

---

# Quantifizierung der Treibhausgas- emissionen des oberleitungs- gebundenen Straßengüterverkehrs

---

**M.Sc. Ferdinand Schöpp**

geboren in Usingen

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik

Institute of Transport Planning  
and Traffic Engineering

Prof. Eva Kaßens-Noor, Ph. D.

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke

---

Verfasser: M.Sc. Ferdinand Schöpp  
Titel der Dissertation: Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des  
oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs  
Dissertationsort: Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Tag der Einreichung: 13.12.2023  
Tag der mündlichen Prüfung: 25.03.2024

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International  
<https://creativecommons.org/licenses>

Herausgeber:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik  
Otto-Berndt-Straße 2  
64287 Darmstadt

[www.tu-darmstadt.de/verkehr](http://www.tu-darmstadt.de/verkehr)  
[ivv@verkehr.tu-darmstadt.de](mailto:ivv@verkehr.tu-darmstadt.de)

Schriftenreihe der Institute für Verkehr  
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik  
Heft V52

ISSN 1613-8317

---

Es ist mir ein besonderes Anliegen, dass sich sämtliche Geschlechter von den nachfolgenden Ausführungen in dieser Dissertationsschrift angesprochen fühlen. Ich habe hierfür versucht, möglichst durchgehend geschlechtsneutrale Begriffe zu verwenden. In wenigen Fällen, insbesondere dann, wenn es sich bei Begriffen um in der Literatur etablierte Fachbegriffe handelt, habe ich aufgrund der eindeutigen Zuordnung den in der Literatur gängigen Fachbegriff übernommen. Auch direkte Zitate wurden nicht angepasst.

Sollten trotz großer Sorgfalt Aussagen nicht geschlechtsneutral formuliert sein, bitte ich höflichst um Nachsicht und möchte ausdrücklich darauf hinweisen – sofern sich die Aussage nicht konkret auf ein Geschlecht bezieht – dass ich mit meinen Aussagen dennoch alle Geschlechter ansprechen möchte.





---

## DANKSAGUNG

---

Die Anfertigung der Dissertationsschrift hat mir viel Freude bereitet, zeitgleich aber auch einiges abverlangt. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich auf meinem Weg begleitet haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze. Ohne ihn wäre die Anfertigung der Doktorarbeit nicht möglich gewesen. Bereits im Studium hat er mich mit seinem strukturierten Vorgehen und seiner großen Professionalität sehr fasziniert. In meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter habe ich unglaublich viel von ihm lernen dürfen. Die vielfältigen Möglichkeiten, die er mir eröffnete, haben mich sehr geprägt. Er war mir jederzeit ein großes Vorbild.

Auch meinem Korreferenten, Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke, möchte ich für die zu jeder Zeit vertrauensvolle, unkomplizierte und sehr wertschätzende Zusammenarbeit sehr herzlich danken.

Insbesondere im letzten Jahr der Anfertigung meiner Doktorarbeit durfte ich Prof. Eva Kaßens-Noor, Ph.D. kennenlernen. Sie übernahm die Leitung des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der TU Darmstadt. Sie hat meine Arbeit durch das Öffnen neuer Perspektiven sehr bereichert. Danken möchte ich ihr vor allem für das ausgesprochen große Vertrauen, das sie in mich hatte.

Mein außerordentlicher Dank gilt zudem Özgür Öztürk, Ph.D., der mich mit seinen exzellenten Fähigkeiten in der Datenverarbeitung und im Datenmanagement erstklassig unterstützte.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich ebenfalls sehr bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen bedanken, welche ich zu keiner Zeit hätte missen wollen: Nicole von Stetten, Laurenz Bremer, Meng Cai, Kristin Follmann, Sunghyun Jang, Dr.-Ing. Wei Jiang, Matthias Lange, Regina Linke, Marc Lüke, Dr.-Ing. Karin Menges, Dr.-Ing. Tobias Monzert, Sebastian Pfirmann, Dr.-Ing. Kevin Rolko, Maya Scheyltjens, Dr.-Ing. Le Thi Huong, Dr.-Ing. Truong Le Xuan, Danny Wauri, Jürgen K. Wilke, Dr.-Ing. Kim Wilke und Dr.-Ing. Xiaochen Yu.

Ein ganz besonderer Dank gilt überdies dem BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) für die Förderung des Forschungsprojekts ELISA II-B, in dessen Rahmen die vorliegende Forschungsarbeit angefertigt wurde. Auch bedanke ich mich für die kontinuierliche und wertvolle Unterstützung durch die ELISA-Projektpartner: DIE AUTOBAHN GMBH DES BUNDES, SIEMENS MOBILITY GMBH, E-NETZ SÜDHESSEN AG. Auch den assoziierten Transportunternehmen SPEDITION HANS ADAM SCHANZ GMBH & CO. KG, SPEDITION KNAUF GMBH, LUDWIG MEYER GMBH & CO. KG, CONTARGO GMBH & CO. KG sowie der MERCK KGAA gilt mein großer Dank. Sie erst haben es durch den Einsatz der Oberleitungs-Lastkraftwagen in ihrem Tagesgeschäft mit ihren hervorragenden Fahrerinnen und Fahrern möglich gemacht, die für meine Arbeit so wichtige Datengrundlage zu generieren. Darüber hinaus habe ich die Unterstützung durch SCANIA sowie den Austausch mit den Kolleginnen und Kollegen der anderen eHighway-Forschungsprojekte jederzeit sehr geschätzt.

Von Herzen danken möchte ich meiner Familie, die in den vergangenen Monaten hat sehr auf mich verzichten müssen. Ohne die bedingungslose Unterstützung meiner Eltern Regina Reusch und Günther Schöpp, meiner Schwester Anika Neubauer sowie meinen Stiefeltern Enikö Schöpp und Klaus Reusch, die mich auf meinem Lebensweg so sehr geprägt haben, wäre mir das Anfertigen der Dissertationsschrift um einiges schwerer gefallen.

Auch meinen Freunden danke ich für ihr großes Verständnis, dass ich während der Anfertigung der Dissertationsschrift so wenig Zeit für sie hatte.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Partnerin Renate Günther. Ohne ihre Unterstützung, ihren Zuspruch, ihre vielen Aufmunterungen sowie ihr uneingeschränktes Vertrauen in mich, wäre es mir nicht möglich gewesen, meine Doktorarbeit so zielgerichtet fertigstellen zu können. Sie hat nie an mir gezweifelt, obwohl sie am meisten auf mich hat verzichten müssen.



---

---

## KURZFASSUNG

---

Im Jahr 2030 dürfen nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Verkehrssektor 85 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert werden (Anlage 2 (zu §4) KSG). Im Vergleich zum Jahr 2019 entspricht dies einer Reduzierung der verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen um knapp die Hälfte (BMUV 2022b).

Demgegenüber steht jedoch unter anderem ein langfristig wachsender Verkehrssektor und in diesem insbesondere ein prosperierender Straßengüterverkehr (BMVBS 2008, S. 212-213 & S. 236-237; BMVI 2021, S. 218-219 & S. 244-245). Aufgrund verschiedenster Einflüsse verdoppelte sich in der Zeitspanne von 1990 bis heute (2023) die über die Straße realisierte Güterverkehrsleistung. Darüber hinaus gewann der Straßengüterverkehr über die vergangenen Dekaden aufgrund seiner vorteilhaften, charakteristischen Systemeigenschaften verkehrsträgerübergreifend sukzessive auch an immer weiteren Marktanteilen im Modal Split: Mit rund 75 % ist der Straßengüterverkehr gegenwärtig der mit Abstand bedeutendste Verkehrsträger im innerdeutschen Güterverkehrsmarkt (BMVBS 2008, S. 236-237; BMVI 2021, S. 244-245; Muchna u. a. 2021; Schulte 2013; Kummer u. a. 2006; Aberle 2009; Posset u. a. 2014, S. 12).

Der Straßengüterverkehr steht allerdings auch für eine nicht unerhebliche Menge an Treibhausgasemissionen. Rund ein Drittel der im innerdeutschen Verkehrssektor anfallenden Treibhausgasemissionen lässt sich auf den Straßengüterverkehr zurückführen. Dies entspricht rund sieben Prozent sämtlicher in Deutschland emittierten Treibhausgase (BMUV 2022b; BMU 2021, S. 36).<sup>1</sup> Diese Treibhausgasemissionen entstehen vor allem in Folge der Verbrennung fossiler Energieträger durch den Einsatz dieselbetriebener Fahrzeuge (BMU 2021, S. 36; Allekotte u. a. 2020, S. 44).

Möchte Deutschland seine ambitionierten Klimaschutzziele einhalten, wird es für das vorstehend umrissene Spannungsfeld effektiver, aber auch effizienter Lösungen bedürfen. Gelingt es dabei nicht, umgehend zukunftsfähige Lösungen für den Straßengüterverkehr erfolgreich zu etablieren, die ökonomisch, ökologisch und sozial verträglich sind, wird Deutschland seine Klimaschutzziele verfehlen.

Die vorliegende Dissertationsschrift setzt an dieser Stelle an und beschäftigt sich intensiv mit dem sogenannten eHighway-System – eine oberleitungsgebundene Elektrifizierungsoption zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. Das eHighway-System ermöglicht entsprechend ausgestatteten Lastkraftwagen – sogenannte Oberleitungs-Lastkraftwagen (O-Lkw) – während der Fahrt dynamisch mit elektrischer Energie versorgt werden zu können. Hierfür wird das effiziente Energieversorgungskonzept des elektrischen Schienen(güter)verkehrs auf die Straße übertragen, ohne dabei die charakteristisch hohe Flexibilität des Straßengüterverkehrs zu beeinträchtigen (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24). Damit das funktioniert, wird in die bestehende Straßeninfrastruktur eine Oberleitungsanlage integriert. O-Lkw verfügen über einen Stromabnehmer, mit dem eine kraftschlüssige Verbindung zur Oberleitungsanlage hergestellt werden kann. In Folge wird der O-Lkw mit elektrischer Energie aus der Oberleitungsanlage versorgt. Bedarfsgerecht ausgelegte elektrische Energiespeicher und gegebenenfalls ein ergänzendes, weiteres Antriebssystem erlauben es, dass O-Lkw auch auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten eingesetzt werden können – beispielsweise im Vor- beziehungsweise Nachlauf eines elektrifizierten Streckenabschnitts, zwischen zwei elektrifizierten Streckenabschnitten, in Tunneln und Anschlussstellen oder um vorausfahrende, langsamere Fahrzeuge zu überholen beziehungsweise um Gefahrenstellen auszuweichen (Wietschel u. a. 2017, S. 19; Jöhrens, Lehmann, u. a. 2022, S. 5).

Die in dieser Dissertationsschrift durchgeführte Forschung basiert auf dem vom BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ geförderten Forschungsprojekt „ELISA“ (Elektrifizierter, innovativer

---

<sup>1</sup> Wert von 2019: Aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie wird an dieser Stelle das Jahr 2019 als jüngstes, belastbares Referenzjahr verwendet.

---

Schwerverkehr auf Autobahnen). Auf einem der meistbefahrenen Autobahnabschnitten Europas, der Bundesautobahn (BAB) 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt, wurde 2018 ein fünf Kilometer langer Streckenabschnitt beidseitig mit einer Oberleitungsanlage ausgestattet. Fünf O-Lkw nahmen zwischen 2019 und 2020 sukzessive den Betrieb auf und befinden sich seitdem im operativen (und realen) Tagesgeschäft bei fünf diversifizierten Transportunternehmen (Boltze 2020; Schöpp u. a. 2022). Ausgestattet mit einem Datenlogger generieren diese O-Lkw mit einer Frequenz von 100 Millisekunden zu mehr als einhundert verschiedenen Fahrzeugparametern eine einzigartige und exklusive Datenbasis. Fast 650.000 auswertbare Kilometer dienen der vorliegenden Dissertationsschrift als Datengrundlage.

In diesem Rahmen berichtet die Dissertationsschrift zu der Forschungsfrage, wie das eHighway-System konkret dazu beitragen kann, dass Deutschland seine gesetzten Klimaschutzziele erreichen können. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf der Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems. Vor allem soll das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw – resultierend aus dem Fahrzeugbetrieb – analysiert werden.

Basierend auf der Durchführung und anschließenden Auswertung von Forschungsfahrten mit O-Lkw werden zunächst Betriebsmodi eines O-Lkws identifiziert und definiert. Zu unterscheiden sind einerseits die drei hybriden Betriebsmodi *Hybrid-Standardmodus*, *Hybrid-Zwangslademodus* und *Hybrid-Oberleitungsmodus*. Andererseits ist zwischen den drei elektrischen Betriebsmodi *Elektrisch-Standardmodus*, *Elektrisch-Zwangsmodus* und *Elektrisch-Oberleitungsmodus* zu differenzieren. Ferner wird festgestellt, dass zwischen dem Übergang von einem Betriebsmodus zu einem anderen Betriebsmodus Übergangsphasen entstehen – auch bezeichnet als *Übergangsmodus*.

Aufbauend auf den Betriebsmodi werden charakteristische Energieflusskennwerte eines O-Lkws berechnet. Es zeigt sich, dass sich entsprechend des Betriebsmodus teils deutlich gegensätzliche Energieverbrauchs-kennwerte feststellen lassen. Operiert ein O-Lkw beispielsweise im Hybrid-Standardmodus, so ist dies durch einen vergleichsweise hohen Dieselmotorkraftstoffverbrauch gekennzeichnet – im Durchschnitt werden in diesem Betriebsmodus 30,53 l/100 km Dieselmotorkraftstoff verbraucht. Operiert der O-Lkw hingegen im Elektrisch-Standardmodus, kann gänzlich ohne Dieselmotorkraftstoff gefahren werden. Bezieht ein O-Lkw elektrische Energie aus einer Oberleitungsanlage, wird einerseits der Dieselmotorkraftstoffverbrauch erheblich, teils vollständig gesenkt; andererseits kann zusätzlich elektrische Energie zur Steigerung der elektrischen Reichweite auf nachgelagerten Streckenabschnitten ohne Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage aufgenommen werden.

Insgesamt stellt sich heraus, dass der Einsatz von O-Lkw messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr erlaubt. Mit einem Oberleitungsanteil von weniger als fünf Prozent (Bedingungen, die im ELISA-Forschungsprojekt vorliegen), kann ein O-Lkw bereits zwischen 14 % und 17 % an aus dem Fahrbetrieb resultierenden Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) einsparen. Mithilfe eines im Verlauf der Arbeit entwickelten Skalierungs- und Vergleichsrechners („ERSparnis“) lässt sich darüber hinaus ermitteln, dass der Einsatz von O-Lkw allerdings auch Einsparungen an aus dem Fahrbetrieb resultierenden Treibhausgasemissionen in Höhe von bis zu 100 % ermöglichen kann. Voraussetzung hierfür ist, dass O-Lkw in einem sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen operieren, die externe elektrische Energieversorgung zu 100 % mit Ökostrom erfolgt und der O-Lkw über eine ausreichend leistungsfähige E-Maschine sowie einen sinnvoll dimensionierten elektrischen Energiespeicher verfügt. Eine Plug-in-Ladefunktion stellt dabei eine anzustrebende Ergänzung der technischen Konfiguration des O-Lkws dar.

Die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems führt zu der Schlussfolgerung, dass es für den wirksamen Einsatz des eHighway-Systems eines größeren Kernnetzes an Oberleitungsanlagen bedarf. Ein solcher Ausbau kann aufgrund verschiedener Faktoren jedoch auf eine

---

mangelnde Akzeptanz und Ablehnung in der Gesellschaft stoßen. Wird es nicht gelingen, den Ausbau eines Netzes an Oberleitungsanlagen und die gesellschaftliche Akzeptanz in Einklang zu bringen, wird der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr mangels ausreichender Netzdichte nicht zum Erreichen der nationalen Klimaschutzziele beitragen können. Eine Betrachtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems darf aus diesem Grund nicht fehlen. Dieser Aufgabe wird im Verlauf der Dissertationsschrift mit einem Exkurs ergänzend nachgegangen. Basierend auf einer durchgeführten standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen zeigt sich (n=752), dass das eHighway-System von einem nicht unerheblichen Teil der Gesellschaft gegenwärtig nicht akzeptiert wird. Zwar lassen die befragten Personen durchaus verlauten, dass sie den Klimawandel für ein ernstzunehmendes Problem erachten (>90 %) und dass Treibhausgasemissionen zu reduzieren seien (>90 %). Auch sind sie der Auffassung, dass zwar möglichst viele Güter auf die Schiene verlagert werden sollten (ca. 80 %), aber dennoch auch der Straßengüterverkehr in Zukunft emissionsärmer zu realisieren sei (ca. 85 %). Statt einer Elektrifizierung von Lastkraftwagen favorisieren die befragten Personen jedoch vielmehr den Einsatz von Brennstoffzellen-/Wasserstoff-Lkw (mit knapp 80 % Zuspruch) beziehungsweise eine stetige Verbesserung von Verbrennungsmotoren oder die Entwicklung und Anwendung von synthetischen Kraftstoffen (mit einem Anteil von jeweils etwas mehr als die Hälfte der befragten Personen). Bezüglich des eHighway-Systems zeigt sich konkret: Über ein Drittel der befragten Personen hegt Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System; Knapp die Hälfte der befragten Personen nimmt eine negative Haltung gegenüber dem eHighway-System ein; Fast zwei Drittel der befragten Personen sind nicht dazu bereit, ihre Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen; Rund die Hälfte der befragten Personen spricht sich dafür aus, dass sie nicht wünschen, dass das eHighway-System in Zukunft weiter ausgebaut wird.

