

— Kombination von Oberleitungssystemen und Elektrischen, Autonomen Nutzfahrzeugen

Vorstudie

Auftraggeber: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg

Autor*innen:

FZI Forschungszentrum Informatik:

Jacqueline Henle, Laurenz Adolph, Thilo Braun

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV):

Prof. Dr.-Ing. Eric Sax, Lukas Erlinghagen

Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT):

Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller, Martin Lauer

Institut für Verkehrswesen (IfV):

Dr.-Ing. Peter Vortisch, Sebastian Buck, Claude Weyland

Veröffentlichung: Karlsruhe, November 2021

– Management Summary

Im Straßengüterverkehr in Deutschland werden jährlich fast 4 Milliarden Tonnen Güter und Rohstoffe transportiert [1]. Von der Funktionsfähigkeit der Branche ist somit die Großindustrie genauso abhängig wie jeder Konsument, der Lebensmittel, Verbrauchs- und Gebrauchsgüter nachfragt. Lkw-Transporte machen rund 85% des Verkehrsaufkommens in Deutschland aus, dies führt zu Lärm- und Feinstaubbelastung sowie massivem Flächenverbrauch. Der Straßengüterverkehr verursacht darüber hinaus etwa ein Viertel der in Deutschland ausgestoßenen CO₂-Emissionen. Während diese ökologischen Effekte mittel- und langfristig über alternative Antriebe gemindert werden können, droht kurzfristig eine Güterknappheit und Versorgungsengpässe durch akuten Personalmangel in der Branche. Heute bietet der Speditions- und Logistiksektor fast 600.000 Menschen in Deutschland einen Arbeitsplatz, es fehlen aber allein 80.000 Lkw-Fahrende, jährlich zunehmend. In Großbritannien stellt sich jüngst das Ergebnis eines solchen Mangels dar, der fehlende Waren, Lieferverzögerungen und Produktionsstillstand verursacht. Diese Zusammenhänge zeigen auf, dass die Transport- und Logistikbranche vor vielseitigen Herausforderungen steht, denen sowohl kurzfristig geeignet begegnet, als auch mittel- und langfristig mit tiefgreifender Veränderung gegenübergetreten werden muss.

Die Wissenschaft und Industrie beschäftigt sich im Bereich des Güterverkehrs intensiv mit alternativen Antriebsformen, die besonders auf die Reduktion von Schadstoffemissionen ausgerichtet sind. Neben diesen Maßnahmen, die darauf abzielen, den Klimaschutz zu verbessern, müssen Forschungs- und Gesetzgebungsvorhaben künftig auch stärker den drohenden Fachkräftemangel und die Versorgungssicherheit adressieren.

Motiviert durch diese Entwicklungen zeigt die vorliegende Studie auf, wie die Automatisierung von Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) eine Verknüpfung ökologischer Nachhaltigkeitsziele und Versorgungssicherheit ermöglicht. O-Lkw fahren, ähnlich wie Straßenbahnen, unter einer Oberleitung mit elektrifizierten Fahrdrähten. In Baden-Württemberg wurde 2021 mit dem Pilotprojekt eWayBW eine Bundesstraße mit Oberleitungsinfrastruktur in Betrieb genommen [2]. Die dort eingesetzten Lkw mit Hybridantrieb auf Batteriebasis können sich mit einem Dachstromabnehmer hinter dem Fahrerhaus mit den Fahrdrähten verbinden und so während der Fahrt unter der Oberleitungsstrecke laden. Bei flächendeckender Skalierung der Oberleitungstechnologie und ökologischer Antriebsgestaltung kann ein wirtschaftlicher und energieeffizienter Betrieb realisiert werden [3]. Aktuell sind aber lediglich Teststrecken in Betrieb und die Lkw mit Stromabnehmer als Versuchsfahrzeuge im Einsatz.

Die Synthese der O-Lkw mit hochautomatisiertem Fahren kann nun einen weiteren Pfad in der Technologiestrategie darstellen. Die Oberleitung bietet für die Fahrzeugsensorik eine Redundanzebene, die die Automatisierung entscheidend robuster werden lässt. Lkw, die schließlich unter der Oberleitung autonom fahren benötigen kein Fahrpersonal mehr (SAE-Stufe 5). Bereits für hochautomatisiertes Fahren der SAE-Stufe 4 entfällt im spezifischen Anwendungsfall die Notwendigkeit das System durch Fahrpersonal zu überwachen. Mit Oberleitungen ausgerüstete Streckenabschnitte können somit vollautomatisiert zurückgelegt werden, der Fahrende kann währenddessen als Passagier gänzlich andere Aufgaben übernehmen. Die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen können in diesem Szenario während der vollautomatisierten Fahrt unter der Oberleitung in Fahrt verbracht werden. Dies führt zur Reduktion der Transportzeiten und entlastet häufig überausgelastete Rasthöfe und Parkplätze. Während die Pausenzeit der Fahrenden unter der Oberleitung stattfindet, können diese bei noch nicht ausgebauten Streckenabschnitten wieder die Fahraufgabe übernehmen. Durch diese Möglichkeit die Standzeiten von Lkw deutlich zu reduzieren, kann insgesamt eine Effizienzsteigerung erreicht und dem bereits bestehenden Mangel an Fahrenden entgegengewirkt werden. Die hochautomatisierte Fahrzeugführung kann herstellerunabhängig und zudem unabhängig vom Vorhandensein eines Dachstromabnehmers für unterschiedlichste Fahrzeugtypen entwickelt werden. Die Oberleitungsstrecken werden damit für eine bedeutend höhere Zahl an Endanwendern interessant. Dies schafft die Basis für einen beschleunigten Markthochlauf der Technologiekombination. Der Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur geknüpft an hochautomatisiertes Fahren, kann so einen Beitrag zur Stabilisierung der Lieferketten leisten und trägt zum Leistungserhalt der Logistik- und Transportbranche bei.

Auf Basis der Erkenntnisse aus bereits bestehenden Pilotprojekten, wie der Strecke eWayBW im Landkreis Rastatt, werden in der vorliegenden Studie die technologischen Grundlagen und Handlungsoptionen für die Technologiekombination analysiert. Die Effekte auf das gesamte Mobilitätssystem werden anhand einer Simulation ausgewertet sowie anschließend Umwelt- und ökonomische Zusammenhänge untersucht. Schließlich können zwei langfristige Zielbilder für automatisierten Straßengüterverkehr extrahiert und deren Skalierungsweg skizziert werden.

Oberleitungsstrecken für hochautomatisierte Lkw können im ersten Szenario in einem intelligenten Netz für den kombinierten Güterverkehr auf dem Weg zu Umschlagsbahnhöfen oder auf bedeutsamen Pendelstrecken eingerichtet werden, um mit dem Schienengüterverkehr verknüpft zu werden. Eine davon losgelöste Perspektive bildet das flächendeckende Netz an Oberleitungen mit internationaler Anbindung. Hierbei kann die Effizienz des Straßengüterverkehrs unabhängig von anderen Verkehrsträgern erhöht werden. Diese beiden Optionen werden bezüglich ihrer Aufwände, Netzwerkeffekte und Kostenintensität untersucht und diskutiert. Unabhängig von der langfristigen Gestaltung des Gesamtsystems kann technologisch ein stringenter Pfad in Richtung Automatisierung gegangen werden. Der erste Schritt ist dabei die Befähigung der O-Lkw mit SAE-Stufe 4 vollautomatisiert zu fahren, um Fahrenden als Passagier neue Arbeitsaufgaben übertragen zu können. So kann der Beruf attraktiver gestaltet und dem Personalmangel adäquat begegnet werden. Im nächsten Schritt können autonome Lkw der SAE-Stufe 5, die ohne Fahrpersonal und Fahrerhaus auskommen im Fokus der Entwicklungen stehen, um weitere wirtschaftliche und logistische Potentiale zu entfalten. Mittelfristig ergibt sich dadurch die Möglichkeit die Oberleitungsinfrastruktur im Laufe des Ausbaus effizient zu nutzen. Mit Oberleitungen ausgerüstete Streckenabschnitte können autonom zurückgelegt werden und bieten damit die Möglichkeit die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen für die Lkw-Fahrenden während der Fahrt zu ermöglichen. Während die Pausenzeit der Fahrenden unter der Oberleitung stattfindet, können diese bei noch nicht ausgebauten Streckenabschnitten wieder die Fahraufgabe übernehmen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass für beide Ausbauszenarien politische Unterstützung, Weichenstellung und Forschungsförderung benötigt wird, um die Herausforderungen des Güterverkehrssektors zu bewältigen. Bei entsprechend intelligenter Skalierung der hochautomatisierten Oberleitungstechnologie, kann die Transportbranche aber bereits im frühen Marktstadium entlastet werden. Diese Vorstudie bildet die theoretische Grundlage und einen Ausgangspunkt für praktische Pilotierungen. Als nächster Schritt wird die Kartierung einer Pilotstrecke, wie eWayBW empfohlen, um den hochautomatisierten Oberleitungsverkehr in einer umfangreichen Simulation zu analysieren. Dies bietet insbesondere die Möglichkeit das System frühzeitig optimal auszugestalten. Im Anschluss an diese Vorarbeiten können hochautomatisierte O-Lkw als Versuchsfahrzeuge aufgebaut und auf den Pilotstrecken eingesetzt werden, um essentielle Erkenntnisse für einen Markthochlauf zu gewinnen und den Technologiereifegrad in Realumgebungen zu erhöhen.

– Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
2 Automatisierung und alternative Antriebe im Straßengüterverkehr	8
2.1 Stand der Entwicklung automatisierter Nutzfahrzeuge.....	8
2.2 Ausgangssituation des Oberleitungsgüterverkehrs und Ziele der Vorstudie	11
2.3 Laufende Oberleitungsprojekte und -realisierungen	13
3 Kombination von Automatisierung und Oberleitungs-Lkw	16
3.1 Infrastrukturausstattung der Strecke	16
3.2 Fahrzeugtechnische Umsetzung des Betriebs.....	17
3.2.1 Fahrzeugarchitektur von Oberleitungs-Lkw und Vergleich mit verwandten Technologien.....	18
3.2.2 Kombination von Technologien des Hochautomatisierten Fahrens mit Oberleitungssystemen	21
3.3 Konzeptionierung des Sensorsetups und des Architekturentwurfs für hochautomatisierte O-Lkw	26
3.4 Energiesystem auf der Strecke.....	31
3.5 Hochautomatisierter Betrieb und Mensch-Maschine-Interaktion	33
3.6 Betrieb von hochautomatisierten Oberleitungsfahrzeugen im nichtöffentlichen Verkehr	35
4 Simulation der Auswirkungen auf das gesamte Mobilitätssystem	37
4.1 Einführung in die mikroskopische Verkehrsflusssimulation	37
4.1.1 Simulationsaufbau	38
4.1.2 Szenarien	39
4.2 Auswirkungen auf den Verkehrsfluss	39
4.2.2 Auswirkungen auf den Modalsplit und die Nachfrage	46
5 Analyse von Umweltwirkungen und ökologischen Potenzialen	47
5.1 Darstellung des Potentials zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in Deutschland.....	47
5.2 Minderungspotenzial für Treibhausgase, Stickoxide und Erreichung der Klimaziele durch Automatisierung	49
5.3 Beitrag zum Artenschutz und der Luftreinhaltung durch Automatisierung	49
5.4 Wirkungsanalyse des Vorhabens auf die ökologische Gestaltung des Güterverkehrs	50
6 Ökonomische und sozialpolitische Veränderungen	52
6.1 Analyse der wirtschaftlichen Charakteristika des Gesamtsystems	53
6.1.1 Unterschiede von O-Lkw und hochautomatisierten O-Lkw	56
6.2 Voraussetzungen für Beschäftigung, Wohlstand und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit in Logistiksektor und Transportindustrie.....	57
6.3 Vernetzung von Verkehrsträgern zur effizienten Gestaltung des Güterverkehrs	58
6.4 Ableitung von Markteinführungsszenarien.....	60
6.4.1 Pfad- und Skalierungsentscheidungen	60

6.4.2 Rahmenbedingungen und Wege für fiskalpolitische Fragestellungen im Verkehrssektor.....	62
6.5 Mögliche nächste Schritte	62
Fazit.....	64
Abkürzungsverzeichnis.....	66
Literaturverzeichnis	67
Abbildungsverzeichnis.....	74
Tabellenverzeichnis	75

1 Einleitung

Im März 2021 beschloss das Bundesverfassungsgericht die Verfassungswidrigkeit des Klimaschutzgesetzes in Deutschland. Der darauf folgende neue Gesetzesentwurf der Bundesregierung sieht unter anderem die Treibhausgasneutralität bis zum Jahre 2045, begleitet durch die Senkung der Emissionen um 65% bis 2030 (im Vergleich zum Jahr 1990) vor.¹ Für den Verkehrssektor bedeutet dies, dass die Reduktion der Emissionen von CO₂-Äquivalenten von 150 Mio. Tonnen im Jahr 2020 auf mindestens 85 Mio. Tonnen im Jahr 2030 vollzogen werden muss.² Etwa ein Drittel dieser Emissionen sind auf den Güterverkehr zurückzuführen, daher ist eine Transformation des Sektors unter der Prognose steigender Transportvolumina dringend erforderlich.

Die Klimaziele und -vorgaben bestimmen die Entwicklungen im Straßengüterverkehr zu großen Teilen, zusätzlich ist die Branche jedoch bereits jetzt mit einem spürbaren Mangel an Fahrenden konfrontiert. Diese personelle Restriktion hat Auswirkungen auf die Volkswirtschaften Europas, da die Versorgungssicherheit vom Straßengüterverkehr abhängig ist. Bis zum Jahr 2027 wird ein Mangel von etwa 185.000 Berufskraftfahrenden prognostiziert, gleichzeitig wird eine Zunahme der Verkehrsleistung erwartet, die darin noch nicht einberechnet ist [4]. Dies stellt eine große Herausforderung für die Versorgungssicherheit dar. Ebenso entstehen besonders für die Infrastruktur der Raststätten und Rastplätze starke Belastungen.

Neben diesem Mangel an Fachkräften und der Belastung der Infrastruktur, ist auch die hohe Unfallquote der Güterfahrzeuge im Straßenverkehr eine ökonomische, ökologische und vor allem gesellschaftliche Belastung. Zu geringer Abstand sowie Fahrfehler und Vorfahrtfehler stellen die häufigste Ursache der jährlich ca. 37.000 Verkehrsunfälle mit Güterfahrzeugbeteiligung dar. Dabei kamen im Jahr 2019 rund 37.300 Personen zu Schaden [1]. Des Weiteren entstehen durch die hohe Zahl an Unfällen signifikante Sachschäden für die Betroffenen, aber auch für die öffentliche Hand.

Die Herausforderungen für den Straßengüterverkehr sind vielfältig und verknüpfen ökonomische, soziale und ökologische Dimensionen. Um diese lebensbereichsübergreifenden Aufgaben bewältigen zu können, bedarf es vor allem mittel- und langfristig einer geeigneten Strategie, kurzfristig aber Entscheidungen und konsequenter Maßnahmen. Damit bestehende Handlungsspielräume effizient ausgenutzt und Möglichkeiten entwickelt werden, wie der Güterverkehr umweltfreundlicher, wirtschaftlicher und im Arbeitsmarkt attraktiver gestaltet werden kann, muss das Gesamtsystem übergreifend betrachtet werden. Die Kombination von bereits identifizierten Einzelmaßnahmen kann hierbei ein erster Schritt sein. Diese Motivation liegt auch der vorliegenden Studie zugrunde.

Fokus der Studie ist die technologische Kombination von Oberleitungsgüterverkehr und hochautomatisiertem Fahren, die ermöglichen kann, dass mit entsprechender Sensorik ausgestattete Fahrzeuge die Oberleitungsinfrastruktur nutzen, um sicheres, hochautomatisiertes Fahren zu ermöglichen. In Deutschland wurde im Juli 2021 ein neues Gesetz zum autonomen Fahren verabschiedet, das Fahrzeuge der SAE-Stufe 4 erlaubt.³ Diese Rechtslage findet sich so bisher in keinem anderen Land und bietet die Möglichkeit hochautomatisiertes Fahren in Deutschland auf den nächsten Reifegrad zu heben. Da das Gesetz insbesondere die Begrenzung auf einen definierten Verkehrsbereich vorsieht, ist der Betrieb hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge auf Oberleitungstrecken ein ideales Einsatzszenario.

¹ <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, abgerufen am 09.06.2021

² <https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-beschreibt-verbindlichen-pfad-zur-klimaneutralitaet-2045/>, abgerufen am 09.06.2021

³ Der Bundesrat hat am 28. Mai 2021 dem „Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren“ zugestimmt, es trat am 28.07.2021 in Kraft.

Oberleitungsgüterverkehr als Technologiepfad zu umweltfreundlicherem Lkw-Transport ermöglicht es Lkw an einer mit entsprechenden Masten und Fahrdrähten ausgestatteten Fahrbahn, ähnlich zu einer Straßenbahn, elektrisch betrieben zu fahren. In einer Begleitstudie zum Oberleitungsprojekt eWayBW für Oberleitungshybride-Lkw (OH-Lkw) wurde bereits die Überlegung angestellt, dass die Automatisierung von diesen Lkw technisch realisierbar ist [5]. Diesen Impuls aufgreifend, zeigt die vorliegende Arbeit, wie Fahrzeuge unabhängig von einer Stromabnehmervorrichtung, hochautomatisiert unter der Oberleitung fahren können und welche Potentiale dies bringen kann.

Ziel dieser Studie ist es damit einen Weg aufzuzeigen, wie die heute in Testumgebungen aufgebauten Oberleitungen für den Straßengüterverkehr vor ihrem Markthochlauf durch ein Nutzungsszenario bereichert werden können. Es entsteht die Chance neben den Klimazielen auch eine bedeutende wirtschaftliche Entlastung des Sektors zu erreichen. Damit beschreibt diese Studie einen Weg der Vielschichtigkeit der Branchenherausforderungen geeignet zu begegnen und durch Kombination technischer Innovationen nachhaltigen Wandel und eine technologische Vorreiterrolle zu realisieren.

Die Studie zeigt im weiteren Verlauf zunächst die Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugautomatisierung sowie den Stand der Technik des Oberleitungsverkehrs in Kapitel 2 auf. Darauffolgend werden in Kapitel 3 die technologischen und infrastrukturellen Handlungsmöglichkeiten beschrieben und analysiert, um durch die gesamtheitliche Betrachtung aller beteiligten und angrenzenden Systeme ein optimales Konzept für hochautomatisierten Oberleitungsgüterverkehr zu definieren. Dabei ist die Fahrzeugarchitektur der OH-Lkw im Fokus, die im Zusammenspiel mit der Infrastruktur eine intelligente Vernetzung und sichere Fahrzeugkommunikation realisieren kann. Weiterhin wird das Energiesystem in die Betrachtung integriert, um die Anforderungen und Herausforderungen, die durch die Stromabnahme entstehen, zu berücksichtigen. Zusammenfassend werden die Möglichkeiten beschrieben, wie O-Lkw der SAE-Stufe 4 bereits unter bestehenden gesetzlichen und technologischen Grundlagen, hohe Effizienz- und Kostenvorteile in der Transportbranche realisieren können. Zudem wird die Anschlussfähigkeit der Fahrzeuge an Bereiche des nichtöffentlichen Verkehrs aufgezeigt.

Anschließend an diese technische Konzeption wird in Kapitel 4 das Mobilitätssystem mit Fokus auf Verkehrswege und Verkehrsfluss in einer Simulation hinsichtlich der Auswirkungen und Potentiale der Entwicklung untersucht. Hierbei werden unterschiedliche, gegenwärtig realisierbare und zukünftig mögliche, Szenarien betrachtet.

Im darauffolgenden 5. Kapitel folgt die ökologische Analyse der Technologiekombination. Der Hochlauf hochautomatisierter Lkw im Oberleitungsbetrieb wird im Hinblick auf Klimaziele, aber auch im Zusammenhang mit Luftschadstoffen und ihrem Beitrag zum Artenschutz untersucht.

Im weiteren Verlauf erfolgt die wirtschaftliche Betrachtung des Technologieszenarios in Kapitel 6, einschließlich der Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt, die Logistikbranche und den Güterverkehr.

Abschließend werden Möglichkeiten und Rahmenbedingungen zu Pfad- und Skalierungsentscheidungen skizziert und Markthochlaufsznarien abgeleitet, die sowohl kurz- und mittelfristige Potentiale, als auch strategische Ziele formulieren. Diese werden schließlich mit möglichen nächsten Schritten verknüpft, um die Vision des hochautomatisierten Oberleitungsgüterverkehrs erreichen zu können.

2 Automatisierung und alternative Antriebe im Straßengüterverkehr

2.1 Stand der Entwicklung automatisierter Nutzfahrzeuge

Erste Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der hochautomatisierten Fahrfunktionen wurden bereits in den späten 1980er Jahren publiziert. Schon zu diesem Zeitpunkt wurden erste Versuchsfahrzeuge aufgebaut. An der Carnegie-Mellon-University wurde das Fahrzeug ALVINN [6] vorgestellt und auch an der Universität der Bundeswehr München wurde ein Prototyp entwickelt [7]. Die Funktionen „Spurhalten“ und „Abstandhalten“ standen bei diesen Fahrzeugen, die die Größe von Kleintransportern erreichten, im Vordergrund. Die Rechnertechnik zu dieser Zeit war die Ursache für die Dimension der Versuchsfahrzeuge. In den Folgejahren wurde die Forschung im Bereich des hochautomatisierten und autonomen Fahrens fast ausschließlich mit Pkw durchgeführt. Seit den von der DARPA durchgeführten *Grand Challenges* zum automatisierten Fahren 2004, 2005 und 2007 [8] [9], hat das Forschungsgebiet eine breitere Sichtbarkeit erreicht. Zunehmend mehr Forschungsgruppen befassen sich mit diesem Thema, auch in Deutschland arbeiten im Jahr 2021 viele universitäre Arbeitsgruppen an autonomen Fahrzeugen oder Teilsystemen.

Im Bereich der Automobilindustrie stand seit den 1990er Jahren zunächst die Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen im Mittelpunkt. Fahrerassistenzfunktionen übernehmen einen Teil der Fahraufgabe, der Fahrende übernimmt komplementär die anderen Aufgaben und überwacht die Systeme. Während am Anfang Systeme zur Fahrdynamikstabilisierung wie das Anti-Blockier System (ABS) entwickelt wurden, kamen in den 2000er Jahren Systeme zum Abstandhalten (ACC), Spurhaltesysteme, Parkassistenzsysteme und Navigationsgeräte hinzu. Die technische Umsetzung führte zur Ausstattung der Fahrzeuge mit Sensoren (vor allem Kameras und Radarsensoren) sowie zur Erweiterung der Fahrzeugsteuergeräte.

Mit dem Eintritt amerikanischer Technologiekonzerne, wie bspw. Waymo oder Uber in die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen Mitte bis Ende der 2000er Jahre, beschleunigte sich die Forschungsarbeit am hochautomatisierten und autonomen Fahren. Im Zuge des Fortschritts der Aktivitäten, wurde von der SAE die Differenzierung von Automatisierungsstufen abhängig vom Umfang der automatisierten Teilfunktionen (siehe Tabelle 1) vorgenommen. Die niedrigste Stufe 0 entspricht einem Fahren ohne jede Automatisierungstechnik. Stufe 1 beinhaltet konventionelle Fahrerassistenzfunktionen, ab Stufe 2 ist das Fahrzeug zumindest in einigen Situationen in der Lage, ohne Zutun des Fahrenden, allerdings unter ständiger Überwachung durch diesen zu fahren. In den Stufen 3 und 4 entfällt die Überwachungsfunktion durch den Fahrenden schrittweise, auf Stufe 5 schließlich ist der Fahrende komplett entbehrlich.

SAE-Stufe	Name	Beschreibung
Stufe 0	No Automation (Keine Automation)	Der Fahrende übernimmt die dynamische Fahraufgabe, auch wenn unterstützende Systeme vorhanden sind.
Stufe 1	Driver Assistance (Assistenzsysteme)	Fahrmodus-spezifische Übernahme von Lenkung oder Beschleunigung / Verzögerung durch ein Fahrerassistenzsystem unter Verwendung von Informationen über die Fahrumgebung mit der Erwartung, dass der Fahrende alle verbleibenden Aspekte der dynamischen Fahraufgaben übernimmt.

Stufe 2	Partial Automation (Teilautomatisierung)	Fahrmodus-spezifische Übernahme von Lenkung und Beschleunigung / Verzögerung durch ein oder mehrere Fahrerassistenzsysteme unter Verwendung von Informationen über die Fahrumgebung mit der Erwartung, dass der Fahrende alle verbleibenden Aspekte der dynamischen Fahraufgaben übernimmt.
Stufe 3	Conditional Automation (Bedingte Automatisierung)	Fahrmodus-spezifische Ausführung aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch ein automatisiertes Fahrsystem mit der Erwartung, dass der Fahrende auf Anforderung zum Eingreifen reagiert.
Stufe 4	High Automation (Hochautomatisierung)	Fahrmodus-spezifische Ausführung aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch ein automatisiertes Fahrsystem ohne die Erwartung, dass der Fahrende auf Anforderung zum Eingreifen reagiert. Ohne menschliche Reaktion steuert das Fahrzeug weiterhin automatisiert.
Stufe 5	Full Automation (Vollautomatisierung)	Vollständige Ausführung aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch ein automatisiertes Fahrsystem, welches wie ein menschlicher Fahrende alle Fahrbahn- und Umgebungsbedingungen beherrscht

Tabelle 1: Klassifizierung von Kraftfahrzeugen mit Systemen zum autonomen Fahren nach SAE J3016

Es sind unterschiedliche Entwicklungsstrategien beim automatisierten Fahren zu erkennen. Klassische Autobauer setzen meist auf eine evolutionäre Weiterentwicklung ihrer Fahrzeuge, von SAE-Stufe 1 über die SAE-Stufen 2 und 3 hin zu SAE-Stufe 4 und ggf. SAE-Stufe 5, wobei die technisch am ehesten lösbaren sowie die nutzbringendsten Szenarien (z.B. Autobahnfahrt) zuerst umgesetzt werden. Neue in den Markt kommende Unternehmen wie etwa Waymo oder Uber setzen demgegenüber direkt auf die Einführung von fahrerlosen Fahrzeugen der SAE-Stufe 5, wenngleich deren Einsatzbereich unter Umständen zunächst noch räumlich begrenzt ist (z.B. auf bestimmte Städte oder Straßenarten). Mit der Einführung von SAE-Stufe 5-Fahrzeugen verbinden sich unmittelbar neue Nutzungskonzepte für Pkw und damit Geschäftsmodelle wie fahrerlose Taxen, Sammeltaxen und daran geknüpfte Services.

Automatisierte und autonome Fahrzeuge haben heute bereits einen fortgeschrittenen technischen Reifegrad erreicht. Die Fahrzeuge der Firma Waymo haben in den USA bereits sehr viele Testkilometer erfolgreich zurückgelegt. Andere Hersteller arbeiten ebenfalls an hochautomatisierten Fahrzeugen, können momentan jedoch noch nicht denselben Reifegrad vorweisen. Neben der technischen Reife stellt die Frage der Absicherung und in der Folge auch die der Zulassung solcher Fahrzeuge eine große Herausforderung dar. Bisherige Formen der Absicherung scheitern an der Komplexität hochautomatisierter Systeme [10]. Daher gibt es Bestrebungen, die Absicherung stärker modular aufzubauen. Ferner enthalten hochautomatisierte Fahrzeuge nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik zwangsläufig automatisch gelernte Verfahren (oft als KI-Verfahren bezeichnet), die sich ausschließlich empirisch absichern lassen. Der Aufbau großer Datenbanken von Test- und Referenzdaten befindet sich vielerorts in Entwicklung oder ist beabsichtigt. Aus Sicht der Autor*innen gibt es jedoch noch keine allgemein akzeptierte Lösung für das Problem der Absicherung.

Bisher spielte der Bereich der Pkw den Treiber bei der Entwicklung hochautomatisierter und autonomer Technologien. Inzwischen wächst jedoch auch im Nutzfahrzeugbereich das Interesse am hochautomatisierten Fahren. Hierbei ermöglichen es ebenfalls Systeme wie ACC die Fahraufgabe für die Fahrenden zu erleichtern. Darüber hinaus bietet die langfristige Perspektive auf SAE-Stufe 4- oder SAE-Stufe 5-Automatisierung erhebliche betriebswirtschaftliche Vorteile für die Lkw-Flottenbetreibenden. In mehreren Studien wurden die Einsparpotentiale abgeschätzt. So geht eine Studie im Auftrag der Industrie- und Handelskammern davon aus, dass Einsparpotentiale von 28%-35% bei den Betriebskosten durch fahrerlosen Lkw-Betrieb erreicht werden können [11]. Die Mehrkosten für die Hard- und Software für hochautomatisierte Nutzfahrzeuge wurden in einer Studie

von Roland Berger auf circa 23.400 US\$ geschätzt [12], so dass sich die Mehrkosten in der Beschaffung innerhalb weniger Monate amortisieren.

Das Einsparpotential ergibt sich in erster Linie durch die Reduktion des Fahrpersonals, insbesondere aber auch durch den Wegfall der heute notwendigen Fahrpausen zur Lenkzeitunterbrechung. Hochautomatisierte Lkw können Schätzungen zufolge zu 78% der Gesamtzeit in Bewegung sein, während sich heutige Lkw mit Fahrpersonal nur in 29% ihrer Gesamtlebensdauer in Fahrt befinden [13]. Bei SAE-Stufe 5 Fahrzeugen kann zudem die Fahrerkabine entfallen, dies resultiert in einer zusätzlichen Materialersparnis. Darüber hinaus kann der Energieverbrauch der Fahrzeuge durch einen homogeneren Verkehrsfluss bei kooperativen, hochautomatisierten Fahrzeugen verringert werden. Ein höheres Sicherheitsniveau mit geringeren Unfallzahlen verringert zudem die Kosten für daraus entstehende Schäden.

Aus diesen Gründen haben in den vergangenen Jahren mehrere Nutzfahrzeughersteller begonnen, sich dem hochautomatisierten Fahren zu widmen und Versuchsfahrzeuge aufzubauen. Bei den meisten Herstellern finden sich Fahrerassistenzsysteme der SAE-Stufe 1 in Serienproduktion. Projekte, die über die erste Automatisierungsstufe hinausgehen, haben mehrere Firmen und Konsortien angekündigt, unter anderem:

- DB Schenker hat mit dem schwedischen Start-Up Einride einen automatisierten, elektrischen Lkw namens T-Pod entwickelt [14];
- Daimler hat den Mercedes-Benz Future Truck 2025 sowie den Freightliner Inspiration Truck entwickelt [15];
- Volvo hat mehrere automatisierte Lkw, u.a. für den Einsatz in Bergwerken sowie bei der Müllabfuhr entwickelt. Ferner hat Volvo ein automatisiertes Konzeptfahrzeug namens VERA entwickelt [16];
- Der Elektrofahrzeug-Hersteller Tesla hat für 2022 einen Sattelschlepper namens Semi angekündigt, der über automatisierte Funktionen verfügt [17];
- Scania hat einen automatisierten Lkw namens AXL entwickelt [18];
- Die amerikanische Start-Up Firma Embark entwickelt einen automatisierten Lkw [19];
- Die amerikanische Firma TuSimple entwickelt ebenfalls einen automatisierten Lkw [20].

Mit Ausnahme des Teslas, der allerdings nur auf Automatisierungsstufe 2 einzuordnen ist, handelt es sich bei all diesen Fahrzeugen um Versuchs- und Testfahrzeuge. Weitere Hersteller wie MAN, DAF und IVECO arbeiten ebenfalls an hochautomatisierten Fahrzeugen.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der Forschungsergebnisse zum hochautomatisierten Fahren vom Pkw auf den Lkw übertragbar ist. Beispielsweise werden die Methoden zur Wahrnehmung der Umgebung dieselben Algorithmen nutzen wie beim Pkw. Unterschiede ergeben sich vor allem dort, wo die Eigenschaften von Pkw und Nutzfahrzeugen voneinander abweichen. Dies betrifft insbesondere die Trajektorienplanung und Fahrzeugregelung für mehrachsige Nutzfahrzeuge (Lkw mit Anhänger, Sattelzug), die Anpassung des Fahrzeugverhaltens an die anderen geometrischen und dynamischen Eigenschaften der Nutzfahrzeuge, die Anpassung der sensorischen Ausstattung an die andere Fahrzeuggröße und die veränderten Blickwinkel sowie den Aspekt des Platooning, der für Pkw weniger relevant ist.

Forschungsaktivitäten für den hochautomatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen lassen sich bereits seit den 1990er Jahren finden [21], insbesondere mit dem Blick auf Platooning. Obwohl gezeigt werden konnte, dass Platooning technisch umsetzbar ist, hat bisher kein Ansatz die Serienreife erlangt. Hierzu sind neben den technischen Fragestellungen auch rechtliche und verkehrstechnische Punkte zu klären, da Platooning die heute

zulässigen Mindestabstände unterschreitet und durch die entstehenden Lkw-Kolonnen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und die Ein- und Ausfädelvorgänge auf Autobahnen zu erwarten sind.

Eine weitere wichtige Fragestellung ist die Quer- und Längsregelung von Nutzfahrzeugen. Vor allem die Gelenkverbindung zwischen Zugfahrzeug und Sattelaufleger bei Sattelzügen sowie zwischen Zugfahrzeug und Anhänger bei entsprechend ausgestatteten Lkws, erschweren die Regelung gegenüber zweiachsigen Fahrzeugen ohne Anhänger oder Sattelaufleger. Diese Thematik wurde in mehreren Arbeiten bereits adressiert und Lösungsansätze wurden entwickelt.⁵

Für die Manöverplanung gibt es bisher nur wenige Ansätze, die die Besonderheiten von Nutzfahrzeugen berücksichtigen. Es ist eine offene Frage, ob die Verfahren aus dem Pkw-Bereich direkt übertragbar sind oder ob diese Verfahren angepasst oder durch gänzlich andere Ansätze ersetzt werden müssen.

