klassifizierung eines hohen Verkehrsaufkommens genutzt, besitzt das Wochenprofil des erfassten Verkehrsaufkommens 38 Stunden mit einem hohen Verkehrsaufkommen und das Wochenprofil des modellierten Verkehrsaufkommens 35 Stunden (siehe Abbildung 4-33 auf Seite 201). Das modellierte Verkehrsaufkommen kann dementsprechend zur Identifizierung häufig überlasteter Abschnitte verwendet werden.

4.3.3 Auslastung des Autobahnnetzwerks

In diesem Unterabschnitt wird die Verteilung des Verkehrsaufkommens auf das Autobahnnetzwerk mit Blick auf die Auslastung analysiert. Es werden häufig überlastete Autobahnabschnitte identifiziert, indem die jeweiligen Straßenkapazitäten berechnet werden und anschließend das Verkehrsaufkommen jedes Abschnitts mit seiner Kapazität verglichen wird. Im Folgenden wird zuerst die Berechnung der Kapazitäten der einzelnen Autobahnabschnitte und anschließend die Analyse der Auslastung vorgestellt.

Berechnung der Straßenkapazität von Autobahnabschnitten

Die Straßenkapazität bezeichnet die Anzahl an Fahrzeugen, die einen Straßenabschnitt in einem gegebenen Zeitraum passieren können. Die Straßenkapazität ist abhängig von der Geschwindigkeit, der Größe und den Folgeabständen der Fahrzeuge. Für die nachfolgenden Analysen werden dafür Fahrzeuge des Personenverkehrs und des Güterverkehrs unterschieden. Innerhalb der jeweiligen Kategorien wird jedoch davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge die gleichen Eigenschaften besitzen.

Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Fahrzeuge ist die Straßenkapazität abhängig vom jeweiligen Anteil der Fahrzeugtypen. Die Berechnung der Straßenkapazität C erfolgt in Anlehnung an die Berechnung von Friedrich [140] mit Hilfe folgender Formel:

$$C = n_{\mathrm{Spur}} \cdot \frac{p_{\mathrm{Pkw}} \cdot v_{\mathrm{Pkw}} + p_{\mathrm{Lkw}} \cdot v_{\mathrm{Lkw}}}{p_{\mathrm{Pkw}} \cdot (d_{\mathrm{Pkw}} + l_{\mathrm{Pkw}}) + p_{\mathrm{Lkw}} \cdot (d_{\mathrm{Lkw}} + l_{\mathrm{Lkw}})}$$

Gl. 4-1

Dabei ist n_{Spur} die Anzahl der Spuren des Straßenabschnitts, p_{Pkw} und p_{Lkw} bezeichnen die Anteile der Personenkraftwagen und Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen auf dem Straßenabschnitt, v_{Pkw} und v_{Lkw} ihre jeweiligen Geschwindigkeiten, d_{Pkw} und d_{Lkw} ihre räumlichen Folgeabstände zum vorausfahrenden Fahrzeug und l_{Pkw} und l_{Lkw} die jeweiligen Fahrzeuglängen inklusive Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug im Stand, welche mit 7,5 m und 21 m angenommen werden. Es wird dabei vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Spuren die Kapazität der einzelnen Spuren nicht beeinflusst.[97]

Der räumliche Folgeabstand für Personenkraftwagen d_{Pkw} ergibt sich aus dem Produkt der Geschwindigkeit v_{Pkw} und dem zeitlichen Folgeabstand Δt_{Pkw}.

$$d_{\mathrm{Pkw}} = v_{\mathrm{Pkw}} \cdot \Delta t_{\mathrm{Pkw}}$$

Gl. 4-2

Für die Berechnung in dieser Arbeit wird ein zeitlicher Folgeabstand von 1,6 s angenommen. Ein gängiger Richtwert für den Folgeabstand ist 1,8 s. Dies wird häufig als „Halber-Tacho“ bezeichnet, weil es einem Folgeabstand in Metern in Höhe des halben Geschwindigkeitswertes in km/h entspricht. Um zu berücksichtigen, dass der Richtwert des „Halben-Tachos“ nicht immer eingehalten wird, wird der Folgeabstand in dieser Arbeit mit 1,6 s angenommen.

Für Lastkraftwagen gilt eine weitere Regelung für den räumlichen Folgeabstand. Für Fahrgeschwindigkeiten oberhalb von 50 km/h ist in der Straßenverkehrsordnung vorgeschrieben, dass der Abstand mindestens 50 m betragen muss.[98] Unter der Verwendung des Richtwertes „Halber-Tacho“ würde der Abstand bei 50 km/h hingegen nur 25 m betragen. Erst ab Geschwindigkeiten oberhalb von 100 km/h läge der Wert unter Verwendung der „Halber-Tacho“-Regel oberhalb des gesetzlichen Mindestabstandes. Da Lastkraftwagen in den Betrachtungen in dieser Arbeit eine Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h besitzen, bedeutet diese Regelung effektiv, dass Lastkraftwagen für Geschwindigkeiten oberhalb von 50 km/h immer den Mindestabstand von 50 m einhalten.

$$d_{\mathrm{Lkw}} = \begin{cases} v_{\mathrm{Lkw}} \cdot \Delta t_{\mathrm{Lkw}} & , \quad v_{\mathrm{Lkw}} < 50 \dfrac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} \\ \max(v_{\mathrm{Lkw}} \cdot \Delta t_{\mathrm{Lkw}}, 50\mathrm{m}) & , \quad v_{\mathrm{Lkw}} \geq 50 \dfrac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} \end{cases}$$

Gl. 4-3

Die berechnete Kapazität einer Autobahnspur in Abhängigkeit des Anteils an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen ist in Abbildung 4-34 dargestellt. Für die Berechnung wurden

[97] Da die Spuren in der Realität nicht unabhängig voneinander sind, würden sich leichte Veränderungen der Kapazitäten der einzelnen Spuren mit der Anzahl der Spuren ergeben. Diese Veränderungen liegen jedoch im niedrigen Prozentbereich [147].

[98] § 4 Absatz 3 StVO

die Standardgeschwindigkeiten von Personen- und Lastkraftwagen auf Autobahnen im verwendeten Straßennetzwerk von 113 km/h und 80 km/h aus Tabelle 3-11 auf Seite 98 verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge 80% ihrer jeweiligen Standardgeschwindigkeit entspricht.

Es ist zu erkennen, dass die Kapazität mit steigendem Anteil an Lastkraftwagen stark abnimmt. Für den reinen Personenverkehr liegt die Kapazität bei 1910 Fahrzeugen pro Stunde, für den reinen Güterverkehr bei 900 Fahrzeugen pro Stunde. Die Abnahme ist nicht-linear, mit steigendem Anteil an Lastkraftwagen nimmt die Kapazität weniger stark ab. Für den durchschnittlichen Anteil an Lastkraftwagen von 15%[99] ergibt sich eine Kapazität von 1710 Fahrzeugen pro Stunde.

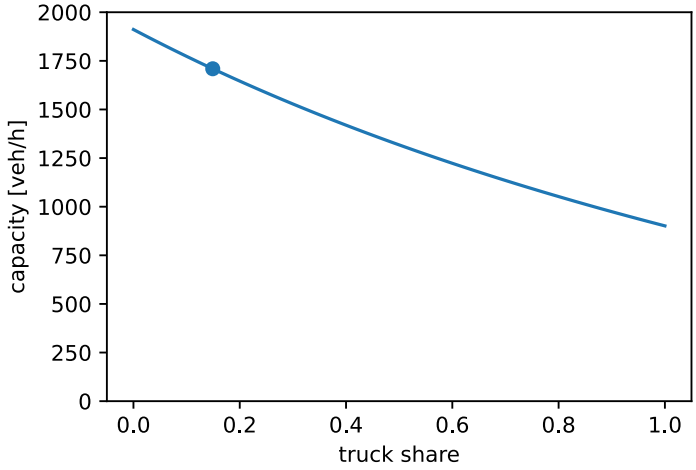


Abbildung 4-34 Straßenkapazität einer Autobahnspur in Abhängigkeit vom Anteil an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen. Der eingezeichnete Punkt repräsentiert den durchschnittlichen Anteil an Lastkraftwagen auf Autobahnen von 15% basierend auf der Fahrleistung.

Die Kapazität der Autobahnabschnitte lässt sich für jeden einzelnen Autobahnabschnitt basierend auf der gefahrenen Geschwindigkeit für diesen Abschnitt sowie dem jeweiligen Verhältnis von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen für jeden Zeitpunkt der Betrachtung bestimmen.

Bestimmung überlasteter Autobahnabschnitte

Mit Hilfe der Kapazität der Straßenabschnitte lassen sich nun besonders stark ausgelastet und überlastete Abschnitte identifizieren. Liegt das modellierte Verkehrsaufkommen auf einem Autobahnabschnitt für einen Zeitpunkt oberhalb der Kapazität des Abschnitts, so ist dieser für diesen Zeitpunkt überlastet.

In Anlehnung an die Engpassanalyse des Bundesverkehrswegeplans 2030 [1] werden im Folgenden Abschnitte, die mehr als 100 Stunden im Jahr überlastet sind, als gelegentlich staugefährdet und Abschnitte, die mehr als 300 Stunden im Jahr überlastet sind, als häufig staugefährdet bezeichnet.

[99] Basierend auf der Fahrleistung, siehe Tabelle 4-8 auf Seite 191

Mit diesem Ansatz wird ausschließlich eine Aussage darüber getroffen, welcher Autobahnabschnitt wie oft überlastet ist. Es findet keine Beurteilung der Stärke der jeweiligen Überlastung statt. Die Intensität möglicher Staus kann mit dem in dieser Arbeit gewählten Ansatz nicht abgebildet werden.

Die Gesamtlängen überlasteter Autobahnabschnitte sind für die Jahre 2019, 2030 und 2045 in Tabelle 4-9 dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Jahre werden im Folgenden diskutiert.

Tabelle 4-9 Gesamtlänge der staugefährdeten Autobahnabschnitte für die Jahre 2019, 2030 und 2045.

Jahr	Häufig staugefährdete Abschnitte	Gelegentlich staugefährdete Abschnitte
2019	2098 km (8,0%)	1073 km (4,1%)
2030	1629 km (6,3%)	785 km (3,0%)
2045	2184 km (8,4%)	930 km (3,6%)

Für das Jahr 2019 sind Autobahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von 2098 km häufig und 1073 km gelegentlich staugefährdet. Es sind somit insgesamt 12,1% des Autobahnnetzwerks staugefährdet.

In der Verteilung der staugefährdeten Abschnitte zeigt sich, dass insbesondere Autobahnabschnitte im Ruhrgebiet bis nach Köln sowie Regionen um große Städte wie Frankfurt, Hamburg und München überlastet sind. Dies liegt daran, dass die Überlastungen der Autobahnabschnitte im Wesentlichen durch hohe Personenverkehrsvorkommen entstehen. Das deutsche Autobahnnetzwerk und die überlasteten Abschnitte sind für das Jahr 2019 in Abbildung 4-35 dargestellt.

Für das Jahr 2030 nimmt die Gesamtlänge der staugefährdeten Abschnitte im Vergleich zum Jahr 2019 deutlich ab. Für das Jahr 2030 sind nur noch 1629 km häufig und 785 km gelegentlich staugefährdet. Dies entspricht 9,3% des Autobahnnetzwerks.

Die Abnahme der Gesamtlänge der staugefährdeten Abschnitte ist durch eine Abnahme des modellierten Personenverkehrsaufkommens um 3,7% im Zeitraum von 2019 bis 2030 zu begründen. Der Abnahme des Personenverkehrsaufkommens steht eine Zunahme des Güterverkehrsaufkommens um 9,8% im selben Zeitraum entgegen. Die absolute Abnahme des Personenverkehrsaufkommens überwiegt jedoch.

Die Verteilung der überlasteten Abschnitte für das Jahr 2030 entspricht der Verteilung der überlasteten Abschnitte für das Jahr 2019. Für das Jahr 2030 sind weniger Abschnitte staugefährdet als für das Jahr 2019, die staugefährdeten Abschnitte befinden sich aber weiterhin an den gleichen Stellen (vergleiche Abbildung 4-35 auf Seite 206 und Abbildung C-1 im Anhang).

Für das Jahr 2045 ist die Gesamtlänge der staugefährdeten Abschnitte vergleichbar zur Gesamtlänge der staugefährdeten Abschnitte für das Jahr 2019. Für das Jahr 2045 sind 2184 km häufig und 930 km gelegentlich staugefährdet. Dies entspricht 12,0% des Autobahnnetzwerks. Die räumliche Verteilung der staugefährdeten Abschnitte für das Jahr 2045 ist ebenfalls vergleichbar zur Verteilung der Abschnitte für das Jahr 2019 (vergleiche Abbildung 4-35 auf Seite 206 und Abbildung C-2 im Anhang).

Es ist verwunderlich, dass die Gesamtlänge der staugefährdeten Abschnitte für das Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 nicht zunimmt, obwohl sowohl das Personen- als auch das Güterverkehrsaufkommen für das Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 zunehmen.

Dass die Gesamtlänge der staugefährdeten Abschnitte bei einer Zunahme des Verkehrsaufkommens nicht zunimmt, lässt die Vermutung zu, dass der Anstieg des Verkehrsaufkommens nicht alle Abschnitte gleichermaßen, sondern insbesondere stark ausgelastete und bereits überlastete Abschnitte betrifft. Ein Indikator dafür ist, dass die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Abschnitte für das Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 zunimmt, während die Gesamtlänge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte abnimmt. Wären alle Abschnitte gleichermaßen betroffen, würde die Gesamtlänge der überlasteten Abschnitte insgesamt zunehmen.

An dieser Stelle wird die Limitation des gewählten Ansatzes deutlich: Es wird die Häufigkeit von Überlastungen jedoch nicht die schwere der Überlastungen bestimmt.

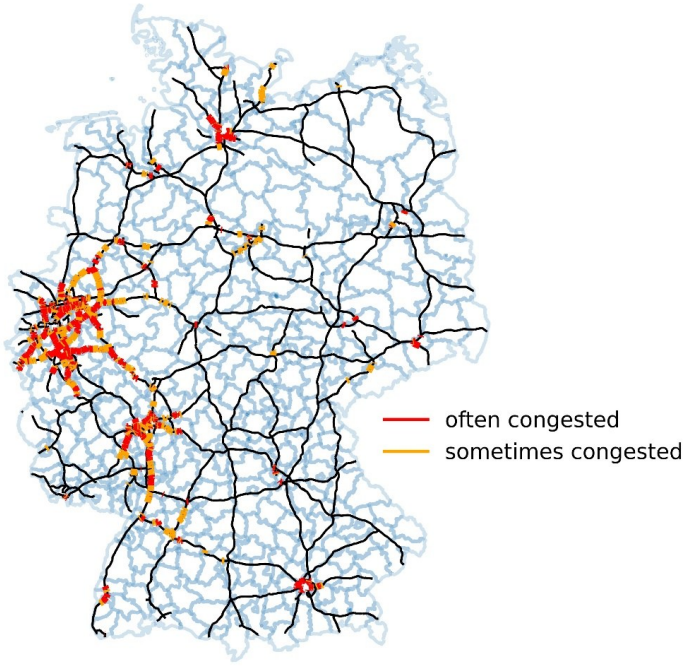


Abbildung 4-35 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2019.

Die in dieser Arbeit berechnete Gesamtlänge überlasteter Autobahnabschnitte ist vergleichbar zu der im Bundesverkehrswegeplan 2030 bestimmten Gesamtlänge überlasteter Autobahnabschnitte [1]. Im Bundesverkehrswegeplan werden für das Jahr 2030 Kapazitätsengpässe für etwa 2000 Richtungskilometer deutscher Autobahnen identifiziert, die

auf Grund ihrer Schwere und verkehrlichen Bedeutung als vordringlicher Bedarf eingestuft werden und durch die vorgesehenen Ausbaumaßnahmen des Bundesverkehrswegeplans behoben werden können. Dieser vordringliche Bedarf lässt sich mit den häufig staugefährdeten Abschnitte in dieser Arbeit vergleichen. Dazu sind jedoch nicht die Werte dieser Arbeit für das Jahr 2030, sondern die Werte für das Jahr 2045 zu nutzen, weil das prognostizierte Verkehrsaufkommen in dieser Arbeit für das Jahr 2030 deutlich geringer ist als im Bundesverkehrswegeplan und erst für das Jahr 2045 ein vergleichbares Verkehrsaufkommen erreicht wird. In dieser Arbeit werden für das Jahr 2045 Autobahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von 2184 km als häufig staugefährdet identifiziert. Die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Autobahnabschnitte in dieser Arbeit ist somit vergleichbar zu der Gesamtlänge der Autobahnabschnitte, für die im Bundesverkehrswegeplan ein Engpass mit vordringlichem Bedarf zur Beseitigung identifiziert wurde.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt haben gezeigt, dass in Zukunft trotz eines steigenden Verkehrsaufkommens ein vergleichbarer Anteil des Autobahnnetzwerks überlastet sein wird, wie es momentan der Fall ist. Für die Jahre 2019 und 2045 sind jeweils 12% des Autobahnnetzwerks durch Überlastung häufig oder gelegentlich staugefährdet. Für das Jahr 2030 sind auf Grund eines geringeren Personenverkehrsaufkommens nur 9% des Autobahnnetzwerks häufig oder gelegentlich staugefährdet. Die Analyse berücksichtigt dabei die Häufigkeit von Überlastungen auf einzelnen Abschnitten, jedoch nicht das Ausmaß der Überlastung. Die in dieser Arbeit ermittelte Überlastung des Autobahnnetzwerks deckt sich mit den Analysen des Bundesverkehrswegeplans 2030 [1].

4.3.4 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Autobahnnetzwerks

In der bisherigen Analyse wurde der Verkehr nicht-automatisierter Fahrzeuge betrachtet. In diesem Unterabschnitt wird nun der Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Autobahnnetzwerk untersucht. Im Folgenden wird zuerst der mögliche Einfluss automatisierter Lastkraftwagen für die Jahre 2030 und 2045 untersucht. Anschließend wird für das Jahr 2045 weiterhin der mögliche Einfluss automatisierter Personenkraftwagen analysiert.

Auswirkungen automatisierter Lastkraftwagen auf die Netzwerkauslastung

Automatisierte Lastkraftwagen können die Auslastung des Autobahnnetzwerks auf zwei gegenläufige Weisen beeinflussen: Sie können einerseits die Straßenkapazität und andererseits das Güterverkehrsaufkommen erhöhen. Der Einfluss der beiden Effekte wird im Folgenden gegeneinander abgewogen. Es findet zuerst eine Betrachtung der Straßenkapazität und anschließend eine Betrachtung des Verkehrsaufkommens statt.

Automatisierte Lastkraftwagen können durch geringere Folgeabstände die Straßenkapazität erhöhen. Automatisierte Fahrzeuge erfassen die Geschwindigkeiten und Abstände anderer Fahrzeuge genauer und haben eine kürzere Reaktionszeit als menschliche Fahrer. Dadurch können sie geringere Folgeabstände einhalten, ohne ein Sicherheitsrisiko einzugehen.

Die Folgeabstände automatisierter Lastkraftwagen werden halb so groß wie die Folgeabstände nicht-automatisierter Lastkraftwagen angenommen. Für automatisierte Lastkraftwagen entspricht der Folgeabstand 0.8 s. Dies entspricht einem Abstand, den Fahrzeuge mit Abstandregeltempomat bereits im Jahr 2022 einhalten konnten [149]. Wie in Unterabschnitt 2.5.2 beschrieben, wird der Folgeabstand automatisierter Lastkraftwagen unabhängig davon angenommen, was für einem Fahrzeug die automatisierten Lastkraftwagen folgen. Der Mindestabstand bei Geschwindigkeiten über 50 km/h wird ebenfalls von 50 m auf 25 m halbiert. Die Auswirkungen unterschiedlicher Anteile automatisierter Lastkraftwagen auf die Straßenkapazität sind in Abbildung 4-36 dargestellt.

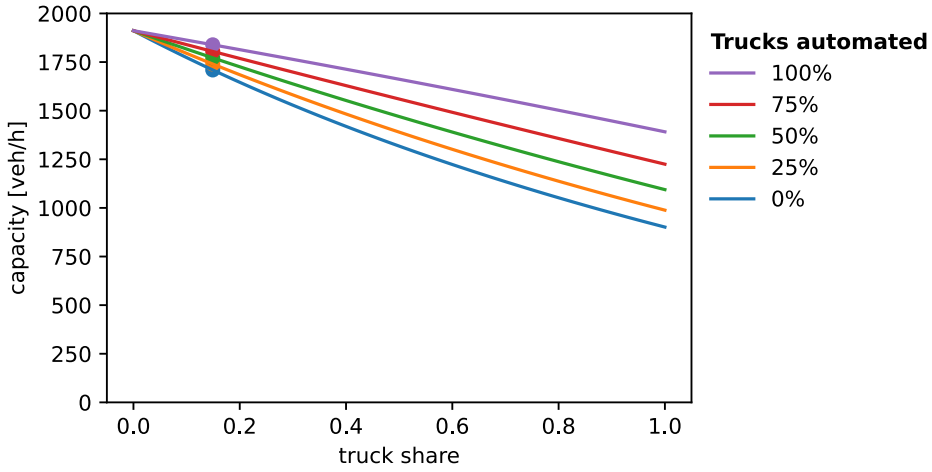


Abbildung 4-36 Straßenkapazitäten einer Autobahnspur in Abhängigkeit vom Anteil an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen für verschiedene Anteile automatisierter Lastkraftwagen. Die eingezeichneten Punkte repräsentieren den durchschnittlichen Anteil an Lastkraftwagen auf Autobahnen von 15% basierend auf der Fahrleistung.

Durch den geringen Anteil von Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen ist der durchschnittliche Anstieg der Straßenkapazität durch automatisierte Lastkraftwagen gering. Für einen reinen Lastkraftwagenverkehr würde die Automatisierung aller Lastkraftwagen für einen Kapazitätsanstieg um 54,4% im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall sorgen. Für den durchschnittlichen Anteil an Lastkraftwagen von 15% sorgt die Automatisierung aller Lastkraftwagen hingegen nur für einen Kapazitätsanstieg um 7,6% im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall. Sind lediglich 25%, 50% oder 75% der Lastkraftwagen automatisiert, steigt die Straßenkapazität entsprechend um 1,8%, 3,6% oder 5,6% im Vergleich zum nicht-automatisierten Fall.

Im Folgenden wird nur der Fall, dass alle Lastkraftwagen automatisiert sind, weiter betrachtet.

Für das Jahr 2030 reduziert die vollständige Automatisierung aller Lastkraftwagen insbesondere die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Autobahnabschnitte. Die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Abschnitte reduziert sich um 159 km und die Gesamtlänge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte um 19 km. Das entspricht Abnahmen um 9,8% und 2,3%.

Für das Jahr 2045 reduziert die vollständige Automatisierung aller Lastkraftwagen die häufig und gelegentlich staugefährdeten Abschnitte gleichermaßen. Die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Abschnitte reduziert sich um 133 km und die Gesamtlänge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte um 72 km. Das entspricht Abnahmen um 6,1% und 7,7%.

Die Verteilung der staugefährdeten Abschnitte bleibt dabei in beiden Fällen unverändert. Durch die erhöhte Straßenkapazität werden alle Regionen gleichermaßen entlastet (vergleiche jeweils Abbildung C-1 und Abbildung C-3 sowie Abbildung C-2 und Abbildung C-4 im Anhang).

Nach der Betrachtung der Auswirkungen automatisierter Lastkraftwagen auf die Straßenkapazität, findet nun eine Betrachtung der Auswirkungen automatisierter Lastkraftwagen auf das Güterverkehrsaufkommens statt.

Automatisierte Lastkraftwagen können durch geringere Betriebskosten ein zusätzliches Straßengüterverkehrsaufkommen erzeugen. Huang und Kockelman haben in einer Modellierung des US amerikanischen Güterverkehrs für eine Untersuchung, in der sie die Gesamtbetriebskosten des Straßengüterverkehrs um 25% reduziert haben, einen Anstieg im Straßengüterverkehrsaufkommen von 9,3% durch eine Verlagerung des Schienengüterverkehrs auf die Straße festgestellt [89]. Auf Grund fehlender Möglichkeiten für eine angepasste Abschätzung innerhalb dieser Arbeit, wird der von Huang und Kockelman bestimmte Anstieg des Straßengüterverkehrsaufkommens von 9,3% für diese Arbeit übernommen. Dies führt allerdings aus zweierlei Hinsicht zu einer Überschätzung des Anstiegs. Erstens liegen die maximalen Einsparungen, die in Unterabschnitt 4.1.4 dieser Arbeit für den Stufe 4 automatisierten Betrieb von Lastkraftwagen ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge berechnet wurden, mit 18,0% unterhalb der von Huang und Kockelman angenommenen Abnahme der Betriebskosten von 25%. Zweitens ist derselbe prozentuale Anstieg im Straßengüterverkehrsaufkommen für Deutschland gravierender als für die USA, weil der Anteil des Straßengüterverkehrs an der Transportleistung im Güterverkehr in Deutschland mit 70% deutlich größer ausfällt als in den USA mit 40%. Weiterhin könnte einem Anstieg im Verkehrsaufkommen durch geringere Betriebskosten mit einer entsprechenden Besteuerung entgegengewirkt werden. Für die Analysen in dieser Arbeit soll jedoch die Zunahme um 9,3% bestehen bleiben, um den maximal möglichen Anstieg abzubilden.

Das erhöhte Güterverkehrsaufkommen sorgt für die Jahre 2030 und 2045 vor allem für eine Zunahme der Gesamtlänge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte. Die Länge der häufig staugefährdeten Abschnitte nimmt in beiden Fällen um 1,9% zu, während die Länge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte im Jahr 2030 um 5,7% und im Jahr 2045 um 6,3% zunimmt.

Die Verteilung der staugefährdeten Abschnitte bleibt jedoch weiterhin unverändert. Durch das erhöhte Güterverkehrsaufkommen entstehen staugefährdete Abschnitte für die Jahre 2030 und 2045 nur in Regionen, in denen es zuvor bereits staugefährdete Abschnitte gab (vergleiche jeweils Abbildung C-1 und Abbildung C-5 sowie Abbildung C-2 und Abbildung C-6 im Anhang).

Werden die erhöhte Straßenkapazität und das erhöhte Straßengüterverkehrsaufkommen gemeinsam betrachtet, zeigt sich, dass die Auswirkungen des erhöhten Verkehrsaufkommens durch die erhöhte Kapazität mehr als ausgeglichen werden. Unter der Annahme, dass alle

Lastkraftwagen automatisiert sind und das Güterverkehrsaufkommen um 9,3% erhöht ist, nimmt die Länge der häufig staugefährdeten Abschnitte für das Jahr 2030 um 6,4% und die Länge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte um 3,4% im Vergleich zum Basisfall ab. Für das Jahr 2045 liegen die Abnahmen bei 5,2% für die Länge der häufig staugefährdeten Abschnitte und 5,8% für die Länge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte. Selbst die hoch abgeschätzte Zunahme des Straßengüterverkehrsaufkommens führt also nicht zu einem Anstieg der überlasteten Abschnitte.