Es eröffnet sich ein Spannungsfeld: Einerseits wird im Rahmen der Dissertationsschrift der Nachweis erbracht, dass das eHighway-System – sofern O-Lkw entsprechend der vorstehend beschriebenen Voraussetzungen eingesetzt werden – erheblich zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr beitragen kann. Andererseits wird das eHighway-System von einem nicht unerheblichen Anteil der Gesellschaft derzeit abgelehnt, trotz des Bewusstseins, Lösungsansätze zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr zügig und wirksam implementieren zu müssen. Die Analyse dieses Spannungsfeldes erlaubt die Schlussfolgerung, dass zum aktuellen Zeitpunkt eine Diskrepanz zwischen dem in der Gesellschaft subjektiv wahrgenommenen und dem tatsächlichen Potenzial des eHighway-Systems zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr vorliegt: Es diffundieren einerseits zu wenige, andererseits vor allem auch falsche Informationen zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems durch die Gesellschaft. Ohne die Eigenschaften eines Akzeptanzobjekts zu kennen oder gar fehlerhafte Informationen zu diesem vorliegen zu haben, wird sich ein Akzeptanzsubjekt von einem Akzeptanzobjekt jedoch nur selten überzeugen lassen. Eine unzureichende Informationsbereitstellung führt in Summe gegenwärtig zu einer Ablehnung des eHighway-Systems bei einem nicht unerheblichen Teil der Gesellschaft.

Abschließend festzuhalten bleibt: Infolge des nachgewiesenen Potenzials zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr durch den Einsatz von O-Lkw muss die Handlungsempfehlung ausgesprochen werden, dass das eHighway-System ausgebaut werden sollte. Das eHighway-System kann einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, dass Deutschland seinen Klimaschutzzielen auch im Straßengüterverkehr gerecht werden kann. Ein Ausbau wird im gleichen Zuge jedoch auch eine starke Intensivierung von aktiver Öffentlichkeitsarbeit bedürfen. Die Diskrepanz zwischen dem in der Gesellschaft subjektiv wahrgenommenen und dem tatsächlich möglichen Potenzial des eHighway-Systems zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr muss gelöst werden, soll das eHighway-System erfolgreich am Markt platziert werden.

---

---

## ABSTRACT

---

According to the German Federal Climate Protection Act, Germany's transport sector is allowed to emit 85 million tons of CO<sub>2</sub> in 2030 (Annex 2 (to §4) KSG). This corresponds to a reduction of transport-related greenhouse gas emissions by almost half compared to current CO<sub>2</sub> projections (BMUV 2022b).

However, this is contrasted by a transport sector that is growing in the long term as well as a prospering road freight transport sector (BMVBS 2008, S. 212-213 & S. 236-237; BMVI 2021, S. 218-219 & S. 244-245). Due to a wide variety of influences, road freight transport performance doubled between 1990 and today (2023). In addition, over the past decades, road freight transport has gradually gained more and more market share in the modal split due to its advantageous, characteristic system properties across all modes of transport. At around 75 percent, road freight transport is currently by far the most important mode of transport in the German domestic freight transport market (BMVBS 2008, S. 236-237; BMVI 2021, S. 244-245; Muchna u. a. 2021; Schulte 2013; Kummer u. a. 2006; Aberle 2009; Posset u. a. 2014, S. 12).

However, road freight transport also stands for a considerable amount of greenhouse gas emissions. Road freight transport is responsible for one-third of the greenhouse gases emitted in the German domestic transport sector, equivalent to around seven percent of all greenhouse gases emitted in Germany (BMUV 2022b; BMU 2021, S. 36).<sup>2</sup> Almost all of these greenhouse gas emissions can be traced back to the combustion of fossil fuels (BMU 2021, S. 36; Allekotte u. a. 2020, S. 44).

If Germany wants to meet its ambitious climate protection targets, it will need effective and efficient solutions to manage the tensions outlined above. If sustainable solutions for road freight transport that are economically, ecologically and socially compatible are not successfully established without delay, Germany will fail to meet its climate protection targets.

This dissertation starts at this point and deals intensively with the so-called eHighway system – an electrification option based on overhead contact lines to reduce greenhouse gas emissions in road freight transport. The eHighway system enables suitably equipped trucks – so-called overhead contact line trucks (O-trucks) – to be dynamically supplied with electrical energy while driving. For this purpose, the efficient energy supply concept of electric rail transport is transferred to the road without compromising the characteristically high flexibility of road freight transport (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24). To make this work, an overhead contact line system is integrated into the existing road infrastructure. O-trucks have a pantograph that can be used to establish a force-fit connection to the overhead contact line system. As a result, the O-truck is supplied with electrical energy from the overhead contact line system. Electrical energy storage devices designed to meet requirements and, if necessary, an additional drive system allow O-trucks to be used on non-electrified sections, too – for example, in the run-up or run-down of an electrified section, between two electrified sections, in tunnels and interchanges, to overtake slower vehicles in front or to avoid danger spots (Wietschel u. a. 2017, S. 19; Jöhrens, Lehmann, u. a. 2022, S. 5).

This research is based on the project ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen, engl.: Electrified, innovative road freight transport on highways) on behalf of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. On one of the busiest highways in Europe (A5 next to Frankfurt am Main, Germany), a five-kilometer stretch (both directions) was equipped with an overhead contact line infrastructure in 2018. Five O-trucks have been successively launched in real-world conditions from 2019 to 2020 and different transport companies are still operating them (Boltze 2020; Schöpp u. a. 2022). For the data analyses, each O-truck is equipped with a datalogger. Around a hundred

---

<sup>2</sup> Value of 2019: Due to the impact of the Corona pandemic, 2019 is used as the most recent, resilient reference year at this point.



---

parameters are measured at a frequency of up to 100ms. Almost 650,000 analyzable kilometers serve as data basis for this dissertation.

In this context, the dissertation addresses the research question of how the eHighway system can concretely contribute to Germany's ability to achieve its climate protection targets. The focus of the research is on the quantification of the greenhouse gas emissions of the eHighway system. In particular, the greenhouse gas emission saving potential of O-trucks – resulting from the truck operation – is analyzed.

Based on the conduction and subsequent analysis of research drives with O-trucks, operating modes of an O-truck are first identified and defined. On the one hand, the three hybrid operating modes *hybrid standard mode*, *hybrid forced charging mode* and *hybrid catenary mode* are to be distinguished. On the other hand, a differentiation must be made between the three electric operating modes *electric standard mode*, *electric forced mode* and *electric catenary mode*. Furthermore, it could be determined that transition phases occur between the transition from one operating mode to another operating mode (also referred to as *transition mode*).

Based on the operating modes, characteristic energy flow values of an O-truck are calculated. It becomes evident that, depending on the operating mode, in some cases clearly opposing energy consumption characteristics can be determined. For example, if an O-truck operates in the hybrid standard mode, this is characterized by a comparatively high diesel fuel consumption – on average, 30.53 l/100 km of diesel fuel are consumed in this operating mode. If, on the other hand, the O-truck operates in the electric standard mode, no diesel fuel is required at all. If an O-truck receives electric energy from an overhead contact line system, on the one hand diesel fuel consumption is reduced considerably, in some cases completely; on the other hand, additional electric energy can be absorbed to increase the electric range on downstream route sections without the availability of an overhead contact line system.

Overall, it can be concluded that the use of O-trucks allows measurable savings of greenhouse gas emissions in road freight transport. With an overhead contact line share of less than five percent (conditions present in the ELISA research project), an O-truck can already save between 14 % to 17 % in greenhouse gas emissions (well-to-wheel). With the help of a scaling and comparison calculator developed in the course of the dissertation ("ERSparnis"), it can also be determined that the use of O-trucks can, however, enable greenhouse gas emission savings of up to 100 %. The prerequisite for this is that O-trucks operate in a properly developed network of overhead contact lines, the external electrical energy supply is 100% green electricity, and the O-truck has a sufficiently powerful electric machine as well as a reasonably sized electrical energy storage device. Furthermore, a plug-in charging function is a valuable complement to the technical configuration of the O-truck.

The quantification of greenhouse gas emissions of the eHighway system leads to the conclusion that a larger core network of overhead contact line systems is needed for the effective deployment of the eHighway system. However, such an expansion may face a lack of acceptance and rejection from society due to a variety of factors. If it is not possible to reconcile the expansion of a network of overhead contact line systems and social acceptance, the eHighway system will not be able to contribute to the achievement of national climate protection targets due to an insufficient network density. For this reason, a consideration of the social acceptance of the eHighway system cannot be omitted. In the course of the dissertation, this task is additionally pursued with an excursus. Based on a standardized survey conducted by means of an online questionnaire, it is shown (n=752) that the eHighway system is currently not accepted by a not inconsiderable part of society. The respondents do indeed state that they consider climate change to be a serious problem (>90 %) and that greenhouse gas emissions must be reduced (>90 %). Moreover, they are of the opinion that as much freight as possible should be shifted

---

to rail (approximately 80 %), but that road freight transport should also be realized with lower emissions in the future (approximately 85 %). Instead of the electrification of trucks, however, the respondents favor the use of fuel cells/hydrogen trucks (with close to 80 % approval) or a continuous improvement of combustion engines or the development and use of synthetic fuels (with a share of slightly more than half of the respondents in each case). With regard to the eHighway system, the following can be seen in concrete terms: Over one-third of the respondents expresses concerns about the eHighway system; Almost half of the respondents have a negative attitude toward the eHighway system; Almost two-thirds of the respondents are not willing to convince their peers about the eHighway system; About half of the people surveyed say that they do not want the eHighway system to be expanded in the future.

On the one hand, the dissertation proves that the eHighway system can contribute significantly to the reduction of greenhouse gas emissions in road freight transport – provided that O-trucks are used in accordance with the conditions described above. On the other hand, the eHighway system is rejected by a not insignificant part of the society, despite the awareness that solutions for the reduction of greenhouse gas emissions in road freight transport have to be implemented quickly and effectively. The analysis of this field of tension allows the conclusion that at the moment there is a discrepancy between the subjectively perceived and the actual potential of the eHighway system to reduce greenhouse gas emissions in road freight transport. On the one hand, there is not only too little information about the greenhouse gas emission reduction potential of the eHighway system diffusing through society, but on the other hand, it is mainly incorrect. Without knowing the characteristics of an acceptance object or even having incorrect information about it, an acceptance subject will rarely be convinced by an acceptance object. Inadequate provision of information currently leads to a rejection of the eHighway system by the society.

To conclude: As a result of the proven potential for reducing greenhouse gas emissions in road freight transport through the use of O-trucks, the recommendation for action must be that the eHighway system should be expanded. At the same time, however, an expansion will also require a strong increase in active public relations work. The discrepancy between the subjective perception in society and the actual potential of the eHighway system to reduce greenhouse gas emissions in road freight transport must be resolved if the eHighway system is to be successfully launched on the market.



DANKSAGUNG.....	V
KURZFASSUNG .....	VII
ABSTRACT.....	X
INHALTSVERZEICHNIS .....	XIII
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANLASS UND MOTIVATION .....	1
1.2 ZIELSETZUNG DER FORSCHUNGSARBEIT .....	4
1.3 ABGRENZUNG DES FORSCHUNGSRAHMENS .....	5
1.4 VORGEHENSWEISE UND AUFBAU DER DISSERTATIONSSCHRIFT .....	7
<b>2. GRUNDLAGEN ZUM OBERLEITUNGSGEBUNDENEN STRAßENGÜTERVERKEHR.....</b>	<b>8</b>
2.1 ANALYSE DES IST-ZUSTANDS UND DER GEGENWÄRTIGEN ENTWICKLUNGEN IM STRAßENGÜTERVERKEHR ..	8
2.1.1 ENTWICKLUNG DER INNERDEUTSCHEN GÜTERVERKEHRSLEISTUNG .....	8
2.1.2 AUSGEWÄHLTE URSACHEN DES (STRAßEN-)GÜTERVERKEHRSWACHSTUMS .....	10
2.1.3 EINFLUSS DES STRAßENGÜTERVERKEHRS AUF DIE ENTWICKLUNG VERKEHRSBEDINGTER TREIBHAUSGASEMISSIONEN .....	14
2.1.4 AUSZUG POLITISCHER ZIELVORGABEN FÜR EINEN KLIMAFREUNDLICHEN STRAßENGÜTERVERKEHR ..	16
2.2 DER OBERLEITUNGSGEBUNDENE STRAßENGÜTERVERKEHR IM FOKUS: DAS eHIGHWAY-SYSTEM .....	22
2.2.1 GRUNDKONZEPT DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	22
2.2.2 ENERGIEVERSORGUNG DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....	22
2.2.3 FAHRWEG DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	23
2.2.4 FAHRZEUGE DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	24
2.2.5 ENTWICKLUNGSPFAD DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....	24
2.2.6 EINFÜHRUNG IN DAS FORSCHUNGSPROJEKT ELISA.....	25
2.3 IDENTIFIKATION VON FORSCHUNGLÜCKEN IN DER eHIGHWAY-FORSCHUNG .....	28
2.4 ZWISCHENFAZIT .....	30
<b>3. FACHLICHE UND METHODISCHE GRUNDLAGEN ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....</b>	<b>32</b>
3.1 EINFÜHRUNG IN DIE ÖKOLOGISCHEN WIRKUNGEN DES STRAßEN(GÜTER)VERKEHRS .....	32
3.2 ENERGIEVERBRAUCH VON FAHRZEUGEN UND WESENTLICHE EINFLUSSFAKTOREN .....	35
3.3 GRUNDLAGEN ZUR QUANTIFIZIERUNG VERKEHRSBEDINGTER TREIBHAUSGASEMISSIONEN.....	46
3.4 ALLGEMEINE ARBEITSSCHRITTE VON FORSCHUNGSVORHABEN IM VERKEHRSBEREICH.....	48
3.5 ZWISCHENFAZIT .....	50
<b>4. QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....</b>	<b>51</b>
4.1 VERFAHRENTWICKLUNG .....	51
4.2 BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	55

4.2.1	TEILVERFAHREN ZUR IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	55
4.2.2	VERSTÄNDNISBILDUNG UND AUFBEREITUNG DER VORHANDENEN DATENBASIS .....	57
4.2.3	DURCHFÜHRUNG VON FORSCHUNGSFAHRTEN ZUR VERBESSERUNG DES DATENVERSTÄNDNISSES... ..	60
4.2.4	DEFINITION UND DATENBASIERTE IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS.....	62
4.2.5	ZUSAMMENFASSUNG ZU DEN BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	68
4.3	ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS .....	70
4.3.1	TEILVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG CHARAKTERISTISCHER ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS .....	70
4.3.2	ENERGIEFLUSSSCHEMATA FÜR EINEN O-LKW .....	72
4.3.3	METHODE ZUR DATENBASIERTEN BERECHNUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS.....	78
4.3.4	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS.....	88
4.3.5	ZUSAMMENFASSUNG ZU CHARAKTERISTISCHEN ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTEN EINES O-LKWS .....	97
4.4	TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTE SOWIE TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW .....	98
4.4.1	TEILVERFAHREN ZUR BERECHNUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN SOWIE ZUR ANALYSE DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS VON O-LKW .....	98
4.4.2	GRUNDLAGENAUFBEREITUNG UND VORÜBERLEGUNGEN ZUR ANALYSE VON TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN EINES O-LKWS .....	101
4.4.3	METHODE ZUR BERECHNUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN EINES O-LKWS.....	105
4.4.4	CHARAKTERISTISCHE TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTE EINES O-LKWS .....	107
4.4.5	TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND -EINSPARUNGEN IM ELISA-FORSCHUNGSPROJEKT.....	108
4.4.6	ENTWICKLUNG EINES SKALIERUNGS- UND VERGLEICHSRECHNERS.....	109
4.4.7	TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW .....	119
4.4.8	ZUSAMMENFASSUNG ZU TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN SOWIE ZUM TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW .....	121
4.5	ZWISCHENFAZIT .....	122
<b>5.</b>	<b>EXKURS: BETRACHTUNGEN ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....</b>	<b>124</b>
5.1	GRANULARITÄTSANSPRUCH AN DIE ERGEBNISSE UND VORGEHEN .....	124
5.2	FACHLICHE UND METHODISCHE GRUNDLAGENAUFBEREITUNG.....	125
5.2.1	EINFÜHRUNG IN DIE AKZEPTANZFORSCHUNG.....	125
5.2.2	AKZEPTANZTHEORIEN UND WESENTLICHE EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AKZEPTANZ .....	127
5.2.3	GRUNDLAGEN ZUR UNTERSUCHUNG VON AKZEPTANZ IM VERKEHRSBEREICH .....	130
5.3	GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	136
5.3.1	GRUNDLAGENKONZIPIERUNG.....	136
5.3.2	ERHEBUNGSVORBEREITUNG .....	138
5.3.3	ERHEBUNGSORGANISATION UND ERHEBUNGSDURCHFÜHRUNG .....	141
5.3.4	DATENAUFBEREITUNG .....	143
5.3.5	DATENANALYSE UND ERGEBNISSE .....	158
5.4	ZWISCHENFAZIT .....	162

<b>6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>164</b>
6.1 EINFÜHRUNG IN DIE DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....	164
6.2 BELASTBARKEIT DER ERGEBNISSE ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....	165
6.3 BELASTBARKEIT DES EXKURSES ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....	171
6.4 DAS TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL IM DISKURS MIT DER GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	174
6.5 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUR STEIGERUNG DER ZUKUNFTSFÄHIGKEIT DES eHIGHWAY-SYSTEMS ...	179
6.5.1 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUM HEBEN DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONS- POTENZIALS DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	180
6.5.2 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM ZUSAMMENHANG DES EXKURSES ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....	181
6.6 ZWISCHENFAZIT .....	183
<b>7. SCHLUSSBETRACHTUNGEN .....</b>	<b>186</b>
7.1 FAZIT .....	186
7.2 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF .....	189
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>i</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>v</b>
<b>FORMELVERZEICHNIS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>x</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>A1</b>



---

## 1. EINLEITUNG

---

*Ab 2045 dürfen in Deutschland keine durch den Menschen erzeugten Treibhausgase mehr emittiert werden (§3 Absatz 2 Satz 1 Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)). Demgegenüber steht unter anderem ein langfristig wachsender Verkehrssektor, und in diesem insbesondere ein prosperierender Straßengüterverkehr (BMVBS 2008, S. 212-213 & S. 236-237; BMVI 2021, S. 218-219 & S. 244-245). Gelingt es nicht, umgehend zukunftsfähige Lösungen für den Straßengüterverkehr erfolgreich zu etablieren, die ökonomisch, ökologisch aber auch sozial verträglich sind, wird Deutschland seine Klimaschutzziele verfehlen.*

*Die vorliegende Dissertationsschrift beschäftigt sich in diesem Themenkomplex mit der Quantifizierung der Treibhausgasemissionen und der gesellschaftlichen Akzeptanz des sogenannten eHighway-Systems: eine oberleitungsgebundene Elektrifizierungsoption zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs.*

*Dieses Kapitel dient hierbei der Einführung. Es werden zunächst der Anlass und die Motivation des Forschungsvorhabens vorgestellt. Es folgt eine Darlegung der Zielsetzung der Dissertationsschrift sowie die Abgrenzung des Forschungsrahmens. Abschließend wird in den Aufbau der Arbeit eingeführt und dabei in Kürze das methodische Vorgehen umrissen.*

### 1.1 ANLASS UND MOTIVATION

**Im Jahr 2030 dürfen nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Verkehrssektor 85 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert werden (Anlage 2 (zu §4) KSG). Das entspricht einer Reduzierung der verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen im Vergleich der Jahre 2019 zu 2030 um knapp die Hälfte (BMUV 2022b). Bis 2045 soll für ganz Deutschland dann eine Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden. Es dürfen faktisch keine anthropogenen – also durch den Menschen erzeugte – Treibhausgase mehr emittiert werden (§3 Absatz 2 Satz 1 KSG).**

**Provokativ formuliert soll nun das, was seit Jahrzehnten nicht gelingt, binnen weniger Jahre realisiert werden.** Im Verkehrssektor wurden 1990 rund 163 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert. In 2019, dem letzten belastbaren Referenzjahr vor Beginn der Corona-Pandemie, waren es 164 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (BMUV 2022b). Nicht nur, dass die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor im dargestellten Vergleich sogar leicht zunahmen – der Verkehrssektor ist damit der einzige Sektor in Deutschland, dem es bislang gar nicht gelang, seinen so wichtigen und dringend notwendigen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele zu leisten (Hendzlik u. a. 2022; BMUV 2022b).