2.2 Ausgangssituation des Oberleitungsgüterverkehrs und Ziele der Vorstudie

Die Nationale Plattform Mobilität untersuchte in Ihrem 2020 veröffentlichten Werkstattbericht die Förderung innovativer Antriebstechnologien und stellte dabei batterieelektrische Lkw (BEV-Lkw), Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw (H₂BZ-Lkw) und OH-Lkw als Lösungswege vor. Der Markthochlauf von BEV-Lkw hängt demzufolge vor allem vom Fortschritt der pro Ladung erzielbaren Reichweite und der Ladeinfrastruktur ab, während bei H₂BZ-Lkw darüber hinaus technologische Voraussetzungen der Betankung zu erforschen bleiben. Auch die OH-Lkw stehen vor infrastrukturellen Fragestellungen. Um diese Fahrzeuge zu betreiben, ist die Errichtung entsprechender Oberleitungen entlang der Verkehrswege die zentrale Voraussetzung.

Ein OH-Lkw, wie in Abbildung 1 dargestellt, ist grundsätzlich ein konventioneller Lkw, der mittels eines Dachstromabnehmers an einer Oberleitung mit Energie gespeist werden kann. Diese zweipolige Gleichstrom-Leitung versorgt den Hybridmotor des Lkw mit Strom und lädt damit die Batterie während der Fahrt unter der Oberleitung. „Hybrid“, da die elektrische Energie zum einen aus der Oberleitung, zum anderen aber auch aus weiteren Quellen (Batterie, Brennstoffzelle, Dieselgenerator) in einen sogenannten elektrischen Zwischenkreis im Fahrzeug gespeist werden kann, der Antriebstrang ist jedoch rein elektrisch. Die beiden Fahrdrähte (Pluspol und Minuspol) der Oberleitung sind über Querträger an einem am Straßenrand befindlichen Mast befestigt. Wenn ein entsprechend ausgerüsteter Lkw in die Oberleitungsstrecke einfährt, kann er diese mittels spezieller Sensorik erkennen und daraufhin das Stromabnehmersystem ausfahren. Sobald der Kontakt zur Oberleitung aufgrund eines Überholvorgangs, bei voll aufgeladener Batterie oder anders begründetem Verlassen der Strecke endet, kann der Stromabnehmer wieder in die Ausgangsposition zurückgebracht werden. Der OH-Lkw fährt dann mit der verbleibenden Ladung oder mit der vom Verbrennungsmotor bereitgestellten Energie weiter. Der Dieselmotorkraftstoff für diesen Verbrennungsmotor ermöglicht schnelles und flexibles Betanken durch die entsprechende Tankstelleninfrastruktur, allerdings entfallen die ökologischen Vorteile eines vollelektrischen Fahrzeugs zu großen Teilen. Neben den OH-Lkw wären deshalb auch rein elektrische Lkw im Oberleitungsbetrieb (BEV-O-Lkw) möglich. Eine weitere Alternative wäre Wasserstoff als zweiter Energieträger im Oberleitungshybrid. Diese Alternativen sind bisher in keinem der in Kapitel 2.3 vorgestellten Pilotprojekte erprobt, sollen aber Teil der Begleitforschung sein [2].

In den folgenden Kapiteln sind die vollelektrischen Lkw im Oberleitungsbetrieb als BEV-O-Lkw gekennzeichnet, Erkenntnisse und Analysen, die Fahrzeuge mit einem Hybridantrieb betreffen, werden mit der Bezeichnung OH-Lkw aufgeführt. Wenn diese antriebstechnologische Trennung keine Relevanz in Bezug auf die Ergebnisse einer Analyse hat, wird von O-Lkw gesprochen.

⁵ Siehe hierzu unter anderem [75].

Die Elektrifizierung durch einen Oberleitungsbetrieb im Straßenverkehr hat zwar hohe Synergien mit der entsprechenden Bahntechnik, dennoch ergeben sich neue Herausforderungen und Risiken. Die Fahrzeuge auf der Straße sind lenkbar, im Gegensatz zur Eisenbahn. Dadurch ist es besonders bedeutsam, dass der Stromabnehmer die Fahrdrähte präzise kontaktiert, insbesondere auch bei Ein- und Ausfahrt aus der Strecke. Aus dieser Bedingung entstand bereits die Idee durch hochautomatisierte Querführung des Fahrzeugs den optimalen Einsatz des Stromabnehmers und eine Lebensdauer optimierende Positionierung beider Schleifkontakte am Fahrdracht für eine kontinuierliche, gleichmäßige Abnutzung unter Berücksichtigung mechanischer und thermischer Effekte zu erreichen [5].

In der vorliegenden Studie wird diese Idee nun vertieft. Der Fokus liegt hierbei auf der hochautomatisierten (SAE-Stufen 4) Steuerung von Lkw bzw. wird teilweise auf die Steigerung des Reifegrads in Richtung der vollautomatisierten, auch als autonom bezeichneten Fahrzeuge der SAE-Stufe 5 eingegangen (siehe Tabelle 1), wenn dies explizit erwähnt wird. Die Robustheit, die die Automatisierungstechnologie für diese Reifegrade aufweisen muss, wird durch das Vorhandensein der Oberleitungsfahrdrähte technisch ermöglicht.

SAE-Stufe 4 Fahrzeuge bieten bereits die Möglichkeit den Lkw-Fahrenden zu entlasten. In einem solchen Fahrzeug können vorgeschriebene Lenkzeitunterbrechungen in Streckenabschnitten unter Oberleitungen durchgeführt werden, da nur in einem Sonderfall die Fahraufgabe übernommen werden muss. Das Lkw-Personal kann in einem solchen Fahrzeug abseits der Pausenzeit als Passagier andere Aufgaben als die des Fahrenden übernehmen. Grundsätzlich ist das SAE-Stufe 4 Fahrzeug fähig, sich selbst zu jedem Zeitpunkt in einen risikofreien Zustand zu bringen. SAE-Stufe 5 Fahrzeuge sind schließlich ohne Fahrer und damit auch ohne Fahrkabine realisierbar. Langfristig bieten solche Fahrzeuge insbesondere deshalb hohe Vorteile, da der Stromabnehmer bei aktuell im Einsatz befindlichen Fahrzeugen eine Reduktion der Ladefläche verursacht (siehe Abbildung 1). Diese kann bei Lkw ohne Fahrerhaus entfallen und zusätzlichen Laderaum bieten. Die Rahmenbedingungen und die technische Ausgestaltung des Systems werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet. Die übergeordneten Ziele des Konzepts sind es, die ökonomischen, ökologischen und infrastrukturellen Potenziale der Technologie zu ermitteln. Anhand dieser werden schließlich Möglichkeiten aufgezeigt, wie das System im Markt etabliert werden kann und welche Randbedingungen einen solchen Hochlauf adäquat und effizient unterstützen können.

Das Gesamtziel dieser Arbeit ist es, durch die Kombination von hochautomatisiertem Fahren und O-Lkw, einen technologiebasierten Weg aufzuzeigen, der neben der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs, vor allem die unter hohem ökonomischen Druck stehenden Unternehmen der Logistik- und Transportbranche entlasten und gleichzeitig das Mobilitätssystem nachhaltig ausgestalten kann.



Abbildung 1: OH-Lkw mit Stromabnehmersystem [2]

2.3 Laufende Oberleitungsprojekte und -realisierungen

Neben der Bahntechnologie finden sich auch weitere Realisierungen des Oberleitungsbetriebs im ÖPNV. In mehreren europäischen Stadtgebieten, aber auch in den USA, China und Russland werden sogenannte Oberleitungsbusse (O-Busse) eingesetzt, die meist vollelektrisch fahren. Die Technologie war vor allem ab den 1950er Jahren im Aufwind, steht im Personenverkehr aber in hoher Konkurrenz zur Straßenbahn und dem Dieselbus und wurde daher an mehreren Orten wieder eingestellt. Die Nachteile der O-Busse sind vor allem ökonomischer Art, da sie sowohl im Antrieb als auch in der Anschaffung den herkömmlichen Dieselfahrzeugen unterlegen sind. Zudem sind sie nicht flexibel in der Streckenwahl, was sie nicht länger von den Straßenbahnen abgrenzt. Dies gilt insbesondere auch bei niedrig frequentierten Linien, für die sich kein entsprechendes Oberleitungsnetz lohnt. Ein weiterer Nachteil durch die starre Streckenführung entsteht, wenn beispielsweise Umleitungen durch Baustellen oder kurzfristige Streckenänderungen auftreten, was in Stadtgebieten häufig der Fall ist. Die Dachstromabnehmer von O-Bussen sind aufgrund der kurvenreichen Strecken anders aufgebaut, als die der O-Lkw auf den existierenden Pilotstrecken. Aus diesem Grund nutzen die Kontaktpunkte des Stromabnehmers bei O-Bussen deutlich schneller ab, außerdem stellen insbesondere Kreuzungen und Abzweigungen größere Herausforderungen für die aufwändigere Stromabnehmerkonstruktion dar, siehe Abbildung 3. Technische Herausforderungen treten zudem bei Nachfragespitzen auf, da die Stromabgabe der Oberleitung begrenzt ist und demnach keine beliebige Anzahl an Fahrzeugen eingesetzt werden kann. Die Oberleitungsinfrastruktur führt in Städten auch zu Herausforderungen, da Einsatz- oder Baustellenfahrzeuge durch sie behindert werden können, weiterhin werden die Oberleitungen im Stadtbild häufig von der Bevölkerung kritisiert. Diese Nachteile kommen beim Oberleitungs-Straßengüterverkehr jedoch überwiegend nicht zum Tragen, daher erfährt der Einsatz von O-Lkw als klimaschonende Güterverkehrslösung ein hohes Forschungsinteresse.

Es gibt seit mehreren Jahren Projekte in Deutschland die O-Lkw pilotieren. Dabei haben alle gemein, dass der Fokus auf der Elektrifizierung des Güterverkehrs liegt. Die Ausgestaltung der Streckenabschnitte ist dabei jedoch unterschiedlich. Im Folgenden sind die Projekte näher beschrieben.

Die erste deutsche Teststrecke zur Pilotierung von OH-Lkw wurde bereits im Jahr 2011 auf einem ehemaligen Flugplatzgelände in Groß Dölln, Brandenburg in Betrieb genommen. Dieses Projekt diente vor allem der technischen Weiterentwicklung des Systems zum anschließenden Einsatz auf Autobahnen.

Der erste sogenannte eHighway in Deutschland wurde 2020 in Hessen in Betrieb genommen. Davor abgeschlossene Forschungsprojekte haben bereits die Potenziale des oberleitungsgebundenen Güterverkehrs auf Autobahnen theoretisch erforscht.⁶ Der 10km lange Autobahnabschnitt der A5, der im Projekt ELISA [22] mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestattet wurde, soll vor allem die ökologischen Potenziale des OH-Lkw belegen. Daneben stehen auch verkehrs- und energiewirtschaftliche Fragestellungen sowie wirtschaftliche Voraussetzungen und Wirkungen im Fokus der Forschung. Technisch sind die heute eingesetzten Pilotfahrzeuge mit Hybridmotoren ausgestattet, die während der Fahrt an der Oberleitung elektrisch geladen werden, bei nicht ausreichender Ladung abseits der Oberleitung jedoch mit Diesel (oder auch anderen Kraftstoffen) gefahren werden. Zur Stromaufnahme sind sie mit einem Dachstromabnehmer ausgestattet. Sensoren auf dem Dach des Fahrerhauses werden zur Identifizierung der Oberleitung eingesetzt und ermöglichen das automatisierte Ausfahren und Andocken des Stromabnehmers an den Streckenabschnitt, gleichermaßen wird der Stromabnehmer bei Verlassen der Strecke eingefahren.

Ersten Erkenntnissen des Projektes zufolge wäre eine Ausstattung von 30% der deutschen Autobahnen mit der Oberleitungstechnik notwendig, um etwa 80% aller schweren Lkw elektrifiziert fahren lassen zu können.

Ein weiteres Projekt, das dieselbe Technik wie der eHighway in Hessen erprobt, wird seit 2018 auf der Autobahn A1 zwischen Reinfeld und Lübeck auf einer 5km langen Strecke durchgeführt.⁷

Das Projekt eWayBW ist das erste Pilotprojekt für OH-Lkw in Baden-Württemberg und wurde im Unterschied zu anderen Projekten auf einer Bundesstraße errichtet [2]. Auf der B462 zwischen den Anschlussstellen Kuppenheim und Oberstrot wurden hierbei zwei Bereiche mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestattet, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die 2.600m und 750m langen Strecken liegen dabei auf einem Abschnitt von insgesamt 5km, ein dritter Abschnitt wurde aufgrund enger Kurven nicht elektrifiziert. Die auf der Bundesstraße eingesetzte Technologie stammt von Siemens und entspricht damit auch der Ausstattung in den anderen Pilotprojekten. Ins Projekt eingebunden sind mehrere Partner, die die Erprobung wissenschaftlich begleiten. Die ersten Publikationen [23] [24] [5] dieser Forschungspartner lieferten die Motivation zur Erforschung der Automatisierung von Lkw im Oberleitungsbetrieb. Diese Strecke erfährt dadurch eine starke Betrachtung in der vorliegenden Studie.

⁶ Projekte ENUBA, ENUBA2, siehe dazu genauer: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/enuba>, <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/enuba-2enuba>; abgerufen am 26.08.2021.

⁷ Siehe dazu genauer: <https://www.ehighway-sh.de/de/>, abgerufen am 26.08.2021.

Neben den Strecken in Deutschland, wurde der erste eHighway für Diesel-Hybrid-Lkw bereits 2016 in Schweden auf 2km Autobahn in Betrieb genommen. Dieser sollte den Güterverkehr auf dem Ziel zur Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen unterstützen. Ebenfalls ein ökologisches Ziel verfolgt ein Oberleitungsprojekt im Umfeld von Los Angeles, das die Verbesserung der Luftqualität auf der Strecke zwischen zwei Häfen fokussiert [25]. Im Oktober 2020 startete der Bau einer Oberleitungs-Teststrecke am Erzberg in der Österreichischen Steiermark, hierbei sollen Schwer-Lkw mit 100t Nutzlast in einer Eisenerz-Mine betrieben werden.⁹



Abbildung 2: Oberleitungsstrecke des Pilotprojekts eWayBW [2]

⁹ Siehe dazu [www. https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Erweiterte_Oberleitungs-Teststrecke_am_Erzberg_3586083.html](https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Erweiterte_Oberleitungs-Teststrecke_am_Erzberg_3586083.html), abgerufen am 28.10.2021.

3 Kombination von Automatisierung und Oberleitungs-Lkw

3.1 Infrastrukturausstattung der Strecke

Ob ein Bundesstraßen- oder Autobahnabschnitt für den Betrieb von O-Lkw ausgerüstet werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab:

- Verfügbarer Platz neben der Fahrbahn für Tragwerke;
- Überbauung der Strecke;
- Unterbau der Strecke;
- Streckenverlauf;
- Zugang zum (über-)regionalen Stromversorgungsnetz.

Bei Streckenabschnitten ohne eng danebenliegende Bebauung ergeben sich keine Einschränkungen für die Aufstellung der Tragwerke. Bereits vorhandene Schallschutzwände belegen zwar möglicherweise bereits den bevorzugten Aufstellplatz für Oberleitungs-Masten, es besteht jedoch die Möglichkeit diese Masten als Aufprallschutz zu nutzen, sofern diese auf der fahrbahnabgewandten Seite errichtet werden. Eine Herausforderung stellen allerdings Streckenabschnitte auf Brückenwerken dar – hier muss eine Verstärkung der Verankerung der Masten zur Aufnahme von Windlasten geprüft werden.

Gemäß der Richtlinie für die Anlage von Landstraßen (RAL) und der Richtlinie für die Anlage von Autobahnen (RAA) muss oberhalb der Fahrbahn eine Luftraumhöhe von 4,50m (RAL) bzw. 4,70m (RAA, bei neuen Strecken) freigehalten werden. Der Fahrdrabt der Versuchsanlage eWayBW wird jedoch nominell in einer Höhe von 5,21m geführt. Durch die Ausführung als Kettenfahrlleitung wird zusätzlich weiterer Bauraum über der Fahrleitung benötigt. Sind auf der zu elektrifizierenden Strecke bereits Brücken vorhanden, die die Fahrstrecke kreuzen und nahe am (oder unter dem) Mindest-Lichtraumprofil gebaut sind, ergeben sich Einschränkungen der möglichen Fahrdrabtführung. Abhängig vom konkreten Brückenbauwerk muss die Fahrleitung als festmontierte Stromschiene ausgeführt oder sogar komplett unterbrochen werden.

Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit, die Existenz solcher Um- oder Auskoppelstellen an das Fahrzeug zu kommunizieren. Außerdem muss die Durchfahrtshöhen-Beschilderung auf Strecken für O-Lkw geprüft werden, da Stromabnehmer gemäß §32 (2) StVZO auch über die maximale Fahrzeughöhe von 4m herausragen dürfen und im erhobenen Zustand ein zusätzliches Kollisionsrisiko darstellen können.

Neben Überführungsbauwerken stellen auch besonders kurvenreiche Strecken einen Sonderfall für den Oberleitungsausbau dar. Die Strecke des Pilotprojekts eWayBW sollte ursprünglich in drei Abschnitten elektrifiziert werden. Ein geplanter Abschnitt konnte jedoch aufgrund des Streckenverlaufs und zu enger Kurvenradien nicht mit der Oberleitungsinfrastruktur ausgebaut werden [26]. Die Testphase eines Oberleitungssystem in Österreich sowie die Infastrukturauslegung bei O-Bussen zeigen jedoch, dass auch enge Kurven bei entsprechender Anpassung der Oberleitungs konstruktion grundsätzlich möglich sind, allerdings erfordern sie entsprechend große Seitenflächen und sind womöglich kostenintensiver als die Standardinfrastruktur.

Während die Oberleitungsinfrastruktur bei entsprechender Konzeption an viele Umgebungen anpassbar ist, verbleibt die Herausforderung, dass die Masten und Fahrdrähte andere Verkehrsteilnehmer einschränken können. Bei Regelbetrieb auf einer zweispurigen Richtungsfahrbahn mit zusätzlichem Seitenstreifen sind

keine Behinderungen zu erwarten, da Überholvorgänge und Fahren auf der Spur ohne Oberleitung uneingeschränkt möglich sind. Im Falle eines Unfalls, der zu Behinderung der Oberleitungsspur und/oder der weiteren Spur führt, können Sondersituationen auftreten. Wenn die Spur ohne Oberleitung blockiert wird, besteht für Fahrzeuge, die aufgrund ihrer Höhe nicht unter der Oberleitung fahren können, keine Ausweichmöglichkeit. Da ein solcher Fall aber vermutlich nicht regelmäßig ist, bedarf es dafür nach ersten Einschätzungen keine infrastrukturellen Anpassungen. Ein bedeutenderer Fall ist die Bildung einer Rettungsgasse sowie Landung eines Rettungshubschraubers auf der Fahrbahn. Für die Bildung einer Rettungsgasse müssen die Lkw von der Oberleitung abdocken und könnten daher nicht länger unter dem Fahrdraht fahren. Für ein solches Szenario muss eine Strategie entwickelt werden, die ein sicheres Ausfahren aus der Oberleitungsstrecke und ggf. dem hochautomatisierten Betrieb ermöglicht.

Für die Landung von Rettungshubschraubern stellen die Oberleitungsmasten eine Einschränkung dar, die in der Planungsphase besondere Aufmerksamkeit benötigen. Eine Lösungsmöglichkeit wäre hier beispielsweise die Errichtung spezieller Landezonen durch die Verbreiterung des Seitenstreifens, die im Zuge des Oberleitungsbaus erfolgen kann. Um die Möglichkeiten und Optionen für die Lösung dieser Situation zu identifizieren, sind jedoch die entsprechenden Institutionen in den Planungsprozess einzubinden.

Der Leistungsbedarf und das Energiesystem der Strecke sowie die Anforderung an das Stromversorgungsnetz werden im Abschnitt 3.4 betrachtet. Infrastrukturell ergeben sich durch die Ausführung der Oberleitung als zweipoliges System Einschränkungen bei der möglichen Trassenführung. Es können keine unterbrechungsfreien Abzweigungen oder Kreuzungen realisiert werden, da es hierbei zur Kreuzung zweier verschiedener Leiter kommen würde.

Sofern die Stromabnehmer nicht über eine Möglichkeit zur Polaritätserkennung und -umschaltung verfügen, ist die Oberleitungsstrecke auf eine einzelne Fahrtrichtung beschränkt. Eine bedarfs- und belastungsabhängig wechselnde Nutzung oder die Umleitung von Verkehr auf die Gegenfahrbahn, z.B. bei Bautätigkeiten, ist in diesem Fall für den Oberleitungs-Verkehr nicht möglich.

3.2 Fahrzeugtechnische Umsetzung des Betriebs

Die bestehenden Versuchsanlagen der Pilotprojekte auf der A1, A5 und B462 sind als gewichtsnachgespannte Hochkettenfahrleitung realisiert. Die Oberleitung wird über der jeweiligen Fahrstreifenmitte geführt. Auf den bei Schienenbahnen üblichen Fahrdraht-Zickzack wird verzichtet. Auffällig ist die große Anzahl an Seitenhaltern, die auch in Kurven eine nahezu knickfreie Führung mit minimalen Abweichungen von der Fahrstreifenmitte gewährleistet. Das bisherige Konzept der Infrastruktur für O-Lkw sieht vor, die Fahrleitung an Stellen zu unterbrechen, an denen die Montage der Fahrleitung aus technischen, rechtlichen oder gestalterischen Gründen nicht möglich oder sehr aufwändig ist, z.B. bei niedrigen Brücken. Im Unterschied zum Bahnbetrieb wird bei O-Lkw auch auf Fahrleitungsweichen oder Fahrleitungskreuzungen verzichtet. Die Fahrleitung wird mit Gleichstrom gespeist, wobei sich die Fahrleitungsspannung an den im Straßenbahnbereich üblichen Werten von circa 600 V bis 750 V orientiert. Eine wesentlich höhere Spannung ist aus Sicherheitsgründen¹⁰ nicht geeignet. Daher ist auch eine Wechselstromelektrifizierung wenig sinnvoll. Vollbahnen in Europa verwenden Stromsysteme mit Gleichstrom 1500 V, 3000 V oder Wechselstrom 15 kV und 25 kV. Die Gleichstromsysteme bei Vollbahnen gelten heute als veraltet. Der Nachteil des niedriggespannten Gleichstroms liegt in den hohen Verlustleistungen durch den ohmschen Widerstand der Fahrleitung. Als Gegenmaßnahmen sind vergrößerte

¹⁰ Personen können bspw. sich direkt unter der Fahrleitung befinden.

Leitungsquerschnitte, zusätzliche Speiseleitungen sowie eine deutlich höhere Dichte an Einspeisestellen üblich. Bei Straßenbahnen wird etwa eine Einspeisestelle pro 2 km verbaut, bei Überlandbahnen sind 5 km mit zusätzlichen Speiseleitungen üblich. Für den Betrieb von vielen O-Lkw auf Autobahnen sind ähnliche Werte zu erwarten.

3.2.1 Fahrzeugarchitektur von Oberleitungs-Lkw und Vergleich mit verwandten Technologien

Die Fahrzeugarchitektur der O-Lkw wird im Folgenden auf unterschiedlichen Ebenen untersucht. Zunächst erfolgt die Darstellung der Architektur in Hinblick auf die Antriebstechnologie mit Fokus auf OH-Lkw. Darüber hinaus wird die Konzeption der O-Lkw von den O-Bussen und Bahnen mit Oberleitung abgegrenzt und damit technologische sowie infrastrukturelle Unterschiede und deren Begründungen dargelegt.

Ein O-Lkw unterscheidet sich hinsichtlich der Fahrzeugarchitektur von einem klassischen Lkw mit Dieselantrieb durch den elektrischen Antrieb, die Traktionsbatterie sowie den Dachstromabnehmer. Diese drei Komponenten sollen in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Bei einem BEV-O-Lkw wird der heute dominierende Dieselantrieb durch einen Elektromotor ersetzt. Dieser Elektromotor bietet gegenüber einem Verbrennungsmotor bei vergleichbarer Stundenleistung eine höhere Überlastfähigkeit und eignet sich daher technisch sehr gut als Antrieb für Nutzfahrzeuge. Nach derzeitigem technischem Stand kommen im Fahrzeugbau bürstenlose Drehstrom-Asynchronmotoren zum Einsatz, die über eine Leistungselektronik angesteuert werden. Die Leistungselektronik erzeugt den benötigten Drehstrom variabler Frequenz aus Gleichstrom. Drehstrom-Asynchronmotoren sind vergleichsweise leicht und kompakt, so dass sich der für den Antrieb benötigte Bauraum und das Gewicht gegenüber Dieselmotoren deutlich reduzieren. Als Variante dieser Antriebsart ist bei den OH-Lkw ein zusätzlicher Antrieb des Fahrzeugs durch einen Verbrennungsmotor möglich. Diese Variante ist vor allem deshalb im Oberleitungseinsatz sinnvoll, weil längere Streckenabschnitte ohne Fahrleitung, mit dem Verbrennungsmotor überbrückt werden können. Sie stellt damit eine technische Lösung dar, die vor allem in einem Übergangszeitraum bis zur Realisierung vollelektrischer Mobilität von Bedeutung ist.

Bei einer vollelektrischen Lösung ist es möglich, das Konzept eines zentralen Antriebs, der mechanisch auf eine oder mehrere Achsen wirkt, mit einem Antrieb, der auf mehrere kleine, elektrische Motoren verteilt ist, die jeweils einer (Stummel-)Achse zugeordnet sind, zu ersetzen. Diese Form des Radnabenmotors bietet verschiedene technische Vorteile. Eine bessere, radindividuelle Antriebssteuerung, eine einfachere Realisierung von Allachsenantrieben, kleinere Bauräume sowie eine höhere Redundanz beim Ausfall einzelner Antriebseinheiten begründen diese Entwicklung. Solche Antriebslösungen sind im Bereich von Schienenfahrzeugen und O-Bussen seit rund 20 Jahren zu finden, im Lkw-Bereich allerdings weitgehend neu.

Der für den Antrieb erforderliche Gleichstrom wird bei einem OH-Lkw wahlweise von einer Traktionsbatterie oder aus der Fahrleitung bereitgestellt. Die Traktionsbatterie dient dazu, Abschnitte zu überbrücken, die nicht mit Fahrleitung überspannt sind. Ferner ermöglicht sie das Ausscheren, wenn der mit der Fahrleitung überspannte Fahrstreifen blockiert sein sollte oder ein anderes Fahrzeug überholt werden soll. Gegenüber einem BEV-Fahrzeug kann die Kapazität der Batterie und damit auch deren Größe und Gewicht geringer ausfallen, da nur kürzere Abschnitte überbrückt werden müssen und der Ladevorgang sowohl flexibel an stationären Ladestellen, als auch während der Fahrt unter der Oberleitung erfolgen kann.



Abbildung 3: Oberleitungsbus und -infrastruktur [27]

Im Vergleich zu den bereits seit über 100 Jahren verbreiteten O-Bussen (siehe Abbildung 3), weisen die Fahrleitungsanlage sowie die Dachstromabnehmer der O-Lkw erhebliche Unterschiede auf. In beiden Fällen wird eine zweipolige Gleichstromfahrleitung verwendet. Die genaue technische Ausführung ist in Kapitel 3.1 beschrieben. Bei den O-Bussen kommen im Gegensatz zu den O-Lkw jedoch Stromabnehmerstangen zum Einsatz. Diese verfügen am oberen Ende über einen Schleifschuh, der in den Fahrdraht greift und von diesem mechanisch geführt wird. Dadurch können auch seitliche Abweichungen des Busses vom Fahrleitungsverlauf von einer Fahrstreifenbreite und mehr realisiert werden. Allerdings erschwert diese Stromabnehmerbauart das automatische Anlegen des Stromabnehmers („eindrahten“) und ist daher für den O-Lkw ungeeignet. Das Systemkonzept der O-Busse ist nicht darauf ausgelegt, dass der Stromabnehmer während der Fahrt an- und abgelegt wird. Dies erfolgt in der Regel nur im Stand und teilweise unterstützt von speziellen Hilfsmitteln an der Fahrleitung („Eindrahttrichter“). Da bei einem O-Lkw das Spurwechseln problemlos möglich sein muss, wird der Stromabnehmer während eines Fahrstreifenwechsels gesenkt, der Vorgang erfolgt im Batteriebetrieb. Anschließend wird der Stromabnehmer wieder gehoben. Eine weitere Anforderung an die Oberleitungsanlage ergibt sich durch das Beschädigungsrisiko, das ein Abgleiten des Stromabnehmers während der Fahrt für die Fahrleitung darstellt. Ferner muss die Fahrleitung knickfrei montiert sein, was eine hohe Anzahl von Befestigungspunkten erfordert. An Abzweigungen und Kreuzungen sind deshalb spezielle Luftweichen in die Fahrleitung einzubauen. Dies ist bei O-Bussen relevant, da im städtischen Umfeld mit engen Kurven und häufigen Spurwechseln umgegangen werden muss. Für die Fahrleitungen und Stromabnehmersysteme der O-Lkw ist dies nicht notwendigerweise erforderlich.

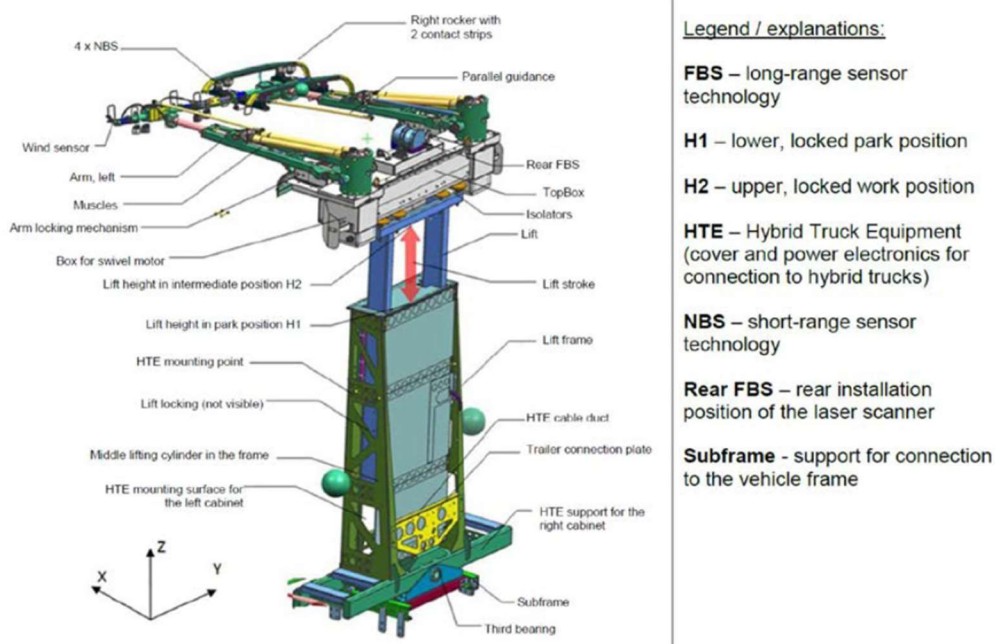


Abbildung 4: Mechatronisches Konzept des Dachstromabnehmers [75]

Als Dachstromabnehmer verwenden die bisher produzierten OH-Lkw Lyra- oder Einholmstromabnehmer mit Wippe, die aus dem Schienenfahrzeugbau entlehnt wurden, siehe . Die Stromabnehmer verfügen über zwei nebeneinander angeordnete, kurze Schleifleisten, je einen für die beiden Fahrdrähte der Fahrleitung. Die Stromabnehmer sind seitenverschiebbar ausgeführt und können damit seitliche Abweichungen des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte kompensieren. Ebenfalls wird das Heben des Stromabnehmers verhindert, wenn sich das Fahrzeug nicht unter der Fahrleitung befindet.

Eine Besonderheit elektrischer Antriebe ist die Möglichkeit zur Rekuperation, d.h. zur Rückgewinnung elektrischer Energie durch die Fahrzeugmotoren beim generatorischen Bremsen. Diese Möglichkeit wird bei batterieelektrischen Fahrzeugen dazu genutzt, die Traktionsbatterie zu laden und damit die Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen. Die Möglichkeit zur Rekuperation besteht in derselben Weise auch bei O-Lkw mit elektrischem Antrieb. Der erzeugte Strom kann sowohl zur Aufladung der Batterie genutzt, als auch ins Fahrleitungsnetz zurückgespeist werden, sofern das Fahrleitungsnetz zu diesem Zeitpunkt aufnahmefähig ist, d.h. ein anderer Verbraucher im selben Speiseabschnitt in gleichem oder höherem Maße Energie verbraucht. Ist bei einer generatorischen Bremsung weder die Fahrleitung noch die Traktionsbatterie aufnahmefähig, so muss die erzeugte elektrische Energie in elektrischen Bremswiderständen in Wärme umgewandelt werden oder auf die Nutzung der generatorischen Bremse zugunsten der konventionellen Reibbremse verzichtet werden. Zur Verhinderung von Energieverlusten ist es daher für O-Lkw empfehlenswert, die Traktionsbatterie nie zu 100% aufzuladen, sondern eine Restkapazität offen zu lassen, um die beim Anhalten anfallende Energie im Fahrzeug speichern zu können. Mit einer solchen Strategie wird es auch möglich, den hohen Strombedarf beim Anfahren teilweise aus dem Fahrleitungsnetz und der Traktionsbatterie zu entnehmen und damit die Belastung des Fahrleitungsnetzes zu begrenzen. Auf längeren Gefällestrrecken kommt diese Strategie allerdings an ihre Grenzen und die Rekuperation in die Fahrleitung wird erforderlich. Eine Lösungsmöglichkeit hierfür liegt in der Gegenrichtung der Gefällestrrecke. Diese ist üblicherweise eine Steigungsstrrecke, so dass es wahrscheinlich ist, dass es die dort fahrenden Fahrzeuge den rekuperierten Strom zeitgleich verbrauchen können. Alternativ sind ortsfeste Energiespeicher (z.B. Supercaps oder rotierende Energiespeicher) möglich, um gewisse Mengen rekuperierter Energie kurzzeitig zwischenspeichern zu können.