Auswirkungen automatisierter Personenkraftwagen auf die Netzwerkauslastung

Für das Jahr 2045 werden weiterhin Szenarien betrachten, in denen zusätzlich zu den Lastkraftwagen auch Teile der Personenkraftwagenflotte automatisiert sind. Die Automatisierung von Personenkraftwagen wird vermutlich erst nach der Automatisierung von Lastkraftwagen stattfinden. Die Verfügbarkeit des Stufe 5 automatisierten Fahrens wird in dieser Arbeit ab dem Jahr 2035 angenommen, ab diesem Zeitpunkt ist die Automatisierung auch für Personenkraftwagen verfügbar. Bis zum Jahr 2045 kann daher bereits ein erheblicher Teil der Personenkraftwagenflotte automatisiert sein. Der Anteil der automatisierten Personenkraftwagen ist dabei jedoch von dem erwarteten Nutzen und der Bereitschaft der Nutzer, einen Aufpreis zu zahlen, abhängig. Es werden daher verschiedene Anteile automatisierter Personenkraftwagen betrachtet.

Die Folgeabstände für automatisierte Personenkraftwagen werden wie zuvor auch für automatisierte Lastkraftwagen mit 0,8 s halb so groß angenommen wie für menschliche Fahrer. Die Auswirkungen unterschiedlicher Anteile automatisierter Personenkraftwagen auf die Straßenkapazität sind in Abbildung 4-37 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass bereits 100% der Lastkraftwagen automatisiert sind.

Durch den hohen Anteil von Personenkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen können automatisierte Personenkraftwagen die durchschnittliche Straßenkapazität erheblich erhöhen. Für den durchschnittlichen Anteil an Personenkraftwagen von 85% sorgt eine Automatisierung aller Personenkraftwagen für einen Kapazitätsanstieg von 57,6%. Werden nur 25% der Personenkraftwagen automatisiert, steigt die Kapazität bereits um 9,8%. Dieser Kapazitätsanstieg ist größer als der Kapazitätsanstieg durch die Automatisierung aller Lastkraftwagen. Die Automatisierung der Personenkraftwagen besitzt durch den höheren Anteil von Personenkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen einen deutlich größeren Hebel zur Beeinflussung der Straßenkapazität.

Die in dieser Arbeit modellierte Steigerung der Straßenkapazität durch automatisierte Fahrzeuge liegt im Bereich der Steigerungen, die für den Einsatz heutiger Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomaten ermittelt wurden. Im Vergleich zum vollständig nicht-automatisierten Fall nimmt die Straßenkapazität durch eine vollständige Automatisierung in dieser Arbeit um 69,6% zu. Für aktuell verfügbare Fahrzeuge mit Abstandregeltempomaten haben Li et al. [149] einen Anstieg der Straßenkapazität von bis zu 75,6% im Vergleich zum Basisfall ohne Abstandsregeltempomaten bestimmt.

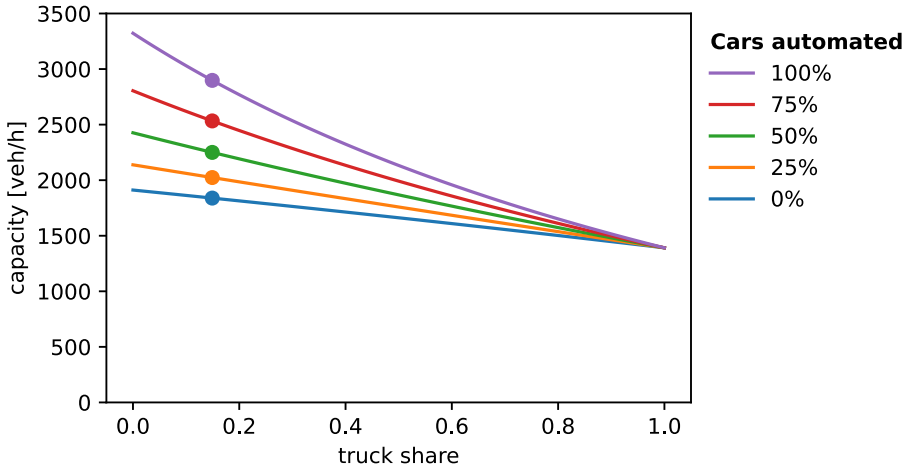


Abbildung 4-37 Straßenkapazitäten einer Autobahnspur in Abhängigkeit vom Anteil an Lastkraftwagen am Gesamtverkehrsaufkommen für vollständig automatisierte Lastkraftwagen und verschiedene Anteile automatisierter Personenkraftwagen. Die eingezeichneten Punkte repräsentieren den durchschnittlichen Anteil an Lastkraftwagen auf Autobahnen von 15%.

Durch die Automatisierung von 25% der Personenkraftwagen zusätzlich zur Automatisierung der Lastkraftwagen können die staugefährdeten Abschnitte deutlich reduziert werden. Die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Abschnitte nimmt um 30,3% und die Länge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte um 15,6% im Vergleich zur reinen Automatisierung der Lastkraftwagen ab. Im Vergleich zum Basisfall ohne jegliche Automatisierung für das Jahr 2045 liegen die Abnahmen bei 34,6% für die Länge der häufig staugefährdeten und 22,2% für die Länge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte.

Mit einer vollständigen Automatisierung aller Fahrzeuge lassen sich die staugefährdeten Abschnitte fast vollständig eliminieren. Im Vergleich zum Basisfall ohne jegliche Automatisierung für das Jahr 2045 kann durch eine vollständige Automatisierung aller Fahrzeuge die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Abschnitte um 84,6% und die Gesamtlänge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte um 79,7% reduziert werden. Für diesen Fall sind nur noch 337 km des Autobahnnetzwerks häufig und 189 km gelegentlich staugefährdet. Die staugefährdeten Abschnitte treten nun ausschließlich bei den Städten Frankfurt, Hamburg und München sowie im Ruhrgebiet bis nach Köln auf. Das deutsche Autobahnnetzwerk und die entsprechenden überlasteten Abschnitte sind in Abbildung 4-38 dargestellt.

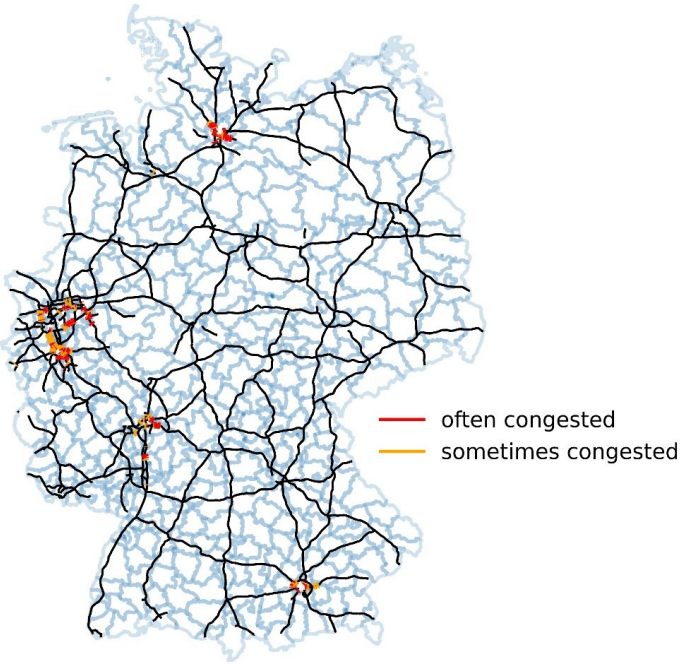


Abbildung 4-38 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 unter der Annahme, dass alle Fahrzeuge automatisiert sind.

Die in dieser Arbeit ermittelten Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des deutschen Autobahnnetzwerks sind vergleichbar zu den Ergebnissen der Studie von Hartmann et al. [154] zu den Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Kapazität des deutschen Autobahnnetzwerks. Die Autoren haben festgestellt, dass durch eine vollständige Automatisierung des Verkehrs ein Großteil der Engstellen im Autobahnnetzwerk behoben werden kann. Die Verteilung der überlasteten Abschnitte ist für die Studie von Hartmann et al. [154] und diese Arbeit ähnlich. Während im nicht-automatisierten Fall neben großen Städten auch Verbindungsstrecken zwischen diesen überlastet sind, sind für den Fall der vollständigen Automatisierung nur noch Abschnitte um große Städte herum weiterhin überlastet.

Die in dieser Arbeit ermittelte Kapazitätssteigerung weicht dabei jedoch deutlich von der in der Studie von Hartmann et al. [154] ermittelten Kapazitätssteigerung ab. Die Autoren finden, dass positive Auswirkungen auf die Straßenkapazität erst ab einer hohen Marktdurchdringung automatisierter Fahrzeuge auftreten, weil sie davon ausgehen, dass automatisierte Fahrzeuge nur dann einen geringeren Folgeabstand einhalten können als menschliche Fahrer, wenn sie einem anderen automatisierten Fahrzeug folgen. Für menschliche Fahrer nehmen sie einen Folgeabstand von 1,1 s, für automatisierte Fahrzeuge, die einem nicht-automatisierten Fahrzeug folgen, einen Folgeabstand von 1,8 s und für automatisierte Fahrzeuge, die einem

anderen automatisierten Fahrzeug folgen, einen Folgeabstand von 0,5 s an. Insgesamt ermitteln die Autoren für den Fall der vollständigen Automatisierung einen Kapazitätsanstieg von 30% für das gesamte Autobahnnetzwerk. Im Gegensatz dazu wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge unabhängig von der Art des vorausfahrenden Fahrzeugs immer denselben Folgeabstand einhalten. Der Folgeabstand automatisierter Fahrzeuge ist dabei in Anlehnung an die möglichen Folgeabstände aktueller Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomat gewählt. Der in dieser Arbeit gewählte Folgeabstand automatisierter Fahrzeuge beträgt 0,8 s und der Folgeabstand menschlicher Fahrer 1,6 s. Insgesamt beträgt der mittlere Kapazitätsanstieg aller Abschnitte in dieser Arbeit 69,6%. Die Unterschiede in den Studien sind somit darauf zurückzuführen, dass Hartmann et al. [154] bereits deutlich geringere Folgeabstände für menschliche Fahrer annehmen als es in dieser Arbeit der Fall ist und automatisierte Fahrzeuge somit deutlich geringere Folgeabstände einhalten müssen, um eine Kapazitätssteigerung zu erzielen.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt haben gezeigt, dass automatisierte Fahrzeuge dazu beitragen können, die Überlastung des Autobahnnetzwerks zu reduzieren. Automatisierte Fahrzeuge können die Straßenkapazität durch geringere Folgeabstände erhöhen.

Durch automatisierte Lastkraftwagen kann die Gesamtlänge der staugefährdeten Autobahnabschnitte reduziert werden. Automatisierte Personenkraftwagen können diesen Effekt deutlich verstärken. Bei einer vollständigen Automatisierung aller Fahrzeuge gibt es nur noch sehr wenige staugefährdete Abschnitte.

In einem letzten Schritt wird im folgenden Unterabschnitt 4.3.5 die Entlastung des Autobahnnetzwerks durch automatisierte Fahrzeuge zur Entlastung des Autobahnnetzwerks durch anderen kapazitätsverändernden Maßnahmen in einer verkehrlichen und ökonomischen Betrachtung ins Verhältnis gesetzt.

4.3.5 Vergleich der Fahrzeugautomatisierung mit weiteren Maßnahmen zur Verbesserung der Auslastung des Autobahnnetzwerks

In diesem Unterabschnitt wird untersucht, wie sich der Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Auslastung des Autobahnnetzwerks im Vergleich zu anderen Maßnahmen verhält. Als weitere Maßnahmen werden das Verbannen von Lastkraftwagen aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs und die Erweiterung von Autobahnabschnitten um eine Spur untersucht. Abschließend werden die Kosten der Erweiterung von Autobahnabschnitten um eine Spur mit den Kosten der Automatisierung der Fahrzeuge verglichen.

Alle Analysen in diesem Unterabschnitt werden für das Jahr 2045 durchgeführt.

Die Einflüsse der verschiedenen Maßnahmen auf die Netzwerkauslastung sind in Abbildung 4-39 vergleichend dargestellt.

Die Herangehensweisen und Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen werden im Folgenden nacheinander vorgestellt.

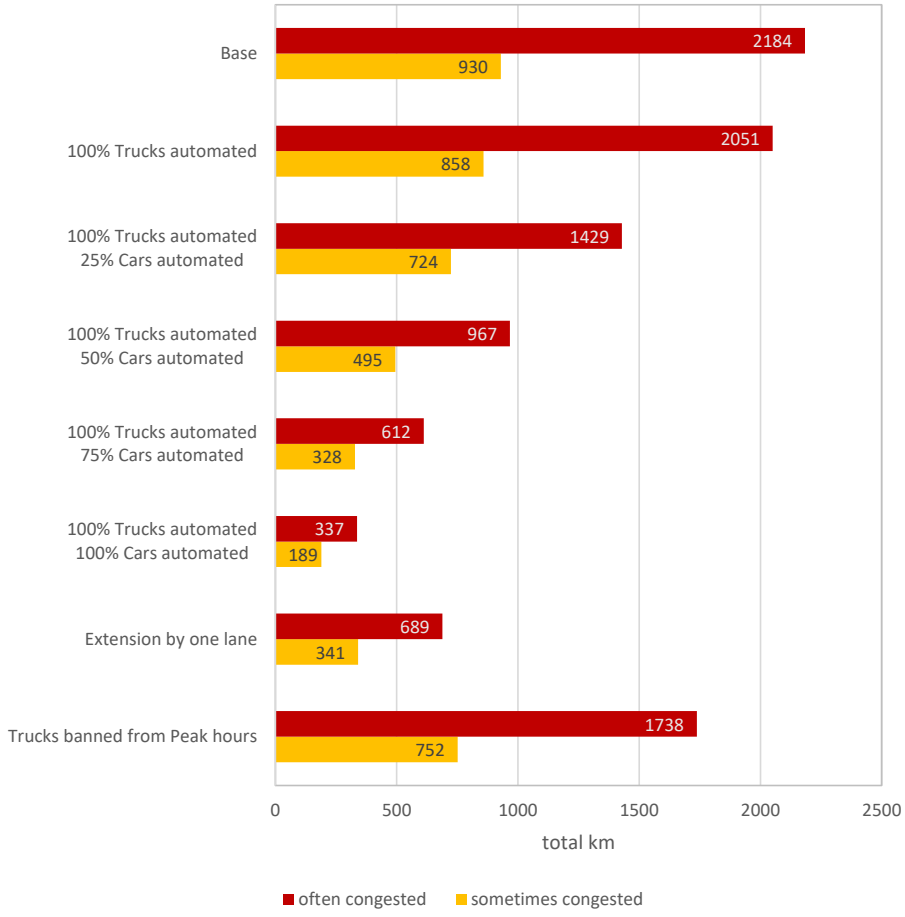


Abbildung 4-39 Vergleich der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf die Gesamtlänge der überlasteten Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045.

Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs

Das Verbannen des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs kann dazu beitragen, die starke zeitliche Konzentration des Verkehrsaufkommens zu verringern und dadurch überlastete Autobahnabschnitte zu entlasten. Wie in Abbildung 4-30 auf Seite 197 und Abbildung 4-33 auf Seite 201 bereits gezeigt, besitzen sowohl das Personen- als auch das Güterverkehrsaufkommen eine zeitliche Verteilung mit stark ausgeprägten Spitzen während des Tages. Wenn ein Teil des Güterverkehrsaufkommens vom Tag in die Nacht verschoben wird, kann dies die Spitzenbelastung reduzieren.

Die Umsetzung der Verbannung erfolgt im Rahmen der Analysen dieser Arbeit dadurch, dass das Güterverkehrsaufkommen in der Auslastungsanalyse einfach ignoriert wird. Es wird der reine Personenverkehr betrachtet. Dies stellt die maximal zu erreichende Verbesserung durch

eine Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten dar. In Realität würde die Verlagerung logistische Zeitpläne und Abläufe verändern und eine Verlagerung wäre nicht für alle Gütertransporte möglich. Weiterhin müsste das Güterverkehrsaufkommen auf andere Zeiten umgelegt werden. Dies würde die Auslastung zu anderen Zeiten erhöhen und eventuell dort zu Überlastungen führen. Die Analyse dient daher als Abschätzung des maximalen theoretischen Potentials zur Verbesserung der Auslastung der Autobahnen durch das Verbannen des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs.

Durch eine Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs lässt sich die Überlastung des Autobahnnetzwerks um ein Fünftel reduzieren. Die Gesamtlänge der häufig staugefährdeten Abschnitte nimmt um 20,4% und die Länge der gelegentlich staugefährdeten Abschnitte um 19,1% gegenüber dem Basisfall für das Jahr 2045 ab. Die Verbannung des Güterverkehrs hat somit einen geringeren Einfluss als die Automatisierung aller Lastkraftwagen und 25% der Personenkraftwagen.

Es zeigen sich regionale Unterschiede für die Abnahme der Überlastung des Autobahnnetzwerks durch die Verbannung des Güterverkehrs. In Städten fällt der Effekt geringer aus, weil dort der Personenverkehr dominiert und der Wegfall des Güterverkehrs kaum Auswirkungen hat. Das deutsche Autobahnnetzwerk und die entsprechenden überlasteten Abschnitte sind in Abbildung 4-40 dargestellt. Autobahnabschnitte, für die Entlastungen gegenüber dem Basisfall erkennbar sind, sind hervorgehoben.

Insgesamt hat die Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs im Vergleich zur Automatisierung der Fahrzeuge einen geringen Einfluss auf die Überlastung des Autobahnnetzwerks. Die Betrachtungen in dieser Arbeit beschreiben dabei bereits das maximale Potential einer Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs. Es wird angenommen, dass eine Verbannung des gesamten Güterverkehrsaufkommens möglich ist und die Verlagerung des Güterverkehrsaufkommens keine Überlastung zu anderen Zeitpunkten bewirkt. In der Realität würde dies den Einfluss der Verbannung weiter reduzieren.

Eine Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs stellt dementsprechend keine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Überlastung des Autobahnnetzwerks dar.

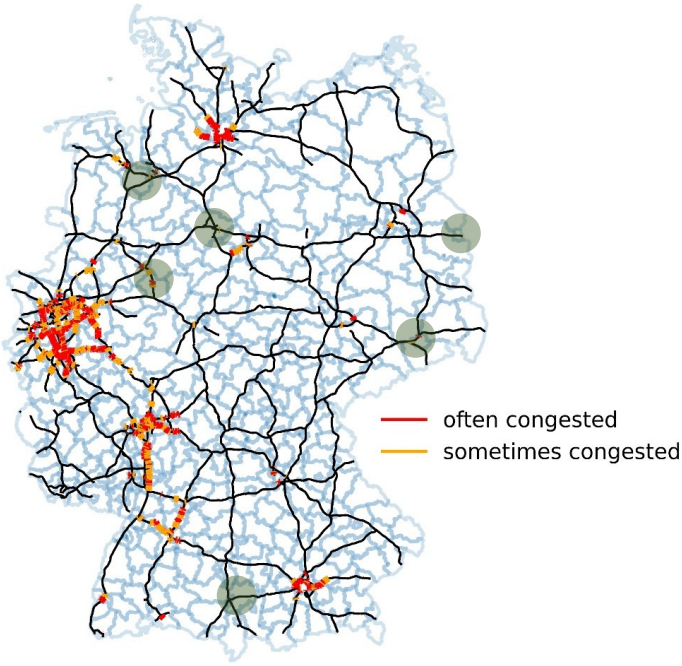


Abbildung 4-40 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 ohne Berücksichtigung des Güterverkehrs. Beispiele für Abschnitte, für die die Überlastung im Vergleich zum Basisfall mit Berücksichtigung des Güterverkehrs erkennbar abnimmt, sind grün unterlegt.

Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur

Eine Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur erhöht deren Kapazität und trägt dadurch dazu bei, überlastete Autobahnabschnitte zu entlasten.

Die Erweiterung um eine Spur führt in dieser Arbeit für alle Autobahnabschnitte zum gleichen Kapazitätsanstieg. Es wird wie zuvor davon ausgegangen, dass einzelne Spuren unabhängig voneinander sind. Durch die Erweiterung um eine Spur, erhöht sich die Kapazität der Autobahnabschnitte also, abgesehen von Unterschieden auf Grund unterschiedlicher Verhältnisse von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen auf den einzelnen Abschnitten, um den gleichen absoluten Wert. Der relative Kapazitätsanstieg ist jedoch von der Anzahl bereits verfügbarer Spuren abhängig. Die Kapazität eines vorher zweispurigen Autobahnabschnitts erhöht sich durch eine weitere Spur um 50%, während sich die Kapazität eines vorher dreispurigen Autobahnabschnitts nur um 33% erhöht.

Die Umsetzung der Erweiterung um eine Spur erfolgt im Rahmen der Analysen dieser Arbeit dadurch, dass in der Kapazitätsberechnung für jeden Autobahnabschnitt die Anzahl der Spuren um eins erhöht wird. Das bedeutet, es kommt für jede Fahrtrichtung eine Spur hinzu. Dieser Ansatz vernachlässigt, dass ein Spurausbau für bestimmte Autobahnabschnitte

beispielsweise auf Grund von Platzbeschränkungen nicht möglich ist. Wie anhand von Abbildung 4-35 auf Seite 206 bereits diskutiert, sind insbesondere Autobahnabschnitte im Ruhrgebiet bis nach Köln sowie Regionen um große Städte wie Frankfurt, Hamburg und München überlastet. Diese Regionen sind bereits dicht bebaut, sodass ein Spurausbau eventuell nicht möglich ist. Die Analyse dient daher als Abschätzung des maximalen theoretischen Potentials zur Verbesserung der Auslastung der Autobahnen durch die Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur.

Durch die Erweiterung um eine Spur lässt sich die Überlastung des Autobahnnetzwerks um zwei Drittel reduzieren. Durch die Erweiterung um eine Spur sind für das Jahr 2045 nur noch Autobahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von 689 km häufig und 341 km gelegentlich staugefährdet. Dies stellt Abnahmen um 68,5% und 63,3% im Vergleich zum Basisfall dar. Die Erweiterung um eine Spur hat somit einen vergleichbaren Einfluss wie die Automatisierung aller Lastkraftwagen und 75% der Personenkraftwagen.

In der Verteilung der überlasteten Autobahnabschnitte lässt sich kein regionaler Unterschied für die Auswirkungen der Erweiterung um eine Spur erkennen. Die überlasteten Abschnitte nehmen überall gleichermaßen stark ab. Das deutsche Autobahnnetzwerk und die entsprechenden überlasteten Abschnitte sind in Abbildung 4-41 dargestellt. Staugefährdete Abschnitte liegen fast nur noch bei den Städten Frankfurt, Hamburg und München sowie im Ruhrgebiet bis nach Köln vor.

Insgesamt hat die Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur einen vergleichbaren Einfluss auf die Überlastung des Autobahnnetzwerks wie eine hohe Automatisierungsrate. Die Betrachtungen in dieser Arbeit beschreiben dabei das maximale Potential einer Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur. Es wird angenommen, dass eine Erweiterung für alle Autobahnabschnitte möglich ist. Überlastete Autobahnabschnitte liegen jedoch häufig in dicht bebauten Regionen vor, sodass eine Erweiterung um eine Spur in diesen Fällen gegebenenfalls nicht möglich ist.

Die Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur stellt insgesamt eine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Überlastung des Autobahnnetzwerks dar.

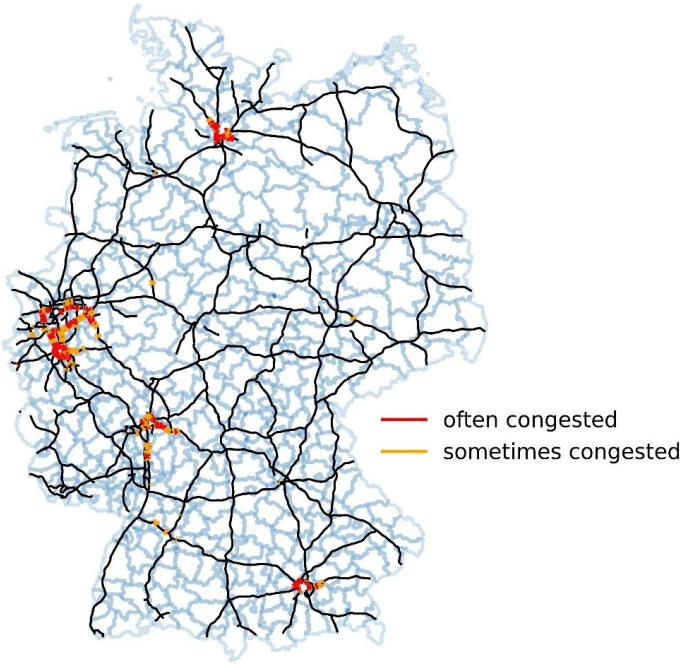


Abbildung 4-41 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 unter der Annahme, dass alle Autobahnabschnitte um eine Spur erweitert werden.

Kostenvergleich der Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur und der Automatisierung der Fahrzeuge

Wie zuvor bereits diskutiert und in Abbildung 4-39 auf Seite 214 dargestellt, bewirkt die Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine Spur eine vergleichbare Entlastung des Autobahnnetzwerks wie eine Automatisierung von 75% der Personenkraftwagen und aller Lastkraftwagen. An dieser Stelle soll nun eine Beurteilung stattfinden, welche der beiden Möglichkeiten eine kosteneffizientere Verbesserung der Auslastung des Straßennetzwerks darstellt. Die Kostenabschätzungen werden im Folgenden zuerst für die Erweiterung um eine Spur und anschließend für die Automatisierung vorgestellt.

Für die Erweiterung um eine Spur wird angenommen, dass diese nur für staugefährdete Abschnitte erfolgt. Für das Jahr 2045 sind in der Betrachtung dieser Arbeit 2184 km häufig und 930 km gelegentlich staugefährdet. Insgesamt werden Autobahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von 3114 km um eine Spur erweitert.

Die Kosten für die Erweiterung lassen sich aus den spezifizierten Projektkosten im Bundesverkehrswegeplan ableiten [1]. Im Bundesverkehrswegeplan sind Ausbauprojekte für Bundesautobahnen auf einer Gesamtlänge von 1.741 km spezifiziert mit Gesamtprojektkosten

von 15.160 Mio. €. Daraus ergeben sich Kosten für die Erweiterung von 8,7 Mio. € pro Kilometer.

Die Kosten für die Realisierung der Projekte gehen jedoch häufig deutlich über die geplanten Projektkosten hinaus. In der Antwort der Bundesregierung auf eine Anfrage der Fraktion DIE LINKE aus dem Jahr 2023 zur Zwischenbilanz des Bundesverkehrswegeplans 2030 sind für 340 von 1065 Projekten aktualisierte Projektkosten ab dem Jahr 2015 spezifiziert.[100] Die aktualisierten Kosten dieser 340 Projekte sind im Durchschnitt 78,7% höher als die ursprünglich geplanten Kosten. Der Kostenanstieg nimmt dabei mit der Zeit zu. Für die 63 Projekte mit aktualisierten Kostenständen ab dem Jahr 2022 sind die aktualisierten Kosten um 121,2% höher als die geplanten Kosten. Für die weiteren 725 Projekte, für die noch keine aktuellen Projektkosten vorliegen, wird der Unterschied zwischen den geplanten und aktualisierten Projektkosten vermutlich weiter zunehmen.

Die Kosten für die Erweiterung eines Autobahnabschnitts um eine Spur werden daher in dieser Arbeit mit 15–20 Mio. € abgeschätzt.

Damit ergeben sich Gesamtkosten von 46,7–62,3 Mrd. € für die Erweiterung aller staugefährdeten Autobahnabschnitte um eine Spur.