**Natürlich muss in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden, dass der Verkehrssektor seit Jahrzehnten einem beachtlichen Wachstum unterliegt: Die Verkehrsleistung, sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr, ist förmlich ausschließlich durch Wachstum geprägt (BMVBS 2008, S. 212-213 & S. 236-237; BMVI 2021, S. 218-219 & S. 244-245).** Selbst verschiedene Krisenereignisse, die zwar kurzzeitig immer mal wieder zu temporären Einbrüchen im Verkehrssektor führten und führen, konnten den langfristigen Wachstumstrend bislang nicht brechen, so dass dem Verkehrssektor auch für die kommenden Jahre ein weiteres Wachstum prognostiziert wird (BMUV 2022c; BMVI 2019, S. 5). Ob die seit März 2020 grassierende Corona-Pandemie mit ihrem erheblichen Einschnitt hieran etwas ändern und ein anhaltender Rücksetzer in der Verkehrsleistung zu registrieren sein wird, ist derzeit noch ungewiss (BMUV 2022c). Erste Erholungstendenzen des Verkehrssektors zeichnen sich jedoch bereits wieder ab. Zweifelsohne wird „Verkehr“ – also die in der Regel zu Land, zu Wasser oder über den Luftweg stattfindende „Ortsveränderung von Personen, Gütern, Nachrichten oder Energie“ (FGSV Verlag 2020, Blatt 7) – so oder so stets als wesentlicher Bestandteil einer globalen, arbeitsteiligen und wohlhabenden Volkswirtschaft von ganz besonderer Relevanz sein (Bratzel & Teller mann 2008; BMUV o. J.). Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich die Verkehrsleistung in den kommenden Jahren organisch in großem Umfang zurückentwickeln wird. Sicherlich ist dies auch nicht im Interesse von Politik, Wirt-

---

schaft oder Gesellschaft, ist es doch der Verkehrssektor, der stark mit der Entwicklung des Wohlstandes eines Landes korreliert (Quaschnig 2020; Muchna u. a. 2021, S. 4). Es muss also gelingen, eine erfolgreiche Transformation hin zu einem klimaverträglichen Verkehrssektor zu realisieren.

**Bemühungen, um verkehrsbezogene Treibhausgase einzusparen, wurden zweifelsohne bereits unternommen.** Für den motorisierten Individualverkehr gewinnen beispielsweise batterieelektrische Fahrzeuge allmählich an Bedeutung, biogene Kraftstoffe sind schon seit längerer Zeit im Einsatz (BMU 2021, S. 37) und Grenzwerte für den zulässigen CO<sub>2</sub>-Ausstoß je gefahrenen Kilometer wurden definiert (BMU 2021, S. 39). Aber auch der Schienenverkehr sowie die Binnenschifffahrt, die beide als umweltverträgliche Verkehrsträger gelten, wurden und werden durch verschiedene Masterpläne politisch gestärkt, um eine Verkehrsverlagerung insbesondere auf diese Verkehrsträger zu begünstigen (BMVI 2017b; BMVI 2019; Aberle 2009, S. 259).

**Trotz dieser Bemühungen gelang es bislang nicht, im Verkehrssektor nennenswerte Einsparungen an emittierten Treibhausgasen zu verzeichnen** (BMUB 2016, S. 49; Boltze 2020). Es lässt sich zwar zugutehalten, dass trotz des beachtlichen Verkehrswachstums in den vergangenen Dekaden die Höhe der jährlich emittierten Treibhausgase im Verkehrssektor weitgehend stagnierte (BMUV 2022b) und dass somit zumindest Einzelprozesse umweltverträglicher geworden sein müssen (BMUV 2022a). Doch Verbesserungsmaßnahmen in einem solchen Ausmaß reichen nicht aus, um die Einhaltung der Klimaschutzziele bis 2045 zu gewährleisten. Auch der temporäre Rückgang der Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 gibt keinerlei Anlass, hierin eine Trendwende zu erkennen – dieser Rückgang wird maßgeblich auf die durch die Corona-Pandemie hervorgerufenen Effekte zurückgeführt (BMUV 2021; BMU 2021, S. 36). So ließ sich die nach Bundes-Klimaschutzgesetz zulässige Jahresemissionsgrenze für 2020 im Verkehrssektor zwar einmalig einhalten – zumindest auf dem Papier – doch überstiegen die emittierten Treibhausgase in 2021 bereits wieder die Zielvorgaben (Günther & Gniffke 2022).

**Ein besonderer Handlungsdruck besteht vor allem für den Straßengüterverkehr (Boltze 2019). Der Straßengüterverkehr allein ist verantwortlich für mehr als ein Drittel der im innerdeutschen Verkehrssektor anfallenden Treibhausgasemissionen.** Das entspricht rund sieben Prozent sämtlicher in Deutschland emittierten Treibhausgase (BMUV 2022b; BMU 2021, S. 36).<sup>3</sup> Überdies ist zu beachten, dass die durch den Straßengüterverkehr emittierten Treibhausgase über die vergangenen dreißig Jahre einem Wachstumstrend unterlagen und gegenwärtig deutlich mehr Treibhausgase im Straßengüterverkehr emittiert werden, als dies beispielsweise in 1990 noch der Fall war (Allekotte u. a. 2020, S. 139). Diese Treibhausgasemissionen lassen sich dabei auf die Verbrennung fossiler Energieträger zurückführen (BMU 2021, S. 36). Im Straßengüterverkehr sind bislang fast ausschließlich dieselbetriebene Fahrzeuge im Einsatz (Allekotte u. a. 2020, S. 44; Boltze 2020). Neben der Problematik, dass hierdurch umweltverträgliche Transporte über den Straßengüterverkehr zum gegenwärtigen Zeitpunkt nahezu unmöglich sind, eröffnet sich ein weiteres Handlungsfeld:

**Der Straßengüterverkehr ist in größtem Maße auf importabhängige fossile Energieträger angewiesen** (BMVI 2021, S. 304-307). In 2019 wurden 99,1 % der in Deutschland verwendeten Mineralöle importiert (BMWi 2021). Nicht nur, dass hieraus – vor allem kurzfristig – unberechenbare Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Ländern resultieren können (Andruleit u. a. 2015); weiterhin sind, so zumindest nach QUASCHNING (2020, S. 16), die Vorkommen fossiler Energieträger begrenzt und könnten in geraumer Zeit aufgebraucht sein.

**Dass vor allem im Straßengüterverkehr nun also enormer Handlungsdruck herrscht, wird nochmals deutlicher vor dem Hintergrund, dass insbesondere dieser seit Jahrzehnten einem erheb-**

---

<sup>3</sup> Wert von 2019: Aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie wird an dieser Stelle das Jahr 2019 als jüngstes, belastbares Referenzjahr verwendet.

---

**lichen Wachstumstrend unterliegt** (BMVBS 2008, S. 236-237; BMVI 2021, S. 244-245). Aufgrund verschiedenster Einflüsse und Treiber verdoppelte sich in der Zeitspanne von 1990 bis heute die über die Straße realisierte Güterverkehrsleistung. Darüber hinaus gewann der Straßengüterverkehr über die vergangenen Dekaden aufgrund seiner vorteilhaften, charakteristischen Systemeigenschaften verkehrsträgerübergreifend sukzessive auch an immer weiteren Marktanteilen im Modal Split. Mit rund 75 % ist der Straßengüterverkehr gegenwärtig der mit Abstand bedeutendste Verkehrsträger im innerdeutschen Güterverkehrsmarkt (BMVBS 2008, S. 236-237; BMVI 2021, S. 244-245; Muchna u. a. 2021; Schulte 2013; Kummer u. a. 2006; Aberle 2009; Posset u. a. 2014, S. 12). Sollten für den Straßengüterverkehr also keine tragfähigen Lösungen gefunden werden, so werden die Herausforderungen im vorstehend angerissenen Spannungsfeld über die kommenden Jahre nicht nur kontinuierlich zunehmen; sie werden sich sogar potenzieren.

**Ohne eine ausreichende Akzeptanz auf Seiten der betroffenen Stakeholder wird jeder potenzielle Lösungsansatz bezüglich seiner Erfolgsaussichten und seiner Marktdurchdringung jedoch auf Hindernisse stoßen** (Taherdoost 2018). Mit zunehmender Bedeutung ist hier vor allem auch die öffentliche Meinung von besonderer Relevanz (Fairbrother 2022). Ob Betroffene neuartige Lösungsansätze annehmen werden, wird in der Regel von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die auf einer subjektiven Abwägung wahrgenommener Vor- und Nachteile basieren (Venkatesh u. a. 2003; Bruhn 2007).

**Zusammengefasst bedarf es für den klimaverträglichen Straßengüterverkehr der Zukunft also Lösungen, die weder auf importabhängige fossile Energieträger angewiesen sind, deren Verbrennung zu klimaschädlichen Treibhausgasen führt, noch das Wachstum von Volkswirtschaften aufgrund Restriktionen im Verkehrssektor limitieren. Um den Erfolg und die Marktdurchdringung angedachter Lösungen dabei bestmöglich zu flankieren, sollten diese weiterhin auf eine breite Akzeptanz auf Seiten der Betroffenen stoßen. Gelingt es nicht, umgehend zukunftsfähige Lösungen für den Straßengüterverkehr erfolgreich zu etablieren, die ökonomisch, ökologisch aber auch sozial verträglich sind, wird Deutschland seine Klimaschutzziele verfehlen.**

**Die vorliegende Dissertationsschrift setzt an dieser Stelle an und beschäftigt sich in diesem Themenkomplex mit dem sogenannten eHighway-System: eine oberleitungsgebundene Elektrifizierungsoption zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs.**

Das eHighway-System ermöglicht entsprechend ausgestatteten Lastkraftwagen, sogenannten Oberleitungs-Lastkraftwagen (O-Lkw), während der Fahrt dynamisch mit elektrischer Energie versorgt zu werden (siehe Abbildung 1). Hierfür wird das effiziente Energieversorgungskonzept des elektrischen Schienenverkehrs auf die Straße übertragen, ohne dabei die charakteristisch hohe zeitliche und vor allem räumliche Flexibilität des Straßengüterverkehrs zu beeinträchtigen (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24). Damit das funktioniert, wird in die bestehende Straßeninfrastruktur eine Oberleitungsanlage integriert. O-Lkw verfügen über eine elektrische Maschine (E-Maschine) und einen Stromabnehmer, mit dem eine kraftschlüssige Verbindung zur Oberleitungsanlage hergestellt werden kann. In Folge wird der O-Lkw mit elektrischer Energie aus der Oberleitungsanlage versorgt. Bedarfsgerecht ausgelegte elektrische Energiespeicher und gegebenenfalls ein ergänzendes, weiteres Antriebssystem erlauben es, dass O-Lkw auch auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten eingesetzt werden können – beispielsweise im Vor- beziehungsweise Nachlauf eines elektrifizierten Streckenabschnitts, zwischen zwei elektrifizierten Streckenabschnitten oder in Tunneln und Anschlussstellen. Auch vorausfahrende, langsamere Fahrzeuge können überholt und Gefahrenstellen kann ausgewichen werden (Wietschel u. a. 2017, S. 19; Jöhrens, Lehmann, u. a. 2022, S. 5). „Ein wesentlicher Vorteil des eHighway-Systems besteht darin, den Kraftstoffverbrauch des Straßengüterverkehrs in Folge erheblich zu reduzieren, ihn teils sogar vollends zu vermeiden. Damit einhergehend lassen sich Treibhausgasemissionen einsparen, so dass ein positiver Beitrag zum Klimaschutz erreicht werden kann“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 40-41) – so die Theorie.





**Abbildung 1: Das eHighway-System**

(Quellen: links: SIEMENS MOBILITY (2019); rechts: IVV (o. J.))

## 1.2 ZIELSETZUNG DER FORSCHUNGSARBEIT

Das eHighway-System befindet sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt (2023) noch im Entwicklungsstadium. Die Forschungsaktivitäten, die den Weg zu einer Marktreife ebnen, sind noch nicht abgeschlossen. In diesen Kontext fügt sich die vorliegende Dissertationsschrift ein und trägt zur voranschreitenden Entwicklung des eHighway-Systems mit Beantwortung der folgenden übergeordneten Forschungsfrage bei:

**Wie kann das eHighway-System konkret dazu beitragen, die (nationalen) Klimaschutzziele zu erreichen?**

Die der Dissertationsschrift zugrunde liegende Forschungsarbeit setzt sich dabei zum primären Ziel, eine **Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems vorzunehmen**. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf fahrzeugbezogenen Untersuchungen. So sollen zunächst sogenannte Betriebsmodi von O-Lkw und zugehörige Energieflüsse identifiziert werden. Hieraus abgeleitet ergeben sich Erkenntnisse zum Kraftstoff- und Stromverbrauch eines O-Lkws, deren Ergebnisse die Grundlage zu Analysen der resultierenden Treibhausgasemissionen eines O-Lkws darstellen. Dieser Schwerpunkt hat zum Hintergrund, dass das eHighway-System zweifellos nur dann erfolgreich zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele beitragen wird, wenn schlussendlich auch Treibhausgasemissionen durch die Verwendung von O-Lkw eingespart werden können. Dies gilt es zu untersuchen.

Die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems wird zu der Schlussfolgerung führen, dass es für den wirksamen Einsatz des eHighway-Systems eines größeren Kernnetzes an Oberleitungsanlagen bedarf. Ein solcher Ausbau kann aufgrund verschiedener Faktoren jedoch auf eine mangelnde Akzeptanz und Ablehnung in der Gesellschaft stoßen. Wird es nicht gelingen, den Ausbau eines Netzes an Oberleitungsanlagen und die gesellschaftliche Akzeptanz in Einklang zu bringen, wird der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr mangels ausreichender Netzdichte nicht zum Erreichen der nationalen Klimaschutzziele beitragen können. Aus diesem Grund erscheint es zielführend, sich neben den Treibhausgasemissionen zumindest in Form eines Exkurses auch **moderat mit der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** zu beschäftigen. Dieser Aufgabe wird in dieser Dissertationsschrift als ergänzende Nebenzielstellung nachgegangen.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage und der definierten Zielstellung werden im Verlauf der Dissertationsschrift verschiedene Oberziele (OZ) definiert (siehe Kapitel 4). Für die Untersuchung jedes Oberziels wurden dabei verschiedene Forschungshypothesen (H) – basierend auf dem aktuellen Stand der Forschung – aufgestellt und untersucht. Der nachfolgenden Tabelle 1 können die definierten Oberziele sowie die zu untersuchenden Forschungshypothesen zusammenfassend entnommen werden.



---

**Tabelle 1: Ziele und Forschungshypothesen**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

---

**Hauptziel: Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems**

**Oberziel 1: Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws**

- H1a: Ein O-Lkw operiert in verschiedenen Betriebsmodi.
- H1b: Die Betriebsmodi eines O-Lkws werden durch das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Antriebsstrangs und der externen Energieversorgung bestimmt.
- H1c: Die Betriebsmodi eines O-Lkws können funktional eindeutig voneinander abgegrenzt werden.
- H1d: Die Betriebsmodi eines O-Lkws können auch datenbasiert eindeutig voneinander abgegrenzt werden.

**Oberziel 2: Ermittlung und Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws**

- H2a: Entsprechend dem Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws.
- H2b: Die Energieflüsse eines O-Lkws können datenbasiert berechnet werden.
- H2c: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus des O-Lkws.
- H2d: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine.
- H2e: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken.
- H2f: Der Energieverbrauch eines O-Lkws wird durch die Nutzung der Oberleitungsanlage gesenkt.

**Oberziel 3: Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte und Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw**

- H3a: Die durch einen O-Lkw emittierten Treibhausgase sind abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws.
- H3b: Der Strommix beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an emittierten Treibhausgasen von O-Lkw.
- H3c: Der Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitte im Vergleich zu den nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten einer Fahrt beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen von O-Lkw.
- H3d: Der Einsatz von O-Lkw erlaubt messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr.