Die Rekuperation ist im Bereich von Straßenbahnen und O-Bussen seit etwa 40 Jahren etablierter Standard, die Übertragung auf O-Lkw stellt somit technisch keine besondere Herausforderung dar. Auch die Nutzung ortsfester oder fahrzeugseitiger Energiespeicher zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Rekuperation ist in diesen Bereichen seit einigen Jahren zu finden.

Zur Ermittlung des Stromverbrauchs sowie zur Abrechnung ist die Installation eines Stromzählers auf jedem O-Lkw erforderlich. Grundsätzlich ist denkbar, dass jeder Betreiber eines O-Lkw einen eigenen Stromliefervertrag mit einem Stromlieferanten abschließt. Die tatsächlich verbrauchte Menge Energie wird mit den Stromzählern gemessen und verbrauchsabhängig abgerechnet. Neben dem Stromlieferanten und dem Stromverbraucher ist der Betreiber der Fahrleitungsanlage als Netzbetreiber ebenfalls einzubeziehen und durch Nutzungsentgelte zu entschädigen. Aufgrund der dezentralen Einspeiseinfrastruktur und der Vorhaltung von Gleichrichteranlagen an den Speisestellen ist davon auszugehen, dass die Einspeiseinfrastruktur vom Betreiber des Fahrleitungsnetzes bereitgestellt wird. Die Vorgehensweise ist grundsätzlich vergleichbar mit den allgemeinen Stromnetzen in Europa und der Bahnstromversorgung, in der es etablierte Formen des Zusammenwirkens und der Abrechnung von Stromlieferanten, Netzbetreiber und Verbraucher gibt.

3.2.2 Kombination von Technologien des Hochautomatisierten Fahrens mit Oberleitungssystemen

Wie zuvor beschrieben sind alle bisher in Pilotprojekten betriebenen O-Lkw in der Lage, sowohl abschnittsweise unter Fahrleitung als auch fahrleitungslos betrieben zu werden. Im fahrleitungslosen Betrieb unterscheiden sie sich daher nicht von einem einfachen, batterieelektrischen bzw. hybrid angetriebenen Fahrzeug. Daher werden im Folgenden der Betrieb unter Fahrleitung sowie die daraus resultierenden Besonderheiten für die Automatisierung erörtert. Diese beziehen sich insbesondere auf die E/E-Architektur und damit auf die elektrischen und elektronischen Komponenten der Fahrzeuge sowie deren Vernetzung. Zunächst werden die aus dem Fahrleitungsbetrieb resultierenden Anforderungen an die Automatisierung analysiert, anschließend folgt die Darstellung der zusätzlichen Möglichkeiten, die der Oberleitungsbetrieb für die Automatisierung bietet.

Die funktionale Architektur für die Realisierung des hochautomatisierten Fahrens, wie in Abbildung 5 skizziert, besteht aus der Sensorverarbeitung, Perzeption und Situationsverständnis, Verhaltens- und Bewegungsplanung sowie Fahrzeugsteuerung und Aktorik. Zusätzlich kommuniziert das Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen, Infrastruktur oder anderen Artefakten, um die Datengüte zu verbessern. Hierbei spielt die Sicherheit dieser Datenübertragung eine entscheidende Rolle.

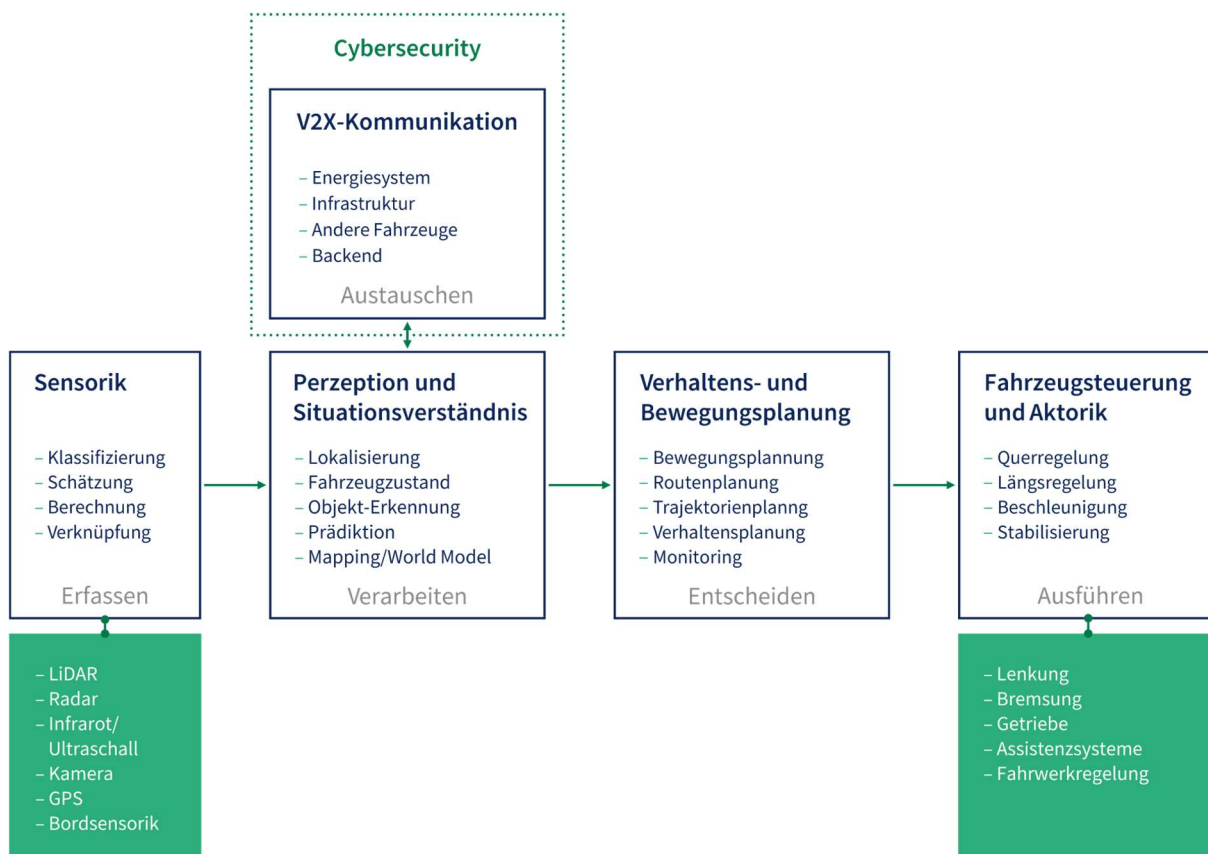


Abbildung 5: Funktionale Architektur des autonomen Fahrens, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an [28] [29]

Hochautomatisiertes Fahren ist, wie in Kapitel 2.1 erläutert, bereits in unterschiedlichen Reifegraden erprobt. Für Lkw ist die Übertragbarkeit der Erkenntnisse von Pkw häufig aufgrund deren Größe und Aufbau limitiert. Insbesondere die Anbringung und Nutzung von geeigneter Sensorik, kann nicht direkt aus dem Pkw-Bereich übertragen werden. Der Oberleitung kommt an dieser Stelle eine zentrale Rolle zu. Durch die Fahrleitung ergeben sich weitere Möglichkeiten Sensorik für die Perzeption und Lokalisierung zu verwenden, doch diese sind nicht notwendigerweise als Ersatz bereits bestehender Konzepte zu betrachten. Die zusätzliche Sensorik bietet insbesondere für die Routen- und Trajektorienplanung eine Redundanzebene, die bei konventionellen Lkw nicht gegeben ist. Auch die Integration der Antriebstechnologie hat Einflüsse auf die Gestaltung der funktionalen Architektur und wird im Folgenden genauer erläutert.

Bei der Routenplanung handelt es sich um die Planung der Strecke vom Startpunkt einer Fahrt zum Zielpunkt, d.h. die Routenplanung betrachtet Distanzen von wenigen bis hin zu mehreren hundert Kilometern. Zusätzlich zu den bereits bei klassischen Routenplanungsverfahren üblichen Optimierungskriterien *Streckenlänge* und *Fahrzeit* kommt als weiteres Kriterium die *Existenz der Fahrleitung* auf den befahrenen Streckenabschnitten sowie die *Reichweite der Traktionsbatterie* hinzu. Die Route sollte so geplant werden, dass die fahrleitunglosen Abschnitte kürzer als die Reichweite der Traktionsbatterie sind und die dazwischenliegenden Abschnitte mit Fahrleitung lange genug sind, um die Batterie wieder aufzuladen. Damit können Zwischenstopps zum Nachladen der Batterie vermieden und die Einsatzdauer und Gesamtfahrdauer reduziert werden. Das bedeutet, dass unter Umständen Algorithmen-basiert eine längere Strecke gewählt wird, um die beschriebenen zusätzlichen Randbedingungen einzuhalten.

Die heute üblichen Verfahren zur Routenplanung nutzen Such- und Optimierungsalgorithmen, die den Raum aller möglichen Routen graphenbasiert aufspannen und effizient durchsuchen. Die durch den fahrleitungs-basierten Betrieb erforderlichen zusätzlichen Randbedingungen lassen sich verhältnismäßig einfach in diese Verfahren integrieren.

Um die Routenplanungsverfahren entsprechend zu erweitern, ist es erforderlich, die digitalen Straßenkarten um die Verfügbarkeit der Fahrleitung zu ergänzen. Da heute gebräuchliche digitale Kartenformate es erlauben, jedem Streckenabschnitt verschiedene Attribute zuzuordnen, ist dies durch Ergänzung eines entsprechenden Attributs problemlos in den bestehenden Formaten möglich. Um auch die Trajektorienplanung unter Fahrleitung zu ermöglichen, ist es ferner ratsam, auch den genauen Verlauf der Fahrleitung über der Fahrbahn in den digitalen Karten als Polygonzug abzulegen. Heutige Kartenverfahren sind dazu ebenfalls mit geringen Erweiterungen in der Lage. Ebenfalls lassen es die heutigen Mobile-Mapping-Verfahren zu, Oberleitungsinfrastruktur sensorisch zu erfassen und bei der Kartierung zu berücksichtigen. Daher ergeben sich für die digitalen Straßenkarten keine wesentlichen neuen Herausforderungen durch den Betrieb unter Fahrleitung.

Basierend auf der geplanten Route und der sensorisch erfassten Umgebungsinformation über andere Verkehrsteilnehmer sowie dem sensorisch erfassten bzw. aus der digitalen Straßenkarte entnommenen Straßenverlauf ist es Gegenstand der Trajektorienplanung, den geometrischen Pfad und die Geschwindigkeit des hochautomatisierten Fahrzeugs für die nächsten Sekunden zu planen. Die Kombination aus Pfad und Geschwindigkeitsprofil wird als Trajektorie bezeichnet.

Heute übliche Trajektorienplaner basieren auf mathematischen Optimierungsverfahren, mit deren Hilfe ein Gütefunktional unter Randbedingungen optimiert wird. In dem Gütefunktional werden wünschenswerte Eigenschaften des Pfades und des Geschwindigkeitsprofils sowie in den Randbedingungen zwingend erforderliche Eigenschaften codiert. Zwingend erforderliche Eigenschaften sind z.B. die Kollisionsfreiheit der Trajektorie, das Verbleiben im befahrbaren Straßenraum, die Einhaltung der Straßenverkehrsordnung. Wünschenswerte Eigenschaften sind eine hohe Reisegeschwindigkeit, Fahrkomfort, Nachvollziehbarkeit der Trajektorie, aber auch das Einhalten von Fahrstreifenverläufen. Die letztgenannte Eigenschaft wird häufig modelliert, indem eine größere Abweichung der Trajektorie von der Fahrstreifenmitte negativ in das Gütefunktional eingeht. Die Fahrstreifenmitte dient somit als Referenzlinie, an der sich die Trajektorienplanung orientiert und nur dann davon abweicht, wenn z.B. Hindernisse dies erfordern.

Möchte man einen O-Lkw im Fahrleitungsbetrieb automatisieren, kann man sich diese grundlegende Arbeitsweise der Trajektorienplaner zunutze machen. Zusätzlich zur Fahrstreifenmitte, kann in den Fahrleitungsabschnitten der Oberleitungsdraht als Referenzlinie genutzt werden. Damit wird erreicht, dass die geplante Trajektorie in der Regel nur geringfügig von der Fahrleitung abweicht und der Stromabnehmer somit am Fahrdraht verbleiben kann. Dies trägt damit zu einer optimalen Führung des Stromabnehmers am Fahrdraht bei und kann dessen Lebenszyklus verlängern. Weiterhin ist die Fahrbahn als Basis für die Trajektorienplanung nicht sicher genug, um die O-Lkw in SAE-Stufe 4 zu betreiben. Diese kann durch Umwelteinflüsse, Abnutzung oder Baustellen unkenntlich sein und erfordert daher unbedingt eine Redundanzebene. Die Oberleitung entfaltet hier also ihr Potential, um hochautomatisiertes Fahren technologisch sicherer zu gestalten, welches im folgenden Abschnitt genauer betrachtet wird.

Neben den Anforderungen an die Automatisierung, die durch den Betrieb unter einer Oberleitung entstehen, bietet diese Technologie auch zusätzliche Möglichkeiten, um das hochautomatisierte Fahren robuster zu machen. Die Grundidee hierbei ist, die für die Fahrleitung erforderliche Infrastruktur (Fahrleitung, Ausleger, Masten) für die Automatisierung zu nutzen. Davon kann insbesondere die Selbstlokalisierung der Fahrzeuge profitieren. Die Selbstlokalisierung ist dafür zuständig, die Position und Ausrichtung des Fahrzeugs zu bestimmen.

Die erforderliche Genauigkeit liegt dabei im Bereich von circa 10 cm. Da diese Genauigkeit mit Satellitennavigation (GNSS) nicht zu erreichen ist, kommen Ansätze zum Einsatz, die aus den Objekten im Umfeld des Fahrzeugs (sogenannte Landmarken) die eigene Position bestimmen. Solche Landmarken können beispielsweise Fahrbahnmarkierungen, Leitplanken, Leitpfosten, Schilder, Masten und Fassaden angrenzender Gebäude sein. Die Landmarken werden mit bordeigener Sensorik (Kameras, Lidar, Radar) erkannt, deren Lage in der digitalen Straßenkarte nachgeschlagen und anschließend in einem mathematischen Optimierungsprozess die eigene Position berechnet wird.

Während im urbanen Raum sehr viele dieser Landmarken zur Orientierung zur Verfügung stehen, gibt es auf Land- und Bundesstraßen sowie Autobahnen längere strukturarmer Bereiche, in denen nicht genügend Landmarken zur Verfügung stehen oder deren Anordnung die Bestimmung der exakten Position nicht erlaubt. Auf Landstraßen sind oft nur Fahrbahnmarkierungen und Leitplanken verfügbar, die in Längsrichtung der Straße verlaufen und die für die Bestimmung der Längsposition des Fahrzeugs ungeeignet sind. Ein weiteres Problem kann auftreten, wenn durch ungünstige Sicht- oder Witterungsbedingungen Landmarken von den Sensoren nicht erkannt werden können. Beispiele sind Fahrbahnmarkierungen auf verschneiten Straßen oder durch Nebel reduzierte Kamerasichtweiten. Die Infrastrukturelemente der Fahrleitungsanlage stellen zusätzliche potentielle Landmarken für die Lokalisierung dar. Sie haben den Vorteil, dass sie erhaben und dadurch auch bei Schnee erkennbar sind. Außerdem sind sie mit Kameras, Radar- oder Lidarsensoren relativ leicht zu detektieren. Der Fahrdraht kann als Landmarke dienen, die eine sehr genaue Positionsbestimmung quer zur Fahrbahn erlaubt. Die Fahrleistungsmasten und -ausleger erlauben es, die Positionsbestimmung in Längsrichtung zu verbessern.

Um den technologischen Sprung auf SAE-Stufe 4 zu ermöglichen, muss das Fahrsystem in der Lage sein ohne menschliche Unterstützung Fehler in Komponenten zu erkennen und einen sicheren Zustand einzunehmen. Dabei unterscheidet man zwischen der Fail-Safe- und der Fail-Operational-Strategie. Bei der Fail-Safe-Strategie muss sichergestellt werden, dass beim Fehler oder Ausfall einer Komponente das System in einen beherrschbaren Zustand überführt wird. Bei der Fail-Operational-Strategie bleibt das System auch bei einem Fehler in Betrieb, was durch redundante Systemauslegung oder eine Rückfallebene erreicht wird. Bis SAE-Stufe 2 gilt der Mensch als Rückfallebene für Fahrerassistenzsysteme. Fällt eine Komponente aus, kann er das Fahrzeug weiterhin steuern und sicher in Betrieb halten. Bei SAE-Stufe 3 muss ein sicherer Betrieb so lange erhalten werden, bis der Fahrende die Steuerung übernehmen kann. Ab SAE-Stufe 4 ist der Mensch nicht mehr als Rückfallebene vorhanden. Bei einer Fail-Safe-Strategie muss sich das Fahrzeug beim Ausfall einer Komponente, z.B. dem Ausfall der Umfelderkennung über Kameras, selbständig in einen sicheren Zustand bringen. Dies ist z.B. Navigieren und Anhalten auf den Seitenstreifen oder kontrolliertes Anhalten auf der eigenen Spur, falls kein Seitenstreifen vorhanden ist. Bei einer Fail-Operational-Strategie muss der hochautomatisierte Betrieb trotz Komponentenfehler fortgesetzt werden. Dafür sind redundant ausgelegte Systeme notwendig, die den Ausfall einer Komponente auffangen. Für das Beispiel der Umfelderkennung stellt die Erkennung der Fahrspur über die Oberleitung eine solche Redundanzebene dar.

Abbildung 6 zeigt die möglichen Betriebszustände mit zwei redundanten Sensorikkonzepten, der bereits vorhandenen Sensorik (klassische Sensorik) und der Sensorik, die die Oberleitungsinfrastruktur detektiert (Oberleitungssensorik).

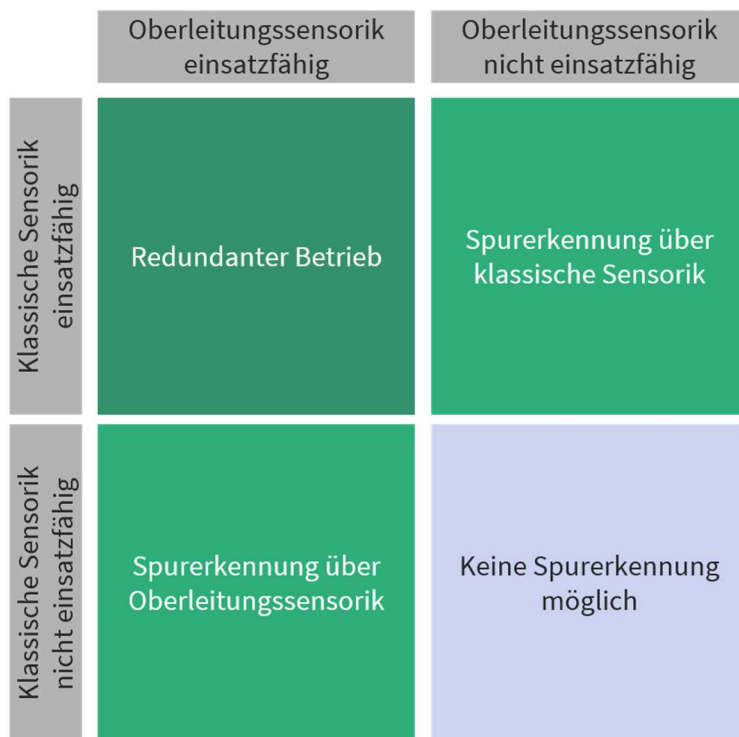


Abbildung 6: Mögliche Betriebszustände mit redundanten Sensoriken

Der Vorteil einer zusätzlichen Oberleitungssensorik zeigt sich in zwei Zuständen. Ist die klassische Umfelderkennung nicht einsatzfähig, kann die Oberleitungssensorik die notwendigen Informationen für die Umfelderkennung liefern, um einen hoch- bis vollautomatisierten Betrieb zu gewährleisten. Ist z.B. klassische Spurerkennung nicht möglich, weil vorausfahrende Fahrzeuge die Sicht blockieren, die Witterungsbedingungen schlecht sind oder die Spurmarkierungen stark verunreinigt sind, kann die Spur über die Oberleitung erkannt werden. Somit wird die hochautomatisierte Betriebsdauer auf Strecken mit Oberleitung erhöht, in denen die klassische Sensorik nicht ausreicht um eine sichere Umfelderkennung zu erzeugen.

Liefern beide Sensoriken robuste Informationen (redundanter Betrieb), kann die Genauigkeit der Umfelderkennung durch Informationsfusion erhöht werden. Dabei werden die Messwerte der Sensoren miteinander kombiniert um ein präziseres Ergebnis zu erhalten. Technisch lassen sich die einzelnen Messungen gewichten, um z.B. eine höhere Präzision der Oberleitungssensoren abzubilden. Da die Umfelderkennung Grundlage für die Regelung des Fahrzeugs ist, führt die präzisere Information direkt zu einer höheren Qualität des Fahrens. Zudem ist durch zwei funktionsfähige Systeme eine Sicherheitsebene eingebaut, die den spontanen Ausfall einer Sensorik abfangen kann.

Der Wechsel von Streckenabschnitten mit und ohne Oberleitung ändert den Betriebszustand. Durch die potentiell wechselnden Betriebszustände müssen Übergänge zwischen diesen Szenarien betrachtet werden. Der Wechsel von einem Abschnitt ohne Oberleitung auf einen Abschnitt mit Oberleitung stellt kein Sicherheitsrisiko dar. Durch die zusätzliche Sensorik kommt entweder Information hinzu (bei erfolgreicher Erkennung der Oberleitung) und somit wird redundanter Betrieb ermöglicht oder die Information bleibt gleich (bei erfolgloser Erkennung der Oberleitung). Kritischer kann der Wechsel von einem Abschnitt mit Oberleitung auf einen Abschnitt ohne Oberleitung werden. Ist die Umfelderkennung nur über Oberleitung möglich, führt der Wegfall der Oberleitung zu einem Zustand, in dem kein hochautomatisiertes Fahren mehr möglich ist und das Fahrzeug muss in einen sicheren Zustand überführt werden. Befindet sich das Fahrzeug dagegen im redundanten Betrieb kann über die klassische Sensorik der hochautomatisierte Betrieb aufrechterhalten werden.

Die zusätzliche Nutzung der Oberleitung als Redundanzebene erfolgt dabei transparent für Bediener, da hierdurch keine eigenständige neue Fahrfunktion realisiert wird. Vorhandene Bedienelemente für die Aktivierung hochautomatisierter Fahrfunktionen sowie die Übernahme der Kontrolle vom und Übergabe an den Menschen können weiterverwendet werden. Die Benutzung eines vorhandenen Stromabnehmers für den Oberleitungsbetrieb ist orthogonal zum hochautomatisierten Fahrbetrieb und nicht von diesem abhängig. Dies beschreibt insbesondere auch die Möglichkeit, dass Fahrzeuge ohne Stromabnehmer, aber mit entsprechender Sensorik zur Oberleitungserkennung und SAE-Stufe 4-fähiger Funktionalität diese zum hochautomatisierten Fahren nutzen können.

Die Analyse zeigt auf, dass die Oberleitung und die Erkennung dieser mittels geeigneter Sensorik, ein entscheidendes Potential für den Fortschritt in der Automatisierung von Lkw bietet. Die potentiell deutlich robustere Spurführung ermöglicht bisher ungenutzte Möglichkeiten zur Sensorfusion.

3.3 Konzeptionierung des Sensorsetups und des Architekturentwurfs für hochautomatisierte O-Lkw

Hoch- und vollautomatisiertes Fahren erfordern den Einsatz von Sensorik und eine hochvernetzte E/E-Architektur. Die am häufigsten verwendeten Sensoren sind in Tabelle 2 beschrieben.

Sensorik	Nutzung	Vorteile	Nachteile
GNSS-Empfänger	GPS-Empfänger zur funkbasierten Positionierung des Fahrzeugs	<ul style="list-style-type: none"> - Gute Standortbestimmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine optische Umfelderkennung - Qualität abhängig von Satellitenkonstellation
Kamera	Optische Informationsgenerierung durch (farbige) Bilder Nutzung: Detektion von Objekten und Fahrbahn	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Auflösung - Farbinformation - Kompakt - Robust - Günstig - Hohe Winkelreichweite - Gute Objekterkennung 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig robust gegenüber Dunkelheit und Witterung - Schlechte Geschwindigkeitsauflösung - Keine 3D-Information
LIDAR	Optische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung durch dreidimensionales Laserscanning Nutzung: Kollisionsvermeidung	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Robustheit ggü. Tageszeit/Witterung - 3D-Information - Robust - Hohe Reichweite - Hohe Auflösung 	<ul style="list-style-type: none"> - Teuer - Keine Farbinformation
Radar	Optische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung mittels Mikrowellen Nutzung: Kollisionsvermeidung	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Robustheit gegenüber Tageszeit/Witterung - 3D-Information - Kompakt - Robust 	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige Auflösung - Keine Farbinformation

		<ul style="list-style-type: none"> - Günstig - Hohe Reichweite - Hohe Geschwindigkeitsauflösung 	
Infrarot/Ultraschall	Entfernungsmessung durch Reflexion von Schallimpulsen Nutzung: Kollisionsvermeidung im Nahbereich	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Robustheit gegenüber Tageszeit/Witterung - Kompakt - Robust - Günstig 	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige Auflösung - Keine Farbinformation - Geringe Reichweite (nur Nahbereich)

Tabelle 2: Fahrzeugsensorik zur Positionierung und Objekterkennung

Bei einem hochautomatisierten Fahrzeug erfordert die Betrachtung möglicher Degradationserscheinungen besondere Aufmerksamkeit. Unter Degradation ist hier die Reduzierung der technischen Möglichkeiten zu verstehen, die dem Fahrzeug zur Verfügung stehen. Diese können durch technische Defekte am Fahrzeug, durch tageszeitliche Einflüsse, Witterungseinflüsse oder Defekte an der Infrastruktur ausgelöst werden. In jedem Fall ist trotz der Funktionseinschränkungen ein sicherer Betrieb zu gewährleisten. In Tabelle 2 ist zu erkennen, dass besonders die Fahrbahnerkennung abhängig von Witterungseinflüssen ist. Mögliche Degradationserscheinungen der Sensorik sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Darstellung orientiert sich an der in [5] verwendeten Systematik¹³, bei der den möglichen Ursachen für Degradation der relevante Effekt für Automatisierungsfunktionen zugeordnet wird. Jede Ursache wird hinsichtlich ihrer Kritikalität bewertet. Die Kritikalität wird qualitativ durch die Zuordnung eines jeden Effekts zu einer von vier Stufen bewertet:

- Stufe 0: Die Degradation hat keinen wesentlichen Effekt auf die hochautomatisierte Fahrfunktion. Das Fahrzeug kann seine Fahrt hochautomatisiert ohne Einschränkungen fortsetzen.
- Stufe 1: Einzelne Komponenten sind in ihrer Funktion eingeschränkt. Diese Einschränkungen können durch andere Komponenten kompensiert werden, so dass das Fahrzeug seine hochautomatisierte Fahrt fortsetzen kann.
- Stufe 2: Die Degradation führt zu Funktionseinschränkungen, die Einschränkungen beim Betrieb des hochautomatisierten Fahrzeugs erfordern.
- Stufe 3: Die Funktionseinschränkungen sind so gravierend, dass eine hochautomatisierte Weiterfahrt nicht möglich ist.

Ursache	Effekt	Kritikalität	Technisch-konzeptionelle Gegenmaßnahmen
Direkte Sonneneinstrahlung	Blendung der Kamera Kamerabilder überbelichtet, Fahrspur kann evtl. nicht mehr detektiert werden	1	Kompensation durch Lidar & Radar,
Dunkelheit	Reduzierter Kontrast im Kamerabild. Fahrspur kann evtl. nicht mehr detektiert werden	1	Kompensation durch Lidar & Radar,

¹³ Siehe Abschnitt 4.4.

Leichter Regen	Geringe Störungen im Kamerabild und ggf. bei Lidarmessungen	0-1	Geeignete Montage der Sensoren, ggf. Einsatz von Scheibenwischern, robustere Sensordatenauswerteverfahren, Kompensation durch Radar
Leichter Schneefall			
Starkregen	Starke Störungen im Kamerabild und bei Lidarmessungen	2-3	Geeignete Montage der Sensoren, Einsatz von Scheibenwischern, Reduktion der Geschwindigkeit, Fahrtunterbrechung
Starker Schneefall			
Graupel, Hagel			
Nebel	Reduzierte Sichtweite der Sensoren	0-1	Reduktion der Geschwindigkeit, Kompensation durch Radar
Sensorausfall	Sensorinformation fehlt	2	Einsatz redundanter Sensoren, Nutzung von Karteninformation über den Fahrleitungsverlauf, Fahrtunterbrechung
Verschmutzung der Sensorik	Sensorinformationen unvollständig oder verfälscht	1	Einsatz redundanter Sensoren, geeignete Montage der Sensoren, Blickrichtung nach hinten oder hinter der Windschutzscheibe

Tabelle 3: Degradationserscheinungen [5]

Um O-Lkw hochautomatisiert betreiben zu können, ist es demnach notwendig die Spur auch bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen und Straßensituationen sicher zu erkennen. Dafür ist es denkbar die bereits vorhandenen Sensoren zu nutzen und mit weiteren zu ergänzen oder gänzlich neue Technologien zu implementieren. Im Folgenden werden die technischen Möglichkeiten im E/E-Architekturentwurf beschrieben.

Werden vorhandene Sensoren genutzt, müssen nur die Software-, und keine Hardwarekomponenten geändert werden. Da Hardwareänderungen größeren Entwicklungs- und Kostenaufwand bedeuten, sind Softwareupdates eine vergleichsweise kostengünstige Variante. Zudem ist eine Nachrüstung der Funktionalität durch Updates auch nach der Produktion möglich. Die bereits bestehende Sensorverarbeitung müsste so angepasst werden, dass sie in der Lage ist, das Oberleitungssystem oder die Masten zu erkennen, zu lokalisieren und deren Beziehung zur Fahrbahn zu kennen. Von den bereits verwendeten Sensoren eignen sich auf Grund der Reichweite sowie der Positionierung im Fahrzeug Kameras, Lidar und Radar am besten (siehe Tabelle 2).

Da sich die Oberleitung kontrastreich zum Himmel absetzt, ist die Erkennung über die Kamera bei normalen Wetterbedingungen in guter Qualität möglich. Auch die Masten der Infrastruktur lassen sich sicher detektieren und eignen sich somit als Landmarken. Wie in Tabelle 3 gezeigt, gestaltet sich die Detektion bei schlechten Witterungsbedingungen jedoch schwierig. Kameras ermöglichen damit nur bei guten Witterungsbedingungen Redundanzen durch die Erkennung der Infrastruktur. Auch bei Einsatz von Lidar-Sensoren zur Detektion der Masten oder des Fahrdrahtes ergeben sich ähnliche Probleme durch Witterungsbedingungen. Die Detektion des Fahrdrahtes durch das bei Lkw vorhandene Radar ist durch den geringen Durchmesser des Fahrdrahtes und aufgrund der Ausrichtung des Radars nur schwer möglich. Die Radarsensorik entfaltet ihre Vorteile jedoch in der Erkennung der Masten auf Distanzen von bis zu 300 m [30]. Auch bei schlechten Witterungsbedingungen können die Metallmasten robust erfasst werden, andere Materialien werden heute kaum noch verwendet [31]. Die Spurerkennung im Fahrzeug erfolgt primär über die Kameras, sowie das Lidar. Dadurch eignet sich von den bestehenden Sensoren das Radar am besten dazu, eine weitere Redundanzebene zu der Spurerkennung und der Selbstlokalisierung beizutragen.

Abbildung 7 zeigt ein mögliches Szenario mit Erkennung der Masten. Durch das Radar wird erkannt, wo die Masten sich in Relation zum Fahrzeug befinden. Durch die bekannte Position der Masten lässt sich die Selbstlokalisierung in Längs- sowie Querrichtung deutlich verbessern. Ebenfalls kann durch die Position der Masten die Fahrbahnmitte, unabhängig von den Fahrbahnmarkierungen, bestimmt werden.

Bei schlechten Witterungsbedingungen ist dies mit Kameras und Lidar-Sensoren nur eingeschränkt möglich. In Tabelle 3 ist zu sehen, dass Radar unanfällig für viele Degradationsursachen ist und somit als technisch-konzeptionelle Gegenmaßnahme eingesetzt werden kann.