Für die Automatisierung der Fahrzeuge wird angenommen, dass nur die Kosten für die Automatisierung von Personenkraftwagen berücksichtigt werden müssen. Wie in den Analysen in Abschnitt 4.1 gezeigt, ist der Betrieb automatisierter Lastkraftwagen in den meisten Fällen ökonomisch sinnvoll. Daher wird angenommen, dass die Anschaffung automatisierter Lastkraftwagen von den Unternehmen selbst gezahlt wird. Im Gegensatz dazu hat die Auswertung der Studien in Abschnitt 2.3 gezeigt, dass die meisten Leute für sich noch keinen Vorteil in der Nutzung automatisierter Personenkraftwagen im Personenverkehr sehen. Daher wird angenommen, dass die Kosten für die Automatisierung von Personenkraftwagen subventioniert werden müssen.

Es wird angenommen, dass 75% der Personenkraftwagen und alle Lastkraftwagen automatisiert werden. In Deutschland waren Anfang 2024 insgesamt 49,1 Mio. Personenkraftwagen im Zentralen Fahrzeugregister erfasst [157]. Damit ergeben sich 36.8 Mio. Personenkraftwagen, für die die Kosten der Automatisierung zu berücksichtigen sind.

Die maximalen erlaubten Kosten für die Automatisierung, um die gleichen Gesamtkosten wie für die Erweiterung der staugefährdeten Autobahnabschnitte um eine Spur zu erhalten, liegen somit bei 1300–1700 € pro Fahrzeug.

Die maximalen erlaubten Kosten für die Automatisierung sind deutlich niedriger als die in dieser Arbeit angenommenen Kosten für die Automatisierung von Lastkraftwagen. Für das Jahr 2035 liegen die angenommenen Kosten für das Automatisierungssystem noch bei 25.000 €. Für automatisierte Lastkraftwagen gleicht der Wegfall der Fahrerkabine bereits einen großen Teil dieser Zusatzkosten aus. Für Personenkraftwagen sind solche Kosteneinsparungen allerdings nicht möglich.

Es ist somit eine deutliche Abnahme der Kosten des Automatisierungssystems notwendig. Die Automatisierung von Personenkraftwagen führt dazu, dass der Markt für

[100] BT-Drucks. 20/5762

Automatisierungssysteme deutlich wächst. Dies kann die Kosten für das Automatisierungssystem auf zwei Weisen senken. Erstens können Produktionskapazitäten erhöht und Produktionskosten reduziert werden. Zweitens können die Entwicklungskosten für das Automatisierungssystem auf eine größere Anzahl an Fahrzeugen aufgeteilt werden.

Die maximalen erlaubten Kosten für die Automatisierung werden durch eine ausschließliche Betrachtung des Autobahnverkehrs eventuell zu gering abgeschätzt. Die Entlastung der staugefährdeten Autobahnabschnitte durch die Erweiterung um eine Spur führt nur für diese Abschnitte zu einer Entlastung. Alle anderen Autobahnabschnitte sind weiterhin gleichermaßen ausgelastet. Automatisierte Fahrzeuge führen hingegen auf allen Autobahnabschnitten sowie im Stadt- und Landverkehr zu Entlastungen. Wie in Tabelle 4-6 auf Seite 190 dargestellt, haben Autobahnen nur einen Anteil von 5,1% am gesamten in dieser Arbeit verwendeten Straßennetzwerk. Werden für die übrigen Straßentypen vergleichbare Überlastungsquoten wie für die Autobahnabschnitte angenommen und die Kosten für den Ausbau pro Kilometer für diese halb so groß angenommen wie für Autobahnen, ergibt sich vereinfachend ein Faktor zehn für die Kosten des Ausbaus im Vergleich zu den Kosten für den reinen Ausbau des Autobahnnetzwerks. Die maximalen erlaubten Kosten für die Automatisierung, liegen somit bei 13.000–17.000 € pro Fahrzeug. In diesem Fall decken sich die maximalen erlaubten Kosten für die Automatisierung mit den in dieser Arbeit angenommenen Kosten für die Automatisierung.

Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Autobahnabschnitte eventuell nicht für alle staugefährdeten Autobahnabschnitte möglich. Insbesondere Autobahnabschnitte im Ruhrgebiet bis nach Köln sowie Regionen um große Städte wie Frankfurt, Hamburg und München sind überlastet. Diese Regionen sind bereits dicht bebaut. Eine Erweiterung der Autobahnabschnitte um eine weitere Spur ist dadurch gegebenenfalls an einigen Stellen nicht möglich. Automatisierte Fahrzeuge können hingegen auch in dicht besiedelten Regionen das Straßennetzwerk effektiv entlasten. Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge sind allerdings nicht nur auf diese Autobahnabschnitte beschränkt, sondern wirken auf alle Autobahnabschnitte gleichermaßen. Auch Autobahnabschnitte, für die eine Erweiterung um eine Spur möglich ist, werden durch die Automatisierung entlastet und die Erweiterung ist dadurch gegebenenfalls nicht mehr notwendig. Wenn automatisierte Fahrzeuge auch nur zur Entlastung für einen Teil der Autobahnabschnitte benötigt werden, weil ein Ausbau für diese nicht möglich ist, kann es daher sinnvoll sein, von Anfang an auf die Automatisierung des Verkehrs zu setzen und auf eine Erweiterung von Autobahnabschnitten zu verzichten.

Zuletzt kann die Verwendung von Abstandsregeltempomaten auf Autobahnen bereits eine große Entlastung bewirken. Der für die Analysen gewählte Folgeabstand automatisierter Fahrzeuge entspricht einem Abstand, den heutige Fahrzeuge bereits mit einem Abstandsregeltempomaten einhalten können. Ein flächendeckender Einsatz von Abstandsregeltempomaten kann daher auf Autobahnen bereits ähnliche Entlastungseffekte wie die Automatisierung der Fahrzeuge bewirken. Mit Kosten von 385–880 € pro Fahrzeug [98, 99] ist die Ausstattung der Fahrzeuge mit Abstandsregeltempomaten auch günstiger als die Erweiterung der überlasteten Autobahnabschnitte um eine Spur.

Die Analysen in diesem Unterabschnitt haben gezeigt, dass die Automatisierung von Fahrzeugen im Vergleich zur Erweiterung des Autobahnnetzwerks um eine Spur und der Verbannung von Lastkraftwagen aus Stoßzeiten des Personenverkehrs eine effiziente Möglichkeit darstellt, die Überlastung des Autobahnnetzwerks zu reduzieren.

Eine Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs stellt keine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Überlastung des Autobahnnetzwerks dar.

Die Erweiterung überlasteter Autobahnabschnitte um eine Spur, kann die Überlastung hingegen effektiv reduzieren. Die Reduzierung der Überlastung durch die Erweiterung um eine Spur ist sogar günstiger als die Reduzierung der Überlastung durch die Automatisierung der Fahrzeuge. Eine Erweiterung ist jedoch gegebenenfalls nicht überall möglich. Stark überlastete Abschnitte treten häufig in dicht besiedelten Regionen auf. Eine Erweiterung um eine Spur ist für dicht besiedelten Regionen nicht immer realisierbar, sodass für diese Abschnitte eine andere Lösung zur Entlastung gefunden werden muss.

Eine Möglichkeit zur Entlastung der Autobahnabschnitte, für die eine Erweiterung um eine Spur nicht möglich ist, stellen automatisierte Fahrzeuge dar. Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge sind allerdings nicht auf diese Autobahnabschnitte beschränkt, sondern wirken auf alle Autobahnabschnitte gleichermaßen. Auch Autobahnabschnitte, die um eine Spur erweitert werden können, werden durch die Automatisierung entlastet. Eine Erweiterung dieser Abschnitte kann dadurch von Anfang an nicht notwendig sein.

In diesem Abschnitt wurde der verkehrliche Einfluss automatisierter Fahrzeuge analysiert.

Es wurden Personen- und Güterverkehrsaufkommen für die Jahre 2019, 2030 und 2045 modelliert und auf das Straßennetzwerk umgelegt. Anschließend wurde eine detaillierte Analyse der Auslastung des Autobahnnetzwerks durchgeführt. Die Analyse hat gezeigt, dass es notwendig ist, das Verkehrsaufkommen für jeden Autobahnabschnitt und jede Stunde einzeln zu betrachten, da sowohl die räumliche Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die einzelnen Abschnitte als auch die zeitliche Verteilung innerhalb einer Woche große Variationen zeigen. Weiterhin haben die Analysen gezeigt, dass in Zukunft trotz eines steigenden Verkehrsaufkommens ein vergleichbarer Anteil des Autobahnnetzwerks überlastet sein wird, wie es momentan der Fall ist. Die Analyse berücksichtigt dabei die Häufigkeit von Überlastungen auf einzelnen Abschnitten, jedoch nicht das Ausmaß der Überlastung. Automatisierte Fahrzeuge können durch geringere Folgeabstände im Vergleich zu menschlichen Fahrern die Straßenkapazität erhöhen und dadurch die Überlastung des Autobahnnetzwerks reduzieren.

Die Automatisierung der Fahrzeuge stellt dabei im Vergleich zur Erweiterung des Autobahnnetzwerks um eine Spur und der Verbannung von Lastkraftwagen aus Stoßzeiten des Personenverkehrs eine effiziente Möglichkeit dar, die Überlastung des Autobahnnetzwerks zu reduzieren. Eine Verbannung des Güterverkehrs aus den Stoßzeiten des Personenverkehrs stellt keine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Überlastung des Autobahnnetzwerks dar. Die Erweiterung überlasteter Autobahnabschnitte um eine Spur, kann die Überlastung hingegen effektiv reduzieren. Die Reduzierung der Überlastung durch die Erweiterung um eine Spur ist sogar kostengünstiger als die Reduzierung der Überlastung durch die Automatisierung der Fahrzeuge. Eine Erweiterung ist jedoch gegebenenfalls nicht

überall möglich. Stark überlastete Abschnitte treten häufig in dicht besiedelten Regionen auf, eine Erweiterung um eine Spur ist daher insbesondere für stark überlastete Abschnitte nicht immer realisierbar. Für diese Abschnitte stellen automatisierte Fahrzeuge eine Möglichkeit zur Entlastung dar. Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge sind allerdings nicht auf diese Autobahnabschnitte beschränkt, sondern wirken auf alle Autobahnabschnitte gleichermaßen. Auch Autobahnabschnitte, die um eine Spur erweitert werden können, werden durch die Automatisierung entlastet. Eine Erweiterung dieser Abschnitte kann dadurch von Anfang an nicht notwendig sein.

5 Diskussion der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die Kernelemente dieser Arbeit noch einmal diskutiert und aus den Ergebnissen der Analysen Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Industrie und Politik abgeleitet. Die Diskussion erfolgt entlang der Struktur von Kapitel 4. Zuerst werden in Abschnitt 5.1 die Betriebskosten und der Fahrerbedarf automatisierter Lastkraftwagen diskutiert. Anschließend wird der Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge in Abschnitt 5.2 diskutiert. Die verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge werden in Abschnitt 5.3 diskutiert. Abschließend werden die Einzelergebnisse in Abschnitt 5.4 in einem Fazit zusammengefasst.

5.1 Betriebskosten und Fahrerbedarf automatisierter Lastkraftwagen

Für den Betrieb automatisierter Lastkraftwagen ergab sich aus den Forschungslücken der Literatur für diese Arbeit die Forschungsfrage: **Unter welchen Voraussetzungen ist der Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Straßengüterverkehr ökonomisch sinnvoll im Vergleich zum Einsatz nicht-automatisierter Fahrzeuge?**

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurde eine Gesamtbetriebskostenanalyse durchgeführt. Die Modellierung der Fahrzeugkosten basiert auf dem Betriebskostenmodell ETHOS.Veh|Cost [104, 136]. Das Modell wurde um Fahrerkosten sowie die Kosten für das Automatisierungssystem erweitert. Mit dem Modell wurden 47 Einsatzprofile untersucht, die sich nach Fahrzeuggrößen, Aufbauarten sowie Einzelfahrtweiten unterscheiden (siehe Abschnitt 3.1). Die Analysen dieser Arbeit unterscheiden sich von vorherigen Studien zu den Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen in der expliziten Berechnung von Einsparungen in den Fahrerkosten sowie der Betrachtung einer Vielzahl verschiedener Einsatzprofile (siehe Unterabschnitt 2.3.2). In dieser Arbeit werden Einsparungen basierend auf den automatisiert stattfindenden Fahrzeiten spezifisch für einzelne Einsatzprofile berechnet.

Die in dieser Arbeit berechneten Betriebskosteneinsparungen durch den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb sind höher als in der Literatur angenommen [6, 101, 102]. Dies ist dadurch zu begründen, dass die verbleibenden Fahrerkosten im automatisierten Betrieb in der Literatur höher angenommen werden, als es die Modellierung dieser Arbeit ergibt (siehe Abbildung 4-21 auf Seite 152).

Die Analysen in dieser Arbeit zeigen jedoch, dass bereits ein teilweise automatisierter Stufe 4 Betrieb für alle untersuchten Einsatzprofile ausreicht, um geringere Betriebskosten als für den nicht-automatisierten Betrieb zu erzielen. Der vollständig automatisierte Stufe 5 Betrieb von Lastkraftwagen ist für alle untersuchten Einsatzprofile kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Auf Grund der unterschiedlichen Komplexität verschiedener Verkehrssituationen werden jedoch nicht von Anfang an alle Fahrsituationen automatisiert stattfinden können. Der Autobahnverkehr weist die geringste Komplexität auf und kann daher zuerst automatisiert werden, der Stadtverkehr weist hingegen die höchste Komplexität auf und kann daher zuletzt automatisiert werden.

Die Automatisierung des Autobahnverkehrs und von Teilen des ländlichen Verkehrs ist für alle untersuchten Einsatzprofile ausreichend, um die Betriebskosten des nicht-automatisierten Betriebs zu unterbieten (siehe Abbildung 4-14 auf Seite 140). Um einen

zeitnahen Einsatz automatisierter Lastkraftwagen zu erreichen, sollten sich die Entwicklungen dementsprechend auf die Automatisierung des Autobahnverkehrs und des ländlichen Verkehrs fokussieren. Eine breite Nutzung automatisierter Lastkraftwagen in ausgewählten Einsatzbereichen wie dem Autobahnverkehr kann die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge weiter vorantreiben und dafür sorgen, dass weitere Einsatzbereiche früher automatisiert werden.

Damit der automatisierte Betrieb von Lastkraftwagen frühzeitig finanziell attraktiv wird, sind automatisierte Lastkraftwagen so zu entwickeln, dass sich ihr automatisierter Fahrbereich durch ein Software-Update erweitern lässt. Die Anschaffung automatisierter Lastkraftwagen, die beispielsweise nur auf der Autobahn automatisiert fahren können ist für einige Einsatzprofile nicht wirtschaftlich im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb. Können im Laufe der Haltedauer jedoch auch Teile der Fahrtstrecke im ländlichen Verkehr automatisiert gefahren werden, sinken die Betriebskosten. Über die gesamte Haltedauer kann der Betrieb dadurch insgesamt wirtschaftlich werden (siehe Abbildung 4-10 auf Seite 128). **Es sollte daher geprüft werden, ob automatisierte Fahrzeuge modular konstruiert werden können, sodass eine Nachrüstung der Sensoren und des Computersystems für den Stufe 5 Betrieb möglich ist und der Stufe 5 Betrieb anschließend durch eine Aktualisierung der Automatisierungssoftware erreicht werden kann.**

Für den Betrieb automatisierter Lastkraftwagen ergab sich die weitere Forschungsfrage: **Welchen Einfluss hat der automatisierte Betrieb auf den Fahrerbedarf im Straßengüterverkehr?**

Um diese Frage zu beantworten, wurde zuerst der Fahrerbedarf im nicht-automatisierten Fall über Annahmen zu täglichen Lenk- und Arbeitszeiten menschlicher Fahrer bestimmt. Dazu wurden die Gesamtfahrzeiten sowie die Be- und Entladezeiten aller Einsatzprofile individuell berechnet. Für automatisierte Lastkraftwagen wurde angenommen, dass die automatisiert stattfindenden Fahrzeit in der Berechnung des Fahrerbedarfs nicht berücksichtigt werden muss (siehe Unterabschnitt 4.1.5). Die Analysen dieser Arbeit unterscheiden sich von vorherigen Studien zum Fahrerbedarf in der expliziten Modellierung der Be- und Entladezeiten der Lastkraftwagen (siehe Unterabschnitt 2.3.2).

Die Analysen in dieser Arbeit zeigen, dass der Stufe 4 automatisierte Betrieb den Fahrerbedarf um 25–41% reduziert und damit einem Fahrermangel effektiv entgegenwirkt. Die Einsparungen im Fahrerbedarf stammen im Wesentlichen aus dem Fernverkehr. Die in dieser Arbeit für den Fernverkehr (> 300 km) berechneten Einsparungen im Fahrerbedarf liegen bei 86–90%. Sie sind damit geringer als der in der Literatur angegebene Wert von 94% [112]. Der berechnete Anteil der Be- und Entladungen für diese Fahrtdistanzen größer ist als von der Literatur angenommen.

Der Stufe 4 Betrieb sollte genutzt werden, um einem Fahrermangel im Straßengüterverkehr entgegenzuwirken. Die Einsparungen im Fahrerbedarf von 25–41% sind größer als der von der International Road Transport Union für Deutschland für das Jahr 2021 angegebene Fahrermangel von 9% [4] (vergleiche Tabelle 4-3 auf Seite 158 und Tabelle 4-4 auf Seite 161). Die Einführung automatisierter Fahrzeuge wird jedoch viele Jahre dauern. In dieser Zeit wird der Fahrermangel aufgrund steigender Güterverkehrsaufkommen und der Prognose, dass mehr Fahrer in den Ruhestand gehen als neue Fahrer ausgebildet werden, voraussichtlich zunehmen [5]. Der Arbeitsmarkt hat somit Zeit, sich auf Veränderung

in Angebot und Nachfrage von Fahrern einzustellen. **Entlassungen, die auf den Einsparungen im Fahrerbedarf durch den Stufe 4 automatisierten Betrieb basieren, sind aufgrund der langsamen Markteinführung automatisierter Fahrzeuge unwahrscheinlich.**

5.2 Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge

Für den Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge ergab sich aus den Forschungslücken der Literatur für diese Arbeit die Forschungsfrage: **Wie wirkt sich der zusätzliche Energiebedarf des Automatisierungssystems für verschiedene Fahrzeugtypen und Einsatzbereiche auf den Gesamtenergiebedarf aus?**

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurde der Energiebedarf einer Sattelzugmaschine im Autobahnverkehr und der Energiebedarf eines Personenkraftwagens im Autobahn- und Stadtverkehr untersucht. Die Berechnung des Energiebedarfs erfolgte in dieser Arbeit basierend auf dem mechanischen Energiebedarf, um einen bestimmten Fahrzyklus zu absolvieren, und dem zusätzlich benötigten elektrischen Energiebedarf. Automatisierte Fahrzeuge unterscheiden sich in dieser Arbeit von nicht-automatisierten Fahrzeugen durch eine veränderte Fahrweise und den zusätzlichen Energiebedarf des Automatisierungssystems (siehe Abschnitt 3.2). Die Analysen dieser Arbeit unterscheiden sich durch die Berücksichtigung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems von vorherigen Studien (siehe Abschnitt 2.4).

Die in dieser Arbeit berechneten Einsparungen im Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge auf Grund einer angepassten Fahrweise decken sich mit den Einsparungen der Literatur, sofern der Energiebedarf des Automatisierungssystems nicht berücksichtigt wird [122, 125]. Durch die Berücksichtigung des Energiebedarfs des Automatisierungssystems fallen die Einsparungen in dieser Arbeit jedoch geringer aus (siehe Unterabschnitt 4.2.2 und Unterabschnitt 4.2.3).

Die Analysen in dieser Arbeit zeigen, dass eine gleichmäßigere Fahrweise im Autobahnverkehr den Energiebedarf von Lastkraftwagen nur geringfügig reduzieren kann. Eine Geschwindigkeitsreduktion von 90 km/h auf 70 km/h kann den Energiebedarf hingegen deutlich reduzieren (siehe Abbildung 4-23 auf Seite 164). Für Personenkraftwagen übertrifft der Energiebedarf des Automatisierungssystems die Einsparungen durch eine gleichmäßigere Fahrweise im Autobahnverkehr (siehe Abbildung 4-24 auf Seite 172). Für den Stadtverkehr sind die Auswirkungen des Energiebedarfs des Automatisierungssystems noch deutlich gravierender. **Der Gesamtenergiebedarf der Personenkraftwagen steigt im Stadtverkehr durch das Automatisierungssystem um nahezu ein Drittel** (siehe Abbildung 4-25 auf Seite 177). Für nicht-automatisierte Personenkraftwagen kann der Energiebedarf im Stadtverkehr sowohl durch die Eliminierung von Stopps als auch durch eine verringerte Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h statt 50 km/h reduziert werden. Der Anstieg des Energiebedarfs durch das Automatisierungssystem übertrifft jedoch die Einsparungen der beiden Maßnahmen deutlich.

Um den Energiebedarf des Transportsektors zu reduzieren, sollten automatisierte Lastkraftwagen auf Autobahnen mit einer verringerten Geschwindigkeit fahren. Durch eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit von 90 km/h auf 70 km/h nimmt der Energiebedarf von Lastkraftwagen im Autobahnverkehr deutlich ab. Für nicht-automatisierte Fahrzeuge ist die Gesamtfahrzeit jedoch durch die maximalen Lenkzeiten des Fahrers begrenzt. Eine

Geschwindigkeitsreduktion ist daher für den nicht-automatisierten Betrieb nicht sinnvoll, da sie den Fahrerbedarf erhöht. Für einen automatisierten Betrieb auf der Autobahn stellt der Fahrerbedarf keine Hürde mehr dar. Zusätzlich führt der verringerte Energiebedarf durch eine Geschwindigkeitsreduktion für den automatisierten Fall zu Einsparungen in den Betriebskosten. Für automatisierte Lastkraftwagen ist es daher insgesamt sinnvoll auf Autobahnen mit einer verringerten Geschwindigkeit zu fahren. Eine solche Geschwindigkeitsreduktion ist jedoch erst ab einer hohen Durchdringungsrate automatisierter Lastkraftwagen sinnvoll. Für einen gemischten Verkehr automatisierter und nicht-automatisierter Lastkraftwagen führt die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrzeugarten zu vielen Überholmanövern nicht-automatisierter Lastkraftwagen, die den Verkehrsfluss beeinträchtigen.

Die Automatisierung von Personenkraftwagen insbesondere im Stadtverkehr erfordert eine Absenkung des Energiebedarfs des Computersystem im Vergleich zu heutigen Systemen. Aktuelle Energiebedarfe können die Einführung automatisierter Fahrzeuge behindern, da sie den Betrieb insbesondere in Städten auf Grund eines deutlich erhöhten Energiebedarfs unattraktiv machen. Auf lange Sicht kann eine Steigerung der Recheneffizienz von Computersystemen den Energiebedarf senken. Gegen eine Reduktion des Energiebedarfs spricht jedoch, dass mit steigender Leistungsfähigkeit des Computersystems auch die Anforderungen an das Automatisierungssystem erhöht werden. Für automatisierte Fahrzeuge ist jedoch auch die Verwendung spezialisierter Hardware, die auf die Aufgaben automatisierter Fahrzeuge ausgelegt ist, denkbar, um den Energiebedarf zu reduzieren. **Die Entwicklung der Computersysteme automatisierter Fahrzeuge sollte daher neben der reinen Performance den Energiebedarf und die Recheneffizienz berücksichtigen.**

5.3 Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung

Für die verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge ergab sich aus den Forschungslücken der Literatur für diese Arbeit die Forschungsfrage: **Wie entwickelt sich die Auslastung des deutschen Autobahnnetzwerks und wie kann das automatisierte Fahren dazu beitragen, Engstellen zu reduzieren?**

Um diese Frage zu beantworten, wurden aktuelle und zukünftige Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr in stündlicher Auflösung modelliert und auf das deutsche Straßennetzwerk umgelegt (siehe Abschnitt 3.3). Für das Autobahnnetzwerk wurden die Kapazitäten der einzelnen Autobahnabschnitte bestimmt und mit dem jeweiligen Verkehrsaufkommen verglichen (siehe Unterabschnitt 4.3.3). Auf dieser Grundlage wurden überlastete Abschnitte des Autobahnnetzwerks identifiziert. Zur Abbildung des Einflusses automatisierter Fahrzeuge wurden die Kapazitäten der Straßenabschnitte angepasst. Die Analysen dieser Arbeit unterscheiden sich von vorherigen Studien durch die Modellierung des Verkehrsaufkommens in stündlicher Auflösung im Vergleich zu einer täglichen oder maximal mehrstündigen Auflösung (siehe Abschnitt 2.5).

Die Analysen in dieser Arbeit zeigen, dass für den nicht-automatisierten Fall trotz steigender Personen- und Güterverkehrsaufkommen für das Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2019 ein vergleichbarer Anteil des Autobahnnetzwerks von jeweils 12% mindestens 100 Stunden im Jahr überlastet sein wird, ohne eine Berücksichtigung des

Ausmaßes der Überlastung (siehe Tabelle 4-9 auf Seite 205 und Abbildung 4-35 auf Seite 206).

Automatisierte Fahrzeuge können durch geringere Folgeabstände die Kapazität der Autobahnabschnitte erhöhen und dadurch die Überlastung des Autobahnnetzwerks reduzieren. Bei einer vollständigen Automatisierung aller Fahrzeuge im Jahr 2045 sind nur noch 2% des Autobahnnetzwerks mindestens 100 Stunden im Jahr überlastet (siehe Abbildung 4-38 auf Seite 212), der Effekt der Automatisierung von Personenkraftwagen ist dabei auf Grund des höheren Anteils am Gesamtverkehrsaufkommen deutlich größer als der Effekt der Automatisierung von Lastkraftwagen (siehe Abbildung 4-39 auf Seite 214).

Die Erweiterung der überlasteten Autobahnabschnitte um eine Fahrspur bewirkt eine vergleichbare Entlastung des Autobahnnetzwerks wie die Automatisierung aller Lastkraftwagen und drei Viertel der Personenkraftwagen (siehe Abbildung 4-39 auf Seite 214). **Eine Erweiterung um eine Fahrspur ist jedoch nicht überall möglich.** Stark überlastete Abschnitte treten häufig in dicht besiedelten Regionen auf, eine Erweiterung um eine Fahrspur ist für diese nicht immer realisierbar. Für diese Abschnitte muss eine andere Lösung zur Entlastung gefunden werden.

Um das Autobahnnetzwerk zu entlasten, sollte eine Automatisierung des Verkehrs angestrebt werden. Die Reduzierung der Überlastung durch die Erweiterung um eine Spur ist günstiger als die Reduzierung der Überlastung durch die Automatisierung der Fahrzeuge. Eine Erweiterung ist jedoch nicht überall möglich. Stark überlastete Abschnitte treten häufig in dicht besiedelten Regionen auf, in denen eine Erweiterung um eine Spur gegebenenfalls nicht möglich ist. Eine Möglichkeit zur Entlastung der Autobahnabschnitte, für die eine Erweiterung um eine Spur nicht möglich ist, stellen automatisierte Fahrzeuge dar. Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge sind allerdings nicht auf diese Autobahnabschnitte beschränkt, sondern wirken auf alle Autobahnabschnitte gleichermaßen. Autobahnabschnitte, die um eine Spur erweitert werden, werden auch durch die Automatisierung entlastet. Eine Erweiterung dieser Abschnitte kann dadurch von Anfang an nicht notwendig sein. Es ist daher ratsam, von Anfang an auf die Automatisierung des Verkehrs, anstatt auf die Erweiterung von Autobahnabschnitten zu setzen.