---

**Nebenziel: Allgemeine Betrachtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems**

---

**1.3 ABGRENZUNG DES FORSCHUNGSRAHMENS**

Die vorliegende Dissertationsschrift ist eingebettet in die allgemeine Forschung zu sogenannten **Electric Road Systems**, kurz ERS, die seit geraumer Zeit als *eine* alternative Antriebsoption zur Dekarbonisierung des Straßen(güter)verkehrs erforscht werden. ERS werden definiert als Systeme, die eine dynamische Energieübertragung ‚von der Straße in das Fahrzeug‘ während der Fahrt ermöglichen (Sundelin u. a. 2016). Das oberleitungsgebundene eHighway-System ist dabei *eine* Ausprägungsform von Electric Road Systems.

---

Die in dieser Dissertationsschrift durchgeführte Forschung basiert auf dem vom BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ geförderten **Forschungsprojekt „ELISA“** (Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen). Auf einem der meistbefahrenen Autobahnabschnitten Europas, der Bundesautobahn (BAB) 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt, wurde 2018 ein fünf Kilometer langer Streckenabschnitt beidseitig mit einer Oberleitungsanlage ausgestattet. Fünf O-Lkw nahmen zwischen 2019 und 2020 sukzessive den Betrieb auf und befinden sich seitdem im operativen (und realen) Tagesgeschäft bei fünf diversifizierten Transportunternehmen (Boltze 2020; Schöpp u. a. 2022). Ausgestattet mit einem Datenlogger generieren diese O-Lkw mit einer Frequenz von 100 Millisekunden zu mehr als einhundert verschiedenen Fahrzeugparametern eine einzigartige und exklusive Datenbasis.

Die im ELISA-Forschungsprojekt betriebenen **O-Lkw** basieren auf einem Scania R450. Dieser Lkw ist als Parallelhybrid konfiguriert. Der Antriebsstrang besteht aus einer E-Maschine (130 kW) und einem Verbrennungsmotor (331 kW bzw. 450 PS). Der O-Lkw ist mit einem Stromabnehmer ausgestattet, der die elektrische Energie aus der Oberleitung aufnimmt. Zusätzlich ist ein elektrischer Energiespeicher mit einer Bruttokapazität von 18,5 kWh installiert. Die derzeit eingesetzte O-Lkw-Generation hat keine Plug-in-Ladefunktion. Aufgrund des Testcharakters handelt es sich bei allen O-Lkw um Prototypen (Boltze 2020; Schöpp u. a. 2021b; Schöpp u. a. 2022).

Die in dieser Dissertationsschrift durchgeführten Untersuchungen basieren auf diesen Rahmenbedingungen und adressieren hinsichtlich der **Untersuchung zu Treibhausgasemissionen vor allem die Fahrzeugebene** – also den O-Lkw. Es wird keine allumfassende Ökobilanzierung durchgeführt, auch bekannt als Life Cycle Assessment. Die im Rahmen dieser Dissertationsschrift erarbeiteten Ergebnisse können jedoch für eine solche Ökobilanzierung in einem nachfolgenden Schritt als zwingend notwendige Eingangsgröße verwendet werden (so unter anderem in 2022 erfolgt durch HANESCH U. A. (2022), basierend auf vorläufigen Zwischenergebnissen des nachfolgend präsentierten Forschungsvorhabens). Wird im Verlauf der Dissertationsschrift vom Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems gesprochen, beziehen sich die Ergebnisse also stets auf das **Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial resultierend aus dem Fahrzeugbetrieb von O-Lkw**. Potenziell anfallende Treibhausgasemissionen für die Errichtung von Oberleitungsanlagen oder des Fahrzeugbaus von O-Lkw werden nicht berücksichtigt. Die erarbeiteten Ergebnisse im Kontext der Untersuchungen zu Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems beziehen sich dabei grundsätzlich auf den innerdeutschen Straßengüterverkehr. Eine allgemeine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf andere Regionen wird angestrebt.

Hinsichtlich der **Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz** wird das Gesamtsystem „eHighway“ betrachtet. Die in dem Exkurs erarbeiteten Ergebnisse beziehen sich auf Deutschland und hierbei vor allem auf das Bundesland Hessen. Eine allgemeine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Regionen wird aber auch bezüglich dieser Analyseergebnisse angestrebt.

Neben dem ELISA-Forschungsprojekt und der zugehörigen Teststrecke auf der BAB 5 in Hessen wird das eHighway-System zusätzlich auch in **anderen Forschungsprojekten**, unter anderem in Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg, untersucht (Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, Verbundprojekt FESH 2017; Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg 2020). Die Erkenntnisse dieser Forschungsprojekte werden nur bedingt im Rahmen dieser Dissertationsschrift berücksichtigt, da in diesen Forschungsprojekten andere Rahmenbedingungen vorliegen, wie beispielsweise anderweitig konfigurierte Fahrzeugtypen oder andere Streckenprofile. Eine Synopsis der Forschungsergebnisse aus den jeweiligen Forschungsprojekten sollte in aufbauenden Forschungsvorhaben vorgenommen werden. Auch zeigt sich ein Vergleich des eHighway-Systems zu anderweitigen alternativen Antriebsoptionen grundsätzlich von Relevanz, stellt jedoch keinen Bestandteil der Dissertationsschrift dar und sollte im Rahmen zukünftiger Forschungsaktivitäten berücksichtigt werden.

---

## 1.4 VORGEHENSWEISE UND AUFBAU DER DISSERTATIONSSCHRIFT

Der **Aufbau der Dissertationsschrift** ist angelehnt an die Struktur des durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen aufgestellten **Verkehrsplanungsprozesses** (FGSV Verlag 2018a).

**Kapitel 1** dient einer **ersten Orientierung zum Forschungsvorhaben**, das dieser Dissertationsschrift zugrunde liegt. Es wird allgemein in das Themenfeld eingeführt sowie die Motivation der Forschung dargelegt. Die Zielsetzung der Forschungsarbeit wird definiert und eine Abgrenzung des Forschungsrahmens vorgenommen. Die Vorgehensweise sowie der Aufbau der Dissertationsschrift werden erläutert.

**Kapitel 2** dient der **Aufbereitung des für die Arbeit relevanten Wissensstandes**. Im Sinne einer Problemanalyse werden literaturbasiert die Grundlagen zum oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehr zusammengetragen. Es werden hierfür der Ist-Zustand und die gegenwärtigen Entwicklungen im Straßengüterverkehr analysiert. Aufbauend erfolgt eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Grundlagen des eHighway-Systems. Hieraus ableitend werden derzeit existierende Forschungslücken identifiziert, welche durch das vorliegende Forschungsvorhaben geschlossen werden sollen.

**Kapitel 3** ist der **fachlichen und methodischen Grundlagenaufbereitung** zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems gewidmet. Basierend auf einer Literaturrecherche wird das für die Quantifizierung notwendige Rüstzeug eruiert.

**Kapitel 4** beschäftigt sich intensiv mit der **Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems**. Es wird hierfür zunächst ein Quantifizierungsverfahren entwickelt. Auf diesem aufbauend werden Betriebsmodi eines O-Lkws identifiziert und definiert. Charakteristische Energiefluss-, Energieverbrauchs- und Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws werden berechnet. Außerdem wird das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial infolge einer Substitution von konventionellen Diesel-Lkw durch O-Lkw analysiert. Zur Erarbeitung der Ergebnisse werden unter anderem Forschungsfahrten mit O-Lkw durchgeführt, die durch Datenlogger erfassten Daten verarbeitet, Berechnungsgrundlagen aufgestellt und angewendet sowie ein Skalierungs- und Vergleichsrechner entwickelt.

**Kapitel 5** ist einem **Exkurs zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** gewidmet. Hierfür werden zunächst fachliche und methodische Grundlagen zusammengetragen. Basierend auf einer standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen werden anschließend die für die Analyse benötigten Daten generiert. Infolge der Auswertung der Daten wird abschließend auf die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems geschlossen.

**Kapitel 6** dient der **Diskussion der Ergebnisse**. Weiterhin werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, deren Umsetzung zur Steigerung der Zukunftsfähigkeit des eHighway-Systems beitragen werden.

**Kapitel 7** können die wesentlichen Schlussfolgerungen des Forschungsvorhabens entnommen werden. Neben dem Fazit zur Arbeit wird außerdem prägnant der aufbauende Forschungsbedarf deklariert.

### HINWEIS ZU IN DER DISSERTATIONSSCHRIFT VORZUFINDENDEN, GRAU HINTERLEGTEN TEXTABSCHNITTEN

**Besonders relevante Kernaussagen und Ergebnisse werden anhand eines grauen Kastens optisch hervorgehoben.**

## 2. GRUNDLAGEN ZUM OBERLEITUNGSGEBUNDENEN STRABENGÜTERVERKEHR

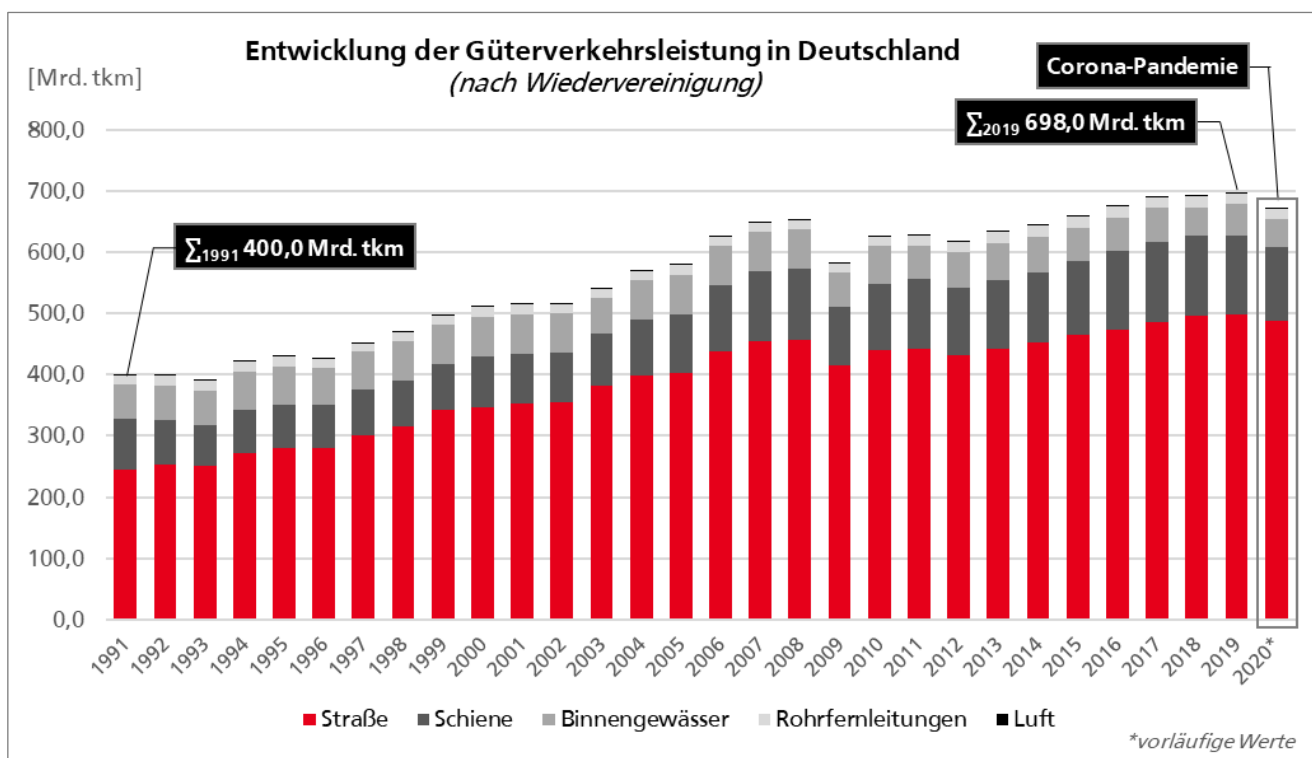
Das vorliegende Kapitel dient der Aufbereitung des für die Arbeit relevanten Wissensstandes. Das Forschungsfeld, in das sich der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr einbettet, wird vorgestellt. Es werden dabei zunächst der Ist-Zustand des innerdeutschen Güterverkehrs sowie die gegenwärtigen Entwicklungen analysiert. In Folge werden derzeit (in der Politik) diskutierte Leitlinien und Zielvorstellungen zusammengetragen, und diese auf die Zielstellung dieser Dissertationsschrift transferiert. Anschließend wird der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr als eine potentielle Handlungsoption zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs näher betrachtet. Das Kapitel schließt mit der Erarbeitung von für diese Dissertationsschrift geltende Leitlinien und Zielvorstellungen.

### 2.1 ANALYSE DES IST-ZUSTANDS UND DER GEGENWÄRTIGEN ENTWICKLUNGEN IM STRABENGÜTERVERKEHR

#### 2.1.1 ENTWICKLUNG DER INNERDEUTSCHEN GÜTERVERKEHRSLEISTUNG

**Deutschlands Verkehrssektor wächst:** Trotz verschiedener Krisenereignisse, die zwar kurzzeitig stets zu temporären Einbrüchen in der Verkehrsleistung führen aber langfristig selten anhaltende Trends mit sich bringen, lässt sich ein generelles, nachhaltiges Wachstum identifizieren (BMUV 2022c, o. S.; BMVI 2019, S. 5). Als ein besonderer Wachstumsmarkt zeigt sich dabei der Güterverkehr.

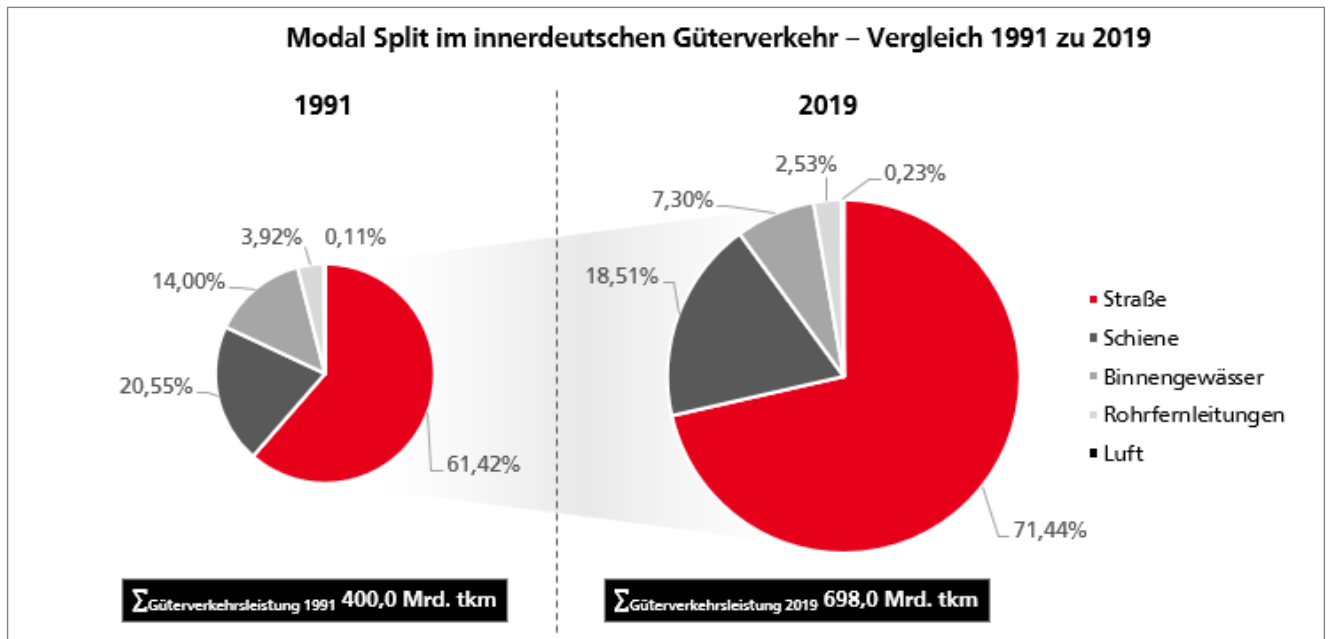
Seit der Wiedervereinigung Deutschlands vor gut 30 Jahren nahm die **Güterverkehrsleistung** bis heute um rund 75 Prozent zu und erreichte in 2019 – dem letzten Vor-Krisenjahr<sup>4</sup> – einen bislang absoluten Höchstwert von 698 Milliarden geleisteten Tonnenkilometern (BMVBS 2008, S. 236-237; BMVI 2021, S. 244-245). Die erbrachte Güterverkehrsleistung verteilt sich dabei im Wesentlichen auf die Verkehrsträger Straße, Schiene, Binnengewässer, Rohrfernleitungen und Luft (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern in Deutschland**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMVBS (2008, S. 236-237) und BMVI (2021, S. 244-245))

<sup>4</sup> Aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie, die spätestens seit März 2020 mit teils erheblichen Einschränkungen in Deutschland grassiert, wird 2019 als jüngstes, belastbares Referenzjahr verwendet.

Dabei war es insbesondere der **Straßengüterverkehr**, der ein merkliches Wachstum erfuhr. Im Vergleich der Jahre 1991 zu 2019 hat sich die mit dem Straßengüterverkehr erbrachte Güterverkehrsleistung von rund 250 Milliarden Tonnenkilometer auf annähernd 500 Milliarden Tonnenkilometer verdoppelt. Kein anderer Güterverkehrsträger kann ein vergleichbares (absolutes) Wachstum der Güterverkehrsleistung vorweisen. Das erhebliche Wachstum des Straßengüterverkehrs wird nochmals deutlicher bei einer genaueren Betrachtung des **Modal Split**. Betrug der Anteil des Straßengüterverkehrs 1991 bereits knapp über 60 Prozent, nahm dieser Anteil bis 2019 sogar auf über 70 Prozent weiter zu (BMVBS 2008, S. 236-237; BMVI 2021, S. 244-245). Der Straßengüterverkehr ist damit ein essenzielles Rückgrat des Güterverkehrs in Deutschland (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3: Modal Split im innerdeutschen Güterverkehr – Vergleich 1991 zu 2019**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMVBS (2008, S. 236) und BMVI (2021, S. 245))

Die wesentlichen **Kennzahlen zur erbrachten Güterverkehrsleistung** in Deutschland, zu den Marktanteilen der einzelnen Verkehrsträger im Modal Split, als auch zur Entwicklung dieser beiden Kenngrößen zeigt Tabelle 2 zusammenfassend auf.