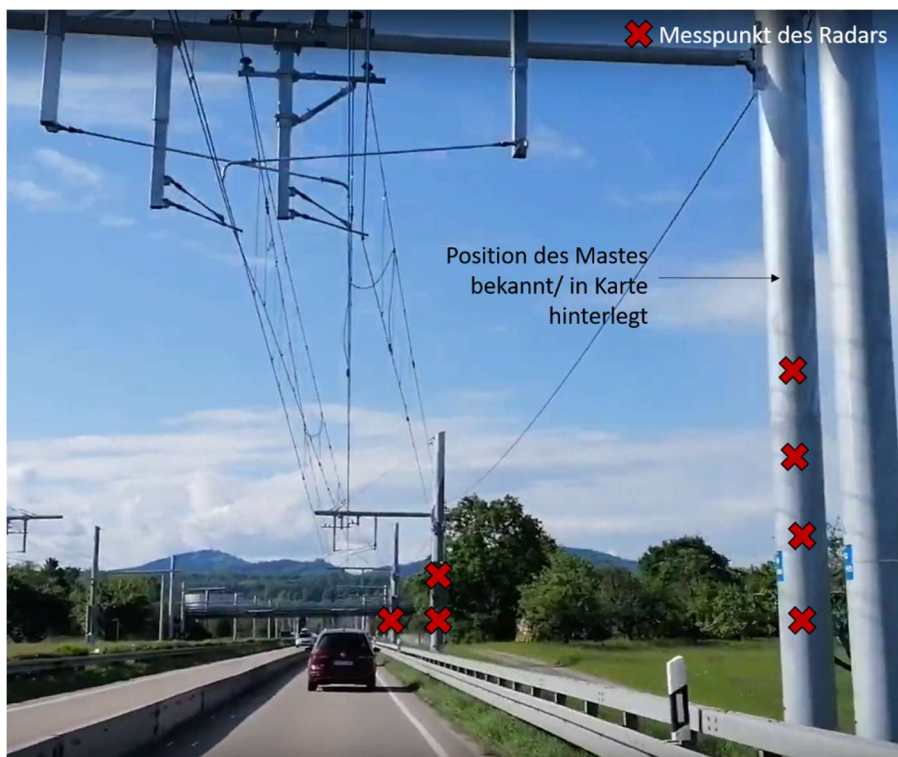


Abbildung 7: Landmarken-konzept basierend auf Radar

Zusätzliche Sensoren beeinflussen neben Softwareänderungen auch die Hardware am Lkw. Im Vergleich zur Nutzung bereits vorhandener Sensoren führt der erhöhte Entwicklungsaufwand und die Anschaffung der zusätzlichen Sensoren zu höheren Kosten pro Lkw. Während bereits vorhandene Sensoren nicht primär dafür ausgelegt sind das Oberleitungssystem zu erkennen und daher in der Erkennungsqualität beschränkt sind, ermöglichen speziell dafür entwickelte und angebrachte Sensoren eine höhere Erkennungsrate. Ein zusätzlicher Sensor könnte eine weitere Kamera oder ein Lidar mit Ausrichtung auf die Oberleitung sein. Nach [2] verfügen die auf der Teststrecke eingesetzten Lkw mit Dachstromabnehmer bereits über eine Detektion des Fahrdrabtes. Die genaue technische Umsetzung ist nicht bekannt, aber das Patent von Siemens [32] legt nahe, dass die Oberleitung durch einen Lidar-Sensor detektiert wird. Durch die geringe Distanz zwischen Sensor und Fahrdrabte, sowie die bessere Positionierung eignen sich beide Konzepte als technische Gegenmaßnahme zu mehreren auftretenden Degradationserscheinungen in Tabelle 3. Beide beschriebenen optischen Methoden, sind jedoch kostenintensiv. Lidar ist mit einem hohen Anschaffungspreis von mehreren hundert Euro deutlich

teurer als Kameras, welche bereits ab ca. 10 Euro verfügbar sind, dennoch benötigen beide Sensoren eine rechenintensive Nachbearbeitung der aufgenommenen Bilder oder Punktwolken. Zu beiden Sensoren kommen die Kosten für die Integration ins Fahrzeug hinzu.

Eine Detektion der einzelnen Fahrdrähte durch zwei auf dem Dach des Lkw angebrachte Infrarot (IR)- Sensoren oder Ultraschall (US)-Sensoren ist möglich. Bei der Option der IR-Sensoren entsteht die gleiche Degradation der direkten Sonneneinstrahlung wie bei Kameras, siehe Tabelle 3. Da die Kameras und die IR-Sensoren allerdings nicht gleich ausgerichtet sind, kann es nicht bei beiden Sensoren gleichzeitig zu dieser Degradation kommen. Bei den US- Sensoren entsteht das Problem, dass durch die Bewegung des Lkw die Sender und Empfänger nicht an gleicher Stelle sein können. Je nach Geschwindigkeit und Position des Lkw muss sich der Empfänger an einer anderen Position befinden. Bei beiden Konzepten entsteht durch die unterschiedliche Funktionsweise zu den bereits vorhandenen Sensoren eine weitere Redundanzebene.

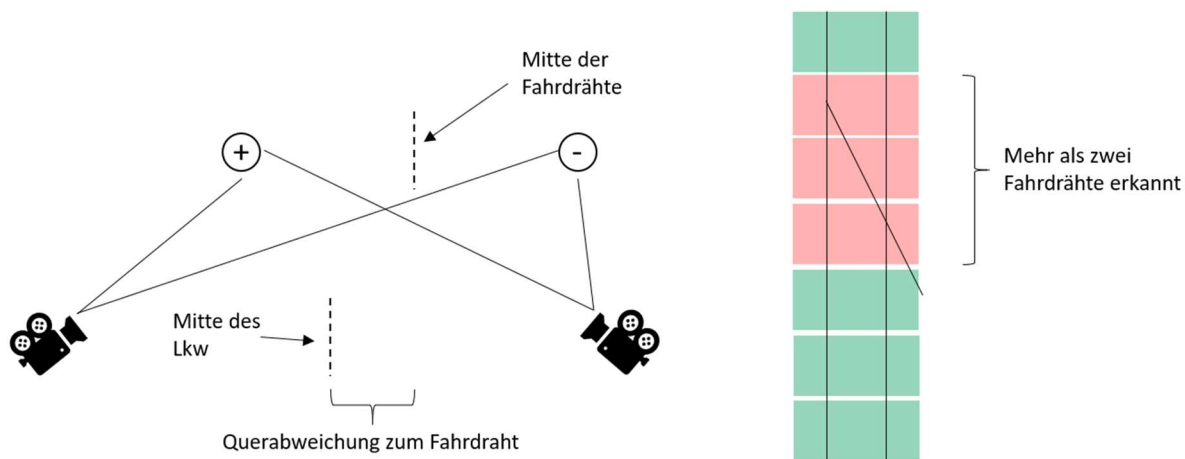


Abbildung 8: Erkennungskonzept basierend auf IR-Sensoren

Abbildung 8 zeigt auf der linken Seite ein Konzept zur Detektion der Fahrdrähte mit IR-Sensoren. Die beiden IR-Sensoren werden auf dem Dach des Lkw angebracht. Sie sind so positioniert, dass sie jeweils von gegenseitigen Richtungen auf die Fahrdrähte zeigen. Mittels der Entfernung der Fahrdrähte zu den Sensoren kann die Differenz zwischen der Mitte der Fahrdrähte und der Lkw-Mitte berechnet werden. Wenn der Verlauf der Fahrdrähte bekannt ist, kann somit die Mitte der Fahrbahn bestimmt werden. Da nicht immer sichergestellt werden kann, dass nur die Fahrdrähte vorliegen, bedarf es der Abschätzung, ob die gemessenen Werte benutzbar sind oder nicht. Dies ist auf der rechten Seite von Abbildung 8 dargestellt. Der Fahrdraht wird mittels des vorgestellten Sensorkonzeptes für ein Zeitintervall detektiert. Werden nur zwei Drähte detektiert, kann die Position und Ausrichtung der Fahrdrähte benutzt werden. Wird in diesem Zeitintervall ein weiterer Draht detektiert muss entweder entschieden werden, ob die Detektion trotzdem nützliche Werte liefert oder die Fahrdrähte nicht eindeutig detektiert werden können. Es ist denkbar, dass das vorgestellte Konzept ebenfalls mit Kameras oder US-Sensoren benutzt werden kann. Von den unterschiedlichen Sensoren sind jedoch IR-Sensoren mit Anschaffungskosten von wenigen Euro am günstigsten.

Die Oberleitung wird mit Gleichstrom betrieben. Dadurch entsteht um die Fahrdrähte ein statisches magnetisches Feld. Eine Messung des magnetischen Feldes, analog zum Konzept mit IR-Sensoren, ist theoretisch möglich. Durch § 3a Abs. 1 Satz 1 26. BImSchV ist die maximale magnetische Feldstärke einer Oberleitung mit Gleichstrom auf 500 µT begrenzt. Durch die geringe magnetische Feldstärke und die Höhe des Fahrdrahtes ist eine Messung in der Praxis jedoch nur schwierig umzusetzen.

Um die Erkennung des Oberleitungssystems zu vereinfachen, kann auch die Infrastruktur angepasst werden. Zusätzlich zu den Kosten am Umfelderkennungssystem der Lkw entstehen hier Kosten für die Infrastruktur. So können z.B. visuelle Landmarks angebracht werden, die eine Erkennung durch Kameras deutlich vereinfachen. Mittels einer hinterlegten Karte kann so eine Navigation durch Landmarken-basierte Lokalisierung erfolgen, wie sie in der Automatisierung der Industrierobotik bereits etabliert ist. Ein weiterer Ansatz ist der Einsatz von aktiven Beacons am Oberleitungssystem und entsprechenden Empfängern am Fahrzeug. Diese Beacons sind Signalstationen, die auf dem Übertragungsprinzip Bluetooth Low Energy (BLE) eine energiesparende Vernetzung eines Senders und Empfängers realisieren können. Um eine Fahrzeug-Selbstlokalisierung durch Beacons zu ermöglichen, wird Kontakt zu mehreren Beacons gleichzeitig benötigt.

Das aufgebaute Oberleitungssystem kann auch mit einer C2X-Kommunikation ausgebaut werden, um mit dem Fahrzeug, und eventuell weiteren Fahrzeugen auf dem Streckenabschnitt, zu kommunizieren. Vor allem an kritischen Stellen, wie bei notwendigen Spurwechseln, Reisverschlussverfahren oder Einfädeln in bestehenden Verkehr, kann die Infrastruktur relevante Informationen an das Fahrzeug weitergeben, die durch die eigenen Sensoren aufgrund von Verdeckung oder zu geringer Sensorreichweite nicht zuverlässig erkannt werden können. Ebenfalls ist denkbar, dass die bestehende Infrastruktur als Messpunkt für Witterungsbedingungen dient. So kann beispielsweise an kritischen Stellen, z.B. an Brücken, die Temperatur und die Windgeschwindigkeit gemessen und gegebenenfalls eine Warnung an Fahrzeuge weitergeleitet werden.

Infrastrukturänderungen gehen mit hohen Kosten einher und sind unflexibel. Bei der Selbstlokalisierung durch Sender an Masten bedarf es zusätzlich zur Infrastruktur an neuer Sensorik im Fahrzeug. Durch die hohen anfallenden Kosten und die geringe Menge an davon profitierenden Fahrzeugen wird eine weitere Veränderung der Infrastruktur zur Verbesserung von hochautomatisierten Fahrfunktionen in dieser Vorstudie nicht betrachtet.

Wenn nur vorhandene Sensoren benutzt werden bietet das Radar das größte Potential. Durch die Detektion der Infrastruktur mittels Radar kann eine neue Redundanzebene, besonders zur Selbstlokalisierung in Längsrichtung, geschaffen werden. Ein nächster Schritt könnte die Simulation der Spurerkennung und Selbstlokalisierung mit Hilfe von Landmarken im Vergleich zur klassischen Spurerkennung sein. Da es sich um eine Softwareänderung handelt, ist es denkbar diese auch in Pkw mit Radar einzusetzen.

Um die Fahrdrähte mit neuen Sensoren zu detektieren und damit die Selbstlokalisierung in Querrichtung zu verbessern, ist die effizienteste der vorgestellten Methoden die Detektion der Fahrdrähte mittels IR-Sensoren. Eine Erkennung durch Kameras und Lidar ist auch möglich, aber mit höheren Kosten verbunden. Eine Detektion des magnetischen Feldes um die Fahrdrähte ist technisch sehr aufwändig.

Von den vorgestellten Konzepten ist eine Kombination aus einer Softwareerweiterung sowie die Verwendung neuer Sensoren am vielversprechendsten. Die Kombination von Landmarkenerkennung durch Radar und Detektion der Fahrdrähte mittels IR-Sensoren bietet das größte Potential, um die Selbstlokalisierung zu verbessern. So könnte auch bei schlechten Witterungsbedingungen die Erkennung in Längs- sowie Querrichtung deutlich verbessert und robuster gestaltet werden. Dies ermöglicht potentiell die weitere Automatisierung von Lkw in bisher nicht automatisierbaren Szenarien.

3.4 Energiesystem auf der Strecke

Aus Sicherheitsgründen wird ein Oberleitungssystem auf Bundesstraßen und Autobahnen als Gleichspannungs-Niederspannungssystem betrieben; das eHighway-System arbeitet hier mit 670V. Dadurch ergeben sich Parallelen zu bereits eingesetzten Systemen bei Straßenbahnen, die ebenfalls im Bereich unterhalb von 1 kV

betrieben werden. Im Gegensatz dazu kommt bei elektrifizierten Bahnstrecken eine Spannung von 15 kV zum Einsatz. Daraus folgt, dass das eHighway-System im Vergleich zur Eisenbahn deutlich höhere Ströme bereitstellen muss, um die gleiche elektrische Leistung bereitzustellen, wodurch gleichzeitig auch die thermischen Verluste ansteigen.

Unter der Annahme der Randbedingungen in Tabelle 4 ergibt sich der, in Tabelle 5 dargestellte, Energiebedarf für verschiedene Szenarien innerhalb eines einzelnen Streckenabschnitts.

Größe	Wert	Bemerkung
Nennspannung DC	670 V	eHighway
Nennleistung el. Einzelfahrzeug	350 kW	Auslegung des Antriebs
Nennleistung Einzelfahrzeug Freifahrt	120 kW	Leistungsbedarf zur Aufrechterhaltung der Freifahrt
Nennstrom el. Einzelfahrzeug	522 A	Stromaufnahme für Auslegungsmaximum
Nennstrom Einzelfahrzeug Freifahrt	179 A	Stromaufnahme zur Aufrechterhaltung der Freifahrt

Tabelle 4: Annahmen zum Energiebedarf eines Streckenabschnitts

Szenario	Streckenlänge (in m)	Nennstrom / Strecke	Nennleistung / Strecke
Fahrzeugabstand 50m, volle Speisung	100	1045 A	700 kW
	200	2089 A	1400 kW
Fahrzeugabstand 50m, nur Freifahrt	100	358 A	240 kW
	200	716 A	480 kW
Fahrzeugabstand 25m, volle Speisung	100	2089 A	1400 kW
	200	4179 A	2800 kW
Fahrzeugabstand 25m, nur Freifahrt	100	716 A	480 kW
	200	1433 A	960 kW

Tabelle 5: Energiebedarf Szenarien

In der vorhergehenden Übersichtsrechnung werden zur Vereinfachung keine Verluste durch Übergangswiderstände, Wandlerwirkungsgrade sowie Lastwechsel betrachtet. Dennoch wird bereits mit als ideal angenommenen Daten deutlich, dass bei Maximalauslastung der Oberleitungsstrecke (Konvoifahrt mit geringem Abstand bei maximal zulässiger Geschwindigkeit) höhere Anforderungen an die Oberleitung als beim Eisenbahnbetrieb gestellt werden.

Der höchste Strombedarf entsteht dort auf Schnellfahrstrecken und liegt über der Dauerstrombelastbarkeit des eingesetzten Fahrdrahtes (1500A in Klasse 4 Oberstrombegrenzung für schnellfahrende Reisezüge, Dauer-

strombelastbarkeit des Fahrdrahtes Re330 ca. 450A). Während im Bahnbetrieb durch die hohe Zuggeschwindigkeit sowie den Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Zügen die Dauerbelastung der Oberleitung unter die zulässige Dauergrenze abgesenkt werden kann, ist dies für O-Lkw nicht gegeben. Abhilfe kann hier entweder durch Mehrdraht-Oberleitungen geschaffen werden, die die notwendigen Ströme auf mehrere parallele Fahrdrähte aufteilen, oder durch die selektive Entfernung einzelner Lkw von der Oberleitung. Für diese intelligente Organisation der Streckenteilnehmer ist eine V2X-Kommunikation notwendig. Lkw, die hochautomatisiert fahren können, können diese Kommunikation realisieren. Zudem bietet die Oberleitung den hochautomatisierten Fahrzeugen auch bei deren voller energietechnischer Auslastung einen Nutzen. Fahrzeuge, die nicht hochautomatisiert fahren und in diesem Szenario auch nicht geladen werden können, werden die Oberleitungsstrecke nicht nutzen können.¹⁴

Soll im Fahrbetrieb bei Freifahrt gleichzeitig noch die Traktionsbatterie über die Oberleitung aufgeladen werden, so ist von einer Verdoppelung der benötigten Ströme auszugehen (aktuell im Markt verfügbare Elektrobusse können ihre Traktionsbatterie mit maximal 120kW aufladen). Es kann also angenommen werden, dass mit aktuell verfügbarer Energietechnik kein kompletter Lkw-Konvoi gleichzeitig geladen und in Freifahrt betrieben werden kann.

Dennoch lassen sich bereits aus der vorangegangenen Abschätzung Randbedingungen für die Ausgestaltung des Energiesystems ableiten:

- Verwenden einer möglichst hohen Spannung zur Verringerung von Transportverlusten;
- Einsatz von Mehrdraht-Oberleitungen zur Verringerung von thermischen Verlusten;
- Einsatz von Aluminium- statt Kupferleitungen auf Grund der höheren Dauerstrombelastbarkeit;
- Engmaschige Einspeisung, um die notwendigen Ströme pro Speiseabschnitt gering zu halten.

3.5 Hochautomatisierter Betrieb und Mensch-Maschine-Interaktion

Die hier untersuchten Funktionen des hochautomatisierten Fahrens sind den SAE-Stufe 4 und 5 zuzuordnen. Bei SAE-Stufe 5 entfällt die Notwendigkeit eine Person im Fahrzeug mit der Fahraufgabe zu betrauen und damit auch der Bedarf einer Fahrkabine. SAE-Stufe 4 unterscheidet sich von der nächsten Automatisierungsstufe durch die Bedingung, dass eine Übernahme der Fahraufgabe durch eine Person möglich ist. Die Fahrzeuge der SAE-Stufe 4 erlauben es dem Fahrenden grundsätzlich während der Fahrt gänzlich anderen Tätigkeiten nachzugehen bis hin zum Schlafen. Für die O-Lkw ist dies besonders interessant, da die Zeit unter der Oberleitung als Lenkzeitunterbrechung oder Ruhepause (siehe Abbildung 9) bewertet werden kann. Für die Fahrenden entfällt somit der Bedarf nach maximal 4,5 Stunden Fahrzeit 45min. Pause auf einem Rast- oder Parkplatz zu machen, auch die tägliche Ruhezeit könnte teilweise oder vollständig in hochautomatisierter Fahrt verbracht werden. Vorteilhaft ist dies für die Fahrenden, da diese durch die Lenkzeitunterbrechung und die dadurch entstehende Verzögerung noch höherem Termindruck ausgesetzt sind. Zudem sind durch die hochautomatisierte Fahrt mehrere und flexiblere Pausen möglich als im manuellen Betrieb. Dadurch kann die Sicherheit der manuellen Fahrt erhöht werden, da die Fahrenden Untersuchungen zufolge deutlich weniger übermüdet und abgelenkt sind [33]. Diese Effekte resultieren auch in Effizienz- und Kostenvorteilen für die Transport- und Logistikunternehmen. Die gesetzlich vorgeschriebene Mindestlenkzeitunterbrechung beträgt bei einer maximal 9-

¹⁴ Dies schränkt auch bei einer möglichen Nutzungsbasierten Finanzierung im Markthochlauf die Einnahmequellen ein.

stündigen Fahrtzeit 45 Minuten. Damit entfallen in diesem Szenario mindestens 8,3% der gesamten Betriebszeit des Lkw auf Pausen.

Nach [4] gab es im Jahr 2016 1.1 Millionen Lkw-Fahrende. Auf Basis dessen wird im Folgenden eine Abschätzung des Potentials der Technologiekombination in Bezug auf den Fahrendenmangel vorgenommen. Es wird dabei angenommen, dass die Oberleitungsinfrastruktur in Kombination mit der Sensorik des Lkw eine als Lenkzeitunterbrechung anerkannte Pause unter Fahrdraht ermöglichen. Die erzielbare Effizienzsteigerung ist im Wesentlichen von der Anzahl so ausgestatter Lkw abhängig. Dennoch ergibt sich bei einer Fahrtzeit von 9 Stunden mit der Notwendigkeit diese für mindestens 45 Minuten zu unterbrechen, folgende Erkenntnis:

Nach [4] fehlen jährlich 13.000 zusätzliche Lkw-Fahrende. Um diese Differenz auszugleichen würde unter den genannten Annahmen, eine jährliche Adaptionsrate der Technologie von 14,23 % ausreichen, um diesen Mangel auszugleichen. Studienergebnisse liefern die Erkenntnis, dass bereits heute die Pause von den Lkw-Fahrenden bevorzugt in der Lkw-Kabine verbracht wird [4]. Dies stützt die These, dass die Fahrenden den Verbleib auf der Strecke positiv bewerten würden. Ebenfalls wird durch die Möglichkeit Pausen während bestimmten Fahrtabschnitten einzulegen die Flexibilität des Berufsalltags erhöht, was ebenfalls in [4] als notwendige Gegenmaßnahme hinsichtlich des Fahrendenmangels angeführt wird. Wie in der Beispielrechnung dargestellt, kann bereits eine teilweise, schrittweise steigende Übernahme der vorgeschlagenen Technologie einen großen Einfluss auf den Fahrendenmangel bedeuten. Diese schrittweise Adaption der Branche basiert insbesondere auf den großen Investitionen, die eine solche Umrüstung für einzelne Unternehmen bedeuten kann und daher zeitlich gedehnt werden muss.

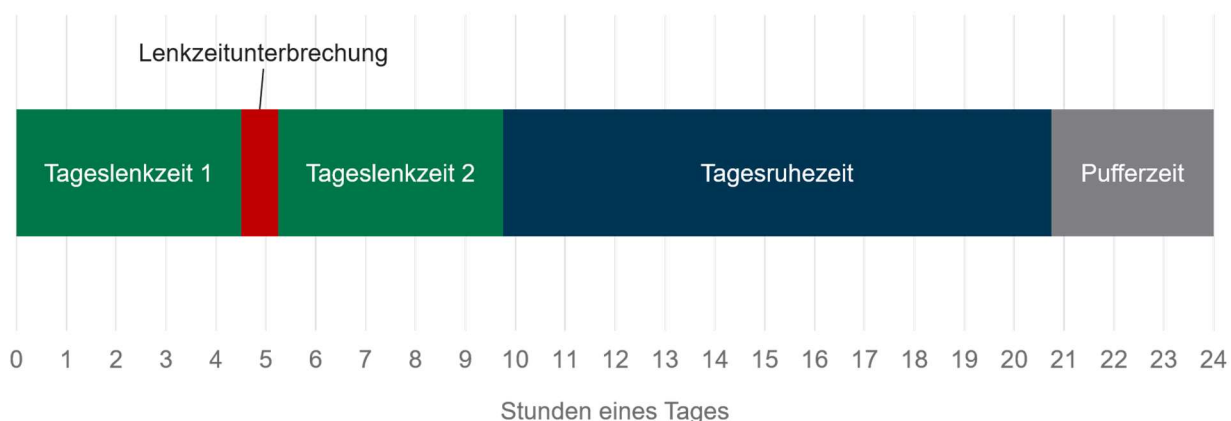


Abbildung 9: Gesetzlich vorgegebene Tageslenk- und Ruhezeiten für Lkw-Fahrende, Quelle: [33], eigene Darstellung

Die SAE-Stufe 4 grenzt sich definitionsgemäß von der SAE-Stufe 3 dadurch ab, dass komplette Fahrten ohne Eingriff des Fahrenden hochautomatisiert bewältigt werden. Da aber flexible Routenführung, unsichere Wetterbedingungen und andere externe Einflussgrößen die Route während der Fahrt veränderlich machen, kann die Funktionalität der SAE-Stufe 4 auch auf Betriebsszenarien begrenzt werden [34]. Der Fahrende ist im hochautomatisierten Betrieb der SAE-Stufe 4 so lange ein Passagier, bis das System aus vordefinierten Gründen seine Grenzen erreicht. Dann kann die Person zur Übernahme des Fahrsystems aufgefordert werden. Im Oberleitungsverkehr liegt eine solche Situation bei Verlassen der Oberleitungsstrecke vor. Wenn die Fahrdrähte nicht mehr als Eingangsgröße für die Trajektorienplanung vorhanden sind, ist die hochautomatisierte Fahrfunktion nicht mehr genauso robust wie unter der Oberleitung. In einem solchen Fall muss schließlich der

Fahrende informiert werden, um zu übernehmen¹⁵. Damit kann der O-Lkw unter der Oberleitung SAE-Stufe 4 hochautomatisiert fahren, ohne Oberleitung muss diese Fähigkeit aber nicht notwendigerweise gegeben sein.

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, kann der Hinweis zur notwendigen Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrenden über bereits vorhandene Bedienelemente erfolgen. Die Daten, die einen solchen Hinweis auslösen, können aus unterschiedlichen Quellen stammen bzw. durch Fusion dieser gewonnen werden. Wenn der Fahrende die Information erhalten soll, dass die Oberleitungsstrecke endet und deshalb die Übernahme des Fahrsystems notwendig ist, sind verschiedene Sensorkonzepte möglich. Zunächst ist davon auszugehen, dass die Oberleitungsstrecken in den Kartendaten verfügbar sind, daher ist eine sichere Informationsquelle gegeben. Darüber hinaus kann die Information über die eingesetzte Sensorik zur Erkennung der Oberleitung erfolgen, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Durch Kommunikationsnetzwerke zwischen Fahrzeugen sowie von Fahrzeugen und Infrastruktur kann darüber hinaus eine zusätzliche Informationsquelle entstehen. V2X-Kommunikation erhält insbesondere im Falle einer ungeplanten Unterbrechung der Fahrt unter der Oberleitung eine hohe Bedeutung. Dies kann im Falle einer blockierten Spur durch Unfälle oder Sperrungen von Bedeutung sein. Da diese Information eventuell mit weniger zeitlichem Abstand zum Übernahmzeitpunkt durch den Fahrenden zusammenhängt, ist es notwendig, dass das Fahrzeug bei nicht erfolgreicher Übernahme dann zunächst in den regelkonformen, risikolosen Zustand überführt wird. Dies ist algorithmisch in der Systemsteuerung zu implementieren.

Das BMVI entwickelte ein Gesetz zum autonomen Fahren, das im Juli 2021 in Kraft trat. Deutschland ging mit diesem Entwurf als erstes Land den Schritt Einsatzszenarien sowie Anforderungen an hochautomatisierte Fahrzeuge (SAE-Stufe 4 und 5) gesetzlich zu regeln. Zukünftig ist die Integration des Gesetzes im gesamten europäischen Rechtsraum angestrebt. Es werden darin technische Anforderungen, Prüfverfahren, Datenverarbeitung, Nachrüstungsmöglichkeiten, die Erprobung sowie Regelungen für den Betrieb formuliert. Damit liegt die gesetzliche Grundlage zur Realisierung von hochautomatisiertem Fahren unter einer Oberleitung vor, unter Einhaltung der darin verordneten Spezifikationen kann der Betrieb wie in dieser Studie entwickelt, realisiert werden. Die Strecke des Pilotprojekts eWayBW eignet sich zur Erprobung des SAE-Stufe 4 Betriebs, da die beiden Oberleitungsabschnitte von einem Streckenabschnitt ohne Oberleitungsinfrastruktur unterbrochen sind (siehe Abbildung 2) und somit die Übernahmeszenarien geeignet erforscht werden könnten.

3.6 Betrieb von hochautomatisierten Oberleitungsfahrzeugen im nichtöffentlichen Verkehr

Die Automatisierung von Betriebshöfen und Industriegelände weist durch die Chance Betriebs- und Personalkosten zu sparen besonders hohe Attraktivität auf. Durch den Entfall der Gültigkeit der Straßenverkehrsordnung (StVO) sind die Möglichkeiten hochautomatisierten Verkehr dort zu realisieren rechtlich bedeutend höher und bereits vielerorts erprobt [35].

Die Pilotstrecke von eWayBW verbindet insbesondere die Werksgelände zweier Papierfabriken sowie Spediti-
ons- und Logistikbetriebe. Unter diesen Voraussetzungen ist die technische Realisierbarkeit von hochautomatisiertem Oberleitungsverkehr im Bereich von Betriebshöfen besonders interessant. Zusätzlich könnte Oberleitungsbetrieb auf einem Containerterminal oder an Güterumschlagsplätzen des kombinierten Verkehrs hohe ökonomische Potentiale entfalten.

¹⁵ Erfolgt dies nicht, muss ein Fahrzeug der SAE-Stufe 4 dazu fähig sein, sich ohne menschlichen Eingriff in einen sicheren Haltezustand zu bringen, beispielsweise Abstellen auf dem Seitenstreifen.

In der Studie von Lauer und Tas [5] wird das Werksgelände im Gebiet des Projekts eWayBW untersucht. Besonders die, ständiger Veränderung unterliegenden, Lagerflächen und die Verschmutzung des Geländes werden hierbei als Herausforderungen klassifiziert. Während diesen Einschränkungen mittels geeigneter Flächenorganisation und Geländepflege begegnet werden kann, sind beengte Raumverhältnisse und Logistikkonstruktionen eine Schwierigkeit für die Oberleitungsserrichtung. Die Gelände einiger Betriebe sind daher womöglich nur durch entsprechende Umorganisation an die Oberleitung anknüpfbar.

Im Falle einer Eignung der Fläche eines Unternehmens kann die Oberleitungsinfrastruktur einige Vorzüge für die Automatisierung des Betriebshofs bieten. Die witterungsbedingten Einschränkungen und Degradations-szenarien bestehender Sensorik, kann über die Oberleitung robust realisiert und die Trajektorienplanung erleichtert werden. Ein weiterer Vorteil der Oberleitung auf dem Werksgelände ergibt sich durch die Möglichkeit der Integration weiterer Logistikfahrzeuge ins System.

Auch für Betriebshöfe und Werksgelände, die aufgrund ihrer Konstruktion oder Platzverfügbarkeit nicht mit Oberleitungen ausstattbar sind, ergeben sich Potentiale. Die Machbarkeit und Effizienz von hochautomatisierten Betriebshöfen, sind vielerorts in Erprobung. Ein gänzlich autonomer Logistikbetrieb oder auch autonome Containerumschlagplätze sind technologisch manuellen Abläufen überlegen, kosteneffizienter und bieten intelligenter Betriebsabläufe [36]. Die Errichtung eines Umschlagplatzes vor dem jeweiligen Werksgelände könnte genutzt werden, um die Ladung von den O-Lkw auf autonome, von der Oberleitung unabhängige Logistikfahrzeuge zu verladen. OH- oder O-BEV-Lkw könnten während dieses Vorgangs idealerweise noch geladen werden.

Die Potentiale die durch einen solchen hochautomatisierten, intelligenten Betrieb realisierbar sind, umfassen unter anderem:

- Kostenersparnis durch Reduktion des Personalbedarfs in Check-in, Check-out und Disposition sowie schnellere, effizientere Be- und Entladeprozesse;
- Optimierung der Platzbelegung und Auslastung durch hochautomatisierte Belegungsverfahren und V2X-Kommunikation, die Fahrzeug-, Kapazitäts- und Ankunftsstracking ermöglicht;
- Datenaustausch aller beteiligten Systeme und Komponenten für Predictive Maintenance, Verbesserung der operativen Abläufe durch entsprechende Lernverfahren;
- Flexible Auslastung und Fahrplansteuerung bei außerplanmäßigen Ereignissen;
- Sicherheit auf dem Betriebsgelände und geringerer Personenschaden bei Unfällen [37] [38].

Erste Umsetzungen und Pilotprojekte zeigen die Realisierbarkeit von hochautomatisierten Güterverkehrsumschlagplätzen oder Terminals auf. Der Bedarf der Oberleitung zur technologischen Umsetzbarkeit nimmt hier zunächst also keine zentrale Rolle ein. Vorteile und Chancen, die durch die Oberleitung entstehen können, entstehen vor allem durch die Möglichkeit zur vollumfänglichen Integration und Energiebereitstellung für In-tralogistiksysteme. Während die O-Lkw also unabhängig vom Stromabnehmersystem einen Nutzen aus der Oberleitung ziehen können, besteht die Möglichkeit Fahrzeuge, die in der Lagerhaltung und Betriebslogistik verwendet werden zusätzlich zu automatisieren und diese über die Oberleitung mit Energie zu versorgen. Bei intelligenter Betankung, Beladung und Auslastung von Flurförderfahrzeugen, Staplern oder weiteren Systemen lassen sich durch intelligente Steuerung Energie- und Wartungskosten einsparen.

4 Simulation der Auswirkungen auf das gesamte Mobilitätssystem

4.1 Einführung in die mikroskopische Verkehrsflusssimulation

Die Auswirkungen von O-Lkw auf den Verkehrsfluss wurden in den bisherigen Pilotprojekten (siehe Kapitel 2.3) nicht untersucht. Der Grund hierfür ist, dass die Rahmenbedingungen der Untersuchungsfelder dies aktuell noch nicht zulassen. Die Streckenabschnitte sind zu kurz und es sind zu wenige Testfahrzeuge im Einsatz, um eine Aussage über die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss treffen zu können. Ein Testfeld mit einem Oberleitungssystem in Kombination mit hochautomatisierten Lkw ist derzeit noch nicht im Einsatz. Die Betrachtung der Auswirkungen mithilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen bietet daher eine sinnvolle Alternative.