5.4 Fazit

Die Nutzung automatisierter Lastkraftwagen bringt einen individuellen Nutzen für Transportunternehmen, einen kollektiven Nutzen für den Transportsektor und einen gesamtgesellschaftlichen Nutzen. Individueller Nutzen ergibt sich in Form von Betriebskosteneinsparungen, kollektiver Nutzen im Transportsektor in Form höherer Transportkapazitäten und gesamtgesellschaftlicher Nutzen in Form verringerter Emissionen und einer Entlastung des Straßennetzwerks.

- **Die Verwendung automatisierter Lastkraftwagen reduziert Betriebskosten im Straßengüterverkehr.** Von geringeren Betriebskosten profitieren sowohl die Transportunternehmen als auch die Unternehmen, deren Waren transportiert werden.
- **Die Nutzung automatisierter Lastkraftwagen senkt den Fahrerbedarf und wirkt damit dem vorherrschenden Fahrermangel entgegen.** Eine Reduzierung des

Fahrermangels ermöglicht es, einen größeren Teil der geplanten Gütertransporte durchzuführen und Lieferverzögerungen zu reduzieren.

- **Die Nutzung automatisierter Lastkraftwagen senkt den Energiebedarf von Lastkraftwagen durch reduzierte Fahrgeschwindigkeiten auf Autobahnen.** Ein geringerer Energiebedarf führt einerseits zu geringeren Betriebskosten, andererseits reduziert dies auch den Gesamtenergiebedarf und damit die Emissionen des Straßengüterverkehrs.
- **Um das Autobahnnetzwerk zu entlasten, sollte eine Automatisierung des Verkehrs anstelle eines Ausbaus angestrebt werden.** Stark überlastete Abschnitte treten häufig in dicht besiedelten Regionen auf, in denen eine Erweiterung um eine Spur nicht immer möglich ist. Für diese Abschnitte können automatisierte Fahrzeuge die Auslastung reduzieren.
- **Um die Auslastung des Autobahnnetzwerks zu verbessern, ist neben der Automatisierung von Lastkraftwagen auch eine Automatisierung von Personenkraftwagen notwendig.** Personenkraftwagen haben einen großen Anteil am Verkehrsaufkommen. Maßnahmen, die lediglich Lastkraftwagen betreffen sind wenig effektiv, um die Auslastung zu reduzieren.
- **Die Nutzung automatisierter Lastkraftwagen kann dazu beitragen, dass automatisierte Personenkraftwagen früher marktreif werden.** Hohe Zusatzkosten und ein hoher Energiebedarf des Automatisierungssystems behindern eine frühzeitige Einführung automatisierter Personenkraftwagen. Eine breite Anwendung automatisierter Lastkraftwagen senkt die Kosten von Automatisierungssystemen und treibt gleichzeitig die Entwicklung effizienter Systeme voran.

Die Analysen dieser Arbeit zeigen insgesamt, dass die Nutzung automatisierter Lastkraftwagen nicht nur für Transportunternehmen ökonomisch erstrebenswert, sondern auf Grund von positiven Auswirkungen auf den vorherrschenden Fahrermangel, den Gesamtenergiebedarf des Straßengüterverkehrs und die Auslastung des Autobahnnetzwerks auch gesellschaftlich erstrebenswert ist. Der Betrieb automatisierter Lastkraftwagen sollte daher frühzeitig ermöglicht und mit Anreizsystemen unterstützt werden.

6 Zusammenfassung

Steigende Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr stellen den deutschen Straßenverkehr neben der Erreichung der Triebhausgasneutralität vor zwei zentrale Herausforderungen. Erstens muss die Verkehrsinfrastruktur so geplant und ausgelegt werden, dass zukünftige Verkehrsströme bewältigt werden können. Zweitens muss der Fahrerbedarf im Güterverkehr gedeckt sein, um den Gütertransport weiterhin zu ermöglichen. Das automatisierte Fahren verspricht Abhilfe für beide Herausforderungen. Vom automatisierten Fahren wird einerseits erwartet, dass es die Auslastung des Straßennetzwerks reduziert, indem es den Verkehrsfluss verbessert und Straßenkapazitäten erhöht. Andererseits wird vom automatisierten Fahren erwartet, dass es den Fahrerbedarf im Straßengüterverkehr reduziert, indem Teile der Fahrtstrecken von Lastkraftwagen ohne menschlichen Fahrer absolviert werden können. Die potentiellen Auswirkungen des automatisierten Fahrens werden im Rahmen dieser Arbeit in Bezug auf die Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen und den Fahrerbedarf im Straßengüterverkehr sowie den Energiebedarf und die verkehrlichen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge tiefergehend analysiert.

Aus der aktuellen Literatur lassen sich die folgenden Forschungslücken für die drei Bereiche identifizieren:

- **Betriebskosten und Fahrerbedarf automatisierter Lastkraftwagen**
  Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen wurden bisher nur für wenige Einsatzbereiche und mit exogenen Annahmen zu möglichen Einsparungen analysiert. Eine fallspezifische Betrachtung der Fahrerkosten als entscheidender Faktor der Kosteneinsparungen ist jedoch notwendig. In gleicher Weise wurden die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Fahrerbedarf bisher ohne eine detaillierte Betrachtung der verschiedenen Aufgaben eines Fahrers, die über die reine Fahraufgabe hinausgehen, untersucht.
- **Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge**
  Studien zum Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge haben bisher den Energiebedarf des Automatisierungssystems vernachlässigt. Der benötigte Leistungsbedarf des Automatisierungssystems reicht heutzutage jedoch bis in den kW-Bereich und ist daher abhängig vom jeweiligen Fahrzeugtypen und Einsatzbereich nicht vernachlässigbar.
- **Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge**
  Verkehrsaufkommen wurden in Studien zu den verkehrlichen Einflüssen automatisierter Fahrzeuge in größeren Straßennetzwerken bisher nur in täglicher oder maximal mehrstündiger Auflösung modelliert. Auf Grund signifikanter Unterschiede zwischen Stoßzeiten und dem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen ist eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung jedoch notwendig, um die Auslastung des Straßennetzwerks adäquat beurteilen und Engstellen identifizieren zu können.

Aus den identifizierten Forschungslücken ergibt sich der folgende Arbeitsansatz für diese Arbeit. Zuerst wird eine Betriebskostenanalyse automatisierter Lastkraftwagen für eine Vielzahl an Einsatzprofilen durchgeführt. Dabei werden Fahrzeiten sowie Be- und Entladezeiten modelliert, um Einsparungen in den Fahrerkosten sowie den Fahrerbedarf für

automatisierte Fahrzeuge zu bestimmen. Anschließend wird der Energiebedarf automatisierter Personen- und Lastkraftwagen in verschiedenen Verkehrsumgebungen modelliert. Dazu werden Fahrzyklen angepasst und der Energiebedarf des Automatisierungssystems berücksichtigt. Zuletzt wird der verkehrliche Einfluss automatisierter Fahrzeuge im deutschen Autobahnnetzwerk analysiert. Dazu werden der Personen- und Güterverkehr in stündlicher Auflösung modelliert und auf das Autobahnnetzwerk umgelegt.

Das verwendete Betriebskostenmodell berücksichtigt Anschaffungskosten für das Fahrzeug und das Automatisierungssystem, Treibstoff-, Wartungs- und Versicherungskosten sowie Lohnkosten für den Fahrer. Die Lohnkosten für den Fahrer werden dabei explizit über die Fahrzeiten sowie die Be- und Entladungszeiten modelliert. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Betriebsstrategien automatisierter Fahrzeuge und unterschiedliche Fahrtanteile im automatisierten Betrieb abzubilden. Es werden insgesamt 47 Einsatzprofile, die sich nach Fahrzeuggrößen/Gewichtsklassen, Aufbauarten sowie Fahrtweiten unterscheiden, untersucht. Dies ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrzeuge.

Die Energiebedarfsanalyse erfolgt mit Hilfe von Fahrzyklussimulationen. Dabei wird neben dem mechanischen Energiebedarf, der benötigt wird, um den jeweiligen Fahrzyklus zu bewältigen, auch der Nebenenergiebedarf für die Fahrzeugelektronik und das Automatisierungssystem berücksichtigt. Zur Abbildung der automatisierten Fahrweise werden Standardfahrzyklen abgewandelt. Es werden Lastkraftwagen im Autobahnverkehr sowie Personenkraftwagen im Autobahn- und Stadtverkehr untersucht. Für automatisierte Lastkraftwagen werden einerseits ein gleichmäßigeres Geschwindigkeitsprofil im Vergleich zur Fahrweise menschlicher Fahrer und andererseits eine reduzierte Maximalgeschwindigkeit angenommen. Für automatisierte Personenkraftwagen im Autobahnverkehr wird ebenfalls ein gleichmäßigeres Geschwindigkeitsprofil angenommen. Für automatisierte Personenkraftwagen im Stadtverkehr werden verschiedene Arten der Verkehrsregelung abgebildet, indem einerseits Stopps eliminiert und andererseits die Maximalgeschwindigkeit reduziert werden.

Die Modellierung des Personen- und Güterverkehrsaufkommen erfolgt über zwei separate Modelle. Das Verkehrsaufkommen im Personenverkehr wird mit dem im Rahmen der Dissertation von Reul entwickelten Verkehrsnachfragemodell ETHOS.MO|DE [83, 86] in stündlicher Auflösung für 4620 Gemeindeverbände in Deutschland bestimmt. In dem Modell werden typische Aktivitätsprofile repräsentativer Haushalte basierend auf soziodemografischen Faktoren wie dem Einkommen, der Haushaltsgröße oder der Anzahl Kinder im Haushalt modelliert. Innerhalb dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, Güterverkehrsströme in Deutschland analog zum Personenverkehr in stündlicher Auflösung auf Gemeindeverbandsebene abzubilden. Jährliche Gütertransportmengen zwischen den NUTS-3 Regionen in Europa werden zuerst über die jeweilige Anzahl der Beschäftigten im produzierenden Gewerbe auf die einzelnen Gemeindeverbände verteilt. Anschließend werden die jährlichen Gütertransportmengen mit Hilfe von Daten automatischer Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen in stündlich aufgelöste typische Wochenprofile runtergebrochen. Zuletzt werden die Gütertransportmengen basierend auf distanzabhängigen Beladungsfaktoren und Anteilen an Leerfahrten in Fahrten von Lastkraftwagen umgewandelt. Die Verkehrsaufkommen des Personen- und Güterverkehrs

werden dann auf das Straßennetzwerk umgelegt, um Analysen zur Auslastung und dem Einfluss automatisierter Fahrzeuge durchzuführen.

Für die Betriebskosten- und Fahrerbedarfsanalyse wurden folgende Kernergebnisse ermittelt:

- Für den vollständig automatisierten Stufe 5 Betrieb liegen die Betriebskosten für alle untersuchten Einsatzprofile unterhalb der Kosten für den nicht-automatisierten Betrieb.
- Unter der Annahme, dass der Autobahnverkehr im Stufe 4 Betrieb automatisiert stattfindet und für Fahrten abseits der Autobahn ein menschlicher Fahrer benötigt wird, ist der Stufe 4 Betrieb für den Betrieb mit Staffelfahrten, Teleoperation und Aufliegerwechsel für alle Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten von über 100 km kostengünstiger als der nicht-automatisierte Betrieb. Die Kosten für die Transferfahrten sorgen hingegen dafür, dass der Betrieb mit Zubringerfahrzeug erst für Einsatzprofile mit Einzelfahrtweiten über 150 km kostengünstiger ist als der nicht-automatisierte Betrieb.
- Für Einsatzprofile, die im reinen Stufe 4 Betrieb höhere Betriebskosten haben als der nicht-automatisierte Betrieb, kann der automatisierte Betrieb durch einen Mischbetrieb aus einem Stufe 4 und Stufe 5 Betrieb über die Haltedauer der Fahrzeuge günstiger werden als der nicht-automatisierte Betrieb.
- Für alle untersuchten Einsatzprofile ist bereits eine Automatisierung des Autobahnverkehrs und des ländlichen Verkehrs für einen kosteneffektiven Stufe 4 Betrieb im Vergleich zum nicht-automatisierten Betrieb ausreichend. Die Automatisierung des Stadtverkehrs ist für kein Einsatzprofil für einen kosteneffektiven Stufe 4 Betrieb notwendig.
- Der Stufe 4 Betrieb kann einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Fahrerbedarfs leisten und dem Fahrermangel entgegenwirken. Für den Stufe 4 Betrieb lässt sich der Fahrerbedarf um mindestens ein Viertel gegenüber dem nicht-automatisierten Fall reduzieren.

Für die Energiebedarfsanalyse wurden folgende Kernergebnisse ermittelt:

- Der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W erhöht den Gesamtenergiebedarf einer Sattelzugmaschine im Autobahnverkehr nur geringfügig um 1,0%.
- Eine Geschwindigkeitsreduktion von 90 km/h auf 70 km/h kann den Energiebedarf automatisierter Sattelzugmaschinen im Autobahnverkehr deutlich senken. Für einen nicht-automatisierten Betrieb ist eine Geschwindigkeitsreduktion nicht praktikabel, da sowohl die Gesamtbetriebskosten als auch der Fahrerbedarf durch die Geschwindigkeitsreduktion steigen. Für einen automatisierten Betrieb ist eine Geschwindigkeitsreduktion hingegen praktikabel, da der Fahrerbedarf im Vergleich zum automatisierten nicht-geschwindigkeitsreduzierten Fall unbeeinflusst ist und die Gesamtbetriebskosten durch den geringeren Energiebedarf sogar reduziert werden können.
- Der angenommene Leistungsbedarf des Automatisierungssystems von 1000 W erhöht den Gesamtenergiebedarf eines Personenkraftwagens im Autobahnverkehr um 4,7% und im Stadtverkehr um 32,4%.

- Der Leistungsbedarf des Automatisierungssystems hebt für den Stadtverkehr sämtliche Einsparungen durch die Eliminierung von Stopps und die Reduktion der Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h auf, obwohl diese Maßnahmen den Energiebedarf für nicht-automatisierte Personenkraftwagen deutlich reduzieren können. Durch eine Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h lässt sich der Gesamtenergiebedarf von nicht-automatisierten Personenkraftwagen im Stadtverkehr um 20,5% senken.
- Der zusätzliche Energiebedarf für das Automatisierungssystem kann zu Beginn eine Hürde für die Einführung automatisierter Personenkraftwagen darstellen. Auf lange Sicht können eine Steigerung der Recheneffizienz von Computersystemen und die Verwendung spezialisierte Hardware für das Computersystem automatisierter Fahrzeuge den Energiebedarf senken. Gegen eine Reduktion des Energiebedarfs spricht jedoch, dass mit steigender Leistungsfähigkeit des Computersystems auch die Anforderungen an das Automatisierungssystem erhöht werden.

Für die Analyse der verkehrlichen Auswirkungen wurden folgende Kernergebnisse ermittelt:

- Es ist notwendig, das Verkehrsaufkommen für jeden Autobahnabschnitt und jede Stunde einzeln zu betrachten, da sowohl die räumliche Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die einzelnen Abschnitte als auch die zeitliche Verteilung innerhalb einer Woche große Variationen zeigen.
- Für den nicht-automatisierten Fall wird trotz eines steigenden Verkehrsaufkommens im Jahr 2045 ein vergleichbarer Anteil des Autobahnnetzwerks überlastet sein wie im Jahr 2019. Die Analyse berücksichtigt dabei die Häufigkeit von Überlastungen auf einzelnen Abschnitten, jedoch nicht deren Ausmaß.
- Automatisierte Fahrzeuge können durch geringere Folgeabstände im Vergleich zu menschlichen Fahrern die Straßenkapazität erhöhen und dadurch die Überlastung des Autobahnnetzwerks reduzieren.
- Die Erweiterung überlasteter Autobahnabschnitte um eine Spur, kann die Überlastung kostengünstiger reduzieren als die Automatisierung der Fahrzeuge. Stark überlastete Abschnitte treten jedoch häufig in dicht besiedelten Regionen auf. Eine Erweiterung um eine Spur ist daher insbesondere für stark überlastete Abschnitte nicht immer realisierbar, sodass diese anderweitig entlastet werden müssen. Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge wirken auf alle Autobahnabschnitte gleichermaßen. Autobahnabschnitte, die um eine Spur erweitert werden können, werden auch durch die Automatisierung entlastet. Eine Erweiterung dieser Abschnitte kann dadurch von Anfang an nicht notwendig sein.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich die folgenden Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des automatisierten Fahrens ableiten:

- Um einen zeitnahen Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Güterverkehr zu erreichen, sollten sich die Entwicklungen automatisierter Fahrzeuge auf die Automatisierung des Autobahnverkehrs und des ländlichen Verkehrs fokussieren.
- Es sollte geprüft werden, ob automatisierte Fahrzeuge modular konstruiert werden können, sodass sie zuerst im Stufe 4 Betrieb eingesetzt werden können, und durch

eine Nachrüstung der Sensoren und des Computersystems sowie eine Aktualisierung der Automatisierungssoftware der Stufe 5 Betrieb möglich wird.

- Der Stufe 4 Betrieb sollte genutzt werden, um einem Fahrermangel im Straßengüterverkehr entgegenzuwirken.
- Um den Energiebedarf des Transportsektors zu reduzieren, sollten automatisierte Lastkraftwagen auf Autobahnen mit einer verringerten Geschwindigkeit fahren, bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit des Straßengüterverkehrs.
- Die Entwicklung der Computersysteme automatisierter Fahrzeuge sollte neben der Leistungsfähigkeit auch den Energiebedarf und die Recheneffizienz berücksichtigen, um die Anwendung für Personenkraftwagen zu ermöglichen, ohne ihren Gesamtenergiebedarf deutlich zu erhöhen.
- Um das Autobahnnetzwerk zu entlasten, sollte anstelle eines Ausbaus eine Automatisierung des Verkehrs angestrebt werden, sowohl für Personen- als auch Lastkraftwagen.

Die Analysen dieser Arbeit zeigen, dass die Nutzung automatisierter Lastkraftwagen nicht nur für Transportunternehmen ökonomisch erstrebenswert, sondern auf Grund von positiven Auswirkungen auf den vorherrschenden Fahrermangel, den Gesamtenergiebedarf des Straßengüterverkehrs und die Auslastung des Autobahnnetzwerks auch gesellschaftlich erstrebenswert ist. Die vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen können dazu beitragen, den Betrieb automatisierter Fahrzeuge frühzeitig zu ermöglichen und die Vorteile durch ihre Nutzung zu maximieren.

Anhang

A. Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen

Tabelle A-1 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.36	0.94	1.16	-	1.12	2.95
2025	2.36	0.95	1.16	-	1.11	2.94
2030	2.37	0.96	0.86	-	0.84	1.76
2035	2.38	0.97	0.53	-	0.53	0.53
2040	2.39	0.98	0.52	-	0.52	0.52
2045	2.38	0.97	0.50	-	0.50	0.50
2050	2.37	0.96	0.47	-	0.47	0.47

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.39	0.98	1.20	-	1.15	2.99
2025	2.35	0.94	1.15	-	1.10	2.93
2030	2.29	0.88	0.78	-	0.76	1.66
2035	2.25	0.84	0.41	-	0.41	0.41
2040	2.23	0.82	0.37	-	0.37	0.37
2045	2.22	0.81	0.35	-	0.35	0.35
2050	2.22	0.80	0.33	-	0.33	0.33

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.30	0.88	1.10	-	1.06	2.87
2025	2.28	0.86	1.07	-	1.03	2.83
2030	2.24	0.83	0.74	-	0.72	1.61
2035	2.22	0.81	0.38	-	0.38	0.38
2040	2.21	0.80	0.34	-	0.34	0.34
2045	2.20	0.79	0.33	-	0.33	0.33
2050	2.20	0.79	0.31	-	0.31	0.31

Tabelle A-2 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51 – 100 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.13	0.73	0.75	-	0.72	1.33
2025	1.13	0.73	0.75	-	0.72	1.33
2030	1.14	0.74	0.57	-	0.55	0.86
2035	1.14	0.74	0.37	-	0.37	0.37
2040	1.15	0.75	0.36	-	0.36	0.36
2045	1.14	0.74	0.35	-	0.35	0.35
2050	1.12	0.72	0.33	-	0.33	0.33

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.13	0.73	0.75	-	0.72	1.33
2025	1.10	0.70	0.72	-	0.69	1.29
2030	1.06	0.66	0.49	-	0.47	0.77
2035	1.03	0.63	0.26	-	0.26	0.26
2040	1.02	0.62	0.24	-	0.24	0.24
2045	1.01	0.61	0.22	-	0.22	0.22
2050	1.00	0.60	0.21	-	0.21	0.21

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	0.66	0.68	-	0.65	1.24
2025	1.04	0.64	0.66	-	0.63	1.23
2030	1.02	0.62	0.46	-	0.44	0.73
2035	1.01	0.61	0.24	-	0.24	0.24
2040	1.00	0.60	0.22	-	0.22	0.22
2045	1.00	0.60	0.21	-	0.21	0.21
2050	0.99	0.59	0.20	-	0.20	0.20

Tabelle A-3 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 101 – 150 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.93	0.69	0.65	-	0.63	0.98
2025	0.93	0.69	0.64	-	0.62	0.98
2030	0.93	0.70	0.51	-	0.50	0.68
2035	0.94	0.70	0.37	-	0.37	0.37
2040	0.94	0.70	0.36	-	0.36	0.36
2045	0.93	0.69	0.35	-	0.35	0.35
2050	0.91	0.68	0.33	-	0.33	0.33

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.92	0.69	0.64	-	0.62	0.98
2025	0.90	0.66	0.61	-	0.59	0.95
2030	0.85	0.62	0.44	-	0.43	0.60
2035	0.83	0.60	0.26	-	0.26	0.26
2040	0.82	0.58	0.24	-	0.24	0.24
2045	0.81	0.57	0.23	-	0.23	0.23
2050	0.80	0.57	0.22	-	0.22	0.22

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.85	0.62	0.57	-	0.55	0.90
2025	0.84	0.61	0.56	-	0.54	0.88
2030	0.82	0.59	0.40	-	0.39	0.56
2035	0.81	0.57	0.24	-	0.24	0.24
2040	0.80	0.56	0.22	-	0.22	0.22
2045	0.79	0.56	0.21	-	0.21	0.21
2050	0.79	0.55	0.20	-	0.20	0.20

Tabelle A-4 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 151 – 200 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.84	0.67	0.58	-	0.56	0.81
2025	0.84	0.67	0.57	-	0.56	0.81
2030	0.84	0.68	0.48	-	0.47	0.60
2035	0.85	0.68	0.37	-	0.37	0.37
2040	0.85	0.68	0.36	-	0.36	0.36
2045	0.84	0.67	0.34	-	0.34	0.34
2050	0.82	0.66	0.32	-	0.32	0.32

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.84	0.67	0.58	-	0.56	0.82
2025	0.81	0.64	0.55	-	0.53	0.78
2030	0.77	0.60	0.40	-	0.40	0.52
2035	0.74	0.58	0.26	-	0.26	0.26
2040	0.73	0.56	0.24	-	0.24	0.24
2045	0.72	0.55	0.23	-	0.23	0.23
2050	0.71	0.55	0.22	-	0.22	0.22

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.76	0.60	0.51	-	0.49	0.74
2025	0.75	0.59	0.49	-	0.48	0.72
2030	0.73	0.57	0.37	-	0.36	0.48
2035	0.72	0.55	0.24	-	0.24	0.24
2040	0.71	0.54	0.22	-	0.22	0.22
2045	0.70	0.54	0.21	-	0.21	0.21
2050	0.70	0.53	0.20	-	0.20	0.20

Tabelle A-5 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201 – 300 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.79	0.67	0.51	-	0.51	0.68
2025	0.79	0.68	0.51	-	0.50	0.68
2030	0.80	0.68	0.45	-	0.44	0.53
2035	0.80	0.68	0.37	-	0.37	0.37
2040	0.80	0.69	0.36	-	0.36	0.36
2045	0.79	0.67	0.34	-	0.34	0.34
2050	0.78	0.66	0.32	-	0.32	0.32

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.79	0.68	0.52	-	0.51	0.69
2025	0.77	0.65	0.48	-	0.48	0.65
2030	0.72	0.61	0.37	-	0.37	0.46
2035	0.70	0.58	0.27	-	0.27	0.27
2040	0.68	0.57	0.24	-	0.24	0.24
2045	0.67	0.56	0.23	-	0.23	0.23
2050	0.67	0.55	0.22	-	0.22	0.22

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.72	0.60	0.44	-	0.44	0.61
2025	0.71	0.59	0.43	-	0.42	0.59
2030	0.69	0.57	0.34	-	0.34	0.42
2035	0.68	0.56	0.24	-	0.24	0.24
2040	0.67	0.55	0.22	-	0.22	0.22
2045	0.66	0.54	0.21	-	0.21	0.21
2050	0.66	0.54	0.20	-	0.20	0.20

Tabelle A-6 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 301 – 400 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.75	0.66	0.47	-	0.46	0.58
2025	0.75	0.66	0.46	-	0.46	0.58
2030	0.75	0.67	0.42	-	0.42	0.48
2035	0.75	0.67	0.36	-	0.36	0.36
2040	0.76	0.67	0.36	-	0.36	0.36
2045	0.75	0.66	0.34	-	0.34	0.34
2050	0.73	0.65	0.32	-	0.32	0.32

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.75	0.67	0.47	-	0.47	0.59
2025	0.72	0.64	0.44	-	0.44	0.55
2030	0.68	0.60	0.35	-	0.35	0.41
2035	0.65	0.57	0.27	-	0.27	0.27
2040	0.64	0.55	0.24	-	0.24	0.24
2045	0.63	0.55	0.23	-	0.23	0.23
2050	0.62	0.54	0.22	-	0.22	0.22

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.68	0.59	0.40	-	0.39	0.51
2025	0.66	0.58	0.38	-	0.38	0.49
2030	0.64	0.56	0.32	-	0.31	0.37
2035	0.63	0.55	0.24	-	0.24	0.24
2040	0.62	0.54	0.22	-	0.22	0.22
2045	0.61	0.53	0.21	-	0.21	0.21
2050	0.61	0.53	0.20	-	0.20	0.20

Tabelle A-7 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 401 – 500 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.72	0.66	0.44	-	0.44	0.52
2025	0.72	0.66	0.44	-	0.44	0.52
2030	0.72	0.66	0.41	-	0.41	0.45
2035	0.73	0.66	0.36	-	0.36	0.36
2040	0.73	0.67	0.36	-	0.36	0.36
2045	0.72	0.66	0.34	-	0.34	0.34
2050	0.70	0.64	0.32	-	0.32	0.32

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.72	0.66	0.45	-	0.45	0.53
2025	0.70	0.63	0.42	-	0.41	0.49
2030	0.65	0.59	0.34	-	0.34	0.38
2035	0.63	0.57	0.27	-	0.27	0.27
2040	0.61	0.55	0.24	-	0.24	0.24
2045	0.60	0.54	0.23	-	0.23	0.23
2050	0.60	0.53	0.22	-	0.22	0.22

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.65	0.59	0.37	-	0.37	0.45
2025	0.64	0.58	0.36	-	0.36	0.44
2030	0.62	0.55	0.30	-	0.30	0.34
2035	0.61	0.54	0.24	-	0.24	0.24
2040	0.60	0.53	0.22	-	0.22	0.22
2045	0.59	0.53	0.21	-	0.21	0.21
2050	0.59	0.52	0.20	-	0.20	0.20

Tabelle A-8 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.77	1.07	1.23	-	1.18	2.31
2025	1.78	1.07	1.23	-	1.18	2.31
2030	1.78	1.08	0.94	-	0.92	1.48
2035	1.80	1.09	0.63	-	0.63	0.63
2040	1.81	1.10	0.63	-	0.63	0.63
2045	1.80	1.09	0.60	-	0.60	0.60
2050	1.78	1.07	0.57	-	0.57	0.57