**Tabelle 2: Überblick über die Entwicklung der innerdeutschen Güterverkehrsleistung**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMVBS (2008, S. 236) und BMVI (2021, S. 245))

Verkehrsträger	Güterverkehrsleistung		Entwicklung der Güterverkehrsleistung		Anteil der Verkehrsträger am Modal Split		Entwicklung des Anteils im Modal Split
	1991 [Mrd. tkm]	2019 [Mrd. tkm]	$\Delta_{1991-2019}$ , absolut [Mrd. tkm]	$\Delta_{1991-2019}$ , relativ [%]	1991 [%]	2019 [%]	$\Delta_{1991-2019}$ , absolut [%-Punkte]
Straße	245,7	498,6	+ 252,9	+ 102,94	61,42	71,44	+ 10,02
Schiene	82,2	129,2	+ 47,0	+ 57,18	20,55	18,51	- 2,04
Binnengewässer	56,0	50,9	- 5,1	- 9,08	14,00	7,30	- 6,70
Rohrfernleitungen	15,7	17,6	+ 1,9	+ 12,42	3,92	2,53	- 1,39
Luft	0,4	1,6	+ 1,2	+ 270,14	0,11	0,23	+ 0,12
Summe	400,0	698,0	297,9	74,48	100,00	100,00	//

## 2.1.2 AUSGEWÄHLTE URSACHEN DES (STRABEN-)GÜTERVERKEHRSWACHSTUMS

Das Wachstum des innerdeutschen Güterverkehrs über die vergangenen Jahrzehnte ist bemerkenswert, und hierbei vor allem das **Wachstum im Straßengüterverkehr**. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Ganz allgemein ist es zunächst das Grundbedürfnis des Menschen nach Mobilität. Die Überwindung von Raum zeigt sich hierbei gleichermaßen für Personen, Güter aber auch Informationen. Weiterhin lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Wohlstand einer Volkswirtschaft und einer zeitgleichen Zunahme des Mobilitätsaufkommens feststellen: Wächst die wirtschaftliche Leistung eines Landes, so steigt die Nachfrage nach Mobilitätsdienstleistungen (Muchna u. a. 2021, S. 4; BMVI 2017a, o. S.; BMVI 2016, S. I).

Als ein möglicher Referenzwert zur Abbildung des Wohlstands eines Landes lässt sich das **Bruttoinlandsprodukt** heranziehen, das beispielsweise nach Duden definiert wird als der „Wert aller Waren und Dienstleistungen, die in einem Jahr innerhalb der Landesgrenzen einer Volkswirtschaft produziert werden“ (Bibliographisches Institut GmbH 2022a, o. S.). In Deutschland hat sich das Bruttoinlandsprodukt seit der Wiedervereinigung bis 2019 auf knapp 3,5 Billionen Euro mehr als verdoppelt (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022, o. S.). Abbildung 4 zeigt die Entwicklung des deutschen Bruttoinlandsprodukts über die vergangenen drei Dekaden auf.

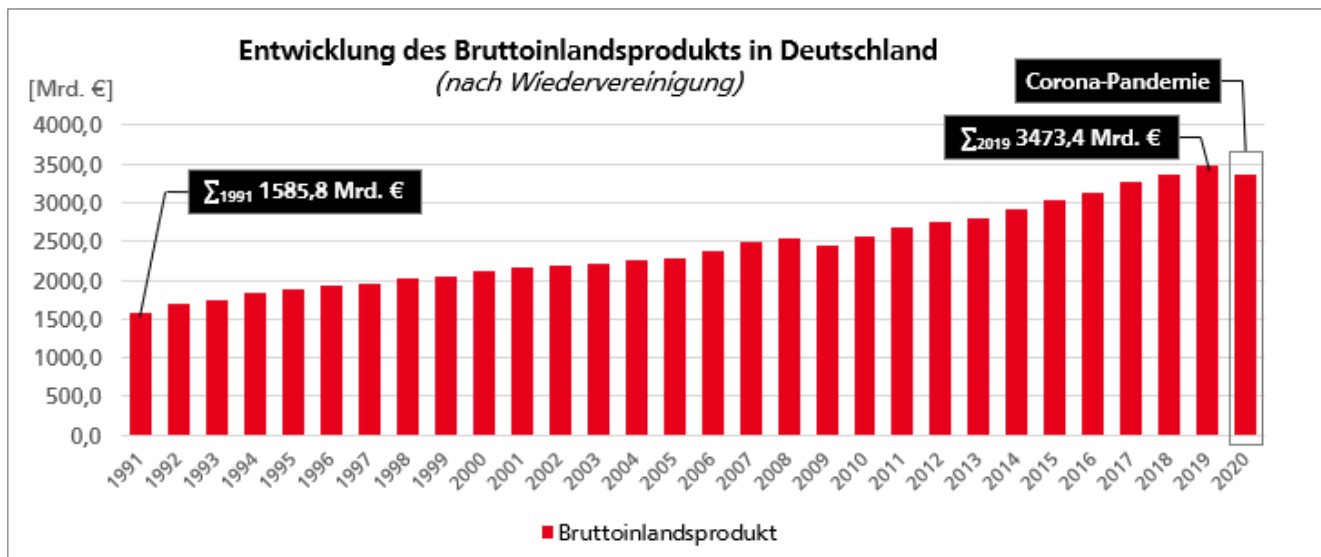


Abbildung 4: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts in Deutschland (nach Wiedervereinigung)  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) (2022, o. S.))

Auch eine zunehmende **Internationalisierung und Globalisierung** begünstigen ein Wachstum des Güterverkehrs. Historisch betrachtet wurden Güter weitestgehend lokal und von wenigen Beteiligten produziert. Meist wurden diese auch direkt in der umliegenden Region verbraucht – Verkehrs- und Transportprozesse beschränkten sich auf kurze und regionale Relationen. Die **Güterbereitstellung**, die **Güterverteilung** als auch die **Güterverwendung** waren vorwiegend räumlich zentriert. Verglichen mit heutigen Produktions- und Lieferketten lassen sich merkliche Unterschiede ausmachen: Aufgrund eines wachsenden Spannungsfeldes aus Kostendruck, Servicequalität und Zeiteffizienz, dem sich zahlreiche Unternehmen aus Industrie und Handel gegenübergestellt sehen, ergeben sich eng verzahnte und aufeinander aufbauende Strukturen mit einer Vielzahl an Beteiligten – mit Auswirkungen auf den Güterverkehr. Transportprozesse erstrecken sich nunmehr über den gesamten Globus, der Güterfluss unterliegt in Folge einer erheblichen Komplexitätssteigerung (Muchna u. a. 2021, S. 5-7 & S. 58-73). In diesem Zusammenhang wird gelegentlich auch von einem sogenannten *Strukturwandel* gesprochen (Schulte 2013, S. 175). Die Gründe hierfür sind vielfältig, lassen sich aber unter anderem zum Beispiel in der **Beschaffungs-**, der **Produktions-** beziehungsweise der **Distributionsstrategie** von Unternehmen identifizieren (Muchna u. a. 2021, S. 58-73). In der Fachliteratur werden diese Gründe auch als **ver-**



---

**kehrssektorinterne Ursachen** bezeichnet (beispielsweise nach KUMMER U. A. (2006, S. 39)). Nachfolgende Tabelle 3 fasst ausgewählte Gründe und begleitende Auswirkungen des Strukturwandels im Güterverkehr in Kürze zusammen.

**Tabelle 3: Ausgewählte Gründe und Auswirkungen des Strukturwandels im Güterverkehr**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

- 
- **Ausweitung des Beschaffungsmarktes** notwendiger Rohstoffe/(Teil-)Produkte auf globale Märkte – auch bezeichnet als „global sourcing“ (Muchna u. a. 2021, S. 66-67; Werner 2013, S. 164-165).
  - Zunahme einer **global ausgerichteten Arbeitsteilung**, insbesondere Verschiebung einer aufwendigen und personalintensiven Produktion ins Ausland (Schulte 2013, S. 175). Unter anderem hierdurch bedingt **längere Transportwege**, teils auch komplexere Transporte durch Umschlagprozesse aufgrund des Wechsels des Verkehrsmittels oder des Verkehrsträgers (Muchna u. a. 2021, S. 66-67).
  - **Veränderung in der Fertigungstiefe**, insbesondere Outsourcing verschiedener Produktionsbereiche auf Lieferanten – auch bezeichnet als Abwägung zwischen „make or buy“ (Entscheidung eines Unternehmens über Eigenleistung oder Zukauf von Fremdleistung). Unter anderem bedingt hierdurch **Zunahme der Anzahl an Lieferanten** (Muchna u. a. 2021, S. 67-68; Gudehus 2012a, S. 45; Schulte 2013, S. 175).
  - **Anpassung von Produktions- und Fabrikplanung**, insbesondere Realisierung von Just-in-Time-Konzepten zur Reduktion eigener Lagerbestände (Muchna u. a. 2021, S. 68-69; Schulte 2013, S. 175). Bedingt hierdurch nicht selten deutlich **häufigere Belieferungen aufgrund geringerer Bestellmengen** (Schulte 2013, S. 175; Muchna u. a. 2021, S. 66).
  - **Veränderung der Beschaffenheit der zu transportierenden Güter**, vor allem aufgrund eines merklichen Anstiegs der Qualitätsanforderungen seitens der Wirtschaft an logistische Dienstleistungen; insbesondere deutliches Wachstum im Gütertransport von bereits verarbeiteten (Teil-)Produkten und damit Anstieg der Wertigkeit und des Veredelungsgrades des Transportguts; zumeist mit Auswirkungen auf die Anforderung des Transports (Zunahme der Empfindlichkeit des Guts und damit Zunahme der Komplexität des Transports) (Schulte 2013, S. 175; Aberle 2009, S. VII).
  - **Vereinfachung internationaler Handelsbeziehungen** durch Abbau nationaler und internationaler rechtlicher Restriktionen, wie zum Beispiel einer Reduktion von Marktzugangsbarrieren (Aberle 2009, S. 1-2).
  - **Ausweitung des Absatzmarktes und der Absatzkanäle** – Zunahme eines überregionalen, teils auch globalen Absatzes (Muchna u. a. 2021, S. 70-73).
- 

Neben den in Tabelle 3 aufgeführten Gründen für den Strukturwandel im Güterverkehr lassen sich ferner weitere Einflussfaktoren identifizieren, die das Wachstum im deutschen Güterverkehr erklären. So sind beispielsweise die Beschaffenheit des binnenländischen Verkehrssystems (Infrastruktur und Verkehrsmittel in Anzahl, Verfügbarkeit und Zustand) und die vorherrschende Preisstruktur zu nennen (Aberle 2009, S. 9-10). Von Bedeutung zeigt sich aber auch die geografische Lage eines Landes, welche das Aufkommen von Gütertransitverkehren ganz wesentlich beeinflusst (Aberle 2009, S. 9-10; BMVI 2016, S. 2; Kummer u. a. 2006, S. 38-39). In der Fachliteratur werden diese Faktoren häufig auch als sogenannte **verkehrssektorexterne Ursachen** umschrieben, beispielsweise nach KUMMER U. A. (2006, S. 39).

Weiterhin sind es vor allem aber auch die Wirkungen des sogenannten Substitutions-, Güterstruktur-, Logistik- und Integrationseffekts, die das Wachstum des Güterverkehrs, und vor allem bestimmter Güterverkehrsträger, erklären (Aberle 2009, S. 10 & S. 91-98).

Der **Substitutionseffekt** beschreibt zunächst die Verlagerung von Transporten eines Verkehrsträgers auf einen Anderen. Die Gründe hierfür liegen vor allem in den charakteristischen Systemeigenschaften der jeweiligen Verkehrsträger. Es ist vorwiegend die Fähigkeit, Kundenanforderungen an einen Transport bestmöglich nachkommen zu können, wie zum Beispiel hinsichtlich Anforderungen an Schnelligkeit, Kosteneffizienz, Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit (Aberle 2009, S. 10 & S. 91; Hopf u. a. 2004, S. 45). Der Straßengüterverkehr zeigt hier erhebliche Vorteile im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern (Aberle 2009, S. 91).

---

Unter dem **Güterstruktureffekt** wird die Veränderung der Beschaffenheit eines zu transportierenden Guts verstanden. Der Transport von unverarbeiteten Rohstoffen (Massengütern) nimmt im Zuge einer prosperierenden Volkswirtschaft in der Regel ab, der Transport von bereits veredelten Halb- beziehungsweise Fertiggütern (Konsumgütern) nimmt zu (Aberle 2009, S. 93-94; Hopf u. a. 2004, S. 45). Massengüter eignen sich besonders für einen Transport auf der Schiene oder dem Binnenschiff; sensiblere und meist auch höherpreisige Halb- und Fertigwaren hingegen weniger – hier zeichnen sich insbesondere die Systemeigenschaften des Straßengüterverkehrs aus (BMUV 2019, o. S.).

Der **Logistikeffekt** wird maßgeblich durch die fortschreitende Entwicklung logistischer Prozesse sowie deren Bedeutung im Rahmen strategischer Unternehmensentscheidungen definiert. Er ist eng gekoppelt an den Güterstruktureffekt und begünstigt diesen. Aufgrund der zunehmenden Auslagerung von Fertigungsbereichen von Unternehmen („Outsourcing“), dem Abbau eigener Lagerbestände und der simultan stattfindenden Integration sensibler Just-in-Time-Konzepte, globaler Beschaffungsstrategien, sowie dem hieraus insgesamt resultierenden, wachsenden Anteil höherpreisiger Halb- und Fertigwaren, verändern sich die Anforderungen an Transportprozesse. Ein hohes Maß an Flexibilität und Zuverlässigkeit sind entscheidende Forderungen aus Industrie und Handel. Erneut ist es der Straßengüterverkehr, der aufgrund seiner spezifischen Systemeigenschaften den anderen Verkehrsträgern zur Erfüllung dieser Anforderungen überlegen ist (Aberle 2009, S. 94-95). Unter anderem ABERLE (2009, S. 94-95) oder das BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV 2019, o. S.) zeigen auf, dass der Straßengüterverkehr die Forderungen nach einem möglichst hohen Grad an zuverlässigen und kostengünstigen Transporten unter einem hohen Maß an Flexibilität sowie der Fähigkeit, sich in bestehende Prozessketten zu integrieren, am ehesten erfüllt.

Der **Integrationseffekt** beschreibt den Abbau von internationalen Handelsbarrieren, beispielsweise durch wirtschaftliche Zusammenschlüsse (als Beispiel ist die *Europäische Union* zu nennen). Eine deutliche Zunahme grenzüberschreitender Transporte in Folge des vereinfachten Marktzugangs im Ausland zeigt sich im Ergebnis. Auch hierbei ist der Straßengüterverkehr – beispielsweise verglichen mit dem Schienengüterverkehr – insbesondere aufgrund seiner Interoperabilität erneut im Vorteil (also seiner Fähigkeit, auch in ausländischen Verkehrssystemen nahezu ungehindert und ohne technischen Anpassungsaufwand operieren zu können). Weiterhin wirken sich die den Straßengüterverkehr begünstigenden Güterstruktur- und Logistikeffekte besonders bei grenzüberschreitenden Transporten aus (Aberle 2009, S. 96-98; Hacker, Blanck, u. a. 2020, S. 56).

Gelegentlich werden in Ergänzung zu den vier vorstehend erläuterten Effekten zusätzlich der **Deregulierungs-**, der **Digitalisierungs-** und der **Nachhaltigkeitseffekt** zur Erklärung des Strukturwandels im Güterverkehr herangezogen (Hacker, Blanck, u. a. 2020, S. 54-57).

Die vorstehenden Aussagen reflektierend, ist es insbesondere der **Straßengüterverkehr, der den gegenwärtigen Anforderungen seitens Industrie und Handel am besten nachkommen kann**. Er zeigt sich den anderen Verkehrsträgern in vielen derzeit vorherrschenden Anforderungen überlegen.

Um diese Aussage zu belegen, werden in der Literatur sogenannte Beurteilungskriterien zur Beschreibung individueller Systemeigenschaften von Verkehrsträgern zur Verfügung gestellt (Schulte 2013, S. 175-177; Aberle 2009, S. 10). In Tabelle 4 werden die gängigen Beurteilungskriterien dargestellt. Unterschieden wird allgemein zwischen Kostenkriterien (Frachtkosten, Transportnebenkosten, etc.) sowie Kriterien zur Bewertung der Verkehrswertigkeit (Massenleistungsfähigkeit, Schnelligkeit des Transports, Netzbildungsfähigkeit, etc.) (Schulte 2013, S. 175-177; Aberle 2009, S. 10).