Die mikroskopische Simulation des Verkehrsflusses ist ein etabliertes Verfahren, vor allem zur Beurteilung der Wirkung von Maßnahmen auf die Leistungsfähigkeit einer Verkehrsanlage. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015 [39]) benennt in fast allen Kapiteln die Verkehrssimulation als alternatives Verfahren zur Bestimmung der Verkehrsqualität. Für die Simulation des Verkehrs auf deutschen Landstraßen und Autobahnen sind mehrere Simulationswerkzeuge grundsätzlich geeignet, was in den Forschungsprojekten FE 03.0460 *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen* [40] [41] [42] und FE 02.0418/2017/FRB *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen*¹⁶ nachgewiesen wurde. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem Einsatz zur Bestimmung der Verkehrsqualität. Beide Projekte empfehlen Parametereinstellungen zur Abbildung von deutschem Autobahn- bzw. Landstraßenverkehr.

Für die vorliegende Problemstellung wird PTV Vissim [43] eingesetzt, weil der deutsche Autobahn- und Landstraßenverkehr darin sehr gut abgebildet wird. Die Software PTV Vissim der PTV Group simuliert Verkehrsfluss mikroskopisch auf der Basis des psycho-physischen Fahrzeugfolgmodells von Wiedemann [41], bei dem jedem Fahrenden und jedem Fahrzeug individuelle Eigenschaften aus vorgegebenen Verteilungen zugeordnet werden. Das Querverhalten der Fahrzeuge wird von einem regelbasierten Fahrstreifenwechselmodell abgebildet, das sich auf Autobahnen an die Arbeit von Sparmann [44] anlehnt. Ergänzt werden diese Basismodelle durch zahlreiche Elemente taktischen Fahrverhaltens wie Kooperation zwischen Fahrzeugen oder vorausschauende Planung von Fahrmanövern. Erst durch diese Elemente wird die quantitativ exakte Nachbildung der Kapazität bei gleichzeitig realistischem Verhalten der Einzelfahrzeuge möglich. PTV Vissim ist das weltweit mit Abstand am häufigsten eingesetzte Simulationswerkzeug in der Verkehrstechnik.

In PTV Vissim ist das Fahrverhalten im Längs- und Querverkehr parametrierbar. Pkw, Lkw und ggfs. weitere Fahrzeugklassen werden dabei unterschiedlich parametrisiert, um die unterschiedlichen Eigenschaften abzubilden. Den Autoren sind keine Forschungen zur Abbildung von hochautomatisierten Lkw oder O-Lkw in PTV Vissim bekannt. Jedoch gibt es Veröffentlichungen zur Abbildung von vernetzten und autonomen Pkw (CAV, Connected and Autonomous Vehicles) in PTV Vissim. Zhao und Sun beschäftigten sich mit der Simulation von ACC und CAAC [45]. Atkins veröffentlicht 2016 eine Untersuchung zu den Auswirkungen von CAVs im Verkehr [46]. Die Studie untersucht Parameterwerte, die eine realitätsnahe Abbildung von CAV ermöglichen. Im Projekt CoEXist [47] werden beispielsweise Fahrverhaltensparameter für CAV ermittelt und publiziert. Aus dem Projekt resultierende Parametersätze für das Fahrverhalten von autonomen Fahrzeugen sind seither in PTV Vissim hinterlegt. Schmitt et al. [48] behandeln die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge im Stadtverkehr. Anhand eines vorfahrtsgeregelten Knotenpunkts werden verschiedene Durchsetzungsraten von autonomen

¹⁶ Schlussbericht derzeit noch unveröffentlicht.

Fahrzeugen in PTV Vissim simuliert. Die Simulationen zeigen eine Erhöhung der Kapazität bei höheren Durchsatzraten. Außerdem wird die Zeitdifferenz zur theoretischen, von der Software berechneten idealen Zeit zum Überqueren der Kreuzung durch den Einsatz hochautomatisierter Fahrzeuge reduziert. Das ist besonders bei hohem Verkehrsaufkommen auf dem Hauptstrom der Fall, was darauf zurückzuführen ist, dass hochautomatisierte Fahrzeuge eine geringere Zeitlücke zum Einordnen auf den Hauptstrom benötigen.

4.1.1 Simulationsaufbau

Zur Untersuchung von Oberleitungssystemen in Kombination mit hochautomatisierten Lkw wird ein Laborbeispiel einer typischen deutschen Autobahn in PTV Vissim aufgebaut. Die Modellstrecke ist ca. neun Kilometer lang und enthält zwei Anschlussstellen mit jeweils einer einstreifigen Ein- und Ausfahrt. Die Hauptfahrbahn hat drei Fahrstreifen. Die Verkehrsstärke wird in den Szenarien auf der Hauptfahrbahn von 1000 Kfz/h (Kraftfahrzeuge pro Stunde) auf 5000 Kfz/h in 15-Minuten-Intervallen um jeweils 500 Kfz/h gesteigert und wieder auf 1000 Kfz/h gesenkt. Auf beiden Einfahrten wird die Verkehrsstärke von 100 Kfz/h auf 500 Kfz/h in 15-Minuten-Intervallen um jeweils 50 Kfz/h gesteigert und wieder auf 100 Kfz/h gesenkt. Es fährt die gleiche Anzahl an Fahrzeugen an den beiden Ausfahrten ab, wie auf die Autobahn auffahren. Die Auswertung beginnt nach einem Vorlauf von 15 Minuten mit einem Zufluss von 1000 Kfz/h auf der Hauptfahrbahn und 100 Kfz/h auf den Einfahrten. Die Simulation hat einen Nachlauf von 15 Minuten mit ebenfalls einem Zufluss von 1000 Kfz/h auf der Hauptfahrbahn und 100 Kfz/h auf den Einfahrten. Der räumliche Vor- und Nachlauf beträgt einen Kilometer. Vor- und Nachlauf werden nicht in die Auswertung einbezogen. Es werden jeweils 10 Simulationsläufe ausgewertet. Abbildung 10 zeigt eine Skizze des Simulationsaufbaus.

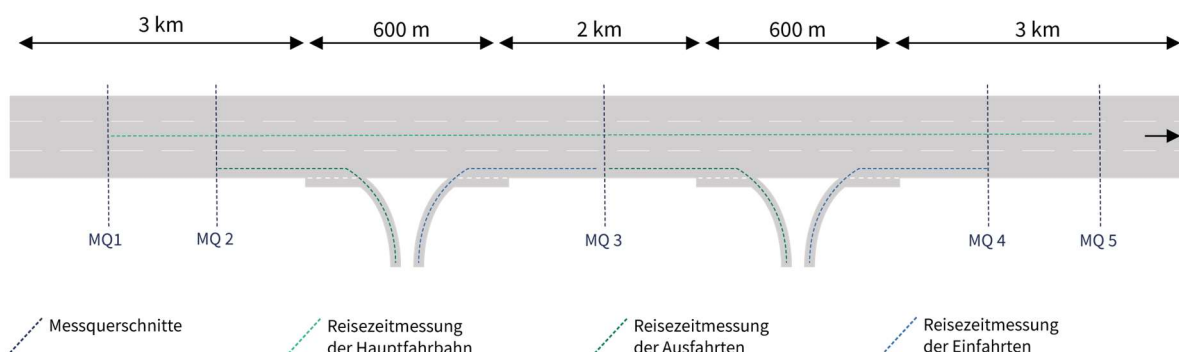


Abbildung 10: Skizze des Simulationsaufbaus, eigene Darstellung

Die Fahrverhaltensparameter für Pkw und Lkw werden zunächst entsprechend den Ergebnissen aus dem oben genannten Projekt [40] [41] [42] gewählt. Zusätzlich erfolgt eine visuelle Plausibilisierung des Verkehrsflusses in der Simulation und eine Plausibilisierung der aus der Simulation resultierenden Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Beziehungen anhand von früheren Forschungsergebnissen des IfV [49]. In diesem Schritt werden die Fahrverhaltensparameter für Pkw und Lkw angepasst. Die in der Simulation hinterlegten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen entsprechen einem allgemeinen Tempolimit von 120 km/h. Das Ergebnis ist ein Laborbeispiel einer deutschen Autobahn, das den heutigen Verkehr realitätsnah abbildet.

Zur Abbildung von hochautomatisierten und elektrifizierten Lkw wird zunächst ein dritter Fahrzeugtyp neben Pkw und Lkw angelegt. Diesem neuen Fahrzeugtyp werden die Fahrverhaltensparameter aus dem Projekt CoExist [47] zugeordnet. Das Fahrverhalten wird in einem späteren Schritt entsprechend der Annahmen der

Szenarien angepasst. Es wird die vereinfachte Annahme getroffen, dass alle hochautomatisierten und elektrifizierten Lkw in der Simulation die gleiche Ausstattung besitzen.

4.1.2 Szenarien

Die verkehrlichen Auswirkungen von hochautomatisierten und elektrifizierten Lkw werden anhand von zwei Szenarien simulativ untersucht und gegenübergestellt.

Szenario 1 umfasst die Automatisierung von Lkw nach aktuell bestehenden Regelungen. Die hochautomatisierten Lkw halten 50m Abstand, welcher nach § 4 Abs. 3 StVO für Lkw gefordert ist. Sie überholen auf dem simulierten Abschnitt mit Oberleitung nicht, da davon auszugehen ist, dass die notwendige Entkopplung vom Oberleitungssystem das Überholen sehr stark hemmt. Die hochautomatisierten Lkw haben eine schnelle Reaktionszeit und ihre Trajektorien weisen im Gegensatz zu Trajektorien von menschlichen Fahrern kaum Oszillationen auf. Sie haben kein kooperatives Fahrverhalten und sie bilden keine Platoons mit anderen hochautomatisierten Lkw.

Szenario 2 beschreibt ein Zukunftsszenario mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation für hochautomatisierte Lkw. Zusätzlich zu dem Fahrverhalten in Szenario 1 fahren die hochautomatisierten Lkw mit sehr geringen Zeitlücken und bilden Platoons. Dabei kann ein Platoon maximal sechs Fahrzeuge umfassen. Zusätzlich kooperieren die Fahrzeuge außerhalb der Platoons, um beispielsweise Lücken zur Durchführung von Fahrstreifenwechsel zu bilden.

In beiden Szenarien werden folgende **Variationen** untersucht:

- Schwerverkehrsanteile von 15% und 25% (SV 15% bzw. SV 20%)
15% Schwerverkehr ist ein durchschnittlicher Schwerverkehrsanteil für deutsche Bundesautobahnen (siehe bspw. [50]). 25% Schwerverkehr entspricht einem sehr hohen Schwerverkehrsanteil. Die Untersuchung beider Schwerverkehrsanteile ist sinnvoll, zum einen, weil die Thematik vor allem für vielbefahrene Autobahnen mit hohem Schwerverkehrsanteil relevant ist und zum anderen, weil davon auszugehen ist, dass die untersuchten Oberleitungssysteme Schwerverkehr induzieren bzw. eine Verkehrsverlagerung zur Folge haben werden.
- Anteil hochautomatisierter und elektrifizierter Lkw von 0%, 25%, 50%, 75% und 100% (E0, E25, E50, E75 und E100)

Bis zur vollständigen Marktdurchdringung hochautomatisierter und elektrifizierter Lkw wird einige Zeit vergehen. Eine verkehrstechnische Untersuchung verschiedener Durchdringungsraten liefert wichtige Erkenntnisse zum Verkehrsfluss in diesem Übergang. Ein Anteil von 0% hochautomatisierter und elektrifizierter Lkw (E0) stellt das Null-Szenario dar.

4.2 Auswirkungen auf den Verkehrsfluss

Zur Einschätzung der Auswirkungen eines Szenarios auf den Verkehrsfluss wird die Beziehung aus Geschwindigkeit und Verkehrsstärke betrachtet. Die Verkehrsstärke wird dabei in Pkw-Einheiten umgerechnet, um unterschiedliche Schwerverkehrsanteile besser miteinander vergleichen zu können. Schwerverkehr geht mit dem Faktor zwei in die Berechnung der Verkehrsstärke ein. Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit berechnet sich aus der Reisezeit und der zurückgelegten Strecke der Fahrzeuge und liefert im Gegensatz zu lokalen Geschwindigkeiten eine stabilere Aussage zur verkehrlichen Situation auf einer Fahrtbeziehung. In den Auswertungen werden die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten der Fahrzeugklassen Pkw, Lkw und O-Lkw, sowie die mittlere

Fahrtgeschwindigkeit aller Kfz betrachtet. Zusätzlich wird zwischen Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn und ein- bzw. ausfahrenden Fahrzeugen unterschieden (siehe Abbildung 10).

In Szenario 1 werden hochautomatisierte Lkw untersucht, die einen großen Abstand zum Vorderfahrzeug halten und nicht überholen. Bedingt durch die großen Abstände und das strikte rechts Fahren sinkt in Szenario 1 insgesamt die Kapazität auf dem rechten Fahrstreifen. Nähert sich die Verkehrsstärke der Kapazität, so kommt es an Engpässen zu Verkehrszusammenbrüchen. In den durchgeführten Simulationen stellen die Fahrstreifenwechsel an den Ein- und Ausfahrten solche Engpässe dar. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 11 bis Abbildung 13 dargestellt.

Abbildung 11 zeigt die Fahrtgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn. Insgesamt findet mit steigender Verkehrsstärke eine Annäherung der Pkw-Geschwindigkeiten an die Lkw-Geschwindigkeiten statt, es entsteht eine Verkehrssituation mit synchronisiertem Verkehr. Da O-Lkw einen viel größeren Abstand halten als konventionelle Lkw, ist die Kapazität in Simulationen mit O-Lkw geringer. Zusätzlich überholen O-Lkw nicht, sodass ihnen lediglich der rechte Fahrstreifen zur Verfügung steht. In den Simulationen mit 15% Schwerverkehr ist die Kapazität ausreichend, es kommt nicht zu Verkehrszusammenbrüchen. Bei 100% O-Lkw-Anteil ist jedoch eine erste Reduktion der Geschwindigkeiten der O-Lkw bei hohen Verkehrsstärken festzustellen. In den Simulationen mit 25% Schwerverkehr und hohen O-Lkw-Anteilen ist die Kapazität des rechten Fahrstreifens nicht ausreichend. Bei 100% O-Lkw-Anteil bricht der Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen bei etwa 4.500 Pkw-E/h zusammen. Mit sinkendem O-Lkw-Anteil steigt die Kapazität des rechten Fahrstreifens. Auch die konventionellen Lkw sind von diesem Geschwindigkeitseinbruch betroffen, wenn auch nicht so stark, da sie überholen können. Die Pkw auf der Hauptfahrbahn sind nur wenig von den Engpässen auf dem rechten Fahrstreifen betroffen.

Abbildung 12 zeigt die Fahrtgeschwindigkeiten ein- und ausfahrender Fahrzeuge. Das Einfahren auf die Autobahn wird unabhängig vom Lkw-Anteil und vom O-Lkw-Anteil mit zunehmender Verkehrsstärke schwieriger. Von dem allgemein sinkenden Geschwindigkeitsniveau mit steigender Verkehrsstärke sind auch auf der Einfahrt vor allem die Pkw betroffen. Wohingegen Pkw auf der Hauptfahrbahn kaum von dem O-Lkw-Anteil beeinflusst werden, ist bei den Pkw auf der Einfahrt eine deutliche Störung bei 25% Schwerverkehr und ab einem O-Lkw-Anteil von 50% festzustellen. Ab diesen Anteilen führt die Lkw-„Wand“ auf dem rechten Fahrstreifen zu einer Beeinträchtigung für auffahrende Fahrzeuge. Hiervon sind auch auffahrende Lkw und O-Lkw betroffen. Die Geschwindigkeitseinbrüche auf der Einfahrt wirken sich nur geringfügig auf den Verkehr auf der Hauptfahrbahn aus.

Der Verlauf der Fahrtgeschwindigkeiten der ausfahrenden Fahrzeuge entspricht in etwa den Fahrtgeschwindigkeiten der Hauptfahrbahn. Eine Beeinflussung des Verkehrsflusses auf der Hauptfahrbahn durch die Ausfahrt ist daher naheliegend. Im Gegensatz zu den Einfahrten führen Ausfahrengpässe zu Verkehrszusammenbrüchen auf der Hauptfahrbahn. Die Simulationen mit 25% Schwerverkehr und O-Lkw-Anteilen ab 50% zeigen solche Verkehrszusammenbrüche. Im Gegensatz zum Pkw-Verkehr auf der Hauptfahrbahn sind neben ausfahrenden Lkw und O-Lkw auch ausfahrende Pkw betroffen.

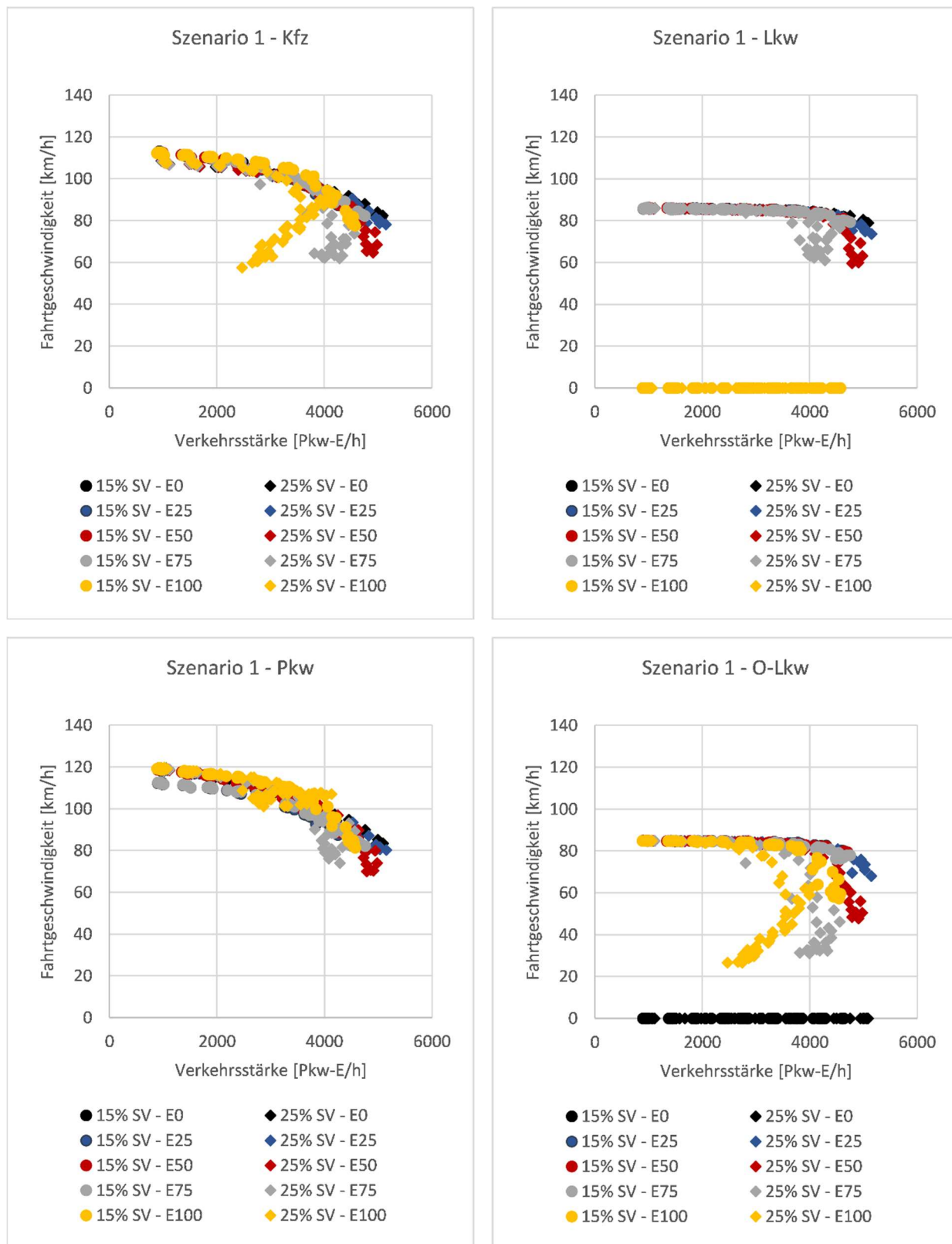


Abbildung 11: Fahrtgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn in Szenario 1, Quelle: Simulation, eigene Darstellung

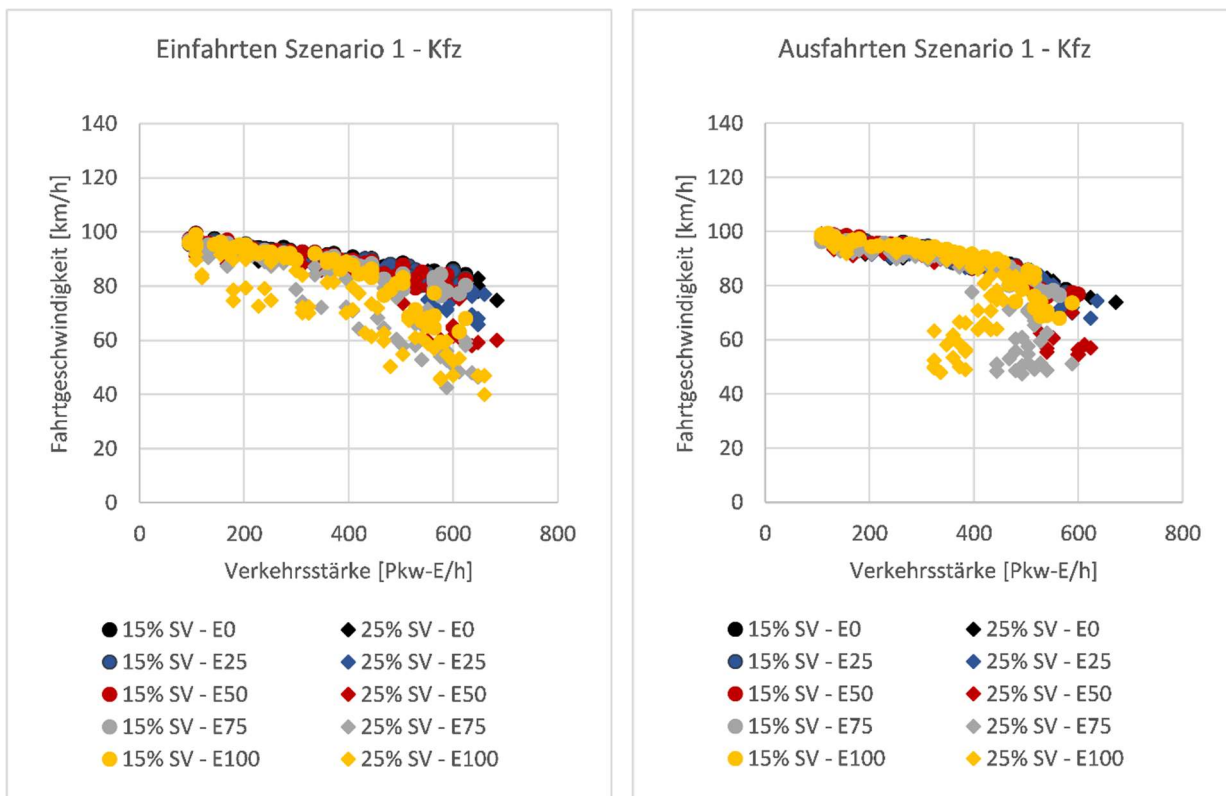


Abbildung 12: Fahrtgeschwindigkeiten ein- bzw. ausfahrender Fahrzeuge in Szenario 1, Quelle: Simulation, eigene Darstellung

Die Fahrstreifenaufteilung aus Szenario 1 ist in Abbildung 13 dargestellt, welche eine für Autobahnverkehr typische Verlagerung des Verkehrs von rechts nach links mit steigender Verkehrsstärke zeigt. Für 15% Schwerververkehrsanteil unterscheidet sich die Fahrstreifenaufteilung für unterschiedliche O-Lkw-Anteile nur geringfügig zum Referenzfall (E0). Für 25% Schwerververkehrsanteil ist eine Zunahme des Verkehrs auf dem rechten Fahrstreifen mit zunehmendem O-Lkw-Anteil zu sehen. Während Lkw überholen können, bleiben O-Lkw auf dem rechten Fahrstreifen, wodurch der Anteil rechts steigt.

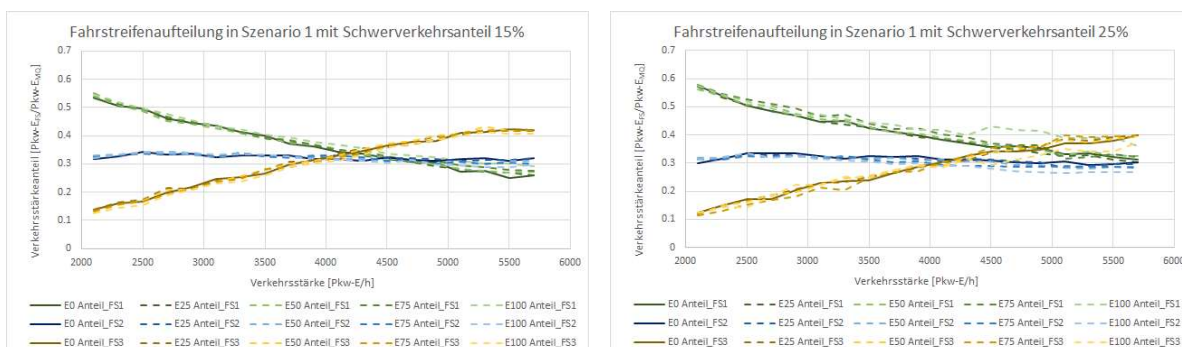


Abbildung 13: Fahrstreifenaufteilungen in Szenario 1, Quelle: Simulation, eigene Darstellung

In Szenario 2 werden hochautomatisierte Lkw untersucht, die mit sehr geringen Zeitlücken fahren und Platoons bilden. Anders als in Szenario 1 hat eine höhere Automatisierungsrate aufgrund des reduzierten Abstan-

des und des Platoonings eine positive Auswirkung auf die Kapazität. Es kommt für die betrachteten Verkehrsstärken und Schwerververkehrsanteile nicht zum Zusammenbruch des Verkehrs in Szenario 2. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 14 bis Abbildung 16 dargestellt.

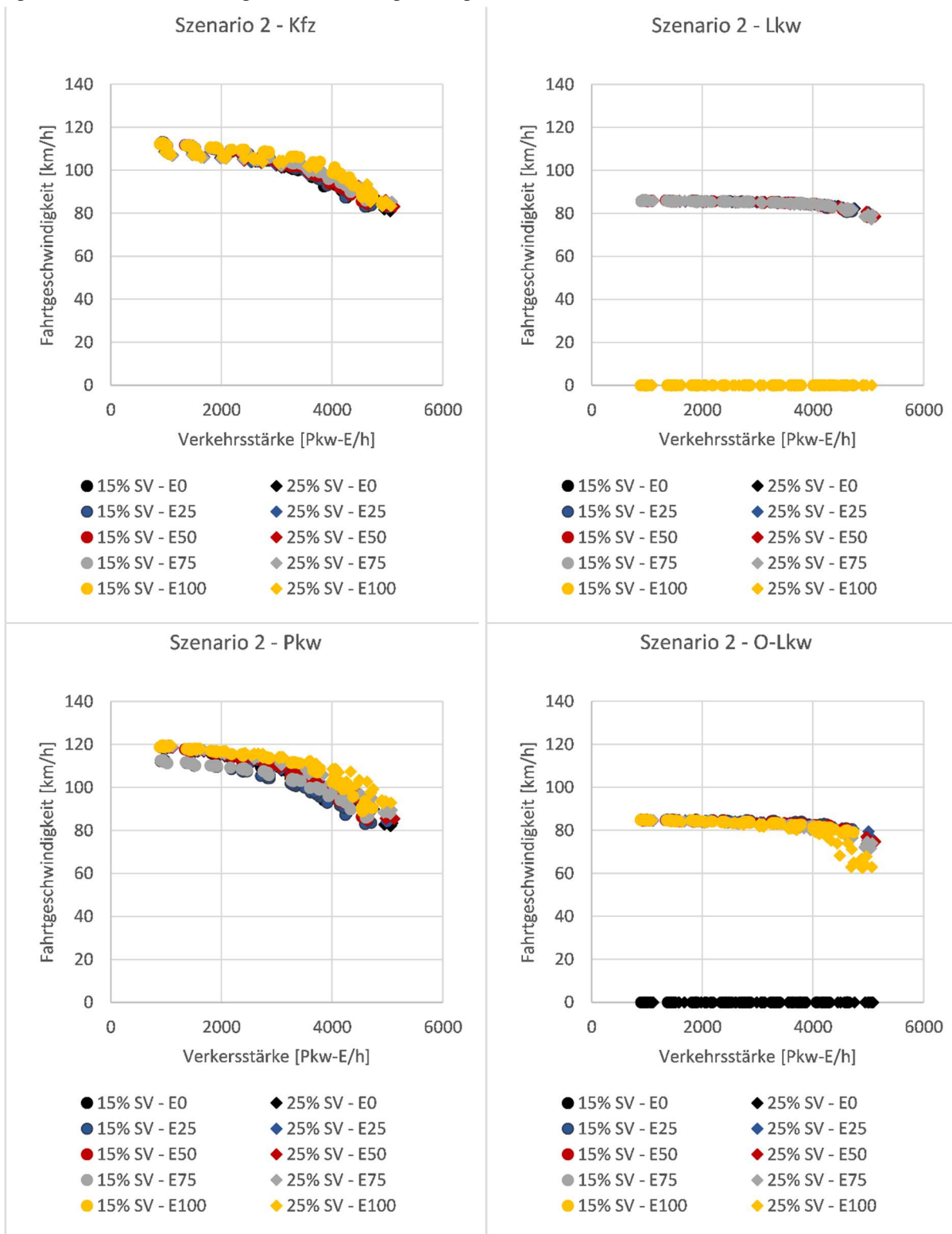


Abbildung 14: Fahrtgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn in Szenario 2, Quelle: Simulation, eigene Darstellung

Abbildung 14 zeigt die Fahrtgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn. Es findet wie auch in Szenario 1 mit steigender Verkehrsstärke eine Annäherung der Pkw-Geschwindigkeiten an die Lkw-Geschwindigkeiten statt,

was ein typisches Phänomen für Autobahnverkehr ist. Mit steigender Automatisierungsrate ist eine leichte Erhöhung der Kapazität feststellbar. Insgesamt variieren die Ergebnisse wenig für die untersuchten Schwerverkehrs- und O-Lkw-Anteile. Die Fahrtgeschwindigkeiten konventioneller Lkw werden für die untersuchten Schwerverkehrsanteile nicht vom O-Lkw-Anteil beeinflusst. Für O-Lkw ist lediglich bei 25% Schwerverkehr mit 100% O-Lkw-Anteil eine Reduktion der Fahrtgeschwindigkeit bei hohen Verkehrsstärken erkennbar. Da O-Lkw nicht überholen, steht ihnen lediglich der rechte Fahrstreifen zur Verfügung und die Kapazität des rechten Fahrstreifens ist nicht ausreichend bei 25% Schwerverkehrsanteil. Konventionelle Lkw weichen auf den mittleren Fahrstreifen aus, weswegen es lediglich in Simulationen mit 100% O-Lkw-Anteil zum Zusammenbruch auf dem rechten Fahrstreifen kommt. Die Fahrtgeschwindigkeiten der Pkw werden vor allem durch konventionelle Lkw auf dem zweiten Fahrstreifen beeinflusst. Ein steigender O-Lkw-Anteil führt zu einer zunehmenden Konzentration der Lkw auf dem rechten Fahrstreifen und damit zu einer Erhöhung der Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten.

Abbildung 15 zeigt die Fahrtgeschwindigkeiten ein- und ausfahrender Fahrzeuge. Szenario 2 zeigt für alle untersuchten Schwerverkehrs- und O-Lkw-Anteile wenig Beeinflussung einfahrender Fahrzeuge. Lediglich bei 25% Schwerverkehrsanteil und 100% O-Lkw-Anteil kommt es zu Zusammenbrüchen der Fahrtgeschwindigkeiten auffahrender Fahrzeuge bei hohen Verkehrsstärken. Diese Beeinträchtigung ist wie auch in Szenario 1 auf die Lkw-„Wand“ auf dem rechten Fahrstreifen zurückzuführen. Die Geschwindigkeitseinbrüche auf der Einfahrt wirken sich nur geringfügig auf den Verkehr auf der Hauptfahrbahn aus. Ausfahrende Fahrzeuge zeigen unabhängig vom Schwerverkehrs- und O-Lkw-Anteil die gleichen Fahrtgeschwindigkeitsverläufe. Es kommt in den durchgeführten Simulationen zu keinen negativen Auswirkungen auf ausfahrende Fahrzeuge in Szenario 2.