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.78	1.07	1.23	-	1.19	2.32
2025	1.73	1.02	1.18	-	1.14	2.25
2030	1.65	0.95	0.81	-	0.79	1.34
2035	1.62	0.91	0.46	-	0.46	0.46
2040	1.59	0.89	0.42	-	0.42	0.42
2045	1.58	0.87	0.40	-	0.40	0.40
2050	1.57	0.86	0.38	-	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.78	1.07	1.24	-	1.19	2.29
2025	1.74	1.03	1.19	-	1.15	2.24
2030	1.67	0.97	0.83	-	0.81	1.35
2035	1.63	0.93	0.47	-	0.47	0.47
2040	1.61	0.90	0.43	-	0.43	0.43
2045	1.59	0.89	0.41	-	0.41	0.41
2050	1.58	0.87	0.39	-	0.39	0.39

Tabelle A-9 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51 – 100 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	0.86	0.87	-	0.84	1.25
2025	1.06	0.86	0.87	-	0.84	1.25
2030	1.07	0.87	0.69	-	0.67	0.87
2035	1.08	0.88	0.49	-	0.49	0.49
2040	1.08	0.88	0.49	-	0.49	0.49
2045	1.07	0.87	0.47	-	0.47	0.47
2050	1.04	0.84	0.44	-	0.44	0.44

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.05	0.85	0.86	-	0.83	1.24
2025	1.01	0.81	0.82	-	0.79	1.19
2030	0.95	0.75	0.57	-	0.55	0.75
2035	0.92	0.72	0.34	-	0.34	0.34
2040	0.90	0.70	0.31	-	0.31	0.31
2045	0.89	0.69	0.30	-	0.30	0.30
2050	0.88	0.68	0.28	-	0.28	0.28

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.03	0.83	0.84	-	0.81	1.21
2025	1.00	0.80	0.81	-	0.78	1.17
2030	0.96	0.76	0.58	-	0.56	0.75
2035	0.93	0.73	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.91	0.71	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.90	0.70	0.31	-	0.31	0.31
2050	0.89	0.69	0.29	-	0.29	0.29

Tabelle A-10 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 101 – 150 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.94	0.82	0.76	-	0.74	0.98
2025	0.94	0.82	0.76	-	0.74	0.98
2030	0.94	0.82	0.63	-	0.62	0.74
2035	0.95	0.83	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.96	0.84	0.49	-	0.49	0.49
2045	0.94	0.82	0.47	-	0.47	0.47
2050	0.92	0.80	0.44	-	0.44	0.44

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.93	0.81	0.75	-	0.73	0.97
2025	0.89	0.77	0.71	-	0.69	0.93
2030	0.83	0.71	0.52	-	0.51	0.62
2035	0.80	0.68	0.34	-	0.34	0.34
2040	0.78	0.66	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.77	0.65	0.30	-	0.30	0.30
2050	0.76	0.64	0.29	-	0.29	0.29

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.91	0.80	0.74	-	0.72	0.95
2025	0.89	0.77	0.71	-	0.69	0.92
2030	0.84	0.72	0.52	-	0.51	0.63
2035	0.81	0.69	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.79	0.67	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.78	0.66	0.31	-	0.31	0.31
2050	0.77	0.65	0.29	-	0.29	0.29

Tabelle A-11 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 151 – 200 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.88	0.80	0.69	-	0.68	0.85
2025	0.88	0.80	0.69	-	0.68	0.85
2030	0.88	0.80	0.59	-	0.59	0.67
2035	0.89	0.81	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.90	0.82	0.49	-	0.49	0.49
2045	0.88	0.80	0.47	-	0.47	0.47
2050	0.86	0.78	0.44	-	0.44	0.44

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.88	0.79	0.69	-	0.68	0.85
2025	0.84	0.76	0.65	-	0.63	0.80
2030	0.78	0.69	0.49	-	0.48	0.56
2035	0.75	0.66	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.73	0.64	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.71	0.63	0.30	-	0.30	0.30
2050	0.71	0.62	0.29	-	0.29	0.29

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.86	0.78	0.67	-	0.66	0.82
2025	0.83	0.75	0.64	-	0.63	0.79
2030	0.78	0.70	0.49	-	0.48	0.56
2035	0.76	0.67	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.74	0.65	0.33	-	0.33	0.33
2045	0.72	0.64	0.31	-	0.31	0.31
2050	0.71	0.63	0.30	-	0.30	0.30

Tabelle A-12 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201 – 300 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.86	0.80	0.63	-	0.62	0.74
2025	0.86	0.80	0.63	-	0.62	0.74
2030	0.86	0.80	0.56	-	0.56	0.62
2035	0.87	0.81	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.88	0.82	0.49	-	0.49	0.49
2045	0.86	0.80	0.46	-	0.46	0.46
2050	0.84	0.78	0.44	-	0.44	0.44

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.86	0.80	0.63	-	0.62	0.74
2025	0.82	0.76	0.59	-	0.58	0.70
2030	0.76	0.70	0.46	-	0.45	0.51
2035	0.73	0.67	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.71	0.65	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.69	0.63	0.30	-	0.30	0.30
2050	0.68	0.62	0.29	-	0.29	0.29

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.84	0.78	0.61	-	0.60	0.72
2025	0.81	0.75	0.58	-	0.57	0.69
2030	0.76	0.70	0.46	-	0.46	0.51
2035	0.73	0.68	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.72	0.66	0.33	-	0.33	0.33
2045	0.70	0.64	0.31	-	0.31	0.31
2050	0.69	0.63	0.30	-	0.30	0.30

Tabelle A-13 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 301 – 400 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.83	0.79	0.59	-	0.58	0.66
2025	0.83	0.79	0.58	-	0.58	0.66
2030	0.83	0.79	0.54	-	0.54	0.57
2035	0.84	0.80	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.85	0.81	0.48	-	0.48	0.48
2045	0.83	0.79	0.46	-	0.46	0.46
2050	0.81	0.76	0.43	-	0.43	0.43

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.83	0.79	0.59	-	0.58	0.66
2025	0.79	0.75	0.54	-	0.54	0.62
2030	0.73	0.69	0.44	-	0.43	0.47
2035	0.70	0.66	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.68	0.64	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.67	0.62	0.30	-	0.30	0.30
2050	0.66	0.61	0.29	-	0.29	0.29

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.81	0.77	0.57	-	0.56	0.64
2025	0.78	0.74	0.54	-	0.53	0.61
2030	0.73	0.69	0.44	-	0.44	0.47
2035	0.71	0.67	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.69	0.65	0.33	-	0.33	0.33
2045	0.67	0.63	0.31	-	0.31	0.31
2050	0.66	0.62	0.30	-	0.30	0.30

Tabelle A-14 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 401 – 500 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.81	0.78	0.56	-	0.56	0.61
2025	0.82	0.78	0.56	-	0.56	0.60
2030	0.82	0.78	0.52	-	0.52	0.55
2035	0.82	0.79	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.83	0.80	0.48	-	0.48	0.48
2045	0.81	0.78	0.46	-	0.46	0.46
2050	0.79	0.76	0.43	-	0.43	0.43

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.82	0.78	0.56	-	0.56	0.61
2025	0.78	0.75	0.52	-	0.52	0.57
2030	0.71	0.68	0.42	-	0.42	0.45
2035	0.68	0.65	0.35	-	0.35	0.35
2040	0.66	0.63	0.32	-	0.32	0.32
2045	0.65	0.62	0.30	-	0.30	0.30
2050	0.64	0.61	0.29	-	0.29	0.29

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.80	0.77	0.54	-	0.54	0.59
2025	0.77	0.74	0.51	-	0.51	0.56
2030	0.72	0.69	0.43	-	0.43	0.45
2035	0.69	0.66	0.36	-	0.36	0.36
2040	0.67	0.64	0.33	-	0.33	0.33
2045	0.66	0.63	0.31	-	0.31	0.31
2050	0.65	0.62	0.30	-	0.30	0.30

Tabelle A-15 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.03	1.33	1.47	-	1.43	2.55
2025	2.04	1.33	1.47	-	1.43	2.56
2030	2.06	1.35	1.19	-	1.17	1.73
2035	2.08	1.37	0.89	-	0.89	0.89
2040	2.10	1.39	0.90	-	0.90	0.90
2045	2.06	1.36	0.85	-	0.85	0.85
2050	2.01	1.30	0.79	-	0.79	0.79

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.09	1.39	1.53	-	1.49	2.62
2025	2.02	1.31	1.45	-	1.41	2.53
2030	1.90	1.20	1.04	-	1.02	1.57
2035	1.84	1.13	0.66	-	0.66	0.66
2040	1.80	1.09	0.60	-	0.60	0.60
2045	1.77	1.06	0.57	-	0.57	0.57
2050	1.75	1.05	0.55	-	0.55	0.55

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.05	1.34	1.49	-	1.44	2.55
2025	1.99	1.29	1.43	-	1.38	2.48
2030	1.90	1.19	1.03	-	1.01	1.55
2035	1.84	1.13	0.65	-	0.65	0.65
2040	1.79	1.09	0.60	-	0.60	0.60
2045	1.77	1.06	0.57	-	0.57	0.57
2050	1.75	1.04	0.54	-	0.54	0.54

Tabelle A-16 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51 – 100 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.26	1.06	1.07	-	1.04	1.44
2025	1.27	1.07	1.07	-	1.04	1.45
2030	1.28	1.08	0.89	-	0.88	1.08
2035	1.30	1.10	0.70	-	0.70	0.70
2040	1.31	1.11	0.71	-	0.71	0.71
2045	1.27	1.07	0.67	-	0.67	0.67
2050	1.22	1.02	0.61	-	0.61	0.61

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.29	1.09	1.09	-	1.06	1.47
2025	1.23	1.03	1.03	-	1.00	1.41
2030	1.14	0.94	0.75	-	0.74	0.93
2035	1.09	0.89	0.50	-	0.50	0.50
2040	1.05	0.85	0.46	-	0.46	0.46
2045	1.03	0.83	0.43	-	0.43	0.43
2050	1.01	0.81	0.41	-	0.41	0.41

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.23	1.03	1.03	-	1.00	1.40
2025	1.19	0.99	0.99	-	0.96	1.35
2030	1.12	0.92	0.73	-	0.72	0.91
2035	1.08	0.88	0.49	-	0.49	0.49
2040	1.05	0.85	0.45	-	0.45	0.45
2045	1.02	0.82	0.42	-	0.42	0.42
2050	1.01	0.81	0.40	-	0.40	0.40

Tabelle A-17 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 101 – 150 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.13	1.01	0.94	-	0.92	1.16
2025	1.13	1.01	0.95	-	0.93	1.16
2030	1.14	1.02	0.82	-	0.81	0.93
2035	1.15	1.04	0.68	-	0.68	0.68
2040	1.16	1.05	0.69	-	0.69	0.69
2045	1.13	1.01	0.65	-	0.65	0.65
2050	1.08	0.96	0.59	-	0.59	0.59

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.16	1.05	0.98	-	0.96	1.20
2025	1.11	0.99	0.92	-	0.90	1.14
2030	1.02	0.90	0.69	-	0.68	0.80
2035	0.96	0.85	0.50	-	0.50	0.50
2040	0.93	0.81	0.45	-	0.45	0.45
2045	0.90	0.79	0.43	-	0.43	0.43
2050	0.89	0.77	0.41	-	0.41	0.41

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.10	0.99	0.92	-	0.90	1.13
2025	1.07	0.95	0.88	-	0.86	1.09
2030	1.00	0.88	0.67	-	0.66	0.78
2035	0.95	0.84	0.48	-	0.48	0.48
2040	0.92	0.80	0.45	-	0.45	0.45
2045	0.90	0.78	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.88	0.76	0.40	-	0.40	0.40

Tabelle A-18 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 151 – 200 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	0.98	0.87	-	0.85	1.02
2025	1.07	0.98	0.87	-	0.85	1.02
2030	1.07	0.99	0.77	-	0.77	0.85
2035	1.09	1.00	0.67	-	0.67	0.67
2040	1.10	1.01	0.67	-	0.67	0.67
2045	1.06	0.98	0.63	-	0.63	0.63
2050	1.01	0.93	0.58	-	0.58	0.58

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.11	1.02	0.91	-	0.90	1.07
2025	1.05	0.97	0.85	-	0.84	1.01
2030	0.96	0.88	0.66	-	0.65	0.73
2035	0.91	0.82	0.50	-	0.50	0.50
2040	0.87	0.79	0.45	-	0.45	0.45
2045	0.85	0.76	0.43	-	0.43	0.43
2050	0.83	0.75	0.40	-	0.40	0.40

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.05	0.96	0.85	-	0.84	1.00
2025	1.01	0.93	0.81	-	0.80	0.96
2030	0.94	0.86	0.64	-	0.63	0.71
2035	0.90	0.81	0.48	-	0.48	0.48
2040	0.86	0.78	0.44	-	0.44	0.44
2045	0.84	0.76	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.82	0.74	0.40	-	0.40	0.40

Tabelle A-19 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201 – 300 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.03	0.97	0.79	-	0.79	0.91
2025	1.03	0.97	0.80	-	0.79	0.91
2030	1.04	0.98	0.73	-	0.73	0.79
2035	1.05	0.99	0.66	-	0.66	0.66
2040	1.06	1.00	0.66	-	0.66	0.66
2045	1.02	0.96	0.62	-	0.62	0.62
2050	0.98	0.92	0.57	-	0.57	0.57

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.08	1.02	0.85	-	0.84	0.96
2025	1.02	0.97	0.79	-	0.78	0.90
2030	0.93	0.87	0.62	-	0.62	0.68
2035	0.88	0.82	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.84	0.79	0.45	-	0.45	0.45
2045	0.82	0.76	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.80	0.74	0.40	-	0.40	0.40

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.02	0.96	0.79	-	0.78	0.89
2025	0.98	0.92	0.75	-	0.74	0.85
2030	0.91	0.85	0.61	-	0.60	0.66
2035	0.87	0.81	0.48	-	0.48	0.48
2040	0.84	0.78	0.44	-	0.44	0.44
2045	0.81	0.76	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.80	0.74	0.40	-	0.40	0.40

Tabelle A-20 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 301 – 400 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.99	0.95	0.74	-	0.74	0.81
2025	1.00	0.96	0.74	-	0.74	0.82
2030	1.00	0.96	0.70	-	0.70	0.74
2035	1.01	0.97	0.65	-	0.65	0.65
2040	1.02	0.98	0.65	-	0.65	0.65
2045	0.99	0.94	0.61	-	0.61	0.61
2050	0.94	0.90	0.56	-	0.56	0.56

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.05	1.01	0.80	-	0.80	0.87
2025	0.99	0.95	0.74	-	0.74	0.81
2030	0.90	0.86	0.60	-	0.60	0.64
2035	0.85	0.81	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.81	0.77	0.45	-	0.45	0.45
2045	0.79	0.75	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.77	0.73	0.40	-	0.40	0.40

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.99	0.95	0.74	-	0.73	0.81
2025	0.95	0.91	0.70	-	0.69	0.77
2030	0.88	0.84	0.58	-	0.58	0.62
2035	0.84	0.80	0.48	-	0.48	0.48
2040	0.81	0.77	0.44	-	0.44	0.44
2045	0.78	0.74	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.77	0.72	0.39	-	0.39	0.39

Tabelle A-21 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kastenwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 401 – 500 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.97	0.94	0.71	-	0.71	0.76
2025	0.98	0.95	0.71	-	0.71	0.76
2030	0.98	0.95	0.69	-	0.68	0.71
2035	0.99	0.96	0.65	-	0.65	0.65
2040	1.00	0.97	0.65	-	0.65	0.65
2045	0.97	0.93	0.61	-	0.61	0.61
2050	0.92	0.89	0.56	-	0.56	0.56

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.03	1.00	0.77	-	0.77	0.82
2025	0.98	0.95	0.71	-	0.71	0.76
2030	0.89	0.85	0.59	-	0.59	0.61
2035	0.84	0.80	0.49	-	0.49	0.49
2040	0.80	0.77	0.45	-	0.45	0.45
2045	0.77	0.74	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.76	0.73	0.40	-	0.40	0.40

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.97	0.94	0.71	-	0.71	0.76
2025	0.94	0.90	0.67	-	0.67	0.72
2030	0.87	0.84	0.57	-	0.57	0.59
2035	0.82	0.79	0.48	-	0.48	0.48
2040	0.79	0.76	0.44	-	0.44	0.44
2045	0.77	0.74	0.42	-	0.42	0.42
2050	0.75	0.72	0.39	-	0.39	0.39

Tabelle A-22 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kippers unter 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.21	1.10	1.44	-	1.40	3.94
2025	3.22	1.10	1.43	-	1.39	3.93
2030	3.23	1.12	1.11	-	1.08	2.35
2035	3.25	1.13	0.71	-	0.71	0.71
2040	3.26	1.14	0.68	-	0.68	0.68
2045	3.26	1.14	0.66	-	0.66	0.66
2050	3.25	1.13	0.63	-	0.63	0.63

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.30	1.18	1.53	-	1.49	4.03
2025	3.24	1.13	1.46	-	1.41	3.94
2030	3.16	1.04	1.03	-	1.01	2.26
2035	3.11	0.99	0.58	-	0.58	0.58
2040	3.08	0.97	0.52	-	0.52	0.52
2045	3.07	0.95	0.49	-	0.49	0.49
2050	3.06	0.95	0.46	-	0.46	0.46

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.17	1.06	1.41	-	1.36	3.88
2025	3.15	1.03	1.36	-	1.32	3.82
2030	3.10	0.98	0.97	-	0.95	2.20
2035	3.07	0.95	0.54	-	0.54	0.54
2040	3.05	0.93	0.49	-	0.49	0.49
2045	3.04	0.93	0.46	-	0.46	0.46
2050	3.04	0.92	0.44	-	0.44	0.44

Tabelle A-23 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kippers mit 7,5 – 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.52	1.40	1.75	-	1.71	4.25
2025	3.53	1.41	1.74	-	1.70	4.24
2030	3.55	1.43	1.40	-	1.38	2.64
2035	3.57	1.45	0.99	-	0.99	0.99
2040	3.59	1.47	0.97	-	0.97	0.97
2045	3.58	1.47	0.95	-	0.95	0.95
2050	3.57	1.45	0.91	-	0.91	0.91

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.60	1.48	1.83	-	1.79	4.33
2025	3.52	1.41	1.74	-	1.69	4.22
2030	3.40	1.28	1.26	-	1.23	2.49
2035	3.34	1.22	0.77	-	0.77	0.77
2040	3.30	1.18	0.70	-	0.70	0.70
2045	3.28	1.16	0.67	-	0.67	0.67
2050	3.27	1.15	0.64	-	0.64	0.64

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.64	1.52	1.87	-	1.83	4.34
2025	3.57	1.45	1.78	-	1.74	4.25
2030	3.45	1.33	1.30	-	1.27	2.52
2035	3.38	1.26	0.81	-	0.81	0.81
2040	3.33	1.21	0.73	-	0.73	0.73
2045	3.31	1.19	0.69	-	0.69	0.69
2050	3.29	1.17	0.66	-	0.66	0.66

Tabelle A-24 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kippers über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.93	1.52	1.74	-	1.69	3.52
2025	2.94	1.53	1.74	-	1.69	3.53
2030	2.96	1.55	1.43	-	1.41	2.32
2035	2.99	1.58	1.09	-	1.09	1.09
2040	3.01	1.60	1.09	-	1.09	1.09
2045	2.98	1.57	1.04	-	1.04	1.04
2050	2.93	1.52	0.98	-	0.98	0.98

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.05	1.64	1.86	-	1.81	3.65
2025	2.96	1.55	1.76	-	1.72	3.54
2030	2.82	1.41	1.29	-	1.26	2.16
2035	2.74	1.33	0.84	-	0.84	0.84
2040	2.69	1.28	0.77	-	0.77	0.77
2045	2.66	1.25	0.73	-	0.73	0.73
2050	2.64	1.23	0.71	-	0.71	0.71

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	3.03	1.62	1.84	-	1.79	3.60
2025	2.96	1.54	1.75	-	1.71	3.51
2030	2.83	1.41	1.29	-	1.27	2.16
2035	2.74	1.33	0.84	-	0.84	0.84
2040	2.69	1.28	0.77	-	0.77	0.77
2045	2.66	1.25	0.73	-	0.73	0.73
2050	2.63	1.22	0.70	-	0.70	0.70

Tabelle A-25 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kippers über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51 – 100 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.56	1.16	1.20	-	1.17	1.78
2025	1.57	1.17	1.20	-	1.17	1.78
2030	1.58	1.18	1.01	-	0.99	1.30
2035	1.60	1.20	0.80	-	0.80	0.80
2040	1.61	1.21	0.80	-	0.80	0.80
2045	1.58	1.18	0.76	-	0.76	0.76
2050	1.53	1.13	0.70	-	0.70	0.70

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.62	1.22	1.26	-	1.23	1.84
2025	1.55	1.15	1.19	-	1.16	1.76
2030	1.45	1.05	0.87	-	0.86	1.15
2035	1.39	0.99	0.59	-	0.59	0.59
2040	1.35	0.95	0.54	-	0.54	0.54
2045	1.32	0.92	0.51	-	0.51	0.51
2050	1.30	0.90	0.49	-	0.49	0.49

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.57	1.17	1.21	-	1.18	1.77
2025	1.52	1.12	1.15	-	1.12	1.72
2030	1.43	1.03	0.86	-	0.85	1.14
2035	1.38	0.98	0.58	-	0.58	0.58
2040	1.34	0.94	0.54	-	0.54	0.54
2045	1.32	0.92	0.51	-	0.51	0.51
2050	1.30	0.90	0.48	-	0.48	0.48

Tabelle A-26 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kippers über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 101 – 150 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.34	1.11	1.08	-	1.06	1.41
2025	1.35	1.11	1.08	-	1.06	1.41
2030	1.36	1.12	0.94	-	0.93	1.10
2035	1.37	1.14	0.78	-	0.78	0.78
2040	1.39	1.15	0.78	-	0.78	0.78
2045	1.35	1.12	0.74	-	0.74	0.74
2050	1.30	1.07	0.69	-	0.69	0.69

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.41	1.17	1.14	-	1.13	1.48
2025	1.34	1.11	1.07	-	1.05	1.41
2030	1.24	1.00	0.82	-	0.81	0.98
2035	1.18	0.94	0.59	-	0.59	0.59
2040	1.14	0.90	0.54	-	0.54	0.54
2045	1.11	0.88	0.51	-	0.51	0.51
2050	1.10	0.86	0.49	-	0.49	0.49

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.36	1.12	1.09	-	1.08	1.42
2025	1.31	1.08	1.04	-	1.02	1.37
2030	1.23	0.99	0.80	-	0.79	0.97
2035	1.17	0.94	0.58	-	0.58	0.58
2040	1.13	0.90	0.53	-	0.53	0.53
2045	1.11	0.87	0.50	-	0.50	0.50
2050	1.09	0.85	0.48	-	0.48	0.48

Tabelle A-27 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Kippers über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 151 – 200 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.24	1.07	1.00	-	0.99	1.24
2025	1.25	1.08	1.00	-	0.99	1.24
2030	1.26	1.09	0.89	-	0.89	1.01
2035	1.27	1.11	0.77	-	0.77	0.77
2040	1.28	1.12	0.77	-	0.77	0.77
2045	1.25	1.08	0.73	-	0.73	0.73
2050	1.20	1.04	0.68	-	0.68	0.68

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.32	1.15	1.07	-	1.06	1.31
2025	1.25	1.09	1.00	-	0.99	1.24
2030	1.15	0.98	0.78	-	0.77	0.90
2035	1.09	0.92	0.59	-	0.59	0.59
2040	1.05	0.88	0.54	-	0.54	0.54
2045	1.02	0.86	0.51	-	0.51	0.51
2050	1.00	0.84	0.48	-	0.48	0.48

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.27	1.10	1.02	-	1.01	1.26
2025	1.22	1.05	0.97	-	0.96	1.20
2030	1.13	0.97	0.77	-	0.76	0.88
2035	1.08	0.91	0.58	-	0.58	0.58
2040	1.04	0.88	0.53	-	0.53	0.53
2045	1.02	0.85	0.50	-	0.50	0.50
2050	1.00	0.83	0.48	-	0.48	0.48

Tabelle A-28 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.97	1.26	1.38	-	1.34	2.46
2025	1.98	1.27	1.38	-	1.34	2.47
2030	1.99	1.28	1.11	-	1.09	1.65
2035	2.01	1.31	0.83	-	0.83	0.83
2040	2.03	1.32	0.84	-	0.84	0.84
2045	1.99	1.29	0.79	-	0.79	0.79
2050	1.94	1.23	0.73	-	0.73	0.73

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.01	1.30	1.42	-	1.38	2.51
2025	1.94	1.24	1.35	-	1.31	2.42
2030	1.83	1.13	0.96	-	0.94	1.48
2035	1.78	1.07	0.60	-	0.60	0.60
2040	1.73	1.03	0.55	-	0.55	0.55
2045	1.71	1.00	0.52	-	0.52	0.52
2050	1.69	0.99	0.49	-	0.49	0.49

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.96	1.25	1.37	-	1.33	2.43
2025	1.91	1.20	1.32	-	1.27	2.37
2030	1.82	1.12	0.94	-	0.92	1.46
2035	1.77	1.06	0.59	-	0.59	0.59
2040	1.73	1.02	0.54	-	0.54	0.54
2045	1.70	1.00	0.51	-	0.51	0.51
2050	1.69	0.98	0.49	-	0.49	0.49

Tabelle A-29 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51 – 100 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.23	1.03	1.02	-	0.99	1.40
2025	1.24	1.04	1.03	-	1.00	1.40
2030	1.25	1.05	0.85	-	0.84	1.04
2035	1.26	1.06	0.67	-	0.67	0.67
2040	1.27	1.07	0.68	-	0.68	0.68
2045	1.23	1.03	0.63	-	0.63	0.63
2050	1.18	0.98	0.58	-	0.58	0.58

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.25	1.05	1.04	-	1.01	1.42
2025	1.19	0.99	0.98	-	0.95	1.35
2030	1.11	0.91	0.71	-	0.69	0.89
2035	1.06	0.86	0.47	-	0.47	0.47
2040	1.02	0.82	0.43	-	0.43	0.43
2045	1.00	0.80	0.40	-	0.40	0.40
2050	0.98	0.78	0.38	-	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.18	0.98	0.97	-	0.94	1.34
2025	1.15	0.95	0.94	-	0.91	1.30
2030	1.08	0.88	0.69	-	0.67	0.87
2035	1.04	0.84	0.45	-	0.45	0.45
2040	1.01	0.81	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.99	0.79	0.40	-	0.40	0.40
2050	0.97	0.77	0.38	-	0.38	0.38

Tabelle A-30 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 101 – 150 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.09	0.98	0.90	-	0.88	1.12
2025	1.10	0.98	0.90	-	0.88	1.12
2030	1.11	0.99	0.78	-	0.77	0.89
2035	1.12	1.00	0.65	-	0.65	0.65
2040	1.13	1.01	0.66	-	0.66	0.66
2045	1.09	0.97	0.61	-	0.61	0.61
2050	1.04	0.92	0.56	-	0.56	0.56