**Tabelle 4: Beurteilungskriterien zur Beschreibung der Systemeigenschaften von Verkehrsträgern**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHULTE (2013, S. 175-177))

Kosten	Verkehrswertigkeit
– Frachtkosten	– Massenleistungsfähigkeit
– Transportnebenkosten	– Schnelligkeit
– Handlingkosten	– Netzbildungsfähigkeit
– Sonstige Logistikkosten	– Berechenbarkeit/Zuverlässigkeit
– Kostenauswirkungen außerhalb der Logistik	– Zeitliche und räumliche Flexibilität
	– Sicherheit
	– Umweltverträglichkeit

Die Bewertung der **charakteristischen Systemeigenschaften des Straßengüterverkehrs** anhand der in Tabelle 4 dargelegten Beurteilungskriterien zeigt im Ergebnis: In erster Linie ist es die äußerst hohe **räumliche und zeitliche Flexibilität** und die hieraus resultierende Fähigkeit, sich selbst in kürzester Zeit an sich verändernde Rahmenbedingungen anpassen zu können, die es dem Straßengüterverkehr erlaubt, auch spontan auftretenden Kundenwünschen in einem hohen Maß nachkommen zu können. Insbesondere die **Integrationsfähigkeit** in industrieseitige Produktionsprozesse, wie dem Just-in-Time-Konzept, ist dabei von Bedeutung (Schulte 2013, S. 177-178; Aberle 2009, S. 65). Möglich wird die räumliche Flexibilität vorwiegend durch die hohe **Netzbildungsfähigkeit** im Straßengüterverkehr (Schulte 2013, S. 177-178). Durch ein engmaschiges europäisches Straßenverkehrsnetz lässt sich eine nahezu unbegrenzte, flächenweite Abdeckung realisieren (Kummer u. a. 2006, S. 69). Als Resultat ist der Straßengüterverkehr in der Lage, **ungebrochene Haus-zu-Haus-Transporte** zu ermöglichen (Aberle 2009, S. 65; Muchna u. a. 2021, S. 110-111). Von Vorteil zeigen sich dabei zusätzlich die **flexiblen Möglichkeiten des Fahrzeugeinsatzes**: Je nach Art und Aufkommen des zu transportierenden Guts gibt es für etliche Anwendungsfälle entsprechende Spezialaufbauten (Muchna u. a. 2021, S. 111). Hinsichtlich der zeitlichen Flexibilität zeigen sich ebenfalls deutliche Nutzenvorteile im Straßengüterverkehr: Die Transportzeiten sind zwar abhängig von der Entfernung, es lassen sich aber durchaus kurze Transportzeiten vor allem für kürzere und mittlere Relationen erreichen und dies auch unter hoher zeitlicher Anpassungsfähigkeit. Gewöhnlich werden im Straßengüterverkehr dabei fahrplanunabhängige und somit zeitlich hoch flexible Transporte angeboten (Schulte 2013, S. 177-178; Muchna u. a. 2021, S. 110). **Kurze Stillstands- und Wartezeiten** auf den Betriebshöfen von Versender und Empfänger begünstigen weiterhin die kurzen Transportzeiten (Schulte 2013, S. 177). Hinzu kommt eine **persönliche Begleitung des Transportguts** durch die Fahrenden, welche auftraggeberseitig als zusätzlicher Vorteil anerkannt wird (Aberle 2009, S. 65; Kummer u. a. 2006, S. 69). Eine ergänzende Systemeigenschaft, die den Straßengüterverkehr auszeichnet, ist die vergleichsweise schnell zu erstellende **Straßeninfrastruktur**. In Relation zu den anderen Verkehrsträgern ergibt sich hier eine deutliche Überlegenheit (Kummer u. a. 2006, S. 69).

Dass dem Verkehrsträger Straße auch politisch eine besondere Bedeutung beigemessen wird, zeigt sich nicht zuletzt im derzeit gültigen **Bundesverkehrswegeplan 2030**: Das Gros der vorgesehenen Investitionsmittel zur Erhaltung beziehungsweise für Aus- und Neubauprojekte entfällt auf diesen Verkehrsträger. Rund die Hälfte der insgesamt vorgesehenen Mittel werden hierfür aufgewendet – wenn gleich, verglichen mit den Anteilen im Modal Split, der Schienengüterverkehr gegenwärtig sogar überproportional berücksichtigt wird (etwa 42 Prozent des gesamten Investitionsvolumens sind für die Schiene eingeplant, circa neun Prozent für die Binnenschifffahrt) (BMVI 2016, S. IV).

Es zeigt sich aber auch ganz deutlich, dass der Straßengüterverkehr nicht in allen Belangen überzeugen kann. Insbesondere hinsichtlich der **Umweltverträglichkeit** lassen sich Defizite im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern feststellen (Muchna u. a. 2021, S. 111). Bezüglich umweltverträglicher Transporte ist

der Straßengüterverkehr dem Schienengüterverkehr und auch der Binnenschifffahrt unterlegen (Muchna u. a. 2021, S. 112; BMVI 2017b, S. 5; Aberle 2009, S. 259; BMVI 2019, S. 5). Aufgrund der gegenwärtigen Entwicklungen im Verkehrssektor im Allgemeinen, sowie der Systemeigenschaften des Straßengüterverkehrs im Speziellen, ist jedoch davon auszugehen, dass der Straßengüterverkehr in Zukunft ein weiteres Wachstum erfahren wird. Gelingt es dabei nicht, auch für den Straßengüterverkehr umweltverträgliche Lösungsansätze erfolgreich zu etablieren, wird Deutschland seine Klimaschutzziele verfehlen.<sup>5</sup> Im folgenden Abschnitt der Dissertationsschrift wird den Umweltwirkungen des Straßengüterverkehrs weiter nachgegangen.

### 2.1.3 EINFLUSS DES STRAßENGÜTERVERKEHRS AUF DIE ENTWICKLUNG VERKEHRSBEDINGTER TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Das Wachstum des innerdeutschen Güterverkehrs führt zu beträchtlichen Auswirkungen, insbesondere im Hinblick auf das Klima. Vor allem sind es die Treibhausgasemissionen, die den Verkehrssektor vor immense Herausforderungen stellen (Hendzlik u. a. 2022, o. S.). Um diese Herausforderung einzuordnen, soll anhand von Abbildung 5 zunächst in die **aktuelle Treibhausgasbilanz Deutschlands** und in die zugehörige Entwicklung eingeführt werden. Es wird, separiert nach Sektoren, die Zeitspanne von 1990 bis 2021 betrachtet.

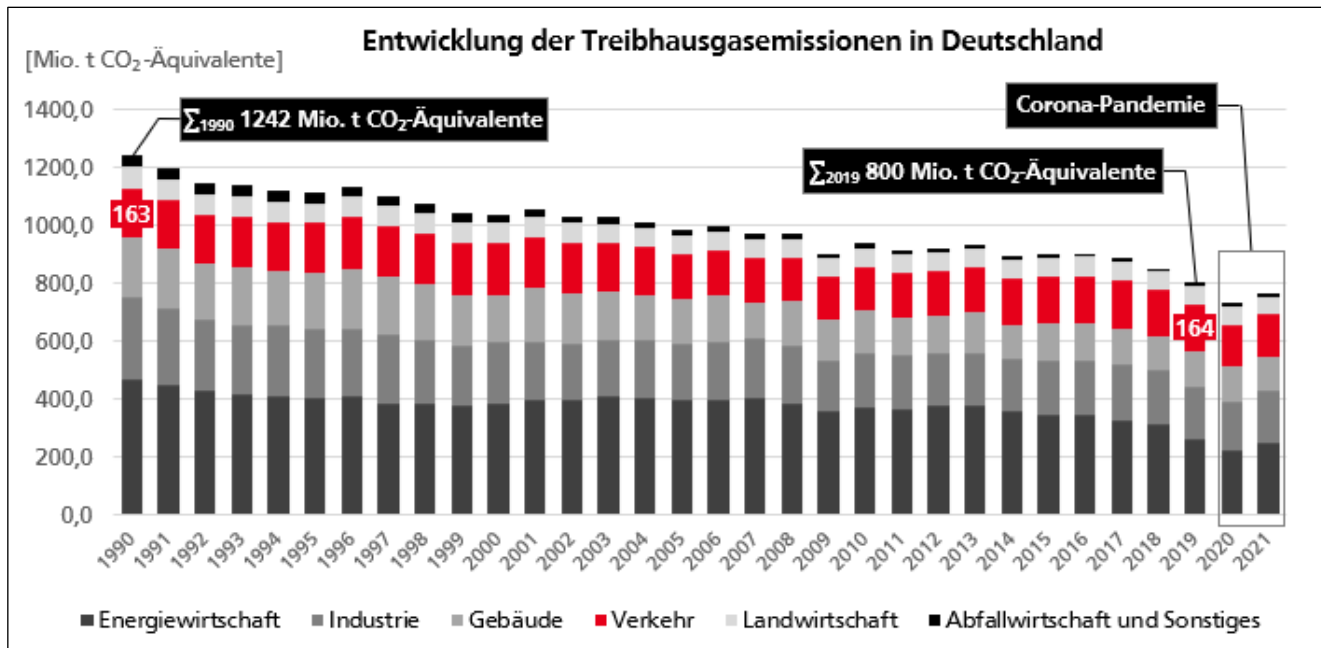


Abbildung 5: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland (nach Sektoren)

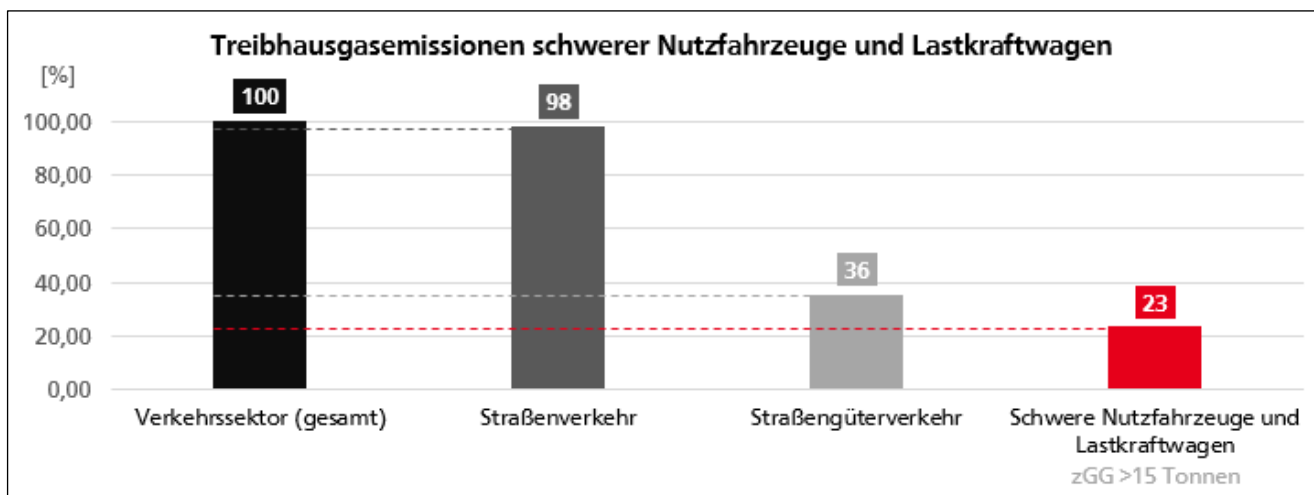
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMUV (2022b, o. S.))

Deutschlands Treibhausgasbilanz wird üblicherweise in die **sechs Sektoren** *Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft* sowie *Abfallwirtschaft und Sonstiges* unterteilt. Im Jahr 2019 wurden in Summe rund 800 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert. 259 Mio. Tonnen hiervon entfielen auf die Energiewirtschaft, 183 Mio. Tonnen auf die Industrie, 121 Mio. Tonnen auf Gebäude, 164 Mio. Tonnen auf den Verkehr, 63 Mio. Tonnen auf die Landwirtschaft sowie neun Mio. Tonnen auf die Abfallwirtschaft und sonstige Verursacher. Im historischen Vergleich zwischen den emittierten Treibhausgasen (als Äquivalente) von 1990 zu 2019 zeigt sich, dass nahezu jeder Sektor seine ausgestoßenen Treibhausgase reduzieren konnte. Generell werden gegenwärtig bereits rund ein Drittel weniger

<sup>5</sup> Über die hier dargestellten Ausführungen hinaus lassen sich zahlreiche weitere Ursachen für das Wachstum des Güterverkehrs im Allgemeinen, aber auch für das Wachstum des Straßengüterverkehrs im Speziellen anführen. Für diese Ursachen wird an dieser Stelle auf die grundständige Literatur verwiesen, beispielsweise auf MUCHNA U. A. (2021), ABERLE (2009) oder KUMMER U. A. (2006).

Treibhausgase emittiert, als noch vor über dreißig Jahren. Einzig der Verkehrssektor ist es, der zur Reduktion von Treibhausgasemissionen bislang nicht beitragen konnte. Wurden 1990 im Verkehrssektor etwa 163 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente registriert, so sind diese in 2019 auf 164 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente sogar nochmals leicht angestiegen (BMUV 2022b, o. S.).

Die **Emissionen im Verkehrssektor** werden mit rund 98 Prozent dabei annähernd ausschließlich durch den Straßenverkehr verursacht (Günther & Gniffke 2022, S. 24). Konkret auf den Straßengüterverkehr entfallen rund ein Drittel der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen. Das entspricht etwa sieben Prozent aller in Deutschland emittierten Treibhausgase (BMUV 2022b, o. S., BMU 2021, S. 36).<sup>6</sup> Obwohl nur etwa 14 Prozent der Fahrzeuge, die dem Straßengüterverkehr zugeordnet werden, sogenannte schwere Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen<sup>7</sup> sind, sind diese wiederum für rund zwei Drittel der durch den Straßengüterverkehr emittierten Treibhausgase verantwortlich. Das entspricht rund 23 Prozent sämtlicher im Verkehrssektor anfallenden Treibhausgasemissionen. Schwere Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen sind damit der Hauptemittent im Straßengüterverkehr (Neuhausen u. a. 2020, S. 5; Plötz u. a. 2018, S. 2-3). In Abbildung 6 wird die Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor – mit Fokus auf dem Straßenverkehr – nochmals grafisch zusammengefasst. In Rot hervorgehoben wird der Anteil der Treibhausgasemissionen, der durch schwere Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen ausgestoßen wird.



**Abbildung 6: Treibhausgasemissionen schwerer Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an GÜNTHER & GNIFFKE (2022, S. 24), BMUV (2022b, o. S.), BMU (2021, S. 36) und NEUHAUSEN U. A. (2020, S. 5))

Die durch den Straßengüterverkehr emittierten Treibhausgase lassen sich dabei vor allem auf die **Verbrennung fossiler Energieträger** zurückführen (BMU 2021, S. 36). Im Straßengüterverkehr sind bislang fast ausschließlich dieselbetriebene Fahrzeuge im Einsatz (Allekotte u. a. 2020, S. 44; Boltze 2020). Hierbei ist festzustellen, dass die durch den Straßengüterverkehr emittierten Treibhausgase über die vergangenen dreißig Jahre zusätzlich einem Wachstumstrend unterlagen und gegenwärtig deutlich mehr Treibhausgase im Straßengüterverkehr emittiert werden, als dies beispielsweise in 1990 noch der Fall war (Allekotte u. a. 2020, S. 139; BMWK 2022b, S. 4). Auch relativ betrachtet zeigt sich, dass der Anteil der durch den Straßengüterverkehr emittierten Treibhausgase an den insgesamt durch den Verkehrssektor ausgestoßenen Treibhausgasen zunimmt. So werden vergleichsweise im Straßenpersonenverkehr, trotz deutlicher Zunahme der Fahrleistung, heute weniger Treibhausgase emittiert als noch 1990 (Allekotte u. a. 2020, S. 139; BMVBS 2008, S. 154-155; BMVI 2021, S. 152-153). Für den

<sup>6</sup> Aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie wird an dieser Stelle das Jahr 2019 als jüngstes, belastbares Referenzjahr verwendet.

<sup>7</sup> Sämtliche Fahrzeuge der sogenannten Fahrzeugklasse N<sub>3</sub>, die über ein zulässiges Gesamtgewicht von mehr als 12 Tonnen verfügen und zum Zweck der Güterbeförderung eingesetzt werden (KBA 2022, S. 25).

---

Straßenpersonenverkehr lässt sich somit zumindest bereits ein erster Trend zur Reduktion von Treibhausgasemissionen identifizieren. Im Straßengüterverkehr zeigt sich hingegen bislang keine Trendwende.

Um das Erreichen der Klimaschutzziele bis 2045 nicht zu gefährden, bedarf es funktionierender Lösungen – vor allem für den Straßengüterverkehr. Um die Zielerreichung zu flankieren, wurde von der deutschen Bundesregierung unter anderem das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verabschiedet. Auf dieses, und auf allgemeine Zielvorgaben für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr der Zukunft, wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

#### **2.1.4 AUSZUG POLITISCHER ZIELVORGABEN FÜR EINEN KLIMAFREUNDLICHEN STRABENGÜTERVERKEHR**

Die **politische Bedeutung des Klimaschutzes** – nicht nur im Verkehrssektor, sondern allgemein – blickt auf eine längere Historie zurück. Hierbei sind nicht nur Bemühungen auf Bundesebene zu verzeichnen. Vielmehr zeichnen sich im Wesentlichen drei Ebenen ab, aus denen sich politische Zielvorgaben für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr der Zukunft ergeben. Es lassen sich eine *internationale* Ebene, eine *europäische* Ebene und eine *nationale* Ebene unterscheiden.