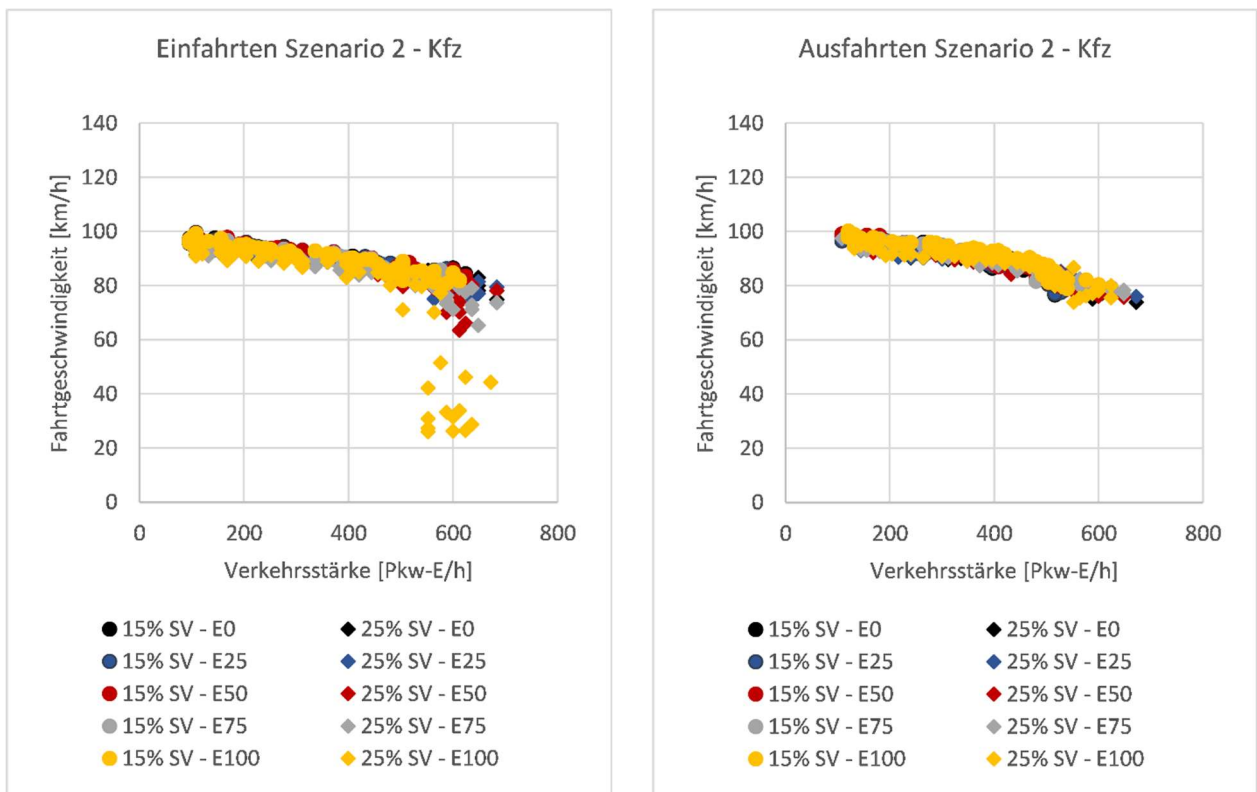


Abbildung 15: Fahrtgeschwindigkeiten ein- bzw. ausfahrender Fahrzeuge in Szenario 2, Quelle: Simulation, eigene Darstellung

Die Fahrstreifenaufteilung aus Szenario 2 ist in Abbildung 16 dargestellt. Mit steigendem O-Lkw-Anteil verlagert sich der Verkehr auf den rechten Fahrstreifen, da O-Lkw in den Simulationen an den rechten Fahrstreifen gebunden sind. Bei 25% Schwerververkehrsanteil ist die Nutzung des rechten Fahrstreifens bis zu 15 Prozentpunkte höher als im Referenzfall (E0). Diese Veränderung ist bereits bei niedrigen Verkehrsstärken erkennbar, steigt aber mit höherer Auslastung an.

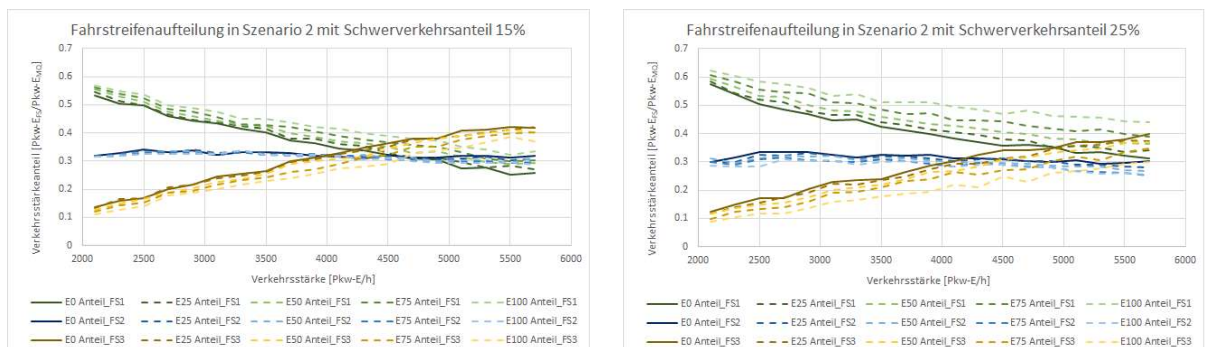


Abbildung 16: Fahrstreifenaufteilungen in Szenario 2, Quelle: Simulation, eigene Darstellung

Bedingt durch die großen Abstände und das strikte rechts Fahren sinkt in Szenario 1 insgesamt die Kapazität auf dem rechten Fahrstreifen. Dadurch verschlechtert sich die allgemeine Verkehrssituation bei hohen Verkehrsstärken mit zunehmendem Schwerverkehrs- und O-Lkw-Anteil. Mit zunehmendem O-Lkw-Anteil wird hingegen die Beeinflussung der Pkw durch Lkw auf dem mittleren Fahrstreifen reduziert und der Verkehrsfluss für Pkw wird dadurch verbessert. In Szenario 2 hat eine höhere Automatisierungsrate aufgrund des reduzierten Abstandes und des Platooning eine positive Auswirkung auf die Kapazität. Für die betrachteten Verkehrsstärken und Schwerverkehrsanteile kommt es in den Simulationen nicht zum Zusammenbruch des Verkehrs. Die Vorteile des verbesserten Verkehrsflusses für Pkw bei zunehmender Automatisierungsrate der Lkw bestehen auch in Szenario 2.

Bei einer geringen Automatisierungsrate der Lkw ist Szenario 1, welches ein sehr vorsichtiges Fahrverhalten von O-Lkw abbildet, denkbar. Mit steigender Automatisierung muss jedoch ein Fahrverhalten wie in Szenario 2 angenommen zum Einsatz kommen, da die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss ansonsten zu groß sind. Zudem sollte der Schwerverkehrsanteil die Kapazität des rechten Fahrstreifens nicht übersteigen.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass es sich bei den durchgeführten mikroskopischen Simulationen lediglich um Voruntersuchungen handelt, die auf vielen Annahmen beruhen. So sind beispielsweise keine Details zum tatsächlichen Fahrverhalten von O-Lkw bekannt. Auch fehlen in den Szenarien hochautomatisierte Pkw. Es ist anzunehmen, dass neben der Automatisierungsrate von Lkw auch Pkw zunehmend hochautomatisiert fahren und sich dadurch Änderungen im Verkehrsfluss ergeben. Dies bleibt weiter zu untersuchen.

4.3 Auswirkungen auf den Modalsplit und die Nachfrage

Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen können keine Aussage über die Auswirkungen auf den Modalsplit oder über Veränderungen der Verkehrsnachfrage treffen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf zu den verkehrlichen Auswirkungen hochautomatisierter O-Lkw. Im Folgenden werden mögliche verkehrliche Effekte kurz thematisiert.

Oberleitungssysteme für elektrifizierte Lkw haben den Vorteil, dass Ladezeiten eingespart werden können. Diese Zeiteinsparung könnte einen Anreiz darstellen, Zeitverluste durch Umwege in Kauf zu nehmen. Eine Verlagerung von Lkw-Verkehr auf Routen, die mit einer Oberleitung ausgestattet sind, wäre somit denkbar. Hochautomatisierte Lkw haben neben der Einsparung an Fahrerkosten den Vorteil, dass sie keine Ruhezeiten einhalten müssen und sich dadurch die Parkplatzsituation auf Raststätten entspannen würde. Zusätzlich sind unterschiedliche Effekte bei der Tageszeit der Fahrten denkbar.

Unterschiedliche Effekte bei der Verkehrsmittel- und Routenwahl, wie auch bei der Tageszeit der Fahrten können auch Auswirkungen auf den Personenverkehr haben. Da sich, vor allem bei Verlagerung des Schwerverkehrs auf einzelne ausgestattete Strecken oder selteneres Überholen der O-Lkw, auch die Reisezeiten von Pkw ändern können, sind auch Effekte auf die Routen- und Moduswahl von Personenverkehr denkbar.

Insgesamt würde Güterverkehr mit Hilfe von hochautomatisierten O-Lkw an Attraktivität gewinnen. Sowohl eine Zunahme des allgemeinen Transportaufkommens als auch ein Modal Shift von anderen Verkehrsmitteln auf die Straße sind denkbar.

5 Analyse von Umweltwirkungen und ökologischen Potenzialen

5.1 Darstellung des Potentials zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in Deutschland

Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung sieht vor, den Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2030 um 65% im Vergleich zu 1990 zu reduzieren, darüber hinaus ist bis 2045 die Treibhausgasneutralität zu erreichen. Um diese Ziele zu erreichen, ist die Emissionsreduktion im Verkehrssektor eine zentrale Maßnahme. Nutzfahrzeuge sind aktuell für etwa ein Drittel der vom Verkehr verursachten CO₂-Emissionen verantwortlich. Damit ist mittel- und langfristig alternative Antriebe alternativlos.

Ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu diesen Reduktionszielen liegt in alternativen Antriebstechnologien, die den bisher dominierenden Verbrennungsmotor ablösen sollen. Aktuell besteht die Fahrzeugflotte der Lkw zu über 94% aus Dieselfahrzeugen. Unter den alternativen Antrieben sind die meisten Fahrzeuge derzeit mit Elektromotoren ausgestattet, etwas seltener kommen Erdgas und Flüssiggas zum Einsatz, Hybride sind bisher in der Unterzahl. Neben diesen Alternativen befinden sich Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie für Lkw in der Entwicklung. O-Lkw bringen bezüglich ihrer Antriebsform eine höhere Flexibilität mit, da sie als Hybride oder vollelektrisch betrieben werden könnten. Um die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs voranzutreiben bestehen daher mehrere Möglichkeiten, die im Folgenden den dominierenden Dieselfahrzeugen gegenübergestellt und verglichen werden (siehe Tabelle 6).

	Diesel-Lkw	Flüssiggas Lkw	BEV Lkw	H ₂ BZ-Lkw	O-/OH-Lkw
<i>Antrieb</i>	Verbrennungsmotor mit Dieseltreibstoff	Erdgasantrieb mit Flüssiggas-Treibstoff (Kühlung von Erdgas auf -162°C)	Elektromotor mit Lithium-Ionen-Akku	Antrieb durch Brennstoffzelle, Treibstoff: gasförmiger Wasserstoff	Vollelektrisch oder Hybrid aus Elektro- und Verbrennungsmotor
<i>Reichweite Tankfüllung</i> <small>(Richtwert, Lkw mit 40t)</small>	2.500km	1.600km	500km	300-400km	Abhängig von Hybridantrieb und elektr. Fahrleistung
<i>Serienreife</i>	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
<i>Emissionen</i>	Hohe Treibhausgas-, und Luftschadstoffemissionen	22% weniger THG als Diesel, geräuscharm	Lokal emissionsfrei (bei erneuerbarem Strom), geräuscharm	Lokal emissionsfrei (bei grünem Wasserstoff), geräuscharm	Abhängig von Hybridantrieb und elektr. Fahrleistung
<i>Tankinfrastruktur</i>	Vorhanden	Unzureichend, < 20 Tankstellen	Nur wenige für Lkw geeignet	Ca. 100 Tankstellen, nur wenige für Lkw geeignet	Sehr wenige Oberleitungen auf Pilotstrecken
<i>Vorteile</i>	- Geringe Anschaffungskosten (Massenmarkt,	- geringere CO ₂ -Emissionen, niedrigere Luftschadstoffemissionen	- Lokal emissionsfrei - Geräuscharm	- Lokal emissionsfrei - Antriebsstrang	- Batterie kleiner und leichter - Unbegrenzte

	<ul style="list-style-type: none"> Gebrauchtfahrzeuge – Hohe Reichweite – Kalkulierbare Lebenszykluskosten, techn. Zuverlässigkeit – Infrastruktur vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> – kurze Betankungszeit – Kostenvorteil (niedrige Energiepreise) 	<ul style="list-style-type: none"> – effizienteste Energienutzung (hoher Wirkungsgrad des Elektromotors, Rekuperation) – weniger Verschleiß, geringe Wartungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ähnlich Verbrennungsmotor (Lieferantenstruktur) – Hohe Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> Reichweite im Oberleitungsnetz
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Geringer Wirkungsgrad – Hohe Emissionen – Volatiler Kraftstoffpreis 	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Anschaffungskosten – Schwere, große Tanks – Unsichere Fahrzeugrestwertentwicklung, Wartungskosten, Lebensdauer – Fehlende Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Investitionskosten – Schwere, große Batteriespeicher – Lange Ladezeit – Fehlende Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Investitionskosten – Geringe Energiedichte und -effizienz – Geräusch-Emissionen ähnlich Verbrenner – Fehlende Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Investitions-/Umrüstkosten – aufwändige Genehmigungs- und Bauverfahren – Fehlende Infrastruktur

Tabelle 6: Vergleich möglicher Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr [51] [3] [52] [53]

Die Nationale Plattform Mobilität [3] untersuchte für das Vorhaben der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs drei mögliche Szenarien der Elektrifizierung. Dazu zählen neben batterieelektrischen Antrieben, die OH-Lkw, allerdings ohne Betrachtung der Automatisierung sowie H₂BZ-Antriebe. Derzeit weisen vor allem elektrische Antriebe und Hybride aus elektrischen und konventionellen Motoren den höchsten Reifegrad auf. Für die H₂BZ-Technologie im Schwerlastverkehr sind im Rahmen von Forschungsprojekten noch einige technologische Fragestellungen zu klären. Aktuellen Prognosen zufolge könnte ein entsprechender Markthochlauf, im Falle einer Entscheidung für diese Technologie, erst gegen Ende des Jahrzehnts beginnen.

Für alle alternativen Antriebe ist die Energiebereitstellungskette für die Kraftstoffproduktion noch stark von fossilen Energieträgern abhängig, was den Beitrag zur Emissionsreduktion im Vergleich zum Diesel nicht wesentlich verbessert. Die Stromproduktion spielt eine entscheidende Rolle, damit die Fahrzeuge einen Beitrag zu den Klimazielen leisten können. Da diese Aufgabe jedoch hauptsächlich in der Energiewirtschaft erforscht und gelöst werden muss, gilt es weitere Potenziale zur Minderung von Schadstoffausstößen im Bereich des Güterverkehrs zu identifizieren, um diesen zeitnah ökologisch auszurichten. Dazu gehören unter anderem die Automatisierung des Straßengüterverkehrs sowie die intelligente Kombination von Verkehrsträgern im Transport- und Logistiksektor. Im Folgenden wird daher explizit der mögliche Beitrag von hochautomatisierten O-Lkw (der SAE-Stufen 4 und 5) auf die Klimaziele näher betrachtet.

5.2 Minderungspotenzial für Treibhausgase, Stickoxide und Erreichung der Klimaziele durch Automatisierung

Hochautomatisierte O-Lkw können Treibhausgase und Stickoxide zur Erreichung der Klimaziele senken, wenn sie technologisch entsprechend effizient gestaltet werden. Unabhängig von der Antriebstechnologie kann mittels Automatisierung über die Optimierung von Geschwindigkeit sowie Routen- und Spurwahl, vor allem im zählfließenden Autobahnverkehr, bis zu 20% der Emissionen im Vergleich zum menschlich gesteuerten Lkw ohne Assistenzsysteme reduziert werden [54]. Die Reduktion kann insbesondere durch V2X-Kommunikation erhöht werden, da Informationen in hoher Güte in Entscheidungen mit einbezogen werden können. Insbesondere durch entsprechend verhinderte Brems- und Beschleunigungsvorgänge sowie vermiedene Überholvorgänge kann die Einsparung erhöht werden. Ein weiterer Faktor, der die ökologische Effizienz steigern kann, ist die Vermeidung von Unfällen, die in über 90% der Fälle auf menschliche Fehler zurückzuführen sind. Die dadurch nicht entstehenden Staus, Rettungseinsätze und Folgeunfälle sowie die längere Lebenszeit der Lkw unterstützt die Treibhausgasverminderung zusätzlich.

Autonome Lkw der SAE-Stufe 5, die unabhängig von einer Oberleitung fahren, stehen technologisch und sicherheits- sowie zulassungsthematisch noch vor großen Herausforderungen und haben damit noch eine längere Vorlaufzeit bis zur Vermarktung. Durch die in Kapitel 3 beschriebene schneller erreichbare Marktreife von hochautomatisierten Lkw durch die Redundanzebene Oberleitung, können die in dieser Studie betrachteten Lkw einen wesentlich stärkeren Beitrag zur Reduktion der Emissionen im Güterverkehr leisten.

Ökonomische Faktoren (siehe Kapitel 6) können in Kombination mit ökologischen Einsparmöglichkeiten durch den hochautomatisierten Straßengüterverkehr eine Anreizwirkung zugunsten dessen im Modal Split des Güterverkehrs nach sich ziehen. Kritiker befürchten daher einen steigenden Zuwachs an Transporten auf der Straße im Vergleich zur Schiene oder Seefracht. Hochautomatisierte O-Lkw haben das Potenzial diesen Effekt bei entsprechender Gestaltung des Gesamtsystems abzumildern und insbesondere den kombinierten Güterverkehr, vor allem für die erste und letzte Meile zwischen Güterbahnhöfen oder Frachthäfen und Ursprungs- bzw. Zielort, zu stärken. Ein solcher Effekt setzt voraus, dass der Ausbau von Strecken mit Oberleitung gezielt für solche Pendelstrecken erfolgt, dieses Szenario wird in Kapitel 6.3 genauer erläutert. Die Kombination fördert die ökologisch und ökonomisch effiziente Verknüpfung der Verkehrsträger.

5.3 Beitrag zum Artenschutz und der Luftreinhaltung durch Automatisierung

Zusätzlich zu Treibhausgasemissionen unterliegt der Verkehrssektor auch den Grenzwerten für Luftschadstoffemissionen, dazu zählen neben Stickoxiden und Kohlenstoffmonoxid auch Ammoniak und Feinstaub. Der Ausstoß dieser Stoffe führt vor allem in Städten und Ballungsräumen zu Herausforderungen und beeinträchtigt die Luftqualität für Menschen, Tiere und Umwelt. An einigen Orten beeinträchtigen die Schadstoffe die Luftqualität in einem besonders hohen Ausmaß, was im Stadtgebiet Stuttgart bereits einige Male den sogenannten Feinstaubalarm zur Folge hatte [55]. Ausgelöst wird die hohe Schadstoffkonzentration in der Luft zum einen durch Reifen- und Bremspedalabrieb von Fahrzeugen und ist somit zunächst antriebsübergreifend problematisch. Insbesondere die Rekuperation, die energiebilanziell positiv ist, verursacht Feinstaubpartikel. Bei Verbrennungsmotoren kommen aber zum anderen hohe Abgaswerte hinzu, die bei bestimmten Wetterlagen hochkonzentriert in niedrigen Luftschichten vorliegen und als Hauptverursacher der Feinstaubereignisse gelten.

Neu veröffentlichte Leitlinien der WHO, die auch als gesetzlich bindende Vorschriften für die EU in Betracht kommen, verschärfen die Grenzwerte für Feinstaub (Reduktion um je $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ für größere und kleinere Partikel) und Stickstoffdioxid (von 40 auf $10\mu\text{g}/\text{m}^3$) stark [56]. Da der Verkehrssektor eine entscheidende Rolle in einer solchen Reduktion spielen muss, sind Konsequenzen in der Gesetzgebung zu erwarten.

Es ist auch beim Umstieg auf alternative Antriebe möglich, dass insbesondere für den Güterverkehr in Ballungsräumen Fahrverbote eingeführt werden können. Solche Verbotszonen haben einerseits zur Folge, dass vorgesehene Routen nicht mehr oder nicht in der geplanten Zeit zurückgelegt werden können. Die dadurch entstehenden Verzögerungen sind ressourcenintensiv, da sie nicht nur den Personal- und Kraftstoffverbrauch erhöhen, sondern auch Lieferverzögerungen verursachen können.

Hochautomatisierte Lkw können deutlich flexibler und kostengünstiger auf kurzfristige Routenänderungen reagieren. Durch eine angepasste Routenwahl bei Bekanntwerden einer Verbotszone, können Verzögerungen minimiert werden. Bei fahrerlosen Lkw entfällt zudem der Personalkostenzuwachs, der insbesondere bei Überschreitung der Lenkzeit eines Fahrenden überproportional wachsen kann. Ein weiterer positiver Effekt der Automatisierung in Bezug auf die Luftreinhaltung ist die entsprechende Anpassung der Fahrweise in besonders gefährdeten Gegenden. So kann die Fahrweise über entsprechende Algorithmen in diesen Gegenden emissionsarm gesteuert werden und entsprechend zuträglich für die Luftreinhaltung und damit für Gesundheits- und Artenschutz sein.

5.4 Wirkungsanalyse des Vorhabens auf die ökologische Gestaltung des Güterverkehrs

Die Automatisierung von O-Lkw wirkt sich in verschiedenen Aspekten auf Emissionen und Umwelt aus. Die Effekte, die sich daraus ergeben sind vor allem von der Gestaltung des Güterverkehrs hinsichtlich der Kombination von Verkehrsträgern, abhängig.

In den vorangegangenen Abschnitten wurden bereits die Potentiale der unterschiedlichen Lkw-Antriebsarten in Bezug auf Emissionsreduktion und Klimaziele dargestellt. Im Folgenden werden die Potentiale der Oberleitungstechnologie im Gesamtsystem des Güterverkehrs betrachtet. Diese Betrachtung kann insbesondere richtungsweisend für die Rolle der O-Lkw in diesem System sein.

Auch unter Verwendung der emissionsärmsten Antriebsstränge verursacht der Straßengüterverkehr mehr Schadstoffe und externe Kosten durch Lärm und Unfälle sowie Beeinträchtigungen für Natur und Landschaft im Vergleich zum Schienengüterverkehr [57].

Neben den Schadstoffemissionen lassen sich durch Automatisierung sowohl Lärm als auch Unfälle stark verringern. Wenn dies aber durch die wachsende Nachfrage im Gütertransport ein stetiges Verkehrsaufkommen auf der Straße bedeutet, erhöht dies dort trotzdem die Anzahl an Staus. Diese sind sehr energieintensiv, verursachen hohe Kosten in der Lieferkette und die Erweiterung des Autobahnnetzes bedeutet weitere Eingriffe in Natur und Umwelt. Diese Effekte legen nahe, dass die effiziente Kombination von Straßen- und Schienengüterverkehr eine bedeutsame Entlastung für das Gesamtsystem bedeuten kann.

Die intelligente Kombination von O-Lkw-Strecken und Schienengüterverkehr mit entsprechenden Umschlagzentren wäre ein ökologisch optimiertes Szenario. Vielbefahrene Pendelstrecken, wie etwa die Pilotstrecke des Projekts eWayBW können an Güterbahnhöfe angebunden werden, um längere Transporte zwischen den Verkehrswegen aufzuteilen. Aufgrund der besseren Umweltbilanz von Güterzügen können zusätzlich Emissionsreduktion und ein gesamtheitlich ökologischerer Transport erreicht werden. Weiterhin sind dadurch bereits im frühen Ausbaustadium der Technologie weitere Personaleinsparungen realisierbar. Der kombinierte

Verkehr erfordert jedoch einen stark optimierten Verkehrswegeplan, um die Flexibilität von Lkw mit der Effizienz von Schienengüterverkehr zu vernetzen.

Eine weitere Möglichkeit Technologien im Güterverkehr zu kombinieren, ist, wie in Kapitel 4 erläutert, die Verbindung von O-Lkw und Platooning. Beim Platooning für ein Oberleitungsszenario ist damit zumindest das Führungsfahrzeug ein hochautomatisierter O-Lkw, die Folgefahrzeuge müssen diese Ausstattung nicht unbedingt vorweisen. Mittels V2V-Kommunikation ist ein hochautomatisierter Lkw-Zug realisierbar. In dieser Ausprägung bildet die Oberleitungsinfrastruktur eine Redundanzebene, die den Fortschritt in der Platooning Technologie beschleunigen kann.

Platooning ist eine Möglichkeit durch den geringen Abstand günstige aerodynamische Bedingungen herzustellen, um so den Energieverbrauch und die Emissionen für den Gesamtzug zu reduzieren. Bei einem Abstand von 5m wäre eine Kraftstoffeinsparung von mehr als 20% bei den Folgefahrzeugen realisierbar [58]. Eine solche Einsparung senkt in der Folge auch die weiteren Schadstoffemissionen.

Der höhere Verkehrsfluss und die intelligente Spurführung, die im Platooning durch die sowieso notwendigen Kommunikationsnetze erreicht werden können, haben das Potential Staus zu verhindern und den Verkehrsfluss gleichmäßiger zu halten. Dadurch werden auch im Gesamtverkehrssystem ökologische Vorteile erzielt. Auch die Reduktion von Unfällen trägt zu weniger Staus bei. Diese Verminderung verbessert die Lebensdauer von Fahrzeugen, Verkehrswegen und Infrastruktur, vermeidet die Entstehung von Schrottteilen und senkt den Materialverbrauch. Dies trägt somit zur Steigerung der Umweltfreundlichkeit des Güterverkehrs bei.

Insgesamt bieten O-Lkw bei intelligentem Einsatz in Kombination mit weiteren Technologien und Mobilitätsformen im Güterverkehr einen wertvollen Baustein auf dem Weg zu Klimafreundlichkeit und Ressourcenschonung.

6 Ökonomische und sozialpolitische Veränderungen

Der Straßengüterverkehr, der in Deutschland etwa drei Viertel des gesamten Güterverkehrs ausmacht, hat seine Verkehrsleistung in den vergangenen 20 Jahren um mehr als 40% gesteigert und legt in Deutschland jährlich knapp 500 Mrd. Tonnenkilometer tkm zurück. Dabei entfallen über 20% auf den Transport von Konsumgütern zum kurzfristigen Gebrauch [1]. Insbesondere in diesem Bereich sorgen der überdurchschnittlich wachsende Online-Handel und die Erweiterung von Services im Versandhandel für stetig wachsende Transportvolumina [59]. Auch in den anderen Industriezweigen des Straßengüterverkehrs wird ein Anstieg prognostiziert.

Die Gründe für die Dominanz des heute üblichen Straßengüterverkehrs sind vielfältig. Grundsätzlich sind Lkw sehr flexibel hinsichtlich ihrer Routen und Transportmengen sowie unabhängig von Fahrplänen im Vergleich zum Schienen- oder Schiffverkehr. Es gibt eine große Anzahl an Transportdienstleistern, die unterschiedlichste Transportmodi anbieten. Am Markt besteht damit ein großes Angebot an Standard- und Spezialtransporten.

Die Betriebe sind europaweit vernetzt und organisieren Transporte häufig über Landesgrenzen hinweg. Dies führt dazu, dass der Straßengüterverkehr meist die günstigste und kurzfristigste Transportoption ist. O-Lkw sind durch die Abhängigkeit von der Infrastruktur weniger flexibel in der Routenwahl. Allerdings bleiben sie im Hinblick auf Warenarten und Transportmengen sowie durch die Unabhängigkeit von einem festen Fahrplan dem Schienenverkehr in der Flexibilität überlegen. Die Routenwahl kann zudem bei entsprechender Infrastrukturverfügbarkeit dynamisch an die Auslastung angepasst werden.

In Deutschland gibt es rund 15.000 Speditionen und etwa 3,3 Millionen Lkw, wobei kleine und mittelständische Unternehmen mit bis zu 50 Mitarbeitern und maximal 10 eigenen Lkw dominieren. Ein fester Bestandteil in der Branche ist das Leasing von Lkw, da auf konjunkturelle oder kurzfristige Effekte so flexibler reagiert werden kann und weniger Kapital gebunden ist. Zudem sind Lebenszykluskosten wie Wartung, Reparatur und Versicherung über das Leasing abgedeckt [60] [61].

In der gesamten Branche besteht ein akuter Mangel an Fachkräften im Güterverkehr. Die Gruppe der Berufskraftfahrenden bekundet aktuell ein Defizit von rund 45.000 Personen. In den nächsten Jahren scheiden zudem überproportional mehr Angestellte altersbedingt aus diesem Beruf aus, als sich in Ausbildung befinden. Die Verlagerung der Güter auf andere Verkehrsträger, wie See oder Bahn ist aktuell nicht in ausreichender Größenordnung möglich. Auch die Steigerung von Löhnen zur Attraktivitätssteigerung des Berufs kann dem demografischen Wandel nicht in angemessener Höhe entgegenwirken. Zudem können alternative Antriebe zwar zur Erreichung ökologischer Ziele beitragen, jedoch tragen sie nur marginal zur Lösung wachsender Transportvolumina und Fahrendenmangel bei. Aus diesem Grund sind massive technologische und infrastrukturelle Investitionen und Innovationen notwendig, um die Entwicklungen im Straßengüterverkehr beherrschbar zu machen [1].

OH-Lkw, wie sie bereits auf den unterschiedlichen Pilotstrecken in Deutschland erprobt werden, sind den im vorangegangenen Kapitel dargestellten Antriebsalternativen, bei entsprechend günstiger Ausgestaltung ökonomisch überlegen. Die zusätzlichen wirtschaftlichen Auswirkungen der Automatisierung werden in der folgenden Analyse untersucht.

6.1 Analyse der wirtschaftlichen Charakteristika des Gesamtsystems

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von hochautomatisierten O-Lkw sind im Rahmen einer Berechnung des Total Cost of Ownership (TCO) folgende Kosten über Gesamtnutzungsdauer relevant (siehe Abbildung 17):

- Transaktionskosten;
- Anschaffungskosten;
- Betriebskosten:
 - Fixe Betriebskosten: Personal, Steuern, Abgaben, Versicherung, Service
 - Variable Betriebskosten: Treibstoff, Energie, Mautgebühren;
- Instandhaltungskosten:
 - Inspektion, Wartung, Instandhaltung;
- Administrative Kosten:
 - Kapitalkosten, Einsatzsteuerungsaufwand;
- Verkaufserlös [62].

Personal- und Kraftstoffkosten machen bei Lkw heute den größten Anteil aus. Eine hochautomatisierte, kraftstoffsparende Fahrweise und Routenoptimierung können den Kraftstoff- und Energieverbrauch senken. Dies gilt sowohl für Verbrennungsmotoren, als auch für elektrisch oder hybrid betriebene Fahrzeuge. Die Steigerung der Energieeffizienz wirkt mittel- und langfristig auch reduzierend auf Energiepreise. Mittel- und langfristig kann diese Reduktion, insbesondere in Kombination mit weiterem Ausbau erneuerbarer Energieerzeuger, die Abhängigkeit von Energieimporten senken und gleichzeitig die Versorgungssicherheit erhöhen sowie Energieverteilungskonflikte verhindern.

Während diese Einsparungen bereits durch Assistenzsysteme und entsprechende Software realisierbar sind, bedarf es für wirksame Einsparung im Personalkostenbereich zumindest hochautomatisiertes Fahren der SAE-Stufe 4 oder Platooning-Lösungen. Für hochautomatisierte Fahrzeuge der SAE-Stufe 4 ist weiterhin eine Person im Fahrerhaus als Passagier notwendig, da die Fahraufgabe aber vom Lkw übernommen werden kann, sind heute vorgeschriebene Ruhe- und Pausenzeiten nicht mehr in diesem Maße relevant. Durch den Wegfall der Fahraufgabe ergibt sich ein höheres Sicherheitslevel und niedriges Stresspensum, was diesen Technologieifegrad attraktiver für entsprechendes Personal machen kann und damit den Fahrendenmangel verringern könnte. Zudem können der Person andere Aufgaben übertragen werden, die während der Fahrt zu erledigen sind, damit wird der Arbeitsplatz auch für Menschen mit anderen Ausbildungshintergründen eröffnet. Für autonome Lkw der SAE-Stufe 5 sind keine Personen mehr im Fahrzeug notwendig, Personalkosten wären damit verschwindend gering und fallen in deutlich geringerem Maße beispielsweise für Flottenleitstellen an [63].

Ein weiterer Vorteil, der durch fahrerlose Lkw und den Entfall der Lenkzeitunterbrechung entsteht, ist die höhere Verfügbarkeit eines jeden Fahrzeugs. Somit sind in der Gesamtflotte weniger Fahrzeuge für dieselbe Menge an Fracht notwendig. Für Flottenbetreiber und Logistikunternehmen ergeben sich hohe Einsparpotenziale. Zudem führt die Reduktion an Fahrzeugen und Pausenzeiten zu einer Entlastung der Verkehrswege und Parkflächen.

in Kapitel 3 diskutierten Konzepte, werden von deutschen Unternehmen gefertigt und sichern damit lokale Märkte und Arbeitsplätze [65].

Zudem verspricht die telematische Vernetzung eines Lkw die Möglichkeit Routen dynamisch anzupassen und bei Bedarf die Fahrzeuge einer Flotte umzuleiten, um so flexibel auf Ausfälle oder Zusatztransporte reagieren zu können. Eine entsprechende Disposition, die über eine Leitwarte gesteuert werden könnte, verursacht jedoch zusätzliche Kosten. Da sie aber flottenübergreifend eingesetzt werden könnte, wären Skaleneffekte realisierbar, die den Kostenanteil auf ein Fahrzeug gering ausfallen lassen würden.