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.12	1.00	0.93	-	0.91	1.15
2025	1.07	0.95	0.87	-	0.85	1.09
2030	0.98	0.86	0.65	-	0.64	0.76
2035	0.93	0.82	0.47	-	0.47	0.47
2040	0.90	0.78	0.43	-	0.43	0.43
2045	0.87	0.76	0.40	-	0.40	0.40
2050	0.86	0.74	0.38	-	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	0.94	0.86	-	0.84	1.07
2025	1.02	0.91	0.83	-	0.81	1.04
2030	0.96	0.84	0.63	-	0.62	0.73
2035	0.92	0.80	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.89	0.77	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.87	0.75	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.85	0.73	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-31 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 151 – 200 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.03	0.95	0.82	-	0.81	0.98
2025	1.03	0.95	0.82	-	0.81	0.98
2030	1.04	0.96	0.73	-	0.73	0.81
2035	1.05	0.97	0.64	-	0.64	0.64
2040	1.06	0.98	0.64	-	0.64	0.64
2045	1.02	0.94	0.60	-	0.60	0.60
2050	0.97	0.89	0.55	-	0.55	0.55

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	0.98	0.86	-	0.84	1.01
2025	1.01	0.93	0.80	-	0.79	0.95
2030	0.92	0.84	0.62	-	0.61	0.69
2035	0.88	0.79	0.46	-	0.46	0.46
2040	0.84	0.76	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.82	0.73	0.40	-	0.40	0.40
2050	0.80	0.72	0.38	-	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.00	0.92	0.79	-	0.78	0.94
2025	0.97	0.88	0.76	-	0.74	0.90
2030	0.90	0.82	0.59	-	0.59	0.67
2035	0.86	0.78	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.83	0.75	0.41	-	0.41	0.41
2045	0.81	0.73	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.79	0.71	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-32 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201 – 300 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.99	0.93	0.75	-	0.74	0.86
2025	1.00	0.94	0.75	-	0.74	0.86
2030	1.00	0.94	0.69	-	0.69	0.75
2035	1.01	0.95	0.63	-	0.63	0.63
2040	1.02	0.96	0.63	-	0.63	0.63
2045	0.98	0.93	0.59	-	0.59	0.59
2050	0.94	0.88	0.54	-	0.54	0.54

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.03	0.98	0.79	-	0.78	0.90
2025	0.98	0.92	0.74	-	0.73	0.85
2030	0.89	0.84	0.58	-	0.58	0.64
2035	0.85	0.79	0.46	-	0.46	0.46
2040	0.81	0.75	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.79	0.73	0.40	-	0.40	0.40
2050	0.77	0.71	0.38	-	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.97	0.91	0.73	-	0.72	0.84
2025	0.94	0.88	0.69	-	0.68	0.80
2030	0.87	0.81	0.56	-	0.56	0.61
2035	0.83	0.77	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.80	0.74	0.41	-	0.41	0.41
2045	0.78	0.72	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.76	0.70	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-33 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 301 – 400 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.96	0.92	0.70	-	0.69	0.77
2025	0.96	0.92	0.70	-	0.70	0.77
2030	0.97	0.92	0.66	-	0.66	0.70
2035	0.98	0.93	0.62	-	0.62	0.62
2040	0.98	0.94	0.62	-	0.62	0.62
2045	0.95	0.90	0.58	-	0.58	0.58
2050	0.90	0.86	0.53	-	0.53	0.53

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.00	0.96	0.74	-	0.74	0.82
2025	0.95	0.91	0.69	-	0.69	0.76
2030	0.86	0.82	0.56	-	0.56	0.59
2035	0.82	0.77	0.46	-	0.46	0.46
2040	0.78	0.74	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.76	0.72	0.40	-	0.40	0.40
2050	0.74	0.70	0.38	-	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.94	0.90	0.68	-	0.68	0.75
2025	0.91	0.86	0.64	-	0.64	0.71
2030	0.84	0.80	0.54	-	0.54	0.57
2035	0.80	0.76	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.77	0.73	0.41	-	0.41	0.41
2045	0.75	0.71	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.73	0.69	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-34 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 401 – 500 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.94	0.91	0.67	-	0.67	0.71
2025	0.94	0.91	0.67	-	0.67	0.72
2030	0.95	0.91	0.65	-	0.65	0.67
2035	0.96	0.92	0.62	-	0.62	0.62
2040	0.96	0.93	0.62	-	0.62	0.62
2045	0.93	0.89	0.58	-	0.58	0.58
2050	0.88	0.85	0.53	-	0.53	0.53

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.99	0.96	0.72	-	0.72	0.76
2025	0.94	0.90	0.66	-	0.66	0.71
2030	0.85	0.82	0.55	-	0.55	0.57
2035	0.80	0.77	0.46	-	0.46	0.46
2040	0.76	0.73	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.74	0.71	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.72	0.69	0.37	-	0.37	0.37

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.92	0.89	0.65	-	0.65	0.70
2025	0.89	0.86	0.62	-	0.62	0.66
2030	0.83	0.79	0.52	-	0.52	0.55
2035	0.79	0.75	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.76	0.72	0.41	-	0.41	0.41
2045	0.73	0.70	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.72	0.68	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-35 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 501 – 700 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.93	0.90	0.66	-	0.66	0.69
2025	0.93	0.91	0.66	-	0.66	0.69
2030	0.94	0.91	0.64	-	0.64	0.65
2035	0.94	0.92	0.61	-	0.61	0.61
2040	0.95	0.93	0.61	-	0.61	0.61
2045	0.91	0.89	0.57	-	0.57	0.57
2050	0.87	0.84	0.53	-	0.53	0.53

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.98	0.95	0.71	-	0.71	0.74
2025	0.92	0.90	0.65	-	0.65	0.68
2030	0.84	0.81	0.54	-	0.54	0.56
2035	0.79	0.77	0.46	-	0.46	0.46
2040	0.75	0.73	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.73	0.71	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.71	0.69	0.37	-	0.37	0.37

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.91	0.89	0.64	-	0.64	0.67
2025	0.88	0.86	0.61	-	0.61	0.64
2030	0.82	0.79	0.52	-	0.52	0.53
2035	0.78	0.75	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.75	0.72	0.41	-	0.41	0.41
2045	0.72	0.70	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.71	0.68	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-36 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil des Containerwagens über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 701 – 900 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.92	0.90	0.65	-	0.65	0.67
2025	0.92	0.90	0.65	-	0.65	0.67
2030	0.93	0.91	0.64	-	0.64	0.64
2035	0.94	0.92	0.61	-	0.61	0.61
2040	0.94	0.92	0.61	-	0.61	0.61
2045	0.91	0.89	0.57	-	0.57	0.57
2050	0.86	0.84	0.52	-	0.52	0.52

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.97	0.95	0.70	-	0.70	0.72
2025	0.92	0.90	0.65	-	0.65	0.67
2030	0.83	0.81	0.54	-	0.54	0.55
2035	0.78	0.76	0.46	-	0.46	0.46
2040	0.75	0.73	0.42	-	0.42	0.42
2045	0.72	0.70	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.71	0.69	0.37	-	0.37	0.37

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.91	0.89	0.64	-	0.64	0.66
2025	0.87	0.85	0.60	-	0.60	0.62
2030	0.81	0.79	0.52	-	0.52	0.53
2035	0.77	0.75	0.45	-	0.45	0.45
2040	0.74	0.72	0.41	-	0.41	0.41
2045	0.72	0.70	0.39	-	0.39	0.39
2050	0.70	0.68	0.37	-	0.37	0.37

Tabelle A-37 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten bis zu 50 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.08	1.37	1.47	1.36	1.43	2.55
2025	2.09	1.38	1.43	1.32	1.39	2.41
2030	2.09	1.39	1.18	1.06	1.16	1.67
2035	2.13	1.43	0.95	0.95	0.95	0.95
2040	2.14	1.43	0.94	0.94	0.94	0.94
2045	2.08	1.38	0.88	0.88	0.88	0.88
2050	2.00	1.30	0.80	0.80	0.80	0.80

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.13	1.43	1.52	1.41	1.48	2.61
2025	2.05	1.34	1.39	1.29	1.35	2.36
2030	1.91	1.20	0.99	0.93	0.97	1.47
2035	1.83	1.13	0.65	0.65	0.65	0.65
2040	1.78	1.07	0.59	0.59	0.59	0.59
2045	1.74	1.04	0.55	0.55	0.55	0.55
2050	1.72	1.01	0.52	0.52	0.52	0.52

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	2.17	1.46	1.56	1.45	1.52	2.62
2025	2.09	1.38	1.42	1.33	1.38	2.38
2030	1.94	1.24	1.02	0.96	1.00	1.49
2035	1.86	1.15	0.66	0.66	0.66	0.66
2040	1.80	1.09	0.60	0.60	0.60	0.60
2045	1.76	1.05	0.56	0.56	0.56	0.56
2050	1.72	1.02	0.52	0.52	0.52	0.52

Tabelle A-38 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 51 – 100 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.34	1.14	1.12	1.13	1.09	1.49
2025	1.34	1.14	1.09	1.09	1.06	1.43
2030	1.34	1.14	0.92	0.87	0.91	1.09
2035	1.37	1.17	0.78	0.78	0.78	0.78
2040	1.37	1.17	0.77	0.77	0.77	0.77
2045	1.31	1.11	0.71	0.71	0.71	0.71
2050	1.24	1.04	0.64	0.64	0.64	0.64

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.38	1.18	1.16	1.19	1.13	1.53
2025	1.30	1.10	1.05	1.07	1.02	1.39
2030	1.18	0.98	0.76	0.76	0.75	0.93
2035	1.12	0.92	0.53	0.53	0.53	0.53
2040	1.07	0.87	0.48	0.48	0.48	0.48
2045	1.04	0.84	0.44	0.44	0.44	0.44
2050	1.01	0.81	0.41	0.41	0.41	0.41

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.35	1.15	1.13	1.20	1.10	1.49
2025	1.29	1.09	1.03	1.09	1.00	1.36
2030	1.18	0.98	0.76	0.76	0.74	0.92
2035	1.12	0.92	0.52	0.52	0.52	0.52
2040	1.07	0.87	0.47	0.47	0.47	0.47
2045	1.04	0.84	0.44	0.44	0.44	0.44
2050	1.01	0.81	0.41	0.41	0.41	0.41

Tabelle A-39 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 101 – 150 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.18	1.07	0.98	0.98	0.96	1.20
2025	1.19	1.07	0.96	0.96	0.94	1.16
2030	1.18	1.06	0.83	0.80	0.83	0.93
2035	1.21	1.09	0.74	0.74	0.74	0.74
2040	1.20	1.09	0.73	0.73	0.73	0.73
2045	1.15	1.03	0.67	0.67	0.67	0.67
2050	1.08	0.96	0.60	0.60	0.60	0.60

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.24	1.12	1.03	1.06	1.01	1.25
2025	1.17	1.05	0.94	0.95	0.92	1.13
2030	1.05	0.93	0.70	0.70	0.69	0.80
2035	0.99	0.87	0.52	0.52	0.52	0.52
2040	0.94	0.82	0.46	0.46	0.46	0.46
2045	0.90	0.79	0.43	0.43	0.43	0.43
2050	0.88	0.76	0.40	0.40	0.40	0.40

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.21	1.10	1.01	1.06	0.99	1.22
2025	1.15	1.04	0.92	0.96	0.90	1.11
2030	1.05	0.93	0.70	0.70	0.69	0.79
2035	0.98	0.87	0.51	0.51	0.51	0.51
2040	0.94	0.82	0.46	0.46	0.46	0.46
2045	0.91	0.79	0.43	0.43	0.43	0.43
2050	0.88	0.76	0.40	0.40	0.40	0.40

Tabelle A-40 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 151 – 200 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.11	1.03	0.89	0.89	0.88	1.04
2025	1.11	1.03	0.88	0.88	0.86	1.02
2030	1.10	1.02	0.78	0.76	0.78	0.85
2035	1.13	1.04	0.71	0.71	0.71	0.71
2040	1.12	1.04	0.70	0.70	0.70	0.70
2045	1.07	0.98	0.64	0.64	0.64	0.64
2050	1.00	0.92	0.58	0.58	0.58	0.58

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.18	1.09	0.96	0.97	0.94	1.11
2025	1.11	1.02	0.87	0.88	0.86	1.01
2030	0.99	0.90	0.66	0.66	0.66	0.73
2035	0.92	0.84	0.51	0.51	0.51	0.51
2040	0.87	0.79	0.46	0.46	0.46	0.46
2045	0.84	0.76	0.42	0.42	0.42	0.42
2050	0.82	0.73	0.40	0.40	0.40	0.40

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.15	1.07	0.93	0.97	0.92	1.08
2025	1.09	1.01	0.85	0.88	0.84	0.99
2030	0.98	0.90	0.66	0.66	0.65	0.72
2035	0.92	0.84	0.50	0.50	0.50	0.50
2040	0.88	0.79	0.46	0.46	0.46	0.46
2045	0.84	0.76	0.42	0.42	0.42	0.42
2050	0.82	0.73	0.39	0.39	0.39	0.39

Tabelle A-41 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 201 – 300 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	1.00	0.81	0.81	0.80	0.92
2025	1.06	1.00	0.80	0.80	0.79	0.90
2030	1.05	0.99	0.73	0.72	0.73	0.78
2035	1.07	1.01	0.69	0.69	0.69	0.69
2040	1.06	1.00	0.68	0.68	0.68	0.68
2045	1.01	0.95	0.62	0.62	0.62	0.62
2050	0.95	0.89	0.55	0.55	0.55	0.55

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.14	1.08	0.89	0.89	0.88	1.00
2025	1.07	1.01	0.80	0.81	0.80	0.90
2030	0.95	0.89	0.63	0.63	0.63	0.68
2035	0.89	0.83	0.50	0.50	0.50	0.50
2040	0.84	0.78	0.45	0.45	0.45	0.45
2045	0.80	0.75	0.42	0.42	0.42	0.42
2050	0.78	0.72	0.39	0.39	0.39	0.39

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.12	1.06	0.86	0.88	0.86	0.97
2025	1.06	1.00	0.79	0.80	0.78	0.89
2030	0.95	0.89	0.62	0.62	0.62	0.67
2035	0.89	0.83	0.50	0.50	0.50	0.50
2040	0.84	0.78	0.45	0.45	0.45	0.45
2045	0.81	0.75	0.42	0.42	0.42	0.42
2050	0.78	0.72	0.39	0.39	0.39	0.39

Tabelle A-42 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 301 – 400 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.02	0.98	0.75	0.75	0.75	0.82
2025	1.02	0.98	0.74	0.74	0.74	0.81
2030	1.01	0.97	0.70	0.69	0.69	0.73
2035	1.03	0.98	0.67	0.67	0.67	0.67
2040	1.02	0.97	0.66	0.66	0.66	0.66
2045	0.97	0.92	0.60	0.60	0.60	0.60
2050	0.90	0.86	0.54	0.54	0.54	0.54

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.10	1.06	0.83	0.84	0.83	0.91
2025	1.03	0.99	0.76	0.76	0.75	0.82
2030	0.92	0.87	0.60	0.60	0.60	0.63
2035	0.85	0.81	0.50	0.50	0.50	0.50
2040	0.80	0.76	0.45	0.45	0.45	0.45
2045	0.77	0.73	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.75	0.70	0.38	0.38	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.08	1.04	0.81	0.82	0.81	0.89
2025	1.02	0.98	0.74	0.75	0.74	0.81
2030	0.91	0.87	0.60	0.60	0.60	0.63
2035	0.85	0.81	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.81	0.76	0.45	0.45	0.45	0.45
2045	0.77	0.73	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.74	0.70	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabelle A-43 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 401 – 500 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.99	0.96	0.72	0.72	0.72	0.76
2025	1.00	0.96	0.71	0.71	0.71	0.75
2030	0.98	0.95	0.68	0.67	0.68	0.70
2035	1.00	0.97	0.66	0.66	0.66	0.66
2040	0.99	0.96	0.65	0.65	0.65	0.65
2045	0.94	0.91	0.59	0.59	0.59	0.59
2050	0.88	0.85	0.53	0.53	0.53	0.53

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.08	1.05	0.81	0.81	0.80	0.85
2025	1.01	0.98	0.73	0.73	0.73	0.77
2030	0.90	0.86	0.59	0.59	0.59	0.61
2035	0.83	0.80	0.50	0.50	0.50	0.50
2040	0.78	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.75	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.73	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	1.03	0.79	0.79	0.79	0.83
2025	1.00	0.97	0.72	0.72	0.72	0.76
2030	0.90	0.86	0.58	0.59	0.58	0.60
2035	0.83	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.79	0.76	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.75	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.73	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabelle A-44 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 501 – 700 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.98	0.96	0.70	0.70	0.70	0.73
2025	0.98	0.96	0.70	0.70	0.70	0.73
2030	0.97	0.94	0.67	0.67	0.67	0.68
2035	0.99	0.96	0.66	0.66	0.66	0.66
2040	0.98	0.95	0.64	0.64	0.64	0.64
2045	0.93	0.90	0.59	0.59	0.59	0.59
2050	0.86	0.84	0.52	0.52	0.52	0.52

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.07	1.05	0.79	0.80	0.79	0.82
2025	1.00	0.98	0.72	0.72	0.72	0.75
2030	0.89	0.86	0.58	0.58	0.58	0.60
2035	0.82	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.77	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.74	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.72	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.05	1.03	0.78	0.78	0.77	0.80
2025	0.99	0.97	0.71	0.71	0.71	0.74
2030	0.89	0.86	0.58	0.58	0.58	0.59
2035	0.82	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.78	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.74	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.72	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabelle A-45 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 701 – 900 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.97	0.95	0.70	0.70	0.70	0.72
2025	0.97	0.96	0.69	0.69	0.69	0.71
2030	0.96	0.94	0.66	0.66	0.66	0.67
2035	0.98	0.96	0.65	0.65	0.65	0.65
2040	0.97	0.95	0.64	0.64	0.64	0.64
2045	0.92	0.90	0.59	0.59	0.59	0.59
2050	0.86	0.84	0.52	0.52	0.52	0.52

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	1.05	0.79	0.79	0.79	0.81
2025	0.99	0.98	0.71	0.71	0.71	0.73
2030	0.88	0.86	0.58	0.58	0.58	0.59
2035	0.81	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.77	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.73	0.71	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.71	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.05	1.03	0.77	0.77	0.77	0.79
2025	0.99	0.97	0.70	0.70	0.70	0.72
2030	0.88	0.86	0.58	0.58	0.58	0.58
2035	0.82	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.77	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.74	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.71	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabelle A-46 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten im Bereich 901 – 1000 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.97	0.95	0.70	0.70	0.70	0.71
2025	0.97	0.96	0.69	0.69	0.69	0.71
2030	0.96	0.94	0.66	0.66	0.66	0.67
2035	0.97	0.96	0.65	0.65	0.65	0.65
2040	0.96	0.95	0.64	0.64	0.64	0.64
2045	0.91	0.90	0.59	0.59	0.59	0.59
2050	0.85	0.84	0.52	0.52	0.52	0.52

FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.06	1.05	0.79	0.79	0.79	0.80
2025	0.99	0.98	0.71	0.71	0.71	0.73
2030	0.87	0.86	0.58	0.58	0.58	0.59
2035	0.81	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.76	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.73	0.71	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.70	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

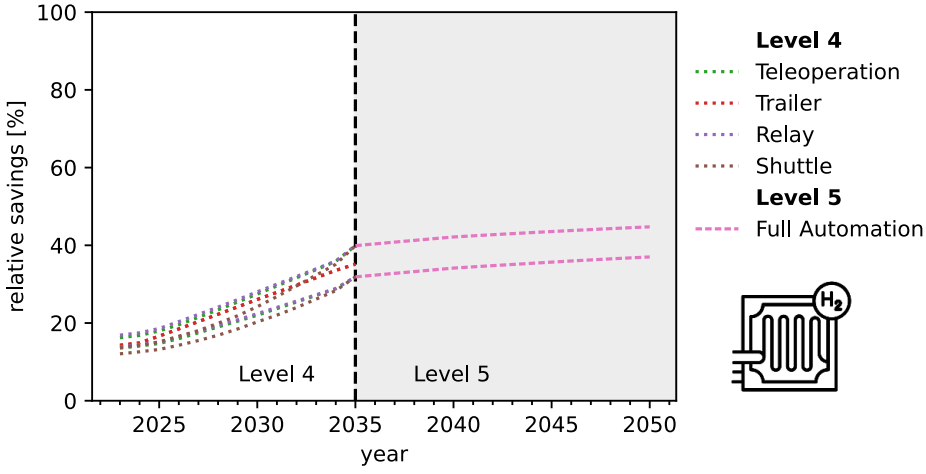
BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.04	1.03	0.77	0.77	0.77	0.78
2025	0.98	0.97	0.70	0.70	0.70	0.72
2030	0.87	0.86	0.58	0.58	0.58	0.58
2035	0.81	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.77	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.73	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.70	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabelle A-47 Betriebskosten aller Betriebsstrategien für das Einsatzprofil der Sattelzugmaschine über 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit Einzelfahrtweiten von mehr als 1000 km. Antriebsstränge: Dieselverbrennungsmotor, ICEV-d; brennstoffzellen-elektrisch, FCEV; batterieelektrisch, BEV.

ICEV-d	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	0.96	0.95	0.70	0.70	0.70	0.71
2025	0.96	0.96	0.69	0.69	0.69	0.70
2030	0.95	0.94	0.66	0.66	0.66	0.67
2035	0.97	0.96	0.65	0.65	0.65	0.65
2040	0.96	0.95	0.64	0.64	0.64	0.64
2045	0.91	0.90	0.59	0.59	0.59	0.59
2050	0.85	0.84	0.52	0.52	0.52	0.52

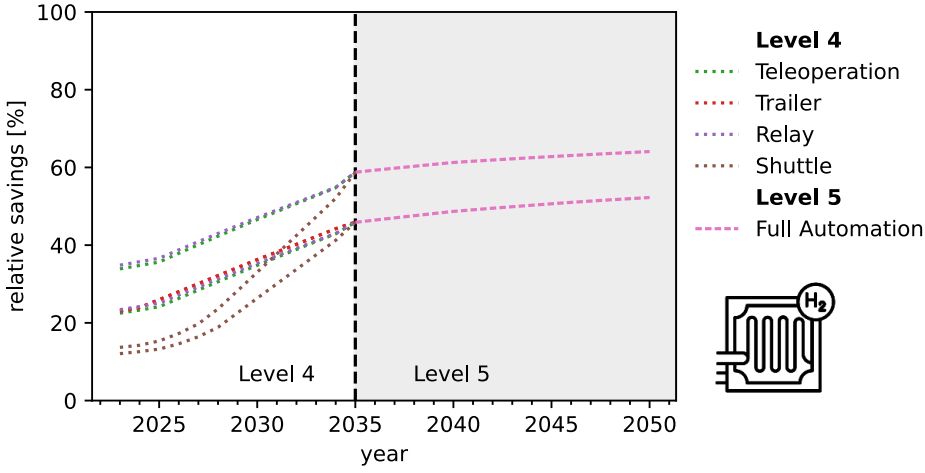
FCEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.05	1.05	0.79	0.79	0.79	0.80
2025	0.99	0.98	0.71	0.71	0.71	0.72
2030	0.87	0.86	0.58	0.58	0.58	0.58
2035	0.81	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.76	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.72	0.71	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.70	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38

BEV	€/km					
Operational Strategy	Non-automated	Non-automated w/o loading and unloading	Tele-operation	Trailer	Relay	Shuttle
2023	1.04	1.03	0.77	0.77	0.77	0.78
2025	0.98	0.97	0.70	0.70	0.70	0.71
2030	0.87	0.86	0.58	0.58	0.58	0.58
2035	0.81	0.80	0.49	0.49	0.49	0.49
2040	0.76	0.75	0.44	0.44	0.44	0.44
2045	0.73	0.72	0.41	0.41	0.41	0.41
2050	0.70	0.69	0.38	0.38	0.38	0.38



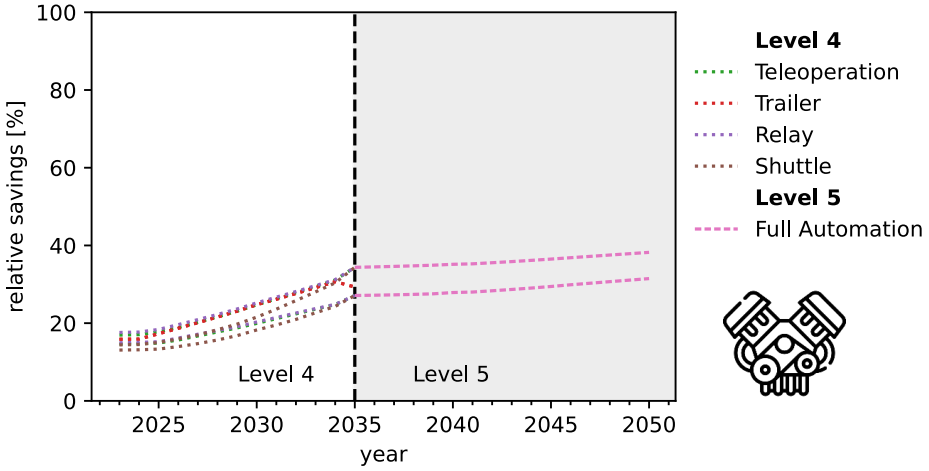
Hydrogen fuel icons created by NeXore88 from www.flaticon.com

Abbildung A-1 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf brennstoffzellen-elektrische Fahrzeuge.



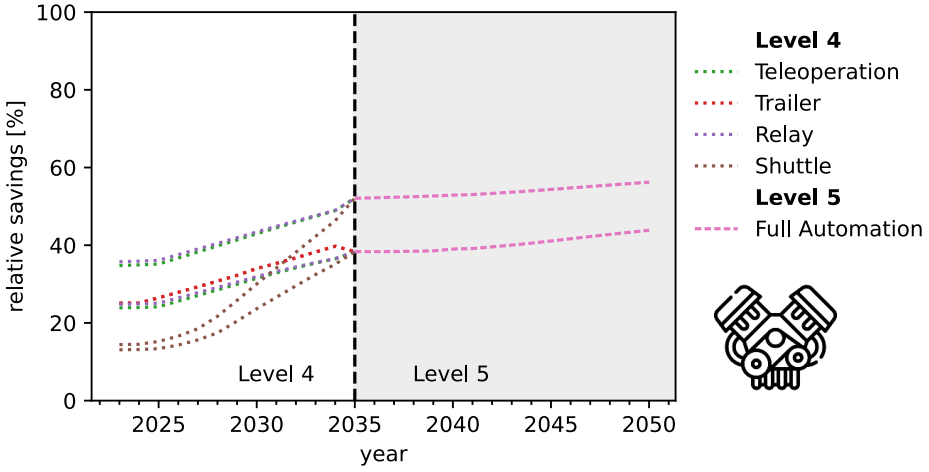
Hydrogen fuel icons created by NeXore88 from www.flaticon.com

Abbildung A-2 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf brennstoffzellen-elektrische Fahrzeuge.



Engine icons created by Freepik from www.flaticon.com

Abbildung A-3 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb ohne Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf Fahrzeug mit Dieselverbrennungsmotor.



Engine icons created by Freepik from www.flaticon.com

Abbildung A-4 Entwicklung der minimalen und maximalen relativen Gesamtersparnis im deutschen Straßengüterverkehr durch den Betrieb mit Stufe 4 und Stufe 5 Fahrzeugen verglichen mit dem nicht-automatisierten Betrieb mit Einsparungen in den Lohnkosten während der Be- und Entladung der Fahrzeuge. Die zugrundeliegenden Fahrzeugkosten beziehen sich auf Fahrzeug mit Dieselverbrennungsmotor.

B. Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge

Tabelle B-1 Energiebedarf einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine für das Autobahnsegment des *WHVC* Fahrzyklus. Erläuterung der Abkürzungen: ACC, Abstandsregeltempomat (6 s gleitender Mittelwert); CACC kooperativer Abstandsregeltempomat (18 s gleitender Mittelwert); PP, Exakte Vorhersage (90 s gleitender Mittelwert). In Anlehnung an [8].

	 Energy demand [MJ/100km]					
Vehicle	**Driving cycle**	**Mechanical [MJ_{mech}/100km]**	**Recuperation [MJ_{el}/100km]**	**Auxiliary [MJ_{el}/100km]**	**Fuel (BEV) [MJ_{el}/100km]**	**Comparison to conventional original**
Conventional	Original	344.23	-45.20	34.95	441.44 (+/- 0%)	-
	ACC	339.65	-42.15	35.21	438.26 (-0.7%)	-3.18 (-0.7%)
	CACC	334.75	-39.17	36.12	435.32 (-1.4%)	-6.12 (-1.4%)
	70 km/h max	269.18	-26.80	45.00	370.87 (-16.0%)	-70.57 (-16.0%)
Automated	Original	344.23	-45.17	39.02	445.83 (+/- 0%)	+4.39 (+1.0%)
	ACC	339.65	-42.10	39.33	442.72 (-0.7%)	+1.28 (+0.3%)
	CACC	334.75	-39.14	40.31	439.85 (-1.3%)	-1.59 (-0.4%)
	PP	318.14	-31.68	39.14	423.24 (-5.1%)	-18.20 (-4.1%)
	70 km/h max	269.18	-26.78	50.22	376.50 (-15.6%)	-64.94 (-14.7%)

Highway icons created by Darius Dan; Cargo truck icons created by Eucalyp; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Tabelle B-2 Energiebedarf eines batterieelektrischen Mittelklasse Personenkraftwagens für das Autobahnsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus. Erläuterung der Abkürzungen: ACC, Abstandsregeltempomat (4 s gleitender Mittelwert); CACC kooperativer Abstandsregeltempomat (12 s gleitender Mittelwert); PP, Exakte Vorhersage (60 s gleitender Mittelwert). In Anlehnung an [8].

	 Energy demand [MJ/100km]					
Vehicle	**Driving cycle**	**Mechanical [MJ_{mech}/100km]**	**Recuperation [MJ_{el}/100km]**	**Auxiliary [MJ_{el}/100km]**	**Fuel (BEV) [MJ_{el}/100km]**	**Comparison to conventional original**
Conventional	Original	59.45	-5.69	1.90	73.45 (+/- 0%)	-
	ACC	59.11	-5.47	1.89	73.18 (-0.4%)	-0.27 (-0.4%)
	CACC	57.41	-4.41	1.90	71.86 (-2.2%)	-1.59 (-2.2%)
Automated	Original	59.45	-5.65	5.11	76.93 (+/- 0%)	+3.48 (+4.7%)
	ACC	59.11	-5.44	5.08	76.64 (-0.4%)	+3.19 (+4.3%)
	CACC	57.41	-4.36	5.14	75.37 (-2.0%)	+1.92 (+2.6%)
	PP	54.44	-3.22	5.34	72.69 (-5.5%)	-0.76 (-1.0%)
	PP 3000 W	54.44	-3.09	12.21	80.17 (+4.2%)	+6.72 (+9.1%)
	PP 200 W	54.44	-3.24	2.66	69.79 (-9.3%)	-3.66 (-5.0%)

Highway icons created by Darius Dan; Car icons created by Konkapp; Energy icons created by Pixel perfect from www.flaticon.com

Tabelle B-3 Energiebedarf eines batterieelektrischen Mittelklasse Personenkraftwagens für das Stadtsegment des *WLTC-3b* Fahrzyklus.

	 Energy demand					
Vehicle	**Driving cycle**	**Mechanical [MJ_{mech}/100km]**	**Recuperation [MJ_{el}/100km]**	**Auxiliary [MJ_{el}/100km]**	**Fuel (BEV) [MJ_{el}/100km]**	**Comparison to conventional original**
Conventional	Original	45.28	-18.04	8.07	52.31 (+/-0%)	-
	No stops	44.35	-17.47	5.64	48.98 (-6.4%)	-3.33 (-6.4%)
	30 km/h max	29.63	-8.50	9.74	41.61 (-20.5%)	-10.70 (-20.5%)
	No stops 30 km/h max	28.71	-7.93	7.31	38.27 (-26.8%)	-14.04 (-26.8%)
Automated	Original	45.28	-17.07	23.16	69.28 (+/-0%)	+16.97 (+32.4%)
	No stops	44.35	-16.56	16.45	61.30 (-11.5%)	+8.99 (+17.2%)
	30 km/h max	29.63	-7.29	27.95	62.13 (-10.3%)	+9.82 (+18.8%)
	No stops 30 km/h max	28.71	-6.78	21.25	54.15 (-21.8%)	+1.84 (+3.5%)
	No stops 30 km/h max 3000 W	28.71	-4.75	51.75	88.50 (+27.7%)	+36.19 (+69.2%)
	No stops 30 km/h max 200 W	28.71	-7.76	9.94	41.23 (-40.5%)	-11.08 (-21.2%)

Street icons created by surang; Energy icons created by Pixel perfect; Car icons created by Konkapp from www.flaticon.com

C. Verkehrlicher Einfluss automatisierter Fahrzeuge und Netzwerkauslastung

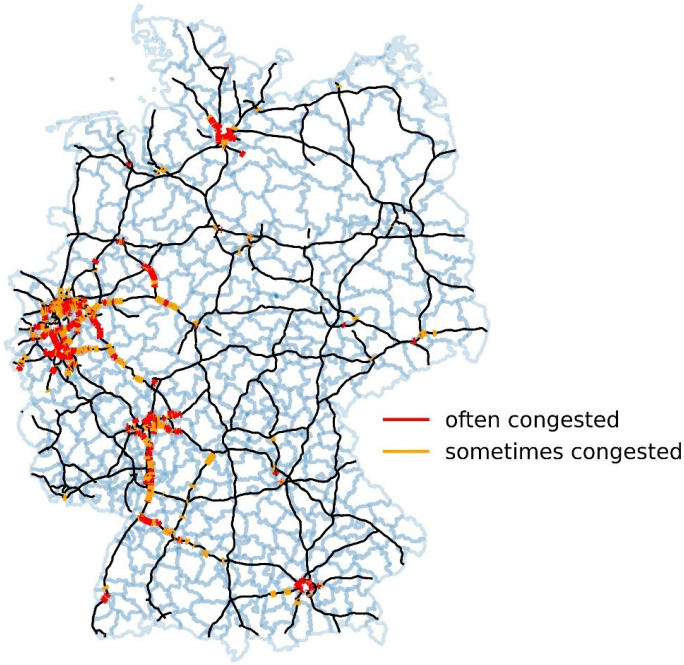


Abbildung C-1 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2030.

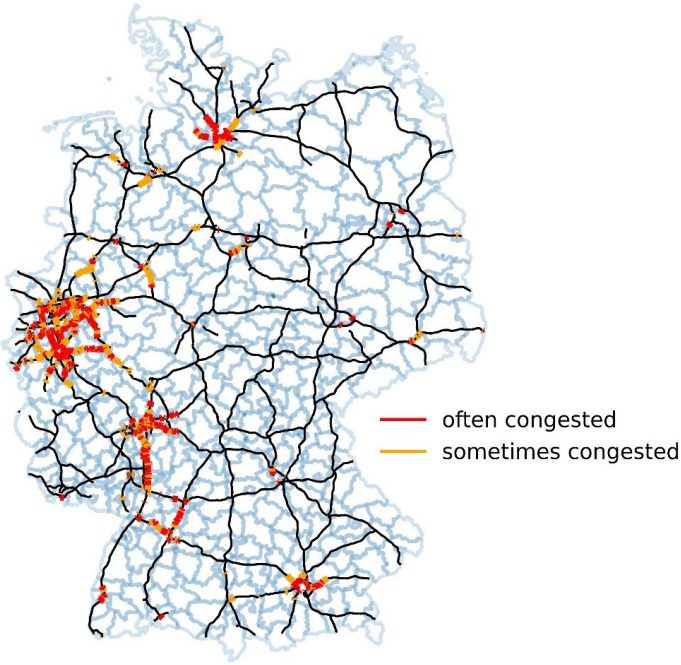


Abbildung C-2 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045.

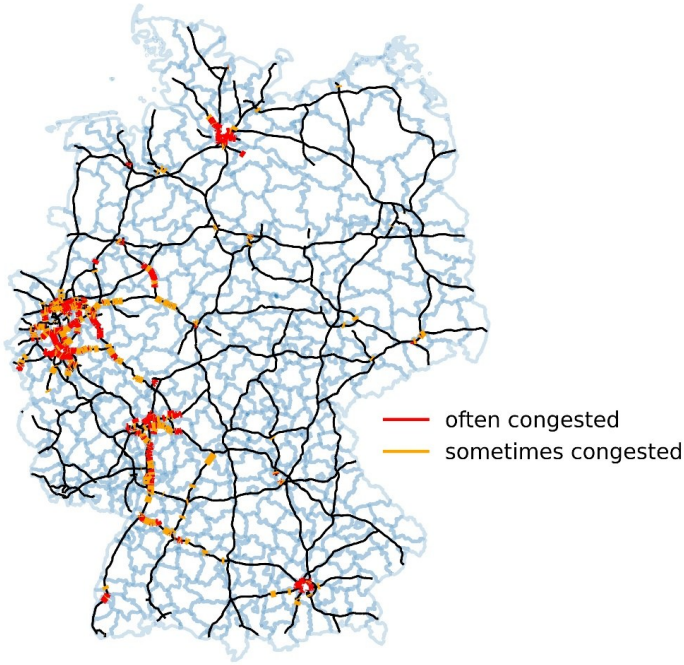


Abbildung C-3 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2030 unter der Annahme, dass alle Lastkraftwagen automatisiert sind.

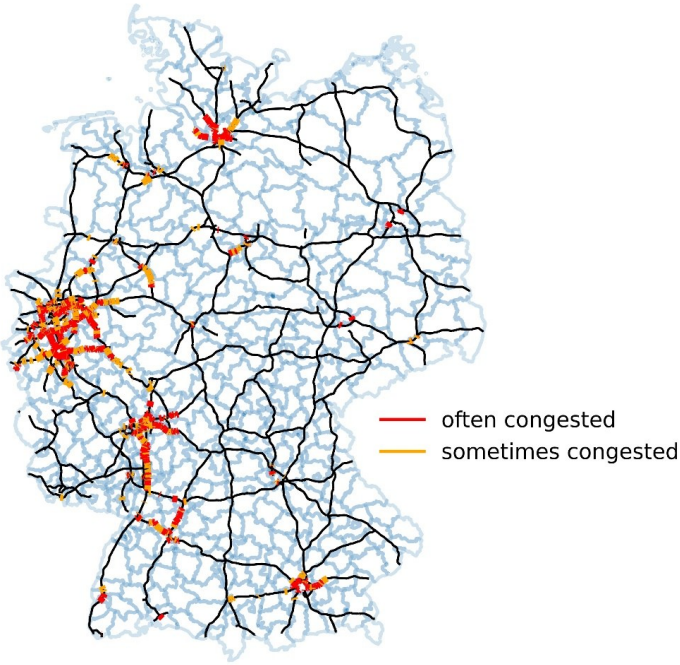


Abbildung C-4 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 unter der Annahme, dass alle Lastkraftwagen automatisiert sind.

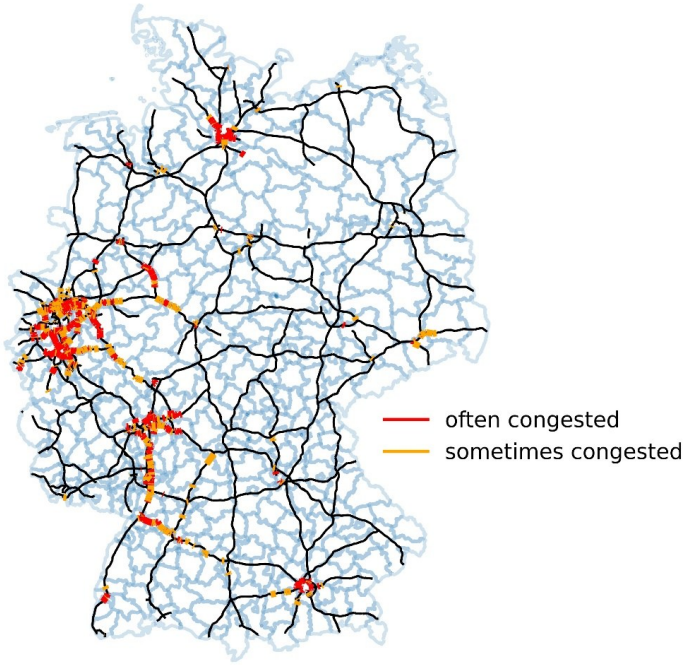


Abbildung C-5 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2030 unter der Annahme, dass das Straßengüterverkehrsaufkommen durch geringere Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen um 9,3% zunimmt.

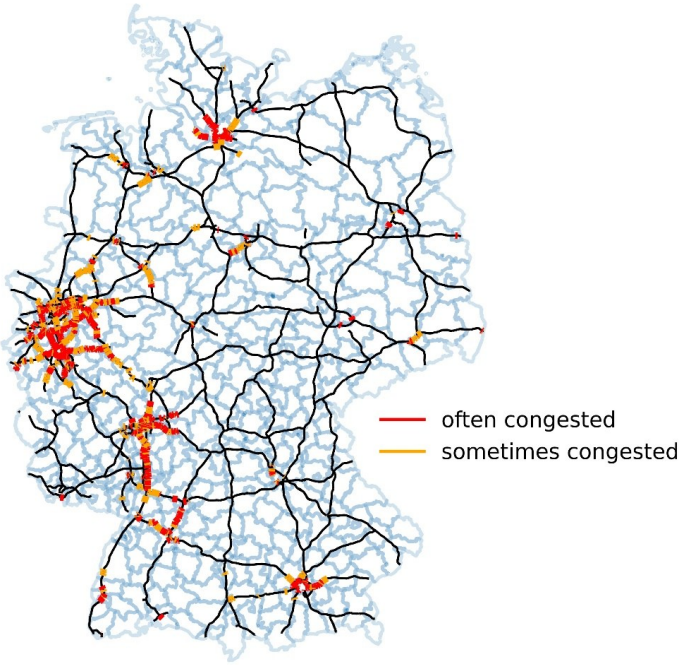


Abbildung C-6 Häufig und gelegentlich staugefährdete Autobahnabschnitte in Deutschland für das Jahr 2045 unter der Annahme, dass das Straßengüterverkehrsaufkommen durch geringere Betriebskosten automatisierter Lastkraftwagen um 9,3% zunimmt.

Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Bundesverkehrswegeplan 2030“, Aug. 2016.

[2] M. Schubert, T. Kluth, G. Nebauer, R. Ratzenberger, S. Kotzagiorgis, B. Butz, W. Schneider, und M. Leible, „Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 96.0981/2011, Juni 2014. Zugegriffen: 22. Dezember 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsprognose-2030.html

[3] Intraplan und Trimode, „Prognose 2022 - Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022“, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Ergebnisbericht VB970426, März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/prognose-berichtgleitende-langfrist-verkehrsprognose.pdf?__blob=publicationFile

[4] IRU, „International Road Transport Union. European Driver Shortage Report 2022“, 2022. Zugegriffen: 13. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iru.org/news-resources/newsroom/one-ten-european-truck-drivers-missing-shortage-escalates

[5] IRU, „International Road Transport Union. Driver shortage report 2023 freight - Global executive summary“, Nov. 2023. Zugegriffen: 17. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iru.org/news-resources/newsroom/global-truck-driver-shortage-double-2028-says-new-iru-report

[6] ITF, „International Transport Forum. Managing the transition to driverless road freight transport“, Mai 2017. Zugegriffen: 26. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.itf-oecd.org/managing-transition-driverless-road-freight-transport

[7] E. Jungblut, T. Grube, J. Linßen, und D. Stolten, „Automated and Connected Driving: State-of-the-Art and Implications for Future Scenario Analysis“. arXiv, 17. August 2024. doi: 10.48550/arXiv.2408.11864.

[8] E. Jungblut, T. Grube, J. Linssen, und D. Stolten, „Fuel-saving opportunities for automated vehicles: A driving cycle analysis“, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Bd. 22, S. 100964, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.trip.2023.100964.

[9] E. Jungblut, T. Grube, J. Linssen, und D. Stolten, „The Impact of Partially Automated Trucking on the Demand for Human Drivers“, *Engineering Power : Bulletin of the Croatian Academy of Engineering*, Bd. 19, Nr. 4, S. 2–8, 2024.

[10] SAE, „On-Road Automated Driving committee. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“, *SAE International*, Apr. 2021, doi: 10.4271/J3016_202104.

[11] A. Hars, „Autonomous car forecasts“, Driverless car market watch. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.driverless-future.com/?page_id=384

[12] Nissan, „Nissan Motor Corporation. Official U.S. Newsroom | Nissan Announces Unprecedented Autonomous Drive Benchmarks“. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://usa.nissannews.com/en-US/releases/nissan-announces-unprecedented-autonomous-drive-benchmarks

[13] P. E. Ross, „IEEE Spectrum | CES 2017: Nvidia and Audi Say They'll Field a Level 4 Autonomous Car in Three Years“, IEEE Spectrum. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://spectrum.ieee.org/nvidia-ceo-announces

[14] A. Sage und P. Lienert, „Ford plans self-driving car for ride share fleets in 2021“, *Reuters*, 16. August 2016. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.reuters.com/article/us-ford-autonomous-idUSKCN10R1G1

[15] McKinsey, „McKinsey Center for Future Mobility. Autonomous Driving“, McKinsey Center for Future Mobility Autonomous Driving. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/overview/autonomous-driving

[16] W. Bernhart und S. Riederle, „Roland Berger. Automotive Disruption Radar #10 | Bump in the road: Is the push for autonomous driving losing speed just as it nears the finish line?“ Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Automotive-Disruption-Radar-10.html

[17] T. Litman, „Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning“, Sep. 2021, Zugegriffen: 20. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://trid.trb.org/view/1678741

[18] DARPA, „Defense Advanced Research Projects Agency. DARPA Urban Challenge Overview“. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.grandchallenge.org/grandchallenge/overview.html

[19] K. Edward, „Forbes | Mercedes-Benz Introduces World’s First Internationally Valid System For Conditionally Automated Driving“, Forbes. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.forbes.com/sites/kyleedward/2021/12/29/mercedes-benz-introduces-worlds-first-internationally-valid-system-for-conditionally-automated-driving/

[20] Reuters, „Automotive News Europe | How Honda’s Level 3 self-driving technology works“, Automotive News Europe. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://europe.autonews.com/automakers/how-hondas-level-3-self-driving-technology-works

[21] R. Bellan, „TechCrunch | Cruise launches driverless robotaxi service in San Francisco“. Zugegriffen: 10. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://social.techcrunch.com/2021/11/03/cruise-launches-driverless-robotaxi-service-for-employees-in-san-francisco/

[22] C. Hetzner, „Fortune | Fancy a spin in a robotaxi? Cruise is now inviting the public to try its self-driving cars in one U.S. city“, Fortune. Zugegriffen: 10. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://fortune.com/2022/02/01/cruise-robotaxi-self-driving-car-san-francisco/

[23] Waymo LLC, „Waypoint - The official Waymo blog. Waymo is opening its fully driverless service to the general public in Phoenix“. Zugegriffen: 10. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://blog.waymo.com/2020/10/waymo-is-opening-its-fully-driverless.html

[24] Cruise LLC, „Cruise resumes supervised autonomous driving with safety drivers“. Zugegriffen: 9. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://getcruise.com/news/blog/2024/cruise-resumes-supervised-autonomous-driving-with-safety-drivers/

[25] Crunchbase, „Company Financials Waymo“. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/waymo/company_financials

[26] Crunchbase, „Company Financials Aurora“. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/aurora-6292/investor_financials

[27] Crunchbase, „Company Financials Inceptio Technology“. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/inceptio-technology/company_financials

[28] Crunchbase, „Company Financials TuSimple“, Crunchbase. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/tusimple-llc/company_financials

[29] Crunchbase, „Company Financials Plus“, Crunchbase. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/plusai/company_financials

[30] Crunchbase, „Company Financials Embark Trucks“. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/embark-trucks/company_financials

[31] Crunchbase, „Company Financials Kodiak Robotics“, Crunchbase. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/kodiak-robotics-inc/company_financials

[32] Crunchbase, „Company Financials Gatik AI“. Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.crunchbase.com/organization/gatik-ai/company_financials

[33] J. Engström, R. Bishop, S. E. Shladover, M. C. Murphy, L. O'Rourke, T. Voege, B. Denaro, R. Demato, und D. Demato, „Deployment of Automated Trucking: Challenges and Opportunities“, in *Road Vehicle Automation 5*, G. Meyer und S. Beiker, Hrsg., in Lecture Notes in Mobility. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 149–162. doi: 10.1007/978-3-319-94896-6_13.

[34] TuSimple Holdings Inc, „Investor Relations | Investor Presentation“, Investor Relations. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ir.tusimple.com/investor-relations/

[35] PlusAI Inc., „Newsroom | IVECO and Plus Announce Autonomous Trucking Pilot in Europe and China“. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://plus.ai/press-release/IVECO-and-Plus-Announce-Autonomous-Trucking-Pilot-in-Europe-and-China.html

[36] PlusAI Inc., „Investor Relations“, Plus Investors. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://plus.ai/investors.html

[37] PlusAI Inc., „Automated Truck by IVECO and Plus Now on Public Roads in Germany“, Plus. Zugegriffen: 25. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://plus.ai/news-and-insights/automated-truck-by-iveco-and-plus-now-on-public-roads-in-germany

[38] R. Bellan, „TechCrunch | TuSimple completes its first driverless autonomous truck run on public roads“. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://social.techcrunch.com/2021/12/29/tusimple-completes-its-first-driverless-autonomous-truck-run-on-public-roads/

[39] TuSimple Holdings Inc, „Investor Relations | Investor Presentation“, Investor Relations. Zugegriffen: 25. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ir.tusimple.com/overview/default.aspx

[40] Aurora Innovation Inc., „Investor Relations“. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ir.aurora.tech

[41] Aurora Innovation Inc., „Aurora Blog | Progress Toward Commercializing Self-Driving Technology: Aurora's 2021 Milestones“, Aurora Blog. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://aurora.tech/blog/progress-toward-commercializing-self-driving-technology

[42] Aurora Innovation Inc., „Investor Relations“. Zugegriffen: 26. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ir.aurora.tech

[43] U. Shakir, „Waymo is scaling back its self-driving truck ambitions“, The Verge. Zugegriffen: 26. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.theverge.com/2023/7/26/23809237/waymo-via-autonomous-truck-delay-timeline-layoffs

[44] D. Hopkins und T. Schwanen, „Sociotechnical expectations of vehicle automation in the UK trucking sector“, *Technological Forecasting and Social Change*, Bd. 196, S. 122863, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.techfore.2023.122863.

[45] M. Campbell, M. Egerstedt, J. P. How, und R. M. Murray, „Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges“, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Bd. 368, Nr. 1928, S. 4649–4672, Okt. 2010, doi: 10.1098/rsta.2010.0110.

[46] S. D. Pendleton, H. Andersen, X. Du, X. Shen, M. Meghjani, Y. H. Eng, D. Rus, und M. H. Ang, „Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles“, *Machines*, Bd. 5, Nr. 1, S. 6, 2017.

[47] Waymo LLC, „Waymo Driver“, Waymo. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://waymo.com/waymo-driver/

[48] PlusAI Inc., „Technology | PLUS Autonomous Truck Driving Technology“, Plus Technology. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://plus.ai/technology.html

[49] TuSimple Holdings Inc, „Technology | Self-Driving Technology Designed for Trucks“. Zugegriffen: 7. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tusimple.com/technology/

[50] Aurora Innovation Inc., „Aurora Driver“, Aurora. Zugegriffen: 11. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://aurora.tech/aurora-driver

[51] L. Liu, S. Lu, R. Zhong, B. Wu, Y. Yao, Q. Zhang, und W. Shi, „Computing Systems for Autonomous Driving: State of the Art and Challenges“, *IEEE Internet of Things Journal*, Bd. 8, Nr. 8, S. 6469–6486, Apr. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3043716.

[52] D. J. Yeong, G. Velasco-Hernandez, J. Barry, und J. Walsh, „Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review“, *Sensors*, Bd. 21, Nr. 6, S. 2140, 2021.

[53] R. Amadeo, „Ars Technica | Google’s Waymo invests in LIDAR technology, cuts costs by 90 percent“, Ars Technica. Zugegriffen: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://arstechnica.com/cars/2017/01/googles-waymo-invests-in-lidar-technology-cuts-costs-by-90-percent/

[54] C. Domke und Q. Potts, „Automotive World | LiDARs for self-driving vehicles: a technological arms race“. Zugegriffen: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.automotiveworld.com/articles/lidars-for-self-driving-vehicles-a-technological-arms-race/

[55] N. Watanabe und H. Ryugen, „Cheaper lidar sensors brighten the future of autonomous cars“, Nikkei Asia. Zugegriffen: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://asia.nikkei.com/Business/Automobiles/Cheaper-lidar-sensors-brighten-the-future-of-autonomous-cars

[56] D. Feng, C. Haase-Schütz, L. Rosenbaum, H. Hertlein, C. Gläser, F. Timm, W. Wiesbeck, und K. Dietmayer, „Deep Multi-Modal Object Detection and Semantic Segmentation for Autonomous Driving: Datasets, Methods, and Challenges“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 22, Nr. 3, S. 1341–1360, März 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.2972974.

[57] Y. Zhang, A. Carballo, H. Yang, und K. Takeda, „Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey“, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Bd. 196, S. 146–177, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.021.

[58] M. Uricar, D. Hurych, P. Krizek, und S. Yogamani, „Challenges in Designing Datasets and Validation for Autonomous Driving“, Jan. 2019, Zugegriffen: 21. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://arxiv.org/abs/1901.09270v1

[59] S.-C. Lin, Y. Zhang, C.-H. Hsu, M. Skach, M. E. Haque, L. Tang, und J. Mars, „The Architectural Implications of Autonomous Driving: Constraints and Acceleration“, *Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, S. 751–766, März 2018.

[60] H. Tabani, R. Pujol, M. Alcon, J. Moya, J. Abella, und F. J. Cazorla, „ADBench: benchmarking autonomous driving systems“, *Computing*, Juli 2021, doi: 10.1007/s00607-021-00975-1.

[61] K. Wong, Y. Gu, und S. Kamijo, „Mapping for Autonomous Driving: Opportunities and Challenges“, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Bd. 13, Nr. 1, S. 91–106, 2021, doi: 10.1109/MITS.2020.3014152.

[62] P. A. Hancock, I. Nourbakhsh, und J. Stewart, „On the future of transportation in an era of automated and autonomous vehicles“, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 116, Nr. 16, S. 7684–7691, 2019.

[63] M. Martínez-Díaz und F. Soriguera, „Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges“, *Transportation Research Procedia*, Bd. 33, S. 275–282, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.trpro.2018.10.103.

[64] Z. Dong, W. Shi, G. Tong, und K. Yang, „Collaborative Autonomous Driving: Vision and Challenges“, in *2020 International Conference on Connected and Autonomous Driving (MetroCAD)*, Feb. 2020, S. 17–26. doi: 10.1109/MetroCAD48866.2020.00010.