#### **ZUSAMMENSPIEL INTERNATIONALER, EUROPÄISCHER UND NATIONALER KLIMASCHUTZVORGABEN**

Mit dem **Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)** hat die deutsche Bundesregierung den rechtlichen Rahmen auf nationaler Ebene geschaffen, die europäischen und internationalen Verpflichtungen umzusetzen. Abgeleitet aus einer Kette verschiedener Abkommen (zum Beispiel **Kyoto-Protokoll** (United Nations 1998), **Pariser Klimaschutzabkommen** (United Nations 2015), **Verordnung (EU) 2018/1999**, **Verordnung (EU) 2021/1119**, **European Green Deal** (Europäische Kommission 2019), „**Fit für 55**“-**Paket** (Europäische Kommission 2021)), soll das KSG schlussendlich auf Ebene der Bundesrepublik Deutschland gewährleisten, die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen sowie den zugesicherten Beitrag zu den europäischen und globalen Klimaschutzziele zu leisten.<sup>8</sup>

#### **BUNDES-KLIMASCHUTZGESETZ (KSG)**

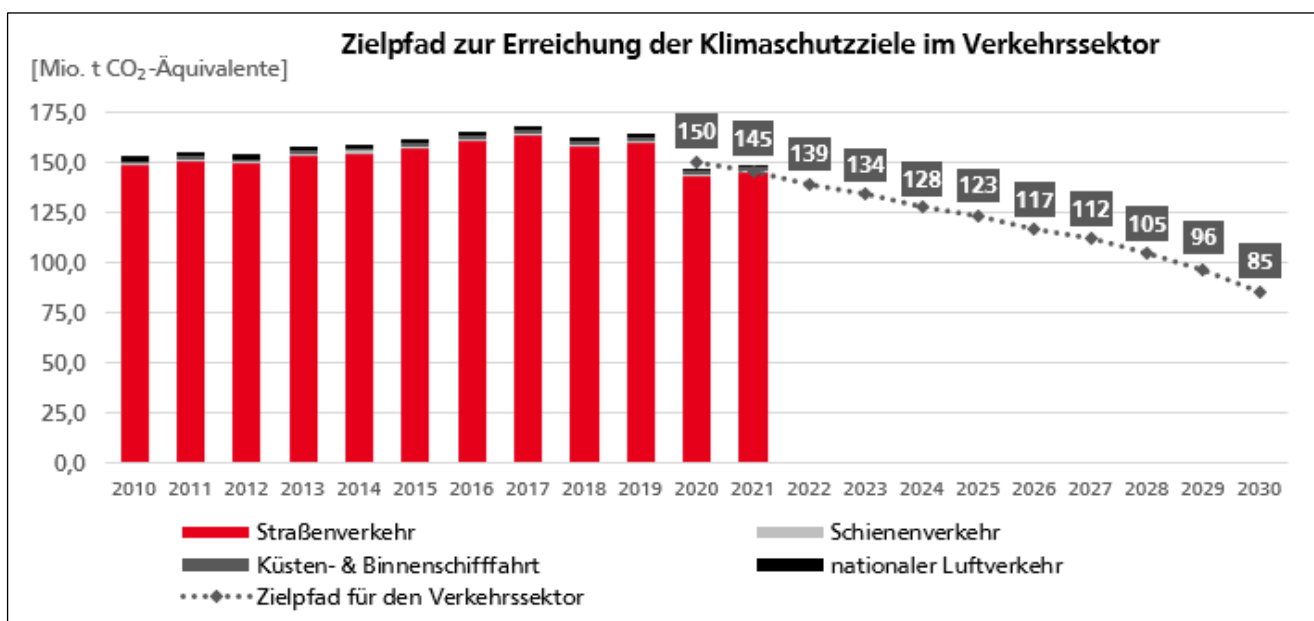
Das **KSG** baut im Wesentlichen auf den Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens auf. Die weithin bekannte Zielvorgabe ist die zunehmende Erderwärmung auf maximal 2° C (besser 1,5° C), verglichen mit dem Niveau des vorindustriellen Zeitalters, zu begrenzen (§1 KSG; United Nations 2015, Artikel 2 Absatz 1a). Als Ziele wurden dafür im KSG definiert, dass im Vergleich zum Referenzjahr 1990 die (anthropogenen) Treibhausgasemissionen sektorübergreifend bis 2030 um mindestens 65 Prozent, bis 2040 um mindestens 88 Prozent und bis 2045 um mindestens 100 Prozent (entspricht Netto-Treibhausgasneutralität) gesenkt werden sollen. Ab 2050 ist dann eine negative Treibhausgasemissionsbilanz zu erreichen (§3 Absatz 1 und 2 KSG). Die Bundesrepublik Deutschland unterstreicht damit ihr Engagement, bis 2045 treibhausgasneutral zu sein – und damit sogar fünf Jahre früher, als auf europäischer und internationaler Ebene vereinbart (Burchardt u. a. 2021, S. 4).

Um die **Zielvorgaben** zu erreichen, werden durch das KSG sogenannte *Jahresemissionsmengen* vorgegeben. Für jeden der sechs Sektoren, die in Deutschlands Treibhausgasbilanz erfasst werden (siehe Kapitel 2.1.3), wurden sektorspezifische Höchstwerte für den jährlich zugelassenen Ausstoß an Treibhausgasen definiert. Die Einhaltung der zugelassenen Höchstmengen wird von den jeweils zuständigen Bundesministerien überprüft. Zeichnen sich Überschreitungen der zulässigen Jahresemissionsmengen ab, ist das jeweils zuständige Bundesministerium dazu angehalten, angemessene Gegenmaßnahmen und Sofortprogramme zu veranlassen (§4 Absatz 1 und 4 KSG).

---

<sup>8</sup> Weitere Erläuterungen zum internationalen und europäischen regulatorischen Rahmen können dem Anhang (S. A2) entnommen werden.

Für den Verkehrssektor ist nach dem KSG der in Abbildung 7 dargestellte **Zielpfad zur Erreichung der Klimaschutzziele** definiert. Obgleich der noch immer anhaltenden Wirkungen der Corona-Pandemie konnten bereits 2021 die vorgegebenen Ziele nach KSG im Verkehrssektor nicht eingehalten werden. 145 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente hätten emittiert werden dürfen, schlussendlich wurden rund 148 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert (Günther & Gniffke 2022, S. 25). Es wird an dieser Stelle nochmals deutlich, welche erhebliche Kraftanstrengung notwendig sein wird, um das Zwischenziel von maximal 85 Millionen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bis 2030 und Treibhausgasneutralität bis 2045 im deutschen Verkehrssektor zu realisieren.



**Abbildung 7: Zielpfad zur Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMUV (2022b, o. S.))

Es rückt unweigerlich erneut die Frage in den Vordergrund, wie eine solche Transformation des Verkehrssektors, als auch im Speziellen des Straßengüterverkehrs, gelingen soll. Bisherige Aktivitäten in diesem Zusammenhang haben den Weg zur Treibhausgasneutralität im Verkehrssektor nicht adäquat ebnen können (Europäische Kommission 2020c, S. 1-3).

### KLIMASCHUTZPLAN 2050 UND KLIMASCHUTZPROGRAMM 2030

Um das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 in Deutschland nicht zu gefährden, wurde auf politischer Ebene hierfür unter anderem der sogenannte „**Klimaschutzplan 2050**“ (BMUB 2016) durch die deutsche Bundesregierung in 2016 verabschiedet. Der Klimaschutzplan 2050 steht dabei im Einklang mit den durch die Bundesregierung international und europäisch zugesicherten Zielen. Der Klimaschutzplan 2050 versteht sich als eine dynamische Begleitunterlage, die inhaltliche Orientierung geben soll, wie die gesetzten Klimaschutzziele erreicht werden können (BMUB 2016, S. 10; o. A. 2019, S. 15). Im Wesentlichen liegt diesem Plan eine dreiteilige Handlungsdoktrin zugrunde:

1. Der allgemeine Energiebedarf in allen Sektoren muss erheblich und anhaltend gesenkt werden.
2. Erneuerbare Energien müssen in einer solchen Form zugänglich gemacht werden, dass diese für eine direkte Nutzung zur Verfügung stehen.
3. Strom muss grundsätzlich aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden (BMUB 2016, S. 14-15).

Der Klimaschutzplan 2050 ist allgemeiner Natur und fokussiert auf verschiedene Handlungsfelder. Mitunter werden aber auch Ziele konkret für den Verkehrssektor definiert. Neben allgemeinen Zielen für den Verkehrssektor lassen sich auch **direkte und indirekte Zielvorgaben für den Straßengüterverkehr**



---

identifizieren. Diese Zielvorgaben können in die drei Zielbereiche **Verkehrsvermeidung**, **Verkehrsverlagerung** sowie **Optimierung des Verkehrsmittels beziehungsweise der Antriebstechnologie** untergliedert werden (BMUV 2019, o. S.; Kummer u. a. 2006, S. 40-41).

Grundlegend soll zunächst das Ziel der **Verkehrsvermeidung** verfolgt werden, denn weniger Verkehr resultiert unmittelbar in Einsparungen von Treibhausgasemissionen. Transporte, die vermieden werden können, sollen also bestmöglich erst gar nicht stattfinden. So erscheint beispielsweise möglich, dass eine Optimierung von Logistikprozessen eine Reduktion benötigter Gütertransporte zur Folge haben könnte (BMUB 2016, S. 51). Vor dem Hintergrund einer prosperierenden Volkswirtschaft und einer einhergehenden Zunahme des Güterverkehrs wird sich trotz großer Bemühungen schlussendlich jedoch nur ein geringes Aufkommen an Gütertransporten auch tatsächlich vermeiden lassen – die Gründe hierfür wurden in den vorherigen Ausführungen bereits dargelegt. Es bedarf ergänzender Maßnahmen.

Der Klimaschutzplan 2050 misst unter anderem einer **Verkehrsverlagerung** im Güterverkehr besondere Bedeutung zu. Hierbei ist vor allem eine Verlagerung von der Straße auf die umweltverträglicheren Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff zu verfolgen. Gelingen soll dies durch eine zielgerichtete Bereitstellung einer bedarfsgerecht ausgebauten Infrastruktur im Güterverkehr, gepaart mit einer intelligent vernetzten Multimodalität und angemessenen Wettbewerbsverhältnissen unter den jeweiligen Verkehrsträgern (BMUB 2016, S. 50-52). Doch auch dem Ziel der Verkehrsverlagerung sind Grenzen gesetzt. So werden sich zwar zweifelsohne Gütertransporte, die bislang auf der Straße stattgefunden haben, auf die Schiene oder das Binnenschiff verlagern lassen – vorausgesetzt, die notwendigen Rahmenbedingungen werden erfolgreich geschaffen (Kummer u. a. 2006, S. 41-42). Dennoch verbleibt ein nicht zu vernachlässigendes Aufkommen an Gütertransporten, das weiterhin über die Straße abgewickelt werden wird (Langhagen-Rohrbach & Doepgen 2021, S. 129-130; Plötz u. a. 2018, S. 3). Selbst wenn die Güterverkehrsleistung der Schiene verdoppelt werden könnte und das Gesamtaufkommen dabei nicht weiter wächst, verblieben mehr als 50 % der gesamten Güterverkehrsleistung auf der Straße.

Auch für diese Gütertransporte, die nach wie vor auf der Straße stattfindenden werden, bedarf es angemessener Lösungskonzepte. Hierfür sieht der Klimaschutzplan 2050 als zusätzlichen Baustein für einen treibhausgasneutralen Verkehrssektor der Zukunft das Ziel der **Optimierung des verwendeten Verkehrsmittels beziehungsweise der genutzten Antriebstechnologie** vor. Das bedeutet, dass all jene Transporte, die weder vermieden, noch auf umweltverträgliche Verkehrsträger verlagert werden können, mit möglichst klimafreundlichen Verkehrsmitteln durchzuführen sind. In diesem Zusammenhang setzt der Klimaschutzplan 2050 als oberste Handlungsdoktrin, dass das deutsche Verkehrssystem seine Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen vollumfänglich lösen müssen. Damit das gelingt, ist vor allem die Elektromobilität zu stärken. Der Strom, der hierfür benötigt wird, muss aus regenerativen Energien hergestellt worden sein. In Ergänzung sollen Biokraftstoffe sowie strombasierte und treibhausgasneutrale Kraftstoffe Verwendung finden. Zeitgleich ist sicherzustellen, dass eine leistungsfähige Tank- und Ladeinfrastruktur für die neu auf den Markt kommenden alternativen Kraftstoffe und Antriebskonzepte errichtet wird. Aber auch Effizienzsteigerungen bestehender Technik sind zu realisieren. Schwere Nutzfahrzeuge werden diesbezüglich explizit im Klimaschutzplan 2050 adressiert: Ihre Verbrennungsmotoren sind zu optimieren, hybride Antriebsstränge zu etablieren oder die Aerodynamik zu verbessern. Ergänzend steht als Ziel, Wasserstoff- und Flüssigerdgas-Lastkraftwagen zu entwickeln und, soweit sinnvoll, auch über eine Elektrifizierung im Straßengüterverkehr nachzudenken. Eine parallel voranschreitende Digitalisierung erlaubt weitere Effizienzsteigerungen: Eine bessere Vernetzung ermöglicht beispielsweise eine Optimierung von Verkehrsflüssen, in Folge lassen sich Stauereignisse reduzieren (BMUB 2016, S. 29 & 50-55).

**In Summe präsentiert der Klimaschutzplan 2050 eine grobe Richtung in Form eines Leitfadens, wie Treibhausgasneutralität in Deutschland erreicht werden kann.** Es werden hierbei allgemein-

---

gültige Ziele für den Verkehrssektor ausgesprochen, als auch unmittelbar für den Straßen(güter)verkehr erarbeitete Zielvorstellungen präsentiert. Die im Klimaschutzplan 2050 von der Bundesregierung noch etwas breiter gefassten Zielvorstellungen werden schlussendlich durch das sogenannte „**Klimaschutzprogramm 2030**“ in konkrete Zielstellungen überführt und gesetzlich verankert (o. A. 2019, S. 8).

**Ein besonderer Fokus in dieser Dissertationsschrift liegt auf dem Bereich der Optimierung des Verkehrsmittels beziehungsweise der Antriebstechnologie der schweren Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs.** Dies hat zum Hintergrund, dass insbesondere im schweren Straßengüterverkehr wenige Fahrzeuge für ein hohes Verkehrsaufkommen verantwortlich sind, im gleichen Zug aber diese wenigen Fahrzeuge ein hohes Aufkommen an Treibhausgasemissionen erzeugen. Aufgrund verhältnismäßig kurzer Haltedauern dieser Fahrzeuge – meist lediglich zwischen drei bis fünf Jahren – erfolgt ein häufiger Fahrzeugwechsel. Hierdurch können alternative Antriebstechnologien einerseits schnell und andererseits in großem Umfang am Markt etabliert werden. Der schwere Straßengüterverkehr zeigt sich als ein Markt, dessen Transformation zügige Einsparungen an Treibhausgasemissionen zulässt (BMVI 2020, S. 6; Hacker, Jöhrens, u. a. 2020, S. 7).

### **GESAMTKONZEPT KLIMAFREUNDLICHE NUTZFAHRZEUGE**

In diesem Zusammenhang ist aus politischer Sicht insbesondere das „**Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge**“ (BMVI 2020) von Bedeutung, welches durch das damalige BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR zum Jahresende 2020 aufgestellt wurde. Mit diesem Konzept wird seitens der Politik der Weg geebnet, Einsparungen an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr kurz-, mittel- und langfristig erfolgreich durchzusetzen. Gelingen soll dies durch die obere Maßgabe, dass bis 2030 rund ein Drittel der insbesondere durch den schweren Straßengüterverkehr realisierten Fahrleistung mit elektrischen Antrieben oder unter Verwendung strombasierter Kraftstoffe erfolgen soll. Um dies umzusetzen, sind Maßnahmen in den Bereichen der Fahrzeugförderung, des Infrastrukturausbaus sowie hinsichtlich des regulatorischen Rahmens vorgesehen (BMVI 2020, S. 5).

Besonderes Potenzial zur Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs wird auf politischer Ebene derzeit den alternativen Antriebstechnologien **batterieelektrische Lastkraftwagen, Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lastkraftwagen** sowie **Oberleitungs-Lastkraftwagen** beigemessen (BMVI 2020, S. 15 & 17). Diese Alternativen zu konventionellen Antrieben im Straßengüterverkehr sind gegenwärtig jedoch weitestgehend rar und technologisch nicht ausgereift. Es lassen sich bislang kaum konkurrenzfähige Antriebstechnologien zu konventionellen Diesel-Lastkraftwagen ausmachen. Ein weiterer Missstand lässt sich derzeit identifizieren in einer unzureichend zur Verfügung stehenden Tank- und Ladeinfrastruktur. Diese ist jedoch erforderlich, um alternative Antriebskonzepte erfolgreich am Markt zu etablieren (BMVI 2020, S. 6 & 17).

Politisch ist man sich diesem Missstand durchaus bewusst und hat aus diesem Grund ein vierstufiges Verfahren erarbeitet, das diesem entgegenwirken soll. Es soll zunächst die Einsatzfähigkeit der drei vorstehend genannten Alternativen unter realen Bedingungen erprobt werden. In diesem Zusammenhang sind die Antriebstechnologien insoweit zu verbessern, dass sie mit Abschluss der Testphase technische Serienreife erreicht haben werden. Zeitgleich sind Standards zu definieren, um einen reibungslosen Betrieb der alternativen Antriebstechnologien unmittelbar nach Markteintritt sicherstellen zu können. Um ein mögliches Nadelöhr an mangelnder Verfügbarkeit von Tank- und Ladeinfrastruktur zu vermeiden, wird parallel der flächendeckende Auf- und Ausbau der notwendigen Infrastruktur vorangetrieben (BMVI 2020, S. 17-19).

Binnen weniger Jahre sollen somit technisch ausgereifte, alternative Antriebskonzepte zur Verfügung stehen, die einerseits in merklichem Umfang Treibhausgasemissionen einsparen, andererseits aber auch die Anforderungen der Betroffenen erfüllen werden – so die Theorie.

---

## MASTERPLAN LADEINFRASTRUKTUR II DER BUNDESREGIERUNG

Mit dem „**Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung**“ (BMDV 2022) soll dem **Auf- und Ausbau der Lade- und Tankinfrastruktur für den Straßen(güter)verkehr** diszipliniert nachgegangen werden, damit „der Hochlauf der Elektromobilität einen zentralen Beitrag zur Transformation im Verkehrs- und Energiesektor, zum Klimaschutz sowie zur Unabhängigkeit von fossilen Energiequellen und damit zur Energiesouveränität Deutschlands leisten“ (BMDV 2022, S. 5) wird. Insgesamt **68 Maßnahmen** stellt der Masterplan zur Verfügung. 58 dieser Maßnahmen zielen dabei vorrangig auf den Straßenpersonenverkehr; **zehn Maßnahmen sind explizit für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs vorgesehen**. Dabei ist es insbesondere der Straßengüterverkehr, der bislang kaum wirksame Transformationsschritte gehen konnte (BMDV 2022, S. 5-6). Um dem entgegenzuwirken, ist im Masterplan unter anderem vorgesehen, dass zeitnah sowohl eine Untersuchung zum Bedarf, als auch eine Planung zum Ausbau von Ladeinfrastruktur für Lastkraftwagen durchgeführt wird. Aufbauend hierauf ist ein Ablaufplan zur Errichtung eines ersten Ladenetzes für Lastkraftwagen zu konzipieren. Bis Ende 2023 sollen erste Ausschreibungen zum Aufbau dieser ersten Ladenetze erfolgen, ergänzt durch einen abgestimmten Finanzierungsrahmen seitens der Politik. Darüber hinaus sollen Pläne erarbeitet werden, an welchen Standorten und in welcher Form Ladeinfrastruktur für Lastkraftwagen zu errichten ist. Weiterer Fokus zeigt sich in der Standardisierung von Ladeprozessen (BMDV 2022, S. 39-42).