Für die Umsetzung eines hochautomatisierten Betriebs von O-Lkw sind trotz der Einsparungen hohe Investitionen notwendig. Insbesondere ist der 5G-Ausbau entlang entsprechender Verkehrswege Voraussetzung für die Konnektivität, die hochautomatisierte Fahrzeuge oder vernetzte Platoons benötigen. Diese Investition in eine flächendeckende, zuverlässige Mobilfunkinfrastruktur kann jedoch nicht allein dem Güterverkehr zugeschrieben werden, da auch im hochautomatisierten Personenverkehr entsprechende Vernetzung essentiell ist.

Für O-Lkw ist auch die Infrastruktur in Form der Leitungen und Masten, die an den Streckenabschnitten gebaut werden müssen, kosten- und zeitintensiv. Schätzungen zufolge, die auf Basis der bisher realisierten Pilotprojekte veröffentlicht wurden, kostet die Infrastruktur, die aus den Masten, der zweipoligen Leitung, den Unterwerken und deren Anbindung an das Stromnetz besteht, zwischen 1,5 und 3 Mio. € pro Streckenkilometer. Abhängig sind diese Kosten vor allen Dingen von der dort abnehmbaren Strommenge, die wiederum die Obergrenze an Fahrzeugen pro Abschnitt vorgibt [14]. Oberleitungsinfrastruktur, die ausschließlich der Elektrifizierung des Verkehrs dient, muss etwa auf 3.000 – 4.000km ausgebaut werden, um das deutsche Autobahnnetz und die dort fahrenden O-Lkw in sinnvoller Länge zu versorgen [23] [66]. Für die Automatisierung sind durchgängige Oberleitungen notwendig, was im deutschen Autobahnnetz die Ausstattung von über 13.200 Streckenkilometer bedeutet. Aufgrund dieser Dimension sind besonders lukrative Strecken auszuwählen und einem unsystematischen Ausbau des Gesamtnetzes vorzuziehen.

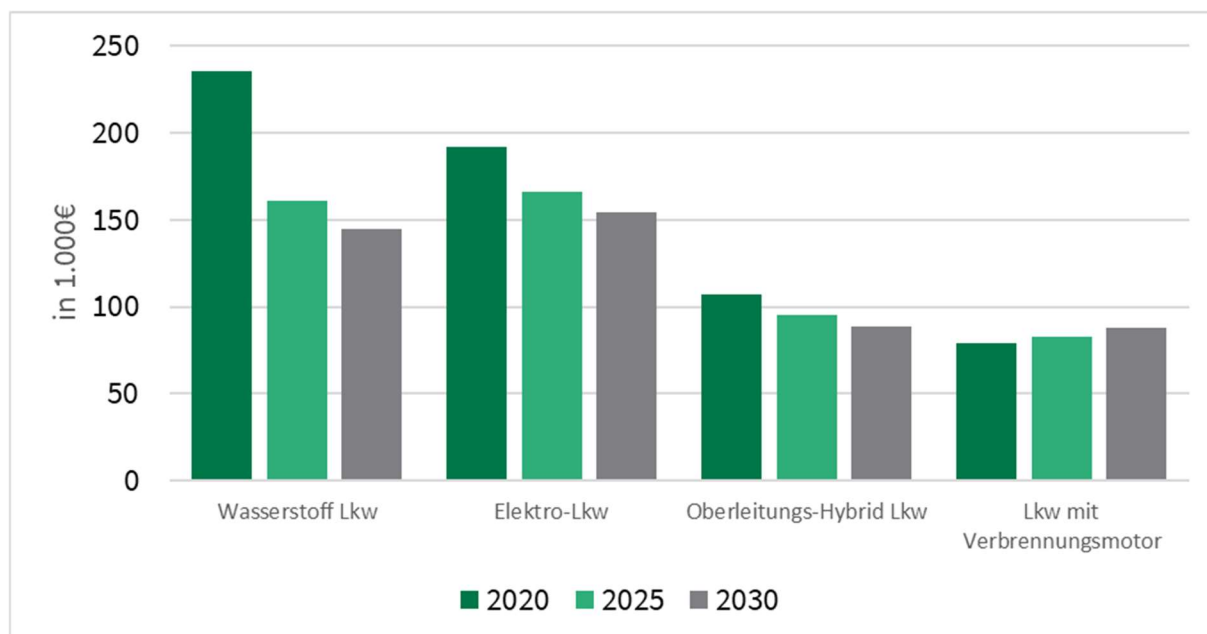


Abbildung 18: Prognose zum Anschaffungspreis von Lkw unterschiedlicher Antriebsarten bis 2030, Quelle: [67], eigene Darstellung

6.1.1 Unterschiede von O-Lkw und hochautomatisierten O-Lkw

Die ökonomische Betrachtung von hochautomatisierten O-Lkw erfolgt auf Basis der Charakteristika für O-Lkw mit Stromabnehmer, die Unterschiede zu diesem System werden aber hervorgehoben.

Die Fahrzeuganschaffungs- und Lebenszykluskosten unterscheiden sich für BEV-O-Lkw und OH-Lkw, die mit einem Stromabnehmer ausgestattet sind und solchen, die die Oberleitung mittels Sensorik ausschließlich zum hochautomatisierten Fahren nutzen. Für hochautomatisierte Lkw ohne Stromabnehmer entfallen die Kosten und Wartungsaufwände für den Stromabnehmer. Unabhängig von der Vorrichtung ist für die hochautomatisierte Fahrfunktion jedoch eine Umrüstung von Hard- und Software in der E/E-Architektur notwendig, wie in Kapitel 3 erläutert.

Die Anschaffungskosten (ohne MwSt.) eines Lkw mit Stromabnehmer liegen Prognosen zufolge im Jahr 2025 für OH-Lkw bei rund 146T€, für BEV-O-Lkw bei 125-150T€, je nach Batterie. Bis 2030 werden diese Preise auf ca. 144T€ (OH-Lkw) bzw. auf 116-138T€ sinken, insbesondere aufgrund fallender Batteriepreise in diesem Zeitraum. Dieselfahrzeuge kosten im Jahr 2025 etwa 101T€ und liegen damit in der Anschaffung deutlich unter den O-Lkw. Prognosen zufolge kostet die Ausstattung eines Verbrenner-Lkw mit Hard- und Software für SAE-Stufe 4 im Jahr 2025 etwa 20 T\$, für 2030 sollen diese Kosten nur noch bei 12 T\$ liegen (darunter 10 T\$ Hardware, 2T\$ Software, ohne Berücksichtigung einer Gewinnspanne) [10][68]. Wartungs- und Betriebskosten für hochautomatisierte Fahrzeuge sinken Studien zufolge zwischen 20- 40%, abhängig von Fahrleistung und Fahrzeugkonzeption. Da O-Lkw und hochautomatisierte Lkw keine konkurrierenden Technologien sind, sondern wie in der vorliegenden Studie gezeigt, eine Kombination zweier zukunftsweisender Konzepte darstellen, werden die Kosten der einzelnen Realisierungen hier nicht verglichen. Ausgehend von den Ersparnissen, die für hochautomatisierte Lkw prognostiziert werden und den berechneten Durchschnittskosten für OH- und BEV-O-Lkw, wird hier lediglich eine vage Schätzung für die Kosten des hochautomatisierten O-Lkw dargestellt, siehe Abbildung 19. Hierbei wird deutlich, dass die Anschaffungskosten eines hochautomatisierten O-Lkw, die des fahrergesteuerten übersteigen, die Betriebs-, Wartungs- und Energiekosten jedoch geringer sind.

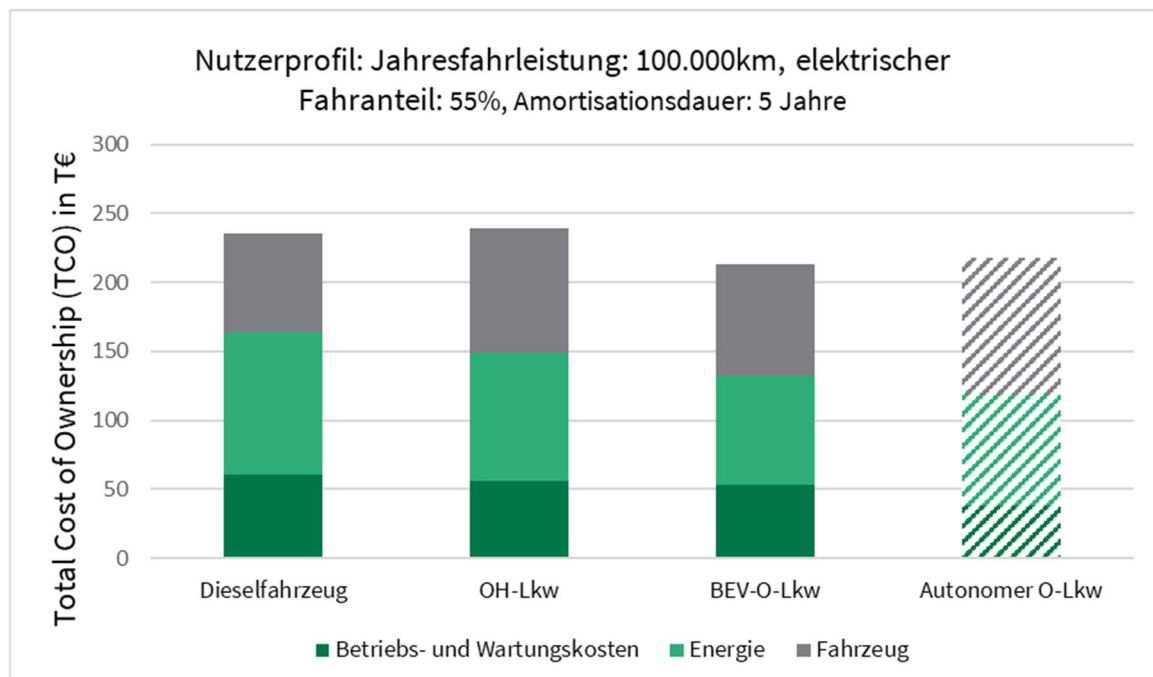


Abbildung 19: Prognose der Nutzerkosten für Diesel-Lkw und O-Lkw für ein exemplarisches Nutzerprofil im Jahr 2030, Quelle: [68], [23], eigene Darstellung

6.2 Voraussetzungen für Beschäftigung, Wohlstand und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit in Logistiksektor und Transportindustrie

Um die Beschäftigung im Straßengüterverkehr und Logistiksektor zu sichern, gleichzeitig aber die drohenden Personalengpässe zu verhindern, ist eine strukturierte Vorgehensweise notwendig. Nach Expertenprognosen fehlen bis zum Jahr 2027 etwa 185.000 Fahrende ausgehend von gleichbleibender Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr. Bei Einbezug des prognostizierten Wachstums in den kommenden Jahren (etwa 20% bis 2030), fällt der Mangel deutlich höher aus.

Ohne Automatisierung und die damit verbundenen Potenziale der Personaleinsparung drohen in Deutschland, aber auch europa- bzw. weltweit massive Unzulänglichkeiten, die zu industrie- und Lebensbereich-übergreifenden Frachtraumengpässen und Lieferverzögerungen führen. Das Ausmaß dieses Mangels wird in Großbritannien im Verlauf des Jahres 2021 besonders drastisch ersichtlich [69]. Die seit Jahren übliche Versorgungssicherheit und gewöhnliche Servicelevel können aufgrund von Personalmangel nicht mehr gewährleistet werden [1] [63].

Da bei autonomen Lkw der SAE-Stufe 5 kein Personal an Bord benötigt wird, entfallen in einem entsprechenden Ausbauszenario einige Arbeitsplätze. Es ist demnach trotz aktueller Personalknappheit ein entsprechender Pfad vorzuzeichnen, der die Wirkungen zunehmender Automatisierung auf den Arbeitsmarkt einbezieht und eine entsprechende Strategie enthält. So sollten sich Fachkräftemangel und Lieferengpässen auf der einen Seite und sinkender Personalbedarf durch Automatisierung auf der anderen Seite idealerweise egalisieren.

Für die Unternehmen der Gütertransport- und Logistikbranche ergeben sich daneben weitere Herausforderungen und der Bedarf an Investitionen. Neben der Umrüstung der Flotte zu einem geeigneten Zeitpunkt, sind auch technologische Umstrukturierungen, unter anderem in den Bereichen Routenplanung, Handling und Datenmanagement inklusive damit verbundener Systeme und Qualifikation zu leisten. Im Folgenden werden Nutzen und Potentiale sowie notwendige Voraussetzungen der Umrüstung auf hochautomatisierte O-Lkw den Einschränkungen und Risiken gegenübergestellt.

Zunächst ergeben sich durch O-Lkw im Unterschied zum normalen Lkw Einschränkungen hinsichtlich der Flexibilität der Transporte. Die Oberleitung als Voraussetzung für die Straßennutzung schränkt die Routenwahl, zumindest im Hochlauf der Technologie ein. In Deutschland sind zudem etwa 15% des Straßengüterverkehrs grenzüberschreitend. Für diese Transporte wäre der hochautomatisierte O-Lkw nur eine Lösung, wenn die notwendige Infrastruktur streckendeckend vorhanden ist [70]. Unternehmen, die in einem international verflochtenen Markt aktiv sind, haben einen Wettbewerbsnachteil, wenn Oberleitungsinfrastruktur nur national ausgebaut wird. Diese Firmen sollten in einem MarkthochlaufszENARIO berücksichtigt und gegebenenfalls über einen entsprechenden Ausgleich entlastet werden.

Neben der Infrastruktur ist die Eignung der Transportmodi für den hochautomatisierten O-Lkw-Verkehr entscheidend. Spezialtransporte, insbesondere Schwertransporte und übergroße Ladungen, die die Oberleitungsinfrastruktur beeinträchtigen könnten, eignen sich nicht in erster Linie für die O-Lkw-Transporte. Im Gegensatz dazu gibt es jedoch Verkehrsarten, die sich im O-Lkw System besonders gut organisieren lassen. Der Stückgutssystemverkehr beschreibt den Transport von am Stück verladbaren Gütern, die nicht in einem eigenen Container, sondern im Verkehrsnetzwerk von mehreren Dienstleistern kooperativ transportiert werden. Im Ladeverkehr werden unterschiedliche Produkte zu einer Ladung (bspw. in einem Container) zusammengefasst und als Einheit über unterschiedliche Verkehrsmodi hinweg vom Start- zum Zielpunkt transportiert. Beide Transportarten können auch im Hub-Verkehr mittels O-Lkw transportiert werden. Hierbei werden Ladungen von Startdepots zu einem Hub transportiert, dort konsolidiert und über längere Strecken zu einem

anderen Hub geliefert. Schließlich werden die Ladungen wieder aufgeteilt und gelangen über den Verteilerverkehr in kleineren Transporten an das jeweilige Endziel. Um diese Transportkombination zu bewältigen, können entweder Oberleitungsstrecken für den Pendelverkehr zwischen Hubs eingesetzt werden oder besonders hoch frequentierte Strecken von Startdepots zu Verladeplätzen des Schienengüterverkehrs mit einer Oberleitung ausgestattet werden. Dies ist insbesondere deshalb ein interessantes Szenario, da, wie in Kapitel 3.6 erläutert, Betriebshöfe und Intralogistiksysteme mittels entsprechender Infrastruktur direkt angebunden werden können.

Um diese kooperativen Gütertransporte in O-Lkw zu ermöglichen, ist es essentiell, dass ein Großteil der Branche die Technologie annimmt. Die Möglichkeiten und Randbedingungen dessen werden im folgenden Kapitel erläutert.

6.3 Vernetzung von Verkehrsträgern zur effizienten Gestaltung des Güterverkehrs

Der Güterverkehr in Deutschland teilt sich in Schienen-, Straßen-, Luftverkehr und Schifffahrt auf, wobei der Straßengüterverkehr mit knapp 85% des Verkehrsaufkommens und über 70% der Verkehrsleistung klar dominiert. Auf die Schiene entfallen lediglich 9% des Verkehrsaufkommens und 19% der Verkehrsleistung, die weiteren Verkehrsträger übernehmen sehr geringe Anteile [1]. Obwohl die Schiene klimafreundlicher und ressourceneffizienter betrieben werden kann, konnte der Anteil dieser am Güterverkehr seit 1990 kaum gesteigert werden.

Begründet liegt der geringe Anteil der Schiene am Modal Split des Güterverkehrs vor allem in den mangelhaften Netzen. Hierbei ist sowohl die Netzabdeckung nicht ausreichend, um den Straßengüterverkehr zu entlasten, des Weiteren fehlen Gleisanschlüsse bei den versendenden Unternehmen und an Verkehrsknotenpunkten. Für kurze Distanzen ist der Bahntransport für Güter weniger rentabel und die Flexibilität hinsichtlich Zeit und Routen ist stark eingeschränkt. Die Vorteile des Schienengüterverkehrs liegen neben ökologischen Faktoren in höherer Sicherheit und vereinfachter Kontrolle sowie in schlankeren Abfertigungsprozessen und höheren Transportmengen pro Sendung, vor allem bei geplanten, wiederkehrenden Transporten. Zudem sind sie nur sehr selten von Staus betroffen.

Die Kombination von Schienengüterverkehr und hochautomatisierten O-Lkw kann einige dieser Vorteile nutzen und gleichzeitig die Nachteile der jeweils individuell betrachteten Transportmodi ausgleichen. Durch eine Kombination, die den Straßengüterverkehr vor allem in Form eines Shuttleverkehrs zwischen Umschlagplätzen auf hochfrequentierten Strecken einbindet, können besonders günstige Bedingungen bereits in einem frühen Marktstadium entstehen (siehe Abbildung 20).

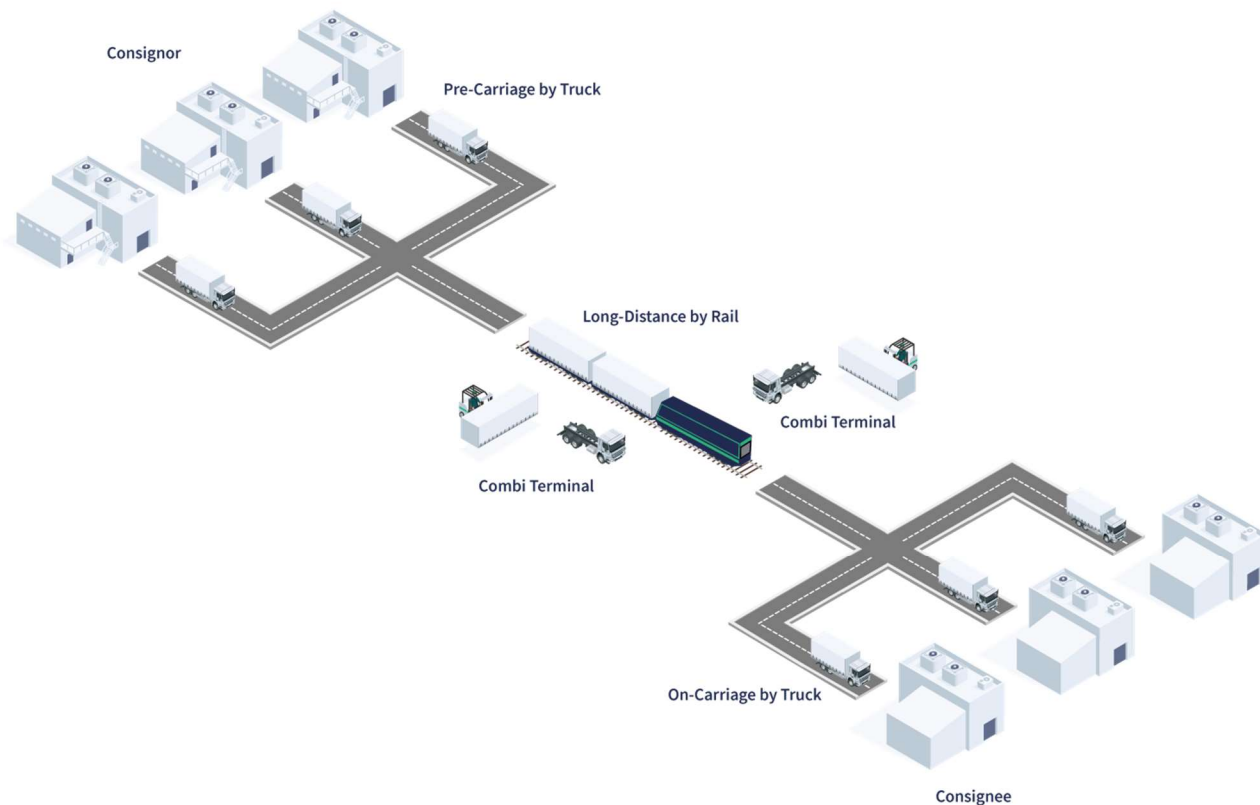


Abbildung 20: Kombiniertes Güterverkehr Schiene und Straße, exemplarische Darstellung, Quelle: [71]

Durch die Verknüpfung von Lkw als Transportmittel für „erste und letzte Meile“ und Bahn als Langstreckentransportmittel zwischen zwei definierten Umschlagplätzen werden beide Verkehrsträger im individuell ökonomischsten Einsatz kombiniert, Straßen werden entlastet und die CO₂-Emissionen reduziert. Ein bedeutender Vorteil ist zudem, dass höhere Beladungen von Lkw möglich sind. Die sogenannte 44-Tonnen-Regelung beim kombinierten Verkehr lässt eine Überschreitung der sonst gültigen Maximalgrenze von 40 Tonnen im Vor- und Nachlauf von Terminals (150km) zu [72].

Ein laufendes Projekt, indem dieser Kombinationstransport pilotiert wird, ist seit 2017 in kleinem Maßstab in den USA in Betrieb¹⁷. Hierbei werden Seehäfen und ein Güterbahnhof mit einer Oberleitungstrecke für Lkw entlang einer Autobahn verbunden.

Die Vorteile, die durch die Kombination von hochautomatisierten Lkw und Bahnverkehr realisierbar sind, übersteigen die genannten Potenziale zudem, da hochautomatisierte Abläufe an den Umschlagterminals möglich sind. Der Einsatz hochautomatisierter Lkw und anderer Güterterminalfahrzeuge ist bereits in vielen Pilotprojekten¹⁸ erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass im innerbetrieblichen Werksverkehr insbesondere Einsparpotenziale im Bereich der Personalkosten, eine optimierte Flächennutzung, effizientere Abläufe sowie die Senkung von Emissionen erreicht werden können.

¹⁷ Siehe Kapitel 2.3.

¹⁸ <https://www.erneuerbar-mobil.de/index.php/projekte/terminal-truck>, abgerufen am 29.10.2021.

6.4 Ableitung von Markteinführungsszenarien

Oberleitungs-Hybrid-Lkw, wie sie beispielsweise auf der Strecke des Projekts eWayBW erprobt werden, unterscheiden sich in ihren Effekten und Voraussetzungen zur flächendeckenden Markteinführung vom Einsatz hochautomatisierter Lkw, die die Oberleitung nutzen. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass hochautomatisierte Lkw, die die Oberleitung zur Spurwahl verwenden, aber nicht unbedingt über ein Dachstromabnehmer an die Oberleitung „anbügeln“, flexibel hinsichtlich der Antriebstechnologie sind. Während aktuell noch Verbrennungsmotoren dominieren, sind diese vor allem aufgrund ihrer Schadstoffemissionen langfristig nicht mit politischen Zielen und gesetzlichen Emissionsgrenzen vereinbar. Da sich die Antriebstechnologien der Zukunft noch in Entwicklung befinden und auf dem Weg zur Marktreife ein Technologiemix den Markt bestimmen wird, kann eine Offenheit diesbezüglich wirtschaftlich sinnvoll sein. Die Automatisierung der O-Lkw erfolgt somit unabhängig von der Motorisierung.

Die Markteinführung ist von zwei Pfaden abhängig und vom Netzwerkeffekt geprägt. Als Grundlage für den Betrieb der O-Lkw ist die Infrastruktur auf den Straßen zu errichten. Gleichzeitig muss die Flotte entsprechender Fahrzeuge im Markt wachsen. Das Gesamtsystem ist erst im eingeschwungenen Zustand rentabel. Damit diese Interdependenz nicht als Hemmnis für die Technologie wirkt, können öffentliche Förderprogramme und eine entsprechende Hochlaufstrategie als Unterstützung dienen.

Wie in Abschnitt 6.2 erläutert, dominieren Leasing und Miete bei den Spediteuren und Transportunternehmen im deutschen Markt. Die Anschaffung der hochautomatisierten O-Lkw würde in diesem Szenario auf entsprechende Fahrzeuganbieter entfallen. Falls dieses Angebot nicht existiert und Transportunternehmen darauf angewiesen sind die hochautomatisierten O-Lkw zu kaufen, erfordert dies hohe Investitionen, die die kleinen und mittelständischen Unternehmen der Branche nur selten zur Verfügung haben. Die Fahrzeug-Leasinganbieter können entweder direkt an die OEMs geknüpft sein oder als externe Flottenbetreiber auftreten. Da für diese Organisationen aber ebenso ein Planungs- und Investitionsrisiko besteht, ist es entscheidend das Gesamtsystem lukrativ zu gestalten und die Nutzung der Oberleitung durch messbare Vorteile zu incentivieren.

Eine Machbarkeitsstudie des BMVI [73] klassifiziert den idealen Nutzer eines OH-Lkw ohne Betrachtung der Automatisierung. Dieser nutzt dabei wiederkehrend dieselben Routen mit hohem Autobahnanteil, legt nur kurze Distanzen auf Strecken ohne Oberleitungsinfrastruktur zurück und transportiert Ladungen, die von Standard-Lkw bedient werden können. Zudem kommt die Bereitschaft Fahrzeuge zu mieten bzw. zu leasen und für langfristige Vorteile kurzfristige, technologisch bedingte Einbußen in Kauf zu nehmen. Erweitert um das Nutzungsszenario des hochautomatisierten O-Lkw, können weitere Charakteristika hinzugefügt werden. Ein entsprechend idealer Nutzer, bedient vorrangig den Pendelverkehr zwischen zwei Umschlagplätzen in Form von Hubs oder Verknüpfungspunkten zweier Verkehrsmodi.

6.4.1 Pfad- und Skalierungsentscheidungen

Um die Kombination von Automatisierung und Oberleitungsgüterverkehr umzusetzen und zur Marktreife zu bringen, sind strukturierte Maßnahmen unter Einbezug aller betroffenen Stakeholder notwendig. Im Folgenden sind einige zentrale Handlungsstränge im zeitlichen Bezugsrahmen für die Realisierung von hochautomatisiertem Oberleitungsgüterverkehr bzw. für das Szenario des hochautomatisierten O-Lkw-Pendelverkehrs (wie in Kapitel 6.3 erläutert) dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine grobe Abschätzung auf Basis der in der vorliegenden Arbeit ermittelten Erkenntnisse und kann daher als Orientierungshilfe dienen. Da die Unsicherheiten im technologischen Fortschritt von vielfältigen Forschungsdomänen abhängig sind und zudem

rechtliche, politische und gesellschaftliche Fragestellungen zu klären sind, ist eine genaue zeitliche Einordnung zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

Grundlegend kann davon ausgegangen werden, dass der Ausbau eines robusten Güterverkehrssystems mit hochautomatisiertem Lkw-Pendelverkehr und hohem Anteil an Schienenverkehr einen längeren Realisierungszeitraum in Anspruch nimmt. In diesem Szenario ist neben der Oberleitungsinfrastruktur auch die Konzeption eines optimalen Logistiknetzwerks mit entsprechender Anbindung von Seehäfen, Bahnhöfen, Containerumschlagplätzen und Transporthubs notwendig. Diese Institutionen müssen eventuell zusätzlich gebaut werden. Neben diesen privatwirtschaftlich zu realisierenden Projekten, ist die Erweiterung und Stärkung des Schienennetzes ein zentrales Kriterium für den Erfolg eines kombinierten Verkehrssystems. Der Ausbau des Schienennetzes nimmt jedoch lange Zeit in Anspruch. 2020 kündigte das Bundesverkehrsministerium ein Marktanteilsziel des Schienengüterverkehrs von mindestens 25% des Güterverkehrs bis 2030 an [73]. Um ein für den kombinierten Verkehr belastbares Netz auszubauen, wäre bei gleicher Ausbaugeschwindigkeit ein Zeitfenster von mehreren Jahrzehnten realistisch. Diesen Bau- und Planungsaufgaben vorgelagert sind hohe Forschungs- und Entwicklungsaufwände für eine ideale Gestaltung des Netzwerks sowie der zugehörigen Prozesse.

Für den Hochlauf des hochautomatisierten O-Lkw-Netzes als Substitut des heutigen Straßengüterverkehrs sind Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vor allem hinsichtlich der Priorisierung und Reihenfolge des Infrastrukturaufbaus auf unterschiedlichen Strecken und Straßentypen notwendig. Zudem sind auch hier viele Marktteilnehmer bei der Anpassung ihrer Prozesse und Produkte zu unterstützen. Grundsätzlich bietet die Markthochlaufphase aber bereits hohe Potentiale. Wie in Kapitel 3 erläutert, kann ein hochautomatisierter Lkw der SAE-Stufe 4 bereits errichtete Oberleitungsstrecken als festgelegten Betriebsbereich klassifizieren und diese Abschnitte ohne Fahrpersonal autonom zurücklegen. Das Personal an Bord wird in dem Moment zum Fahrenden, wenn die Oberleitungsstrecke unterbrochen ist und übernimmt das Fahrzeug für den manuellen Betrieb. Wenn die Abdeckung der Oberleitungsinfrastruktur die notwendigen Lenkzeitunterbrechungen für Fahrende abdeckt, resultieren dadurch im frühen Marktstadium hohe Zeit- und Kosteneinsparungen.

Beide Szenarien eint der Bedarf zur Forschung und Entwicklung an leistungsfähigen Fahrzeugen. Dies impliziert vor allem die Weiterentwicklung von E/E-Architekturen, entsprechender Software sowie Antriebstechnologien und Vernetzungstechnologie. Die infrastrukturellen Aufwände liegen zudem, neben dem Oberleitungs-bau, auch im Energiesektor und im Ausbau von Mobilfunknetzwerken zur Fahrzeugkommunikation. Für den Markthochlauf ist mittelfristig der nationale Ausbau entscheidend, allerdings ist in beiden Ausbauszenarien ein langfristig internationaler Ausbau der Infrastruktur erstrebenswert.

Um die mittel- und langfristigen Aufgaben fundiert bewältigen zu können, sollten kurzfristig Pilotprojekte mit dem Fokus auf Automatisierung von O-Lkw angestoßen werden. Dabei sind im ersten Schritt in Anknüpfung an eine Verkehrsmodellierung, wie die in Kapitel 4 vorliegende, Simulationen geeigneter Streckenabschnitte wertvoll. Bei entsprechender Ausgestaltung einer solchen Simulation können wichtige Erkenntnisse beispielsweise in Bezug auf die Güte der Sensorik und Datenströme, der Infrastrukturrealisierung und des Energiesystems gewonnen werden. Auch die Erweiterung der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Simulation um Antriebsszenarien zur Analyse der Wirkung auf Schadstoffemissionen birgt hohes Erkenntnispotential. Durch die intensive Forschung und Pilotierung ergeben sich im Idealfall klare Handlungsempfehlungen für die Skalierungspfade der Technologien.

6.4.2 Rahmenbedingungen und Wege für fiskalpolitische Fragestellungen im Verkehrssektor

Die Initiierung des Oberleitungsausbaus durch die Privatwirtschaft gilt als sehr unwahrscheinlich, da sie hohe Risiken birgt, die von einem oder wenigen privaten Akteuren unter Unsicherheit kaum eingegangen werden. Daher sind Initiativen durch den Staat entscheidend.

Die Kosten für die Infrastruktur können dabei über unterschiedliche Finanzierungsstrategien getragen werden. Dazu zählt die Finanzierung aus Steuermitteln, die dem Verkehrssektor zur Verfügung gestellt werden. Diese Lösung wäre am einfachsten umsetzbar, jedoch belastet sie zusätzlich den Verkehrshaushalt, der in den nächsten Jahren hohe Investitionen tätigen muss. Eine Steuererhöhung wäre aber beispielsweise bei der Energiesteuer denkbar, um den Infrastrukturausbau mit Klimazielen zu koppeln. Des Weiteren wäre eine nutzungsabhängige Maut für die Oberleitungsstrecken nach dem Verursacherprinzip denkbar, dies würde auch internationale Nutzer der Infrastruktur an den Kosten beteiligen. Da diese Lösung die Nutzer der Technologie zusätzlich belastet, ist auch eine Refinanzierung durch eine Maut, die von allen Verkehrsteilnehmern entrichtet wird, eine Alternative. Neben der unaufwändigen Einführung, ermöglicht auch diese Maut die internationale Beteiligung entsprechender Verkehrsteilnehmer, allerdings folgt diese Abgabe nicht dem Verursacherprinzip.

Eine Kombination von Nutzungsgebühr und Steuerfinanzierung ist eine dritte Finanzierungsmöglichkeit. Hierbei würde die Infrastruktur zunächst durch Steuermittel vorfinanziert werden und anschließend durch eine Maut refinanziert.

Um den Umbruch in der Güterverkehrsbranche effizient und effektiv zu unterstützen, können öffentlich geförderte Forschungs- und Pilotprojekte, Expertengremien und Branchenstandards sowie Weiterbildungsangebote erfolgsversprechend sein. Es ist dabei neben technologischen und infrastrukturellen Herausforderungen bedeutsam prozessuale und organisatorische Fragestellungen zu berücksichtigen.

6.5 Mögliche nächste Schritte

Das BMVI hat in seinen Gutachten [4] mehrere Herausforderungen für den Güterverkehr auf der Straße identifiziert. Besonders der zunehmende Fahrendenmangel und die stetig steigenden Transportvolumina auf der Straße stellen für die Versorgungssicherheit eine Herausforderung dar. In dem Gutachten wird davor gewarnt, „dass sich der Lkw-Fahrmangel in Deutschland schon in absehbarer Zeit zu einem großen Problem auch für die Leistungskraft der deutschen Wirtschaft entwickeln kann“ [4, S. 4].