[65] D. J. Fagnant und K. Kockelman, „Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 77, S. 167–181, Juli 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.04.003.

[66] R. Elvik, „The demand for automated vehicles: A synthesis of willingness-to-pay surveys“, *Economics of Transportation*, Bd. 23, S. 100179, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ecotra.2020.100179.

[67] S. Narayanan, E. Chaniotakis, und C. Antoniou, „Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 111, S. 255–293, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.trc.2019.12.008.

[68] A. Soteropoulos, M. Berger, und F. Ciari, „Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies“, *Transport reviews*, Bd. 39, Nr. 1, S. 29–49, 2019.

[69] G. H. de A. Correia und B. van Arem, „Solving the User Optimum Privately Owned Automated Vehicles Assignment Problem (UO-POAVAP): A model to explore the impacts of self-driving vehicles on urban mobility“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 87, S. 64–88, Mai 2016, doi: 10.1016/j.trb.2016.03.002.

[70] J. Auld, O. Verbas, M. Javanmardi, und A. Rousseau, „Impact of Privately-Owned Level 4 CAV Technologies on Travel Demand and Energy“, *Procedia Computer Science*, Bd. 130, S. 914–919, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.089.

[71] J. Auld, V. Sokolov, und T. S. Stephens, „Analysis of the Effects of Connected–Automated Vehicle Technologies on Travel Demand“, *Transportation Research Record*, Bd. 2625, Nr. 1, S. 1–8, Jan. 2017, doi: 10.3141/2625-01.

[72] D. J. Fagnant und K. M. Kockelman, „The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 40, S. 1–13, März 2014, doi: 10.1016/j.trc.2013.12.001.

[73] P. M. Boesch, F. Ciari, und K. W. Axhausen, „Autonomous Vehicle Fleet Sizes Required to Serve Different Levels of Demand“, *Transportation Research Record*, Bd. 2542, Nr. 1, S. 111–119, Jan. 2016, doi: 10.3141/2542-13.

[74] J. Bischoff und M. Maciejewski, „Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin“, *Procedia Computer Science*, Bd. 83, S. 237–244, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.04.121.

[75] Z. Liu, R. Li, und J. Dai, „Effects and feasibility of shared mobility with shared autonomous vehicles: An investigation based on data-driven modeling approach“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 156, S. 206–226, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.tra.2022.01.001.

[76] G. Ben-Dor, E. Ben-Elia, und I. Benenson, „Determining an Optimal Fleet Size for a Reliable Shared Automated Vehicle Ride-Sharing Service“, *Procedia Computer Science*, Bd. 151, S. 878–883, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.04.121.

[77] M. D. Yap, G. Correia, und B. van Arem, „Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 94, S. 1–16, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.tra.2016.09.003.

[78] T. H. Rashidi, T. Waller, und K. Axhausen, „Reduced value of time for autonomous vehicle users: Myth or reality?“, *Transport Policy*, Bd. 95, S. 30–36, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.tranpol.2020.06.003.

[79] C. J. Haboucha, R. Ishaq, und Y. Shiftan, „User preferences regarding autonomous vehicles“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 78, S. 37–49, 2017.

[80] V. Kolarova, C. Eisenmann, C. Nobis, C. Winkler, und B. Lenz, „Analysing the impact of the COVID-19 outbreak on everyday travel behaviour in Germany and potential implications for future travel patterns“, *European Transport Research Review*, Nr. 1, Mai 2021, Zugegriffen: 28. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter:

https://www.springerprofessional.de/analysing-the-impact-of-the-covid-19-outbreak-on-everyday-travel/19124698?fulltextView=true

[81] P. Loa, S. Hossain, Y. Liu, und K. Nurul Habib, „How has the COVID-19 pandemic affected the use of ride-sourcing services? An empirical evidence-based investigation for the Greater Toronto Area“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 155, S. 46–62, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.tra.2021.11.013.

[82] M. Sunder, T. Hagen, und E. Lerch, „Mobilität während und nach der Corona-Krise : erneute Analysen für Deutschland“, 2021, doi: 10.48718/xhgq-ve96.

[83] J. Reul, „Modellgestützte Analyse zukünftigen Mobilitätsverhaltens“, Doctoral Thesis, RWTH Aachen, 2024.

[84] C. Nobis und T. Kuhnimhof, „Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur“, Bonn, Berlin, FE-Nr. 70.904/15, 2018. Zugegriffen: 25. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de

[85] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Deutsches Mobilitätspanel (MOP)“. Zugegriffen: 17. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/deutsches-mobilitaetspanel.html

[86] J. Reul, T. Grube, und D. Stolten, „Urban transportation at an inflection point: An analysis of potential influencing factors“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 92, S. 102733, März 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.102733.

[87] C. Ledna, M. Muratori, A. Yip, P. Jadun, und C. Hoehne, „Decarbonizing Medium- & Heavy-Duty On-Road Vehicles: Zero-Emission Vehicles Cost Analysis“, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/TP-5400-82081, März 2022. doi: 10.2172/1854583.

[88] M. Wietschel, T. Gnann, A. Kühn, P. Plötz, C. Moll, C. Speth, J. Buch, T. Boßmann, S. Stütz, M. Schellert, D. Rüdiger, W. Balz, H. Frik, V. Waßmuth, D. Paufler-Mann, A. Rödl, W. Schade, und S. Mader, „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“, 2017.

[89] Y. Huang und K. M. Kockelman, „What will autonomous trucking do to U.S. trade flows? Application of the random-utility-based multi-regional input–output model“, *Transportation*, Bd. 47, Nr. 5, S. 2529–2556, Okt. 2020, doi: 10.1007/s11116-019-10027-5.

[90] B. Sharpe, „Barriers to the adoption of fuel-saving technologies in the trucking sector“, The International Council on Clean Transportation, Juli 2017. Zugegriffen: 26. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://theicct.org/publication/barriers-to-the-adoption-of-fuel-saving-technologies-in-the-trucking-sector/

[91] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Lkw-Maut“. Zugegriffen: 10. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html

[92] ING, „Tijdperk van zero emissie breekt aan voor trucks“, Okt. 2019. Zugegriffen: 20. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ing.nl/media/ING_EBZ_tijdperk_zero-emissie-voor-trucks-breekt-aan_tcm162-180450.pdf

[93] Münchener Verein Allgemeine Versicherungs-AG, „Tabellen zum Schadenfreiheitsrabatt-System für Lieferwagen, LKW, Zugmaschinen, übrige Fahrzeuge“. 2016. Zugegriffen: 20. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mv-maklernetz.de/downloadcenter/Kraft/Sonstige_Unterlagen/3800422.pdf

[94] A. Burnham, D. Gohlke, L. Rush, T. Stephens, Y. Zhou, M. A. Delucchi, A. Birky, C. Hunter, Z. Lin, S. Ou, F. Xie, C. Proctor, S. Wiryadinata, N. Liu, und M. Boloor, „Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains“, Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), ANL/ESD-21/4, Apr. 2021. doi: 10.2172/1780970.

[95] A. Leslie und D. Murray, „An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2024 Update“, American Transportation Research Institute, Juni 2024. Zugegriffen: 19. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://truckingresearch.org/2024/06/an-analysis-of-the-operational-costs-of-trucking-2024-update/

[96] Roland Berger, „Automated Trucks – The next big disrupter in the automotive industry?“, Mai 2016. Zugegriffen: 14. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/en/Media/Automated-Trucks-The-next-big-disrupter-in-the-automotive-industry.html

[97] Roland Berger, „Shifting up a gear - Automation, electrification and digitalization in the trucking industry“, Sep. 2018. Zugegriffen: 27. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/en/Media/The-future-of-trucking-Autonomous-driving-electrification-and-digital.html

[98] ADAC, „Functions on Demand: Extras nachträglich kaufen“. Zugegriffen: 6. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/functions-on-demand/

[99] BMW, „Aktive Geschwindigkeitsregelung mit Stop&Go-Funktion“, ConnectedDrive. Zugegriffen: 6. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmw.de/de/shop/ls/dp/ACC_Offer_de

[100] P. Slowik und B. Sharpe, „Automation in the long haul: Challenges and opportunities of autonomous heavy-duty trucking in the United States“, The International Council on Clean Transportation, März 2018. Zugegriffen: 26. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://theicct.org/publication/automation-in-the-long-haul-challenges-and-opportunities-of-autonomous-heavy-duty-trucking-in-the-united-states/

[101] Z. Wadud, „Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 101, S. 163–176, Juli 2017, doi: 10.1016/j.tra.2017.05.005.

[102] T. Ghandriz, B. Jacobson, L. Laine, und J. Hellgren, „Impact of automated driving systems on road freight transport and electrified propulsion of heavy vehicles“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 115, S. 102610, Juni 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.102610.

[103] S. Kraus, „Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor“, Doctoral Thesis, RWTH Aachen, 2024.

[104] T. Grube, S. Kraus, J. Reul, und D. Stolten, „Passenger car cost development through 2050“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 101, S. 103110, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.103110.

[105] EU, *Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport and amending Council Regulations (EEC) No 3821/85 and (EC) No 2135/98 and repealing Council Regulation (EEC) No 3820/85 (Text with EEA relevance) - Declaration*, Bd. 102. 2006. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg/2006/561/oj/eng

[106] EU, *Corrigendum to Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport and amending Council Regulations (EEC) No 3821/85 and (EC) No 2135/98 and repealing Council Regulation (EEC) No 3820/85 (OJ L 102, 11.4.2006)*, Bd. 195. 2016. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg/2006/561/corrigendum/2016-07-20/oj/eng

[107] EU, *Regulation (EC) No 1073/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 on common rules for access to the international market for coach and bus services, and amending Regulation (EC) No 561/2006 (recast) (Text with EEA relevance)*, Bd. 300. 2009. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg/2009/1073/oj/eng

[108] EU, *Regulation (EU) No 165/2014 of the European Parliament and of the Council of 4 February 2014 on tachographs in road transport, repealing Council Regulation (EEC) No 3821/85 on recording equipment in road transport and amending Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport Text with EEA relevance*, Bd. 060. 2014. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg/2014/165/oj/eng

[109] EU, *Regulation (EU) 2020/1054 of the European Parliament and of the Council of 15 July 2020 amending Regulation (EC) No 561/2006 as regards minimum requirements on maximum daily and weekly driving times, minimum breaks and daily and weekly rest periods and Regulation (EU) No 165/2014 as regards positioning by means of tachographs*, Bd. 249. 2020. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg/2020/1054/oj/eng

[110] Bundesamt für Güterverkehr, „Marktbeobachtung Güterverkehr - Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2022-I“, Bundesamt für Güterverkehr, Sep. 2022.

[111] M. Gittleman und K. Monaco, „Truck-driving jobs: Are they headed for rapid elimination?“, *ILR Review*, Bd. 73, Nr. 1, S. 3–24, Jan. 2020, doi: 10.1177/0019793919858079.

[112] A. Mohan und P. Vaishnav, „Impact of automation on long haul trucking operator-hours in the United States“, *Humanities and Social Sciences Communications*, Bd. 9, Nr. 1, S. 1–10, März 2022, doi: 10.1057/s41599-022-01103-w.

[113] J. Lee und K. M. Kockelman, „Energy implications of self-driving vehicles“, in *Proceedings of the 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA*, 2019, S. 13–17.

[114] M. Massar, I. Reza, S. M. Rahman, S. M. H. Abdullah, A. Jamal, und F. S. Al-Ismail, „Impacts of Autonomous Vehicles on Greenhouse Gas Emissions—Positive or Negative?“, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Bd. 18, Nr. 11, Art. Nr. 11, Jan. 2021, doi: 10.3390/ijerph18115567.

[115] Z. Wadud, D. MacKenzie, und P. Leiby, „Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 86, S. 1–18, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

[116] Y. Chen, J. Gonder, S. Young, und E. Wood, „Quantifying autonomous vehicles national fuel consumption impacts: A data-rich approach“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 122, S. 134–145, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.tra.2017.10.012.

[117] M. Roca-Puigròs, C. Marmy, P. Wäger, und D. Beat Müller, „Modeling the transition toward a zero emission car fleet: Integrating electrification, shared mobility, and automation“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 115, S. 103576, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2022.103576.

[118] DieselNet, „Emission Test Cycles: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)“. Zugegriffen: 10. Juni 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php

[119] DieselNet, „Emission Test Cycles: World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)“. Zugegriffen: 10. Juni 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php

[120] S. Tsugawa, S. Jeschke, und S. E. Shladover, „A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings“, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Bd. 1, Nr. 1, S. 68–77, März 2016, doi: 10.1109/TIV.2016.2577499.

[121] M. Muratori, J. Holden, M. Lammert, A. Duran, S. Young, und J. Gonder, „Potentials for Platooning in U.S. Highway Freight Transport: Preprint“, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/CP-5400-67618, März 2017. doi: 10.4271/2017-01-0086.

[122] J. Liu, K. Kockelman, und A. Nichols, „Anticipating the emissions impacts of smoother driving by connected and autonomous vehicles, using the MOVES model“, in *transportation research board 96th annual meeting*, 2017.

[123] USEPA, „Motor Vehicle Emission Simulator: MOVES4. Office of Transportation and Air Quality. US Environmental Protection Agency“. Ann Arbor, MI, 2023. Zugegriffen: 3. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves

[124] V. Mickūnaitis, A. Pikūnas, und I. Mackoit, „Reducing fuel consumption and CO2 emission in motor cars“, *Transport*, Bd. 22, Nr. 3, S. 160–163, Jan. 2007, doi: 10.1080/16484142.2007.9638119.

[125] G. Bray und D. Cebon, „Operational speed strategy opportunities for autonomous trucking on highways“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 158, S. 75–94, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.tra.2022.01.014.

[126] J. H. Gawron, G. A. Keoleian, R. D. De Kleine, T. J. Wallington, und H. C. Kim, „Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects“, *Environmental Science & Technology*, Bd. 52, Nr. 5, S. 3249–3256, März 2018, doi: 10.1021/acs.est.7b04576.

[127] Z. Liu, H. Tan, X. Kuang, H. Hao, und F. Zhao, „The Negative Impact of Vehicular Intelligence on Energy Consumption“, *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2019, S. e1521928, Juli 2019, doi: 10.1155/2019/1521928.

[128] Agora, „Agora Verkehrswende. On Autopilot to a More Efficient Future? How Data Processing by Connected and Autonomous Vehicles Will Impact Energy Consumption“. Zugegriffen: 10. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/en/publications/on-autopilot-to-a-more-efficient-future/, https://www.agora-verkehrswende.de/en/publications/on-autopilot-to-a-more-efficient-future/

[129] P. Schall, S. Sigle, und C. Ulrich, „Design Strategy for a Distributed Energy Storage in a Modular Mover“, in *2021 Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Mai 2021, S. 1–5. doi: 10.1109/EVER52347.2021.9456606.

[130] S. Sigle und R. Hahn, „Energy Consumption Comparison of Current Powertrain Options in Autonomous Heavy Duty Vehicles (HDV)“, in *2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)*, Nov. 2022, S. 1–7. doi: 10.1109/SMART55236.2022.9990489.

[131] S. Sudhakar, V. Sze, und S. Karaman, „Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles“, *IEEE Micro*, Bd. 43, Nr. 1, S. 29–39, Jan. 2023, doi: 10.1109/MM.2022.3219803.

[132] J. Koomey, S. Berard, M. Sanchez, und H. Wong, „Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing“, *IEEE Annals of the History of Computing*, Bd. 33, Nr. 3, S. 46–54, März 2011, doi: 10.1109/MAHC.2010.28.

[133] S. Naffziger und J. Koomey, „Energy Efficiency of Computing: What’s Next?“, Electronic Design. Zugegriffen: 10. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.electronicdesign.com/technologies/microprocessors/article/21802037/energy-efficiency-of-computing-whats-next

[134] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014. doi: 10.1007/978-3-658-05068-9.

[135] T. Grube, „Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw“, Doctoral Thesis, Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, 2014. Zugegriffen: 13. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://juser.fz-juelich.de/record/151986

[136] S. Kraus, J. Reul, T. Grube, J. Linßen, und D. Stolten, „Vehicle Cost Analysis for Road Vehicles Until 2050“, in *30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, Aachen, 2021, S. 1231–1256.

[137] B. Cox, „Mobility and the Energy Transition: A Life Cycle Assessment of Swiss Passenger Transport Technologies including Developments until 2050“, Doctoral Thesis, ETH Zurich, 2018. doi: 10.3929/ethz-b-000276298.

[138] H. Helms, B. Bruch, D. Räder, S. Hausberger, S. Lipp, und C. Matzer, „Energieverbrauch von Elektroautos“, Umweltbundesamt, Dez. 2022. Zugegriffen: 10. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieverbrauch-von-elektroautos

[139] EVspecs, „Electric Cars Weight Comparison Chart“. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.evspecs.org/electric-cars-weight-comparison-chart

[140] B. Friedrich, „The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic“, in *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, und H. Winner,

Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 317–334. doi: 10.1007/978-3-662-48847-8_16.

[141] X. Shi und X. Li, „Constructing a fundamental diagram for traffic flow with automated vehicles: Methodology and demonstration“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 150, S. 279–292, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.trb.2021.06.011.

[142] F. Zhang, J. Lu, X. Hu, und Q. Meng, „A stochastic dynamic network loading model for mixed traffic with autonomous and human-driven vehicles“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 178, S. 102850, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.trb.2023.102850.

[143] Z. Gu, Z. Wang, Z. Liu, und M. Saberi, „Network traffic instability with automated driving and cooperative merging“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 138, S. 103626, Mai 2022, doi: 10.1016/j.trc.2022.103626.

[144] J. Zhou und F. Zhu, „Modeling the fundamental diagram of mixed human-driven and connected automated vehicles“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 115, S. 102614, Juni 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.102614.

[145] S. E. Shladover, D. Su, und X.-Y. Lu, „Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow“, *Transportation Research Record*, Bd. 2324, Nr. 1, S. 63–70, Jan. 2012, doi: 10.3141/2324-08.

[146] J. Vander Werf, S. E. Shladover, M. A. Miller, und N. Kourjanskaia, „Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity“, *Transportation Research Record*, Bd. 1800, Nr. 1, S. 78–84, Jan. 2002, doi: 10.3141/1800-10.

[147] J. Geistefeldt, „Einführungskolloquium Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen 2015 - Verkehrsqualität auf Autobahnen“, 2. Oktober 2015. Zugegriffen: 31. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/299_Geistefeldt.pdf

[148] The Lincoln Motor Company, „2016 MKZ Owner’s Manual“. März 2015.

[149] T. Li, D. Chen, H. Zhou, Y. Xie, und J. Laval, „Fundamental diagrams of commercial adaptive cruise control: Worldwide experimental evidence“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 134, S. 103458, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.trc.2021.103458.

[150] E. Aittoniemi, „Evidence on impacts of automated vehicles on traffic flow efficiency and emissions: Systematic review“, *IET Intelligent Transport Systems*, Bd. 16, Nr. 10, S. 1306–1327, 2022, doi: 10.1049/itr2.12219.

[151] A. Matin und H. Dia, „Impacts of Connected and Automated Vehicles on Road Safety and Efficiency: A Systematic Literature Review“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 24, Nr. 3, S. 2705–2736, März 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3227176.

[152] J. E. Park, W. Byun, Y. Kim, H. Ahn, und D. K. Shin, „The Impact of Automated Vehicles on Traffic Flow and Road Capacity on Urban Road Networks“, *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2021, Nr. 1, S. 8404951, 2021, doi: 10.1155/2021/8404951.

[153] T. Chowdhury, J. Vaughan, und M. J. Roorda, „Modeling impacts of freight automated vehicles in the Greater Toronto and Hamilton Area“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 184, S. 104090, Juni 2024, doi: 10.1016/j.tra.2024.104090.

[154] M. Hartmann, N. Motamedidehkordi, S. Krause, S. Hoffmann, P. Vortisch, und F. Busch, „Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Freeway Network“, *ITS World Congress 2017 Montreal*, 2017.

[155] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Verkehr in Zahlen 2021/2022“, 2021. Zugegriffen: 28. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehr-in-zahlen.html

[156] Kraftfahrt-Bundesamt, „Inlandsverkehr Jahr 2019 VE 3“, März 2021. Zugegriffen: 16. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/europaeischerLastkraftfahrzeuge/ve_Inlandsverkehr/ve_Inlandsverkehr_node.html?yearFilter=2019

[157] Kraftfahrt-Bundesamt, „Zahlen zum 1. Januar 2024 im Überblick“, Statistik | Fahrzeuge | Bestand. Zugegriffen: 5. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html

[158] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Mobilität in Deutschland (MiD)“. Zugegriffen: 17. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html

[159] WVI, IVT, DLR, KBA, „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 - Schlussbericht“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Braunschweig, Apr. 2012.

[160] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Mobilitätserhebungen des BMDV und seiner nachgeordneten Behörden im Überblick“. Zugegriffen: 17. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaetserhebungen-im-ueberblick.html

[161] D. Speth, V. Sauter, P. Plötz, und T. Signer, „Synthetic European road freight transport flow data“, *Data in Brief*, Bd. 40, S. 107786, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.dib.2021.107786.

[162] D. Speth, V. Sauter, P. Plötz, und T. Signer, „Synthetic European road freight transport flow data based on ETISplus“, *Mendeley Data*, Bd. V1, Sep. 2021, doi: 10.17632/py2zkrb65h.1.

[163] Eurostat, „European Comission. NUTS 2016 Eurostat/GISCO“. Zugegriffen: 8. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/statistical-units/territorial-units-statistics

[164] European Commission und Eurostat, „Statistical regions in the European Union and partner countries : NUTS and statistical regions 2021 : 2022 edition“, Publications Office of the European Union, 2022. Zugegriffen: 29. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/doi/10.2785/321792

[165] Destatis, „Statistisches Bundesamt. Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 31.12.2019“, Statistisches Bundesamt. Zugegriffen: 8. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugJ/31122019_Auszug_GV.html

[166] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Regionaldatenbank Deutschland: Ergebnis 42111-01-04-5. Verarbeitendes Gewerbe. Betriebe, tätige Personen, Bruttoentgelte - Stichtag: 30.09.2019 - regionale Tiefe: Gemeinden.“ Zugegriffen: 29. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.regionalstatistik.de/genesis//online?operation=table&code=42111-01-04-5&bypass=true&levelindex=1&levelid=1714391215693#abreadcrumb

[167] E. Szimba, M. Kraft, J. Ihrig, A. Schimke, O. Schnell, Y. Kawabata, S. Newton, T. Breemersch, R. Versteegh, J. Meijeren, H. Jin-Xue, C. de stasio, und F. Fermi, *ETISplus Database Content and Methodology*. 2012. doi: 10.13140/RG.2.2.16768.25605.

[168] OSM, „OpenStreetMap | About“, OpenStreetMap. Zugegriffen: 11. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.openstreetmap.org/about

[169] OSM Wiki, „OpenStreetMap Wiki – DE:Key:highway“. Zugegriffen: 8. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:highway

[170] G. Boeing, „OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks“, *Computers, Environment and Urban Systems*, Bd. 65, S. 126–139, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004.

[171] Bundesministerium für Digitales und Verkehr und Fernstraßen-Bundesamt, „Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs, Stand: 1. Januar 2023“. 1. Juni 2023.

[172] Bundesamt für Güterverkehr und Toll Collect GmbH, „Report: Mautnetz und Lkw-Verkehr 1. Halbjahr 2022“.

[173] Bundesamt für Logistik und Mobilität und Toll Collect GmbH, „Report: Mautnetz und Lkw-Verkehr 2. Halbjahr 2022“.

[174] NetworkX, „NetworkX - Network Analysis in Python“. Zugegriffen: 12. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://networkx.org/

[175] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen“. Zugegriffen: 17. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter:

https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Stundenwerte.html?nn=1817946

[176] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Verkehrs- und Unfalldaten Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland 1970 bis 2022“. Januar 2024.

[177] Bundesamt für Güterverkehr, „Mautstatistik Jahrestabellen 2019“. 2020.

[178] Agora Verkehrswende, „Verkehrswende als Mehrwert. Warum es sich volkswirtschaftlich lohnt, schnell in die Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Deutschlands Verkehrssektor zu investieren.“, Mai 2024. Zugegriffen: 20. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/verkehrswende-als-mehrwert/, https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/verkehrswende-als-mehrwert/

Band / Volume 727
Surface Regeneration of Plasma-Facing Components by Wire-Based Laser Metal Deposition
J. Tweer (2026), XX, 186 pp
ISBN: 978-3-95806-970-1 (Print)
ISBN: 978-3-95806-971-8 (E-Book)

Band / Volume 728
Reducing the noble metal and titanium content of anode PTLs in PEM water electrolysis – performance and degradation
S. Zerressen (2026), XIII, 235 pp
ISBN: 978-3-95806-972-5 (Print)
ISBN: 978-3-95806-973-2 (E-Book)

Band / Volume 729
Gasfernleitungsnetze und deren Umstellung auf Wasserstoff
T. A. Triesch (2026), 364 pp
ISBN: 978-3-95806-978-7 (Print)
ISBN: 978-3-95806-979-4 (E-Book)

Band / Volume 730
Land-Atmosphere Coupling in a Changing Climate: Understanding Variability, Extremes, and Human Influence through Regional Climate Modeling
Y. Zhang (2026), 135 pp
ISBN: 978-3-95806-980-0 (Print)
ISBN: 978-3-95806-981-7 (E-Book)

Band / Volume 731
Abbildung gekoppelter Infrastrukturen in Energiesystemmodellen
P. Freitag (2026), XIX, 322 pp
ISBN: 978-3-95806-984-8 (Print)
ISBN: 978-3-95806-985-5 (E-Book)

Band / Volume 732
Cost-reduced and Sustainable Interconnects and their Coatings for Solid Oxide Cells
M. Hilger (2026), viii, 185 pp
ISBN: 978-3-95806-988-6 (Print)
ISBN: 978-3-95806-989-3 (E-Book)

Band / Volume 733
Liquid-Phase Synthesis of Silicon and Silicon Carbide Thin-Films via Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition
B. Fischer (2026), xxii, 211, A15 pp
ISBN: 978-3-95806-990-9 (Print)
ISBN: 978-3-95806-991-6 (E-Book)

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 734
Modellgestützte Transformationspfade des deutschen Energiesystems
R. Maier (2026), xxvii, 331 pp
ISBN 978-3-95806-994-7 (Print)
ISBN 978-3-95806-995-4 (E-Book)

Band / Volume 735
Dynamical drivers of deep and shallow branches in the stratospheric circulation and transport
R.-A. Baikhadzhaev (2026), 120 pp
ISBN 978-3-95806-996-1 (Print)
ISBN 978-3-95806-997-8 (E-Book)

Band / Volume 736
Silicon heterojunction solar cells on thin wafers – prospects in different utilization scenarios
U. K. Chime (2026), 151 pp
ISBN 978-3-95806-998-5 (Print)
ISBN 978-3-95806-999-2 (E-Book)

Band / Volume 737
Advancing the understanding of actual evapotranspiration and critical soil moisture thresholds using lysimeter networks
X. Lu (2026), XXX, 159 pp
ISBN 978-3-69367-000-2 (Print)
ISBN 978-3-69367-001-9 (E-Book)

Band / Volume 738
Einfluss des automatisierten Fahrens auf die technoökonomische Performance von Verkehrssystemen
E. Jungblut (2026), VIII, 304 pp
ISBN 978-3-69367-006-4 (Print)
ISBN 978-3-69367-007-1 (E-Book)

Weitere ***Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich*** unter
http://wwwzb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 738
ISBN 978-3-69367-007-1

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

JÜLICH
Forschungszentrum