Um die Herausforderungen des Güterverkehrs langfristig zu meistern sind Konzepte und neue Technologien nötig, die nicht nur die Emissionen des Güterverkehrs, sondern auch den Fahrendenmangel adressieren. Der Einsatz von O-Lkw kann hier eine entscheidende Position einnehmen. In [3] wird gezeigt, dass die Elektrifizierung in Kombination mit Oberleitungen einen Beitrag zur Emissionsreduktion im Güterverkehr leisten kann.

Um den Ausbau von Autobahnabschnitten mit Oberleitungen attraktiver zu gestalten, wird in der vorliegenden Studie ein Konzept zur Nutzung der Oberleitung als Redundanzbasis für das hochautomatisierte Fahren beschrieben. Durch das am 28.07.2021 in Kraft getretene Gesetz „Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren“ ist der Betrieb von SAE-Stufe 4 Fahrzeugen auf deutschen Straßen mit ausreichenden Redundanzen gesetzlich möglich. Die Oberleitung kann eine solche Redundanz bieten. Durch den automatisierten Betrieb von O-Lkw ist es zusätzlich möglich Platooning-Lösungen weiterzuentwickeln. Wie in der vorliegenden Studie gezeigt, können Lkw Platoons sich positiv auf das Verkehrsaufkommen auswirken, sowie zu geringeren Emissionen oder Energieverbrauch führen.

Durch die Redundanz der Oberleitung wird es möglich Streckenabschnitte mit einem Fahrzeug der SAE-Stufe 4 ohne menschliche Überwachung zu fahren. Dies führt dazu, dass die vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen während der Streckenabschnitte, die hochautomatisiert gefahren werden, in Fahrt verbracht werden können. Die dadurch sinkende Standzeit der Lkw führt bereits bei einer teilweisen Adoption der Technik zu einer Effizienzsteigerung, die dem Mangel an neuen Berufskraftfahrenden entgegenwirken kann. Ebenso können Lkw-Fahrende ihre Pausenzeiten flexibler in den Arbeitsalltag integrieren. Infrastrukturell betrachtet führt diese Reduktion der erzwungenen Lenkzeitunterbrechung nach spätestens 4,5 Stunden auch zur Entlastung von Rast- und Parkplätzen. Diese Aspekte können wichtige Gegenmaßnahmen zu den in [4] beschriebenen Problemstellungen darstellen. Aus diesen Gründen schlagen wir folgende nächsten Schritte, siehe Abbildung 21, vor:



Abbildung 21: Vorschläge nächster Schritte auf dem Weg zu hochautomatisiertem Oberleitungsstraßengüterverkehr

Die vorliegende Studie bildet das theoretische Fundament für ein praxisorientiertes Folgeprojekt. Dieses Projekt sollte die HD-Kartierung einer Pilotstrecke für O-Lkw, beispielsweise die Strecke eWayBW, anstreben. Die Aufnahme der Oberleitungsstrecken in vorhandene Kartendaten bildet die Voraussetzung, um diese Daten für die Trajektorienplanung im Realversuch zu verwenden. Zudem können im Zuge dessen bereits Simulationen des hochautomatisierten Oberleitungsbetriebs durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Simulationen liefern Erkenntnisse in Bezug auf die Entwicklung der Fahrzeuge sowie der Streckenparameter. Anhand dieser Ergebnisse kann ein nächster Schritt in Richtung Markthochlauf gegangen werden, indem Fahrzeuge mit der notwendigen Sensorik ausgestattet werden, um auf einer Pilotstrecke in den Testbetrieb zu gehen. Für ein solches Vorhaben sind neben Fahrzeugen und Testumgebung auch ein Konsortium aus Unternehmen der Nutzfahrzeugbranche, Forschungsinstitutionen und Universitäten sowie weiteren wirtschaftlichen und politischen Akteuren sinnvoll. Diese beiden nächsten Schritte werden auf Basis der hier vorgelegten Studie als besonders richtungsweisend und zukunftsfähig eingeschätzt. Darüberhinausgehend sind weitere theoretische Forschungsfragen, unter anderem mit rechtlichem, sozioökonomischem und technologischem Inhalt empfehlenswert.

Fazit

Herausforderungen, die Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt gleichermaßen treffen, können nur durch die Kombination von innovativen Ansätzen aus technologischer, politischer und rechtlicher Richtung erfolgen. Die Verknüpfung von hochautomatisiertem Fahren und Oberleitungs-Straßengüterverkehr stellt einen Technologieverbund dar, der unter geeigneter politischer, industrieller und wissenschaftlicher Weichenstellung solch mehrdimensionale Fragestellungen lösen kann.

In Deutschland wurde im Juli 2021 das Gesetz zum autonomen Fahren verabschiedet, das den Betrieb von hochautomatisierten Fahrzeugen der SAE-Stufe 4 ermöglicht. Um Fahrzeuge sicher in dieser Automatisierungsstufe auf öffentlichen Straßen einzusetzen, ist eine robuste Routen- und Trajektorienplanung oberste Prämisse. Während Fahrbahnmarkierungen keine ausreichend sichere Größe für die Realisierung der Funktionen darstellen, kann eine Oberleitungsstrecke durch die Fahrdrähte eine Redundanzebene für hochautomatisiertes Fahren schaffen. OH-Lkw, wie sie auf der Pilotstrecke eWayBW erprobt werden, sind heute ein Teil der Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr. Der akute und langfristig anhaltende Mangel an Berufskraftfahrern kann durch OH-Lkw jedoch nicht abgefangen werden. Die Automatisierung dieser Lkw begegnet diesen Fragestellungen jedoch und begründet eine Kombination der Technologien. Hochautomatisiertes Fahren bietet für O-Lkw die Chance diese fahrerlos (SAE-Stufe 5) oder mit einer Person als Passagier, die nur auf Strecken ohne Oberleitungsinfrastruktur die Fahraufgabe übernimmt, zu betreiben (SAE-Stufe 4). Somit können gesetzlich vorgeschriebene Lenkzeitunterbrechungen in Fahrt verbracht werden, bereits bestehende Infrastruktur in Form von Rasthöfen und Parkplätzen entlastet werden oder ein Betrieb ohne Personal gesteuert werden.

Die Antriebstechnologie für Oberleitungsfahrzeuge befindet sich bereits in mehreren Forschungsumgebungen im Aufbau und benötigt keine gravierende antriebsseitige Adaption, um hochautomatisiertes Fahren zu ermöglichen. Erste Einschätzungen lassen hier eine Technologieoffenheit als nachhaltig erfolgsversprechend wirken. Die eingesetzten Hybridfahrzeuge sind im aktuellen Reifegrad der Technologie am besten geeignet. Trotzdem sollte in Zukunft auch die H₂BZ-Technologie im Kontext der Oberleitung erforscht werden, da sie in einigen Gesichtspunkten effizienter realisiert werden könnte. Auch die ausschließliche Nutzung der Oberleitung als Redundanzebene für hochautomatisiertes Fahren bei Fahrzeugen mit entsprechender Ausstattung, aber ohne Stromabnehmersystem, ist möglich. Im Gegensatz zum Antrieb ist die Umrüstung von Sensorik sowie Hard- und Software der Lkw-Flotte notwendig und auf Basis der Erkenntnisse dieser Studie sinnvoll, um diese zur Automatisierung zu befähigen. Dies geschieht jedoch mit dem entscheidenden Vorteil, dass darüber auch die Redundanz in der hochautomatisierten Spurerkennung robuster und damit sicherer und technologisch reifer im Hinblick auf SAE-Stufe 4 und 5 wird. Die Kombination von Landmarkenerkennung durch Radar und Detektion der Fahrdrähte mittels IR-Sensoren bietet der umfassenden Analyse zufolge, das größte Potential, um die Selbstlokalisierung der O-Lkw robust zu realisieren. Redundante Kamerasysteme oder komplementäre Sensorik zur Kollisionsvermeidung sind zudem notwendig. Diese Redundanz kann auf den Oberleitungsstrecken hochautomatisiertes Fahren der SAE-Stufe 4 ermöglichen. Die Fahrt an der Oberleitung dient dann nicht nur als Ladevorgang für BEV- oder OH-Lkw, sondern kann auch die Pausenzeit für die Fahrenden ohne Notwendigkeit der Fahrtunterbrechung effizienter gestalten. Weitere Produktivitätssteigerung des Güterverkehrs kann durch die Anbindung von hochautomatisiertem Werks- und Lagerlogistikverkehr sowie gesamtsystemisch durch optimierten Modal-Split realisiert werden.

Durch die durchgeführte Verkehrssimulation können weitere Konzepte zur Steigerung der Profitabilität des Gesamtsystems identifiziert werden. Über die Möglichkeit durch Platooning Lkw-Kolonnen zu bilden, können Personal-, Kraftstoff- und Materialinvestitionen verringert werden. Ökologisch betrachtet, kann der hochautomatisierte Oberleitungsgüterverkehr daneben einen Weg zur Erreichung der Klimaziele darstellen und zur

Verringerung von Luftschadstoffen, Flächenverunreinigung und zum Artenschutz beitragen. Dies resultiert auch in ökonomisch günstigen Zukunftsperspektiven. Neben der Reduktion der Personalausgaben, die sich durch den fahrerlosen Betrieb von O-Lkw ergeben und dem drohenden Fahrendenmangel entgegenzutreten, sind die Einsparungen ökologischer Emissionen auch finanziell positiv zu bilanzieren.

Die Betrachtung der Auswirkungen auf den Verkehrsfluss in Kapitel 4 mit Hilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen zeigt, dass eine Zunahme der Automatisierungsrate von Lkw in Kombination mit Oberleitungssystemen einen positiven Effekt hat, wenn O-Lkw mit geringen Abständen und in Platoons fahren. Zum einen erhöht sich durch die geringen Abstände die Kapazität. Zum anderen haben O-Lkw bedingt durch die Kopplung an das Oberleitungssystem ein gehemmtes Überholverhalten und dadurch reduziert sich die Beeinflussung der Pkw durch Lkw auf dem mittleren Fahrstreifen.

Neben diesen Chancen werden in der Studie auch Bedingungen identifiziert, die notwendige Voraussetzungen für eine vorteilhafte Gestaltung des hochautomatisierten O-Lkws bilden. Dabei sind zunächst die Standardisierung und Normung der Infrastruktur und ihrer Schnittstellen erforderlich, um den Zugang zu der Technologie herstellerunabhängig zu ermöglichen. Gleichzeitig sind die überwiegend kleinen und mittelständischen Unternehmen im Transport- und Logistiksektor finanziell zu unterstützen, eine Finanzierung der Technologie kann keineswegs parallel zur Umrüstung der Flotte gestemmt werden. Langfristig sind die Potentiale dennoch erfolversprechend und damit gesamtgesellschaftlich und -wirtschaftlich rentabel organisierbar. Die Finanzierung über Maut oder ein nutzungsunabhängiges Entgelt ist dabei möglich.

Um die Chancen zu nutzen und die Herausforderungen zu überwinden, kann es als Aufgabe der politischen Entscheider gesehen werden, die Strategie und damit die Grundlage für die Technologiekombination zu definieren. Die Studie stellt dazu zwei denkbare Handlungsstränge für den Ausbau vor. Es könnte zum einen einen Oberleitungs-Shuttleverkehr in Kombination mit einem leistungsfähigen Schienengüterverkehr realisiert werden. Auf der anderen Seite besteht die Möglichkeit losgelöst von anderen Verkehrsträgern ein Oberleitungsnetz auszubauen. Neben nationalen Entscheidungen sind hierbei, durch die starke europäische Vernetzung des Güterverkehrs stets internationale Bemühungen und außenpolitische Anknüpfungsimpulse parallel zum nationalen Hochlauf notwendig.

Die vorliegende Studie identifiziert für diese strategische Aufgabe, kurz- und mittelfristig durchführbare Schritte, um die Entscheidungen zu fundieren. Ein erster Anknüpfungspunkt wird in der Simulation und HD-Kartierung einer Pilotstrecke gesehen. Mittels vorhandener Tools zur virtuellen Streckenkartierung und Verkehrssimulation kann die Technologie, inklusive dem Energiesystem und der notwendigen Infrastruktur realitätsgetreu nachgebildet werden. Es können so in einer Analyseumgebung Randbedingungen und Parameter identifiziert werden, die zur optimalen Implementierung notwendig sind. Durch die Integration der Oberleitungsstrecken in digitalen Karten als Polygonzug, wird zudem die Grundlage zur Trajektorienplanung im Realversuch geschaffen. Im Anschluss daran könnte die Erprobung auf vorhandenen Pilotstrecken in einem Konsortium aus Fahrzeug- und Infrastrukturhersteller, Vertreter der Energiewirtschaft und des Logistiksektors sowie wissenschaftlichen Partnern mit Expertise in hochautomatisiertem Fahren, Verkehrsmanagement und Kommunikationsnetzwerken erfolversprechend sein.

Insgesamt legt diese Studie den Grundstein für die Erforschung und Umsetzung von hochautomatisiertem Straßengüterverkehr. Eine Anknüpfung an die Erkenntnisse und die konsequente Weiterentwicklung der Technologiekombination ermöglichen Erkenntnisschübe, die langfristig Pionierleistungen in der sozialverträglichen, ökologischen und ökonomischen Güterverkehrsgestaltung in Aussicht stellen.

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Active Cruise Control (Automatische Distanzregelung)
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
CAV	Connected, Autonomous Vehicles (Vernetzte, automatisierte Fahrzeuge)
C2X	Car-to-Infrastructure (Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation)
E/E-Architektur	Elektrik/Elektronik-Architektur
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
HD	High-Definition
H ₂ -BZ	Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb
Lkw	Lastkraftwagen
O-Lkw	Oberleitungs-Lkw
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OH	Oberleitungs-Hybrid
Pkw	Personenkraftwagen
SAE	SAE International, ehemalige Bezeichnung Society of Automotive Engineers
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
V2X/V2V	Vehicle-to-Everything/ -Vehicle (Fahrzeug- zu-X/-Fahrzeug Kommunikation)

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI), „Verkehr in Zahlen 2020/2021,“ Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2021.
- [2] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „eWayBW,“ [Online]. <https://ewaybw.de/>. [Zugriff am 01 Juli 2021].
- [3] Nationale Plattform Mobilität (NPM), „Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge – Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung- Zwischenbericht 12/2020 der Arbeitsgruppe 1: Klimaschutz im Verkehr,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2020.
- [4] Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium Verkehr und digitale Infrastruktur, „Fahremangel im deutschen Straßengüterverkehr - Strukturelle Treiber und verkehrspolitischer Handlungsbedarf,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, 2020.
- [5] M. Lauer und Ö. S. Tas, „Machbarkeitsstudie zum automatisierten Fahren von HO-LKWs im Murgtal,“ FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, 2019.
- [6] D. A. Pomerleau, „ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network,“ *Advances in neural information processing systems*, S. 305–313, 1989.
- [7] E. D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek und J. Schiehlen, „The Seeing Passenger Car‘VaMoRsP’,“ *Intelligent Vehicles Symposium IEEE*, p. S. 68–73, 1994.
- [8] M. Buehler, K. Iagnemma und S. Singh, *The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic*, Springer, 2009.
- [9] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny und G. u. a. Hoffmann, „Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge,“ *Journal of field Robotics* 23, Nr. 9, pp. 661-692, 2006.
- [10] H. Winner, „Quo vadis, FAS?,“ in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Springer Vieweg, 2015, p. 1167–1186.
- [11] K. Esser und J. Kurte, „Autonomes Fahren – Aktueller Stand, potentiale und Auswirkungsanalyse,“ Studie von KEConsult im Auftrag des Deutschen Industrie und Handelskammertag e.V, 2018.
- [12] Roland Berger, „Automated Trucks – The next big disruptor in the automotive industry?,“ www.rolandberger.com/de/Publications/AutomatedTrucks.html, 2016.
- [13] M. Schmidtgen, „Autonome Lastkraftwagen werden Logistik revolutionieren,“ Kloepfel Consulting, 05 11 2018. [Online]. <https://www.kloepfel-consulting.com/supply-chain-news/maerkte/autonome-lastkraftwagen-werden-logistik-revolutionieren-34098/>. [Zugriff am 11 11 2021].
- [14] DB Schenker, „DB Schenker und Einride: Erster autonomer Elektro-Lkw „T-Pod“ nimmt kommerziellen Betrieb auf,“ 06 11 2018. [Online]. <https://www.dbschenker.com/de-de/ueber->

uns/presse-center/db-schenker-news/db-schenker-und-einride--erster-autonomer-elektro-lkw--t-pod--nimmt-kommerziellen-betrieb-auf--562174. [Zugriff am 13 09 2021].

- [15] Daimler AG, „Autonomer Pionier. Mercedes-Benz Future Truck 2025,“ [Online].
<https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/mercedes-benz-future-truck.html>.
[Zugriff am 13 09 2021].
- [16] Volvo Trucks, „VERA – Die Zukunft des autonomen Transports,“ [Online].
<https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/autonome-lkw/vera.html>. [Zugriff am 13 09 2021].
- [17] Tesla, [Online]. <https://www.tesla.com/semi>. [Zugriff am 13 09 2021].
- [18] Scania, „Autonomous Solutions - The shift to autonomous transport has begun,“ [Online].
<https://www.scania.com/group/en/home/about-scania/innovation/technology/autonomous-solutions.html>. [Zugriff am 13 09 2021].
- [19] Embark Trucks, [Online]. <https://embarktrucks.com>. [Zugriff am 13 09 2021].
- [20] TuSimple, [Online]. <https://www.tusimple.com>. [Zugriff am 13 09 2021].
- [21] S. Tsugawa, S. Jeschke und S. E. Shladovers, „A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings,“ *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 1*, pp. 68-77, 03 2016.
- [22] Hessen Mobil, „ELISA - eHighway Hessen,“ [Online]. <https://ehighway.hessen.de/ELISA>. [Zugriff am 26 08 2021].
- [23] F. Hacker, R. Blanck, W. Görz, T. Bernecker, J. Speiser, F. Röckle, M. Schubert und G. Nebauer, „StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge,“ Öko-Institut e.V., Berlin, 2020.
- [24] F. Hacker, J. Jöhrens und P. Plötz, „Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland,“ Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI, Berlin, Heidelberg, Karlsruhe, 2020.
- [25] J. Impulitti und M. Lehmann, „Electric Truck Pantograph Retrofit Project,“ California Energy Commission, Diamond Bar, CA, USA, 2019.
- [26] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „Fragen und Antworten: Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B462,“ AD Rainer Haas, Stuttgart, Stuttgart, 2020.
- [27] E. Krummheuer, „Oberleitungsbusse - Draht statt Diesel,“ faz.net, 07 11 2018. [Online].
<https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/oberleitungsbusse-als-ersatz-fuer-dieselbuslinien-15872745.html>. [Zugriff am 10 09 2021].
- [28] Ö. S. Tas, F. Kuhnt, J. M. Zöllner und C. Stiller, „Functional System Architectures towards Fully Automated Driving,“ in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [29] R. e. a. Novickis, „Functional Architecture for Autonomous Driving and its implementation,“ in *2020 17th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*, IEEE, 2020.

- [30] C. Ballarin, „Der Lkw auf dem Weg zum autonomen Transportmittel,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 36 - 40, 2016.
- [31] Wikipedia.de, „Oberleitungsmast,“ 04 04 2020. [Online].
<https://de.wikipedia.org/wiki/Oberleitungsmast>. [Zugriff am 26 10 2021].
- [32] A. Kontcha, „Anhänger, Kraftfahrzeugespann mit solch einem Anhänger und Verfahren zum Betrieb“. DE Patent DE 102016213786 A1, 27 Juli 2016.
- [33] bussgeldkatalog.org, „Lenk- und Ruhezeiten bei LKW,“ 19 08 2021. [Online].
<https://www.bussgeldkatalog.org/lenkzeiten-ruhezeiten/>. [Zugriff am 18 10 2021].
- [34] M. Schäffer, P. Pomiersky und W. Remlinger, „Hand Over, Move Over, Take Over - What Automotive Developers Have to Consider Furthermore for Driver's Take-Over,“ in *T. Bertram (Hrsg.), Automatisiertes Fahren 2021, Proceedings*, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2021.
- [35] A. Lauber, E. Sax und M. Wiedemann, „Autonomes Fahren auf dem Busbetriebshof,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 120, pp. 74-77, 06 2018.
- [36] N. Bahnes, B. Kechar und H. Haffaf, „Cooperation between Intelligent Autonomous Vehicles to enhance container terminal operations,“ *Journal of Innovation in Digital Ecosystems*, Vol. 3, pp. 22-29, 06 2016.
- [37] Fraunhofer IIS, „Machbarkeitsstudie zum digitalen KV-Terminal der Zukunft,“ [Online].
<https://www.scs.fraunhofer.de/de/referenzen/kv-terminal.html>. [Zugriff am 19 10 2021].
- [38] I. Barosan, A. A. Basmenj, S. G. R. Chouhan und D. Manrique, „Development of a Virtual Simulation Environment and a Digital Twin of an Autonomous Driving Truck for a Distribution Center,“ in *Software Architecture - 14th European Conference, ECSA 2020*, L'Alquila, Italien, 2020.
- [39] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Ed.), *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS 2015*, Köln: FGSV-Verlag, 2015.
- [40] J. Geistefeldt, S. Giuliani, F. Busch, T. Schendzielorz, P. V. A. Haug, U. Leyn und R. Trapp, „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen,“ *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, 2017.
- [41] J. Geistefeldt, S. Giuliani, P. Vortisch, U. Leyn, R. Trapp, F. Busch, A. Rascher und N. Celikkaya, „Assessment of Level of Service on Freeways by Microscopic Traffic Simulation,“ *Transportation Research Record 2461*, pp. 41-49, 2014.
- [42] U. Leyn und P. Vortisch, „Calibrating VISSIM for the German Highway Capacity Manual,“ *Transportation Research Board 2483*, S. 74-79, 2015.
- [43] M. Fellendorf und P. Vortisch, „Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM,“ in *Fundamentals of Traffic Simulation*, New York, Springer, 2010, S. 63-93.
- [44] U. Sparmann, *Spurwechsellvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*, Bd. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe, Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1978.

- [45] L. Zhao und J. Sun, „Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-Following Behaviors Under Connected-Vehicle Environment,“ *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 96, 2013.
- [46] Department for Transport, „Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow,“ 2016.
- [47] P. Sukennik, „Micro-simulation guide for automated vehicles - final,“ 2020.
- [48] M. Schmitt, V. Zeidler und P. Vortisch, „Modelling Decision Making of Autonomous Vehicles at an Unsignalized Intersection - Indications of Effects on Traffic Flow (unveröffentlicht),“ *TRB 101th Annual Meeting*, 2022.
- [49] C. Weyland, S. Buck und P. Vortisch, „Potenziale zur Emissionsreduktion durch umweltabhängige Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen,“ *HEUREKA'20. Optimierung in Verkehr und Transport*, 2021.
- [50] B. f. S. (BASt), „Verkehrsbarometer 2021 - Entwicklung des Straßenverkehrs auf Bundesfernstraßen nach Monaten,“ 2021. [Online]: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Statistik/Verkehrsdaten/Verkehrsbarometer-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=10. [Zugriff am 04 11 2021].
- [51] S. Kühnel, F. Hacker und W. Görz, „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr,“ Öko-Institut e.V., Berlin, 2018.
- [52] K. Mayr, F. Hofer, G. Ragowsky, W. Gruber, A. Arnberger, A. Kabza, P. Wolf, M. Schmidt und L. Jörissen, „Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug,“ e-mobil BW GmbH, 2021.
- [53] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, „Wasserstoff in der Logistik für einen zukunftsfähigen und nachhaltigen Warentransport,“ HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden, 2019.
- [54] 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*, 23 05 2021.
- [55] Landeshauptstadt Stuttgart, „feinstaubalarm.stuttgart.de,“ [Online]. <https://www.feinstaubalarm.stuttgart.de/item/show/584398>. [Zugriff am 31 08 2021].
- [56] C. Baars, „Grenzwerte für Luftverschmutzung - WHO verschärft Empfehlungen massiv,“ *tagesschau.de*, 22 09 2021. [Online]. <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/who-luftverschmutzung-111.html>. [Zugriff am 27 09 2021].
- [57] Allianz pro Schiene, „Allianz pro Schiene,“ [Online]. <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/gueterverkehr/>. [Zugriff am 25 08 2021].
- [58] S. Tsugawa, S. Jeschke und S. E. Shladover, „A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings,“ *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles Nr. 1*, pp. 68-77, 2016.
- [59] C. Kille, „Bundesvereinigung Logistik (BVL),“ 21 10 2020. [Online]. <https://www.bvl.de/blog/die-entwicklung-der-logistik-in-2021-prognose-der-logistikweisen/>.

- [60] S. Keller, „Statista,“ 24 02 2021. [Online].
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/422098/umfrage/anzahl-der-speditionen/>. [Zugriff am 09 09 2021].
- [61] DSLV Bundesverband Spedition und Logistik, [Online].
https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/id/pa_de_beschaefigte.html. [Zugriff am 09 09 2021].
- [62] Capgemini Invent, „Potentiale des autonomen Lkw,“ 23 05 2019. [Online].
<https://www.capgemini.com/de-de/resources/autonomer-lkw/>. [Zugriff am 23 08 2021].
- [63] M. Randelhoff, „Zukunft Mobilität,“ 28 08 2017. [Online]. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/113531/analyse/automatisierung-strassengueterverkehr-selbstfahrende-lkw-autonom-automatisierte-nfz-nutzfahrzeuge/#wirtschaftlichkeit>. [Zugriff am 23 08 2021].
- [64] S. Althaus, „EHI Retail Industrie,“ 26 03 2019. [Online].
<https://www.ehi.org/de/pressemitteilungen/mehr-kooperation-fuer-weniger-kosten/>. [Zugriff am 24 08 2021].
- [65] E. Sax, R. Reussner, J. Henle, C. P. Hohl, H. Guissouma, S. Krach, T. Saglam, J. Henß und S. Otten, „Analyse der Aktivitäten und Entwicklungsfortschritte im Bereich der Fahrzeugelektronik mit Fokus auf fahrzeugeigene Betriebssysteme,“ e-Mobil BW GmbH, Stuttgart, 2021.
- [66] M. e. a. Wietschel, „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw,“ Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Karlsruhe, 2017.
- [67] M. Kords, „Statista,“ 18 08 2021. [Online].
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1185696/umfrage/entwicklung-des-fahrzeugpreises-von-lkw-nach-antrieb/>. [Zugriff am 01 09 2021].
- [68] S. Keese, W. Aulbur, K. van Marwyk und W. Rentzsch, „Shifting up a gear - Automation, electrification and digitalization in the trucking industry,“ Roland Berger, München, 2018.
- [69] tagesschau.de, „Warnung vor Engpässen: Auch in Deutschland fehlen Lkw-Fahrer,“ 10 09 2021. [Online]. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/lkw-fahrer-mangel-uk-hamsterkaeufe-supermarktregale-101.html>. [Zugriff am 02 11 2021].
- [70] eurostat Statistics Explained, „eurostat Statistics Explained,“ 21 09 2017. [Online].
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Freight_transport_statistics/de&oldid=354266. [Zugriff am 09 09 2021].
- [71] FIS Forschungs-Informationssystem Mobilität und Verkehr, 14 05 2014. [Online].
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/430418/>. [Zugriff am 25 08 2021].
- [72] bussgeldkatalog.org, „Mobilitätsmagazin von bussgeldkatalog.org,“ 13 08 2021. [Online].
<https://www.bussgeldkatalog.org/lkw-pausen/>. [Zugriff am 24 08 2021].
- [73] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), „Masterplan Schienenverkehr,“ Berlin, 2020.
- [74] Statistisches Bundesamt (Destatis), Verkehrsunfälle- Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr 2019, 2020.

- [75] O. Ljungqvist, N. Evestedt, D. Axehill, M. Cirillo und H. Petterson, „A path planning and path-following control framework for a general 2-trailer with a car-like tractor,“ *Journal of Field Robotics* Nr. 8, S. 1345-1377, 2019 .
- [76] Hessen Mobil, „ELISA - eHighway Hessen,“ [Online]. <https://ehighway.hessen.de/>. [Zugriff am 01 Februar 2021].
- [77] Siemens AG / Siemens Mobility GmbH, 14 03 2021. [Online]. <https://press.siemens.com/global/de/feature/ehighway-loesungen-fuer-den-elektrifizierten-strassengueterverkehr>. [Zugriff am 26 08 2021].
- [78] R. Wiedemann, Simulation des Straßenverkehrsflusses, Bd. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Karlsruhe: Institut für Verkehrswesen - Universität Karlsruhe, 1974.
- [79] Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, „eHighway Schleswig-Holstein,“ [Online]. Available: <https://www.ehighway-sh.de/de/>. [Zugriff am 01 Februar 2021].
- [80] M. Randelhoff, „Siemens eHighway, Hybrid-NFZ, LNG: Fährt der Straßengüterverkehr der Zukunft elektrisch?,“ 22 07 2020. [Online]. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/9593/zukunft-des-automobils/elektromobilitaet/ehighway-siemens-hybrid-lkw-elektroantrieb/>.
- [81] J. Jöhrens und H. Helms, „Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland,“ ifeu, Heidelberg, 2020.
- [82] Volkswagen AG, „Grünes Licht für Forschungsprojekt mit Oberleitungs-Lkw auf öffentlichen Straßen in Deutschland,“ 2018.
- [83] Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur , „Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr,“ ITP Intraplan Consult GmbH, München, Köln, 2021.
- [84] E. Fraedrich, L. Kröger, F. Bahamonde-Birke, I. Frenzel, G. Liedtke, S. Trommer, B. Lenz und D. Heinrichs, „Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr,“ e-Mobil BW GmbH, Stuttgart, 2017.
- [85] M. Adorno, „Trans.info,“ 20 05 2021. [Online]. <https://trans.info/de/laderaumoptimierung-besser-als-ein-transport-management-system-237698>. [Zugriff am 25 08 2021].
- [86] M. Rathmann, „eurotransport.de,“ 08 11 2017. [Online]. <https://www.eurotransport.de/artikel/siemens-betreibt-ehighway-in-den-usa-oberleitungs-lkw-starten-in-kalifornien-9740421.html>. [Zugriff am 25 08 2021].
- [87] Siemens AG, „Siemens.com,“ 22 06 2016. [Online]. <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/start-des-weltweit-ersten-ehighwayschweden>. [Zugriff am 26 08 2021].
- [88] „Krummen Kerzers,“ 01 11 2019. [Online]. <https://krummen.com/aktuelles/wasserstoff-als-lkw-antrieb-zukunftsfaehig-oder-nicht-ausgereift/>. [Zugriff am 26 08 2021].
- [89] M. Gyetko, S. Pichlmaier und S. von Roon, „Energiewirtschaftliche Auswirkungen autonomer Fahrtechnologie auf den Verkehrssektor,“ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2021.

- [90] J. Neuhausen, C. Foltz, P. Rose und F. Andre, „Making zero-emission trucking a reality - Truck Study 2020: Routes to decarbonizing commercial vehicles,“ strategy&, 2020.
- [91] „Allianz Pro Schiene - Daten & Fakten,“ 14 10 2021. [Online]. <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/daten-fakten/>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: OH-Lkw mit Stromabnehmersystem	13
Abbildung 2: Oberleitungsstrecke des Pilotprojekts eWayBW	15
Abbildung 3: Oberleitungsbus und -infrastruktur	19
Abbildung 4: Mechatronisches Konzept des Dachstromabnehmers	20
Abbildung 5: Funktionale Architektur des autonomen Fahrens	22
Abbildung 6: Mögliche Betriebszustände mit redundanten Sensoriken	25
Abbildung 7: Landmarken-konzept basierend auf Radar	29
Abbildung 8: Erkennungskonzept basierend auf IR-Sensoren	30
Abbildung 9: Gesetzlich vorgegebene Tageslenk- und Ruhezeiten für Lkw-Fahrende	34
Abbildung 10: Skizze des Simulationsaufbaus	38
Abbildung 11: Fahrtgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn in Szenario 1	41
Abbildung 12: Fahrtgeschwindigkeiten ein- bzw. ausfahrender Fahrzeuge in Szenario 1	42
Abbildung 13: Fahrstreifenaufteilungen in Szenario 1	42
Abbildung 14: Fahrtgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn in Szenario 2	43
Abbildung 15: Fahrtgeschwindigkeiten ein- bzw. ausfahrender Fahrzeuge in Szenario 2	44
Abbildung 16: Fahrstreifenaufteilungen in Szenario 2	45
Abbildung 17: Kostenstruktur in der Transportlogistik für herkömmliche Lkw	54
Abbildung 18: Prognose zum Anschaffungspreis von Lkw unterschiedlicher Antriebsarten bis 2030	55
Abbildung 19: Prognose der Nutzerkosten für Diesel-Lkw und O-Lkw für ein exemplarisches Nutzerprofil im Jahr 2030	56
Abbildung 20: Kombiniertes Güterverkehr Schiene und Straße	59
Abbildung 21: Vorschläge nächster Schritte auf dem Weg zu hochautomatisiertem Oberleitungsstraßengüterverkehr	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung von Kraftfahrzeugen mit Systemen zum autonomen Fahren nach SAE J3016	9
Tabelle 2: Fahrzeugsensorik zur Positionierung und Objekterkennung	27
Tabelle 3: Degradationserscheinungen	28
Tabelle 4: Annahmen zum Energiebedarf eines Streckenabschnitts	32
Tabelle 5: Energiebedarf Szenarien	32
Tabelle 6: Vergleich möglicher Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr	48