Es fällt auf, dass die im *Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung* (BMDV 2022) adressierten **Maßnahmen für den Straßengüterverkehr weitestgehend allgemeiner und übergeordneter Natur** sind. Es zeigen sich **wenig konkrete Aussagen** – insbesondere hinsichtlich der Antriebstechnologie, für die eine entsprechende Tank- und Ladeinfrastruktur errichtet werden soll. Lässt sich dieser Fakt einerseits auf den Aspekt der seitens der Politik gewünschten Technologieoffenheit zurückführen, so darf an dieser Stelle jedoch ebenfalls angeführt werden, dass es bislang schlichtweg keiner alternativen Antriebstechnologie für den schweren Straßengüterverkehr gelang, vollends von sich und dem jeweiligen Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen zu überzeugen.

### EINBEZUG DER ÜBERGEORDNETEN, EUROPÄISCHEN EBENE

Wird der Fokus von der nationalen Perspektive nochmals auf die **europäische Sichtweise** gehoben, wird erneut deutlich, dass auch auf dieser politischen Ebene vor allem der **Energieversorgung im Verkehrssektor** eine **essenzielle Rolle** zugeordnet wird (Europäische Kommission 2018, S. 7). Die **Abhängigkeit des Verkehrssektors von fossilen Energieträgern muss verringert werden** (Europäische Kommission 2020c, S. 3). Für den Straßengüterverkehr zeigen sich auf europäischer Ebene Biokraftstoffe, Biogas und strombasierte Kraftstoffe als Teil der Lösung zur Dekarbonisierung von Verkehrsprozessen. Ferner sind hocheffiziente alternative Antriebe für alle Verkehrsträger zu entwickeln. Generell müssen zügig emissionsarme, besser gar emissionsfreie Fahrzeuge auf dem Markt etabliert werden (Europäische Kommission 2018, S. 12-13). Ein **besonderes Potenzial**, um diese Transformation hin zu einem klimaverträglichen Verkehrssektor zu realisieren, wird in der **Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs** mit nachhaltigen elektrischen Energiespeichern und hocheffizienten E-Maschinen gesehen (Europäische Kommission 2018, S. 8 & 12; Europäische Kommission 2020b, S. 22). Allerdings zeigt sich ferner, dass elektrische Energiespeicher (bislang) eine zu geringe Energiedichte aufweisen und schwer sind. Es ist fraglich, ob sich elektrische Antriebskonzepte im Straßengüterverkehr durchsetzen werden (Europäische Kommission 2018, S. 12).

### ZWISCHENRESÜMEE

Es lässt sich resümieren, dass auf politischer Ebene – global, europäisch, vor allem aber auch auf nationaler Ebene – **Klimaschutz eine hohe Priorität** eingeräumt wird. Die gesetzten Ziele seitens der Politik sind ambitioniert und erfordern entschlossenes sowie zügiges Handeln. Grundsätzlich werden



sämtliche Ziele der Bundesregierung unter die Prämisse gestellt, dass sich langfristig nur solche Lösungen durchsetzen sollen, welche sich nicht zu Lasten des Klimas auswirken werden (o. A. 2019, S. 20). Auch auf europäischer Ebene wird deutlich, dass ein weiteres Verkehrswachstum in Zukunft nur dann zugelassen werden kann, wenn dies unter nachhaltigen Gesichtspunkten geschehen wird. Es gilt der Grundsatz: **Ohne Einsparung an Treibhausgasemissionen, kein weiteres Verkehrswachstum** (Europäische Kommission 2020c, S. 2). Der Verkehrssektor im Ganzen, sowie der Güterverkehr und in diesem der Straßengüterverkehr im Speziellen, finden ebenfalls teils direkte, teils indirekte Berücksichtigung. Zwar konzentriert sich das Gros der aktuell ausgesprochenen politischen Ziele (bislang noch) auf den Straßenpersonenverkehr. Gleichwohl sind zahlreiche übergeordnete Zielstellungen auch für den Straßengüterverkehr relevant und werden sich nur dann einhalten lassen, wenn auch in diesem entsprechende Transformationsschritte erfolgreich gegangen werden. In Summe zeigt sich jedoch, dass insbesondere hinsichtlich des schweren Straßengüterverkehrs seitens der Politik bisher keine klare Entscheidung getroffen wurde. Es scheint Unsicherheit zu herrschen, was nicht verwundert, da mit den „Entscheidungen über den großflächigen Aufbau von Tank- beziehungsweise Ladeinfrastrukturen“ (BMVI 2020, S. 11) für alternative Antriebskonzepte eine erhebliche Tragweite verbunden ist (Plötz u. a. 2018, S. 3-4).

Ohne die Wirtschaft und den gesellschaftlichen Wohlstand Deutschlands komplett abzuwürgen, braucht es zukunftsfähige Lösungen, die einerseits wirksam hinsichtlich des Reduktionspotenzials von Treibhausgasemissionen sind, andererseits vor allem aber auch schnell umgesetzt werden können (Europäische Kommission 2018, S. 2; Burchardt u. a. 2021, S. 4). Dabei muss sichergestellt werden, dass **mit der Umsetzung von Klimaschutz kein Abbau des aktuellen Lebensstandards** einhergeht (o. A. 2019, S. 9). Es muss ermöglicht werden, den Energiebedarf der eingesetzten Verkehrsmittel im Straßengüterverkehr grundsätzlich zu senken – beispielsweise durch die Verwendung strombasierter Antriebskonzepte. Die hierfür benötigte elektrische Energie muss dabei aus erneuerbaren Quellen erzeugt und für eine direkte Nutzung bereitgestellt werden (BMUB 2016, S. 14-15). Zeitgleich ist die Herausforderung gewichtsintensiver elektrischer Energiespeicher zu lösen (Europäische Kommission 2018, S. 12). Als Nebenaspekt zeigt sich an dieser Stelle, dass durch den breiten Markteintritt eines alternativen Antriebskonzepts die Flächenproblematik (unzureichende Stellplatzverfügbarkeit für Lastkraftwagen entlang von Bundesfernstraßen) nicht verschärft werden darf (BMDV 2022, S. 26).

**Einen potentiellen Lösungsansatz für die vorstehend zusammengefasste Problemstellung kann der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr darstellen.**

Das auch als **eHighway-System** bekannte Elektrifizierungskonzept, dem auch seitens der Politik zuweilen erhöhtes Interesse zugewendet wird (beispielsweise nach BMDV (2022, S. 11) oder BMVI (2020, S. 15 & 17)), birgt in Theorie hohes Potenzial zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. Für den Transport von Gütern über längere Distanzen (größer 150 Kilometer), wird das oberleitungsgebundene eHighway-System aufgrund seiner charakteristischen Vorteile (z. B. kaum Nutzlasteinschränkung durch kleine elektrische Energiespeicher, hoher Wirkungsgrad/hohe Effizienz des Antriebs – weitere Details hierzu in den nachfolgenden Ausführungen) gegenwärtig teils sogar als einzig sinnvoller Lösungsansatz gewertet (Langhagen-Rohrbach & Doepgen 2021, S. 129), vor allem auch aufgrund seines weit vorangeschrittenen, technischen Entwicklungsstands (Ainalis u. a. 2022, S. 2). Der Analyse dieses Potenzials und somit des möglichen Beitrags des eHighway-Systems zur Einhaltung der Klimaschutzziele soll im weiteren Verlauf dieser Dissertationsschrift nachgegangen werden.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Über die in diesem Kapitel vorgestellten politischen Rahmenbedingungen hinaus lässt sich eine Vielzahl weiterer politischer Zielvorgaben sowohl für einen klimafreundlichen Verkehrssektor als auch für einen klimafreundlichen (Straßen-)Güterverkehr der Zukunft identifizieren. Für weitere Ausführungen wird einerseits auf den Anhang (S. A2), andererseits auf die Literatur verwiesen.

## 2.2 DER OBERLEITUNGSGEBUNDENE STRABENGÜTERVERKEHR IM FOKUS: DAS eHIGHWAY-SYSTEM<sup>10</sup>

### 2.2.1 GRUNDKONZEPT DES eHIGHWAY-SYSTEMS

In Kürze zusammengefasst ermöglicht das **eHighway-System**, dass entsprechend ausgestattete Lastkraftwagen – sogenannte **Oberleitungs-Lastkraftwagen (O-Lkw)** – während der Fahrt dynamisch mit elektrischer Energie versorgt werden können. Hierfür wird das effiziente Energieversorgungskonzept des elektrischen Schienen(güter)verkehrs auf die Straße übertragen, ohne dabei die charakteristisch hohe Flexibilität des Straßengüterverkehrs zu beeinträchtigen (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24). Damit das funktioniert, wird in die bestehende Straßeninfrastruktur eine **Oberleitungsanlage** integriert. O-Lkw verfügen über einen **Stromabnehmer**, mit dem eine **kraftschlüssige Verbindung zur Oberleitungsanlage** hergestellt werden kann. In Folge wird der O-Lkw mit elektrischer Energie aus der Oberleitungsanlage versorgt. Bedarfsgerecht ausgelegte **elektrische Energiespeicher** und gegebenenfalls ein ergänzendes, weiteres Antriebssystem erlauben es, dass O-Lkw auch auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten eingesetzt werden können – beispielsweise im Vor- beziehungsweise Nachlauf eines elektrifizierten Streckenabschnitts, zwischen zwei elektrifizierten Streckenabschnitten, in Tunneln und Anschlussstellen oder um vorausfahrende, langsamere Fahrzeuge zu überholen beziehungsweise um Gefahrenstellen auszuweichen (Wietschel u. a. 2017, S. 19; Jöhrens, Lehmann, u. a. 2022, S. 5). Das eHighway-System setzt sich dafür im Wesentlichen aus **drei Teilsystemen** zusammen – der **Energieversorgung**, dem **Fahrweg** sowie dem **Fahrzeug** (siehe Abbildung 8) (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24). Die Teilsysteme des eHighway-Systems werden im Folgenden kurz beschrieben.

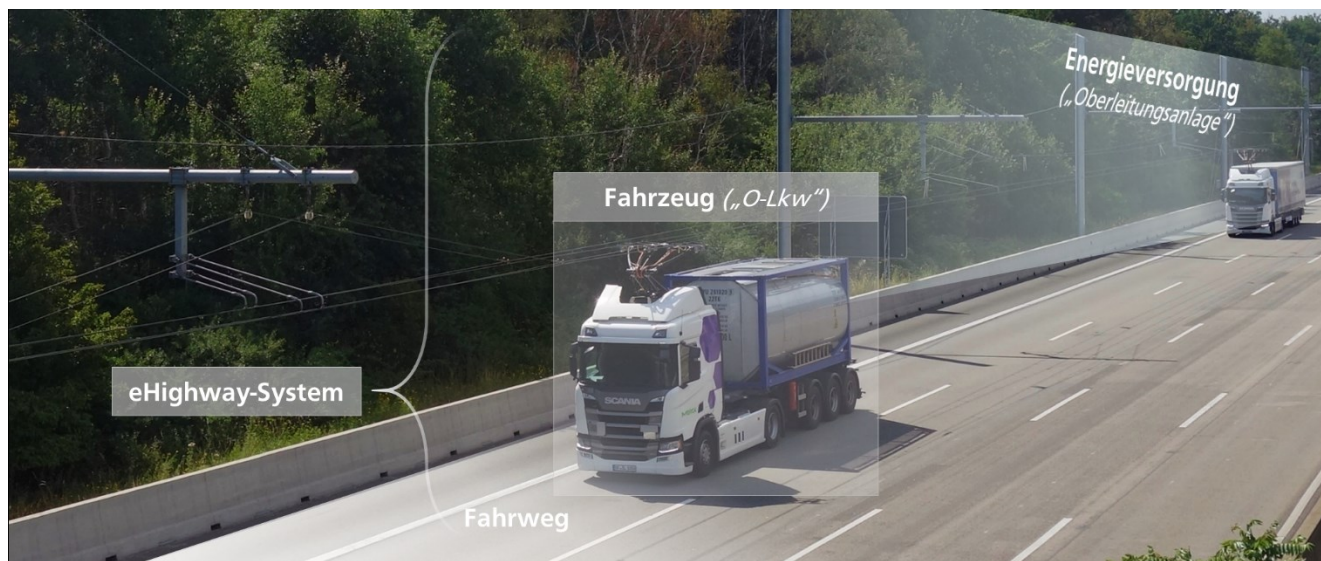


Abbildung 8: Teilsysteme des eHighway-Systems – Energieversorgung, Fahrweg, Fahrzeug  
(Quelle: Eigene Darstellung. Bild: IVV (o. J.))

### 2.2.2 ENERGIEVERSORGUNG DES eHIGHWAY-SYSTEMS

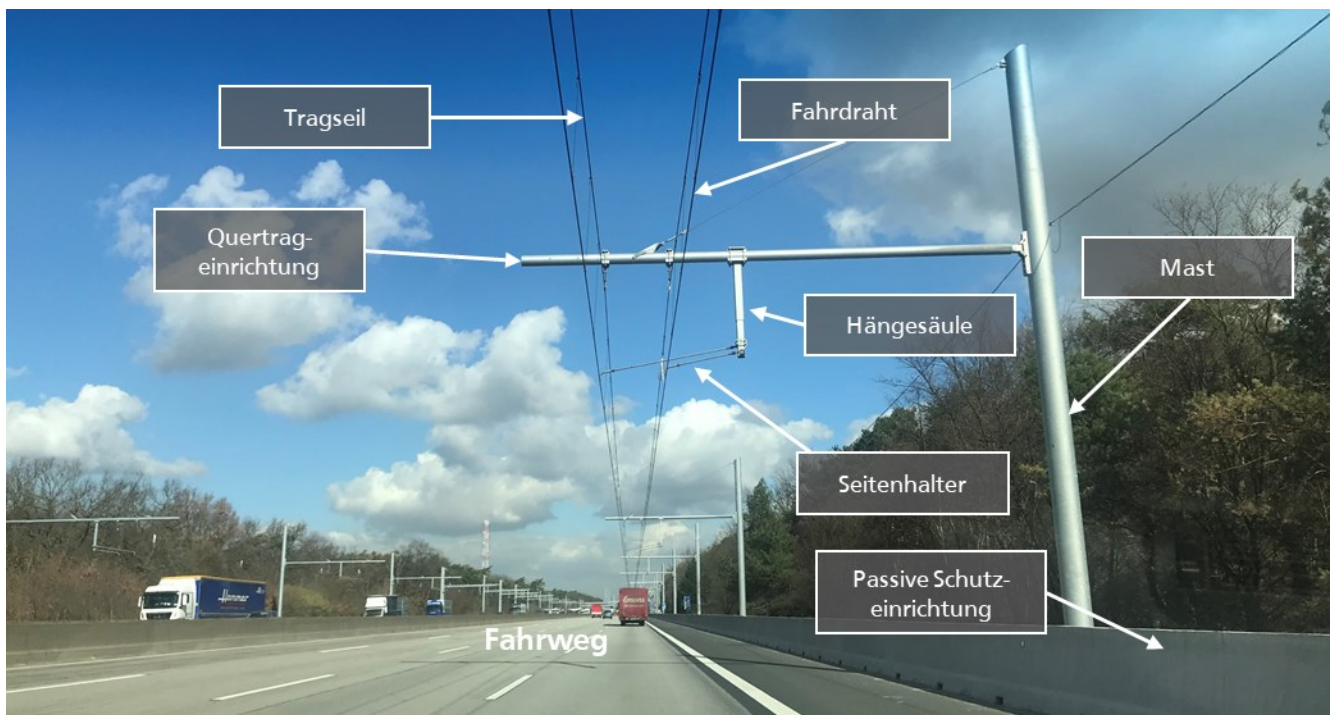
Die **Energieversorgung des eHighway-Systems** wird durch **Unterwerke** sichergestellt, die an das **Mittelspannungsnetz** angeschlossen sind. Bei eHighway-Systemen mit größerer Länge kann auch ein Anschluss an ein Hochspannungsnetz in Erwägung gezogen werden. Die Unterwerke dienen dazu, die aus dem Mittelspannungsnetz eingehende Spannung herunter zu transformieren, diese gleichzurichten und in Folge in die Oberleitungsanlage einzuspeisen. Die Unterwerke werden aus diesem Grund auch als **Gleichrichterunterwerke** bezeichnet (Lehmann, Sommer, u. a. 2021, S. 30 & 36).

<sup>10</sup> Mit dem Werk „Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway“ (Boltze, Lehmann, u. a. 2021) steht ein detailreicher Sammelband zur Verfügung, der die Funktionsweise des eHighway-Systems samt seiner Teilsysteme umfassend beschreibt. Für weitergehende Detail-Informationen zum eHighway-System wird an dieser Stelle auf dieses Werk verwiesen.

Durch die Oberleitungsanlage wird den O-Lkw die benötigte elektrische Traktionsenergie zur Verfügung gestellt. Die **Oberleitungsanlage** setzt sich dabei aus weiteren **Subkomponenten** zusammen. Hervorzuheben sind vor allem die im seitlichen Straßenraum errichteten **Oberleitungsmasten**, an denen sogenannte **Quertrageinrichtungen** angebracht sind (auch als „Ausleger“ bezeichnet). Die Quertrageinrichtungen dienen der **Fahrdrahtführung**. Der **Fahrdraht** wird durch ein **Tragseil**, **Seitenhalter** und verschiedene **Hänger** mittig über dem zu elektrifizierenden Fahrstreifen ausgerichtet. Gemeinsam bilden diese Komponenten das sogenannte **Kettenwerk**.

Neben der Energiebereitstellung muss die Oberleitungsanlage auch dafür ausgelegt sein, eine **Stromrückspeisung** zu ermöglichen. Da eine **Aufnahme zurückgespeister elektrischer Energie über den Fahrweg nicht möglich** ist, wie dies beispielsweise aus dem Schienenverkehr bekannt ist (Stromrückführung dort über die Schiene oder spezielle Rückleiter), ist eine **zweipolige Auslegung der Fahrleitung** des eHighway-Systems erforderlich (Lehmann, Sommer, u. a. 2021, S. 39 & S. 46 & S. 50-51).

Besonderer Fokus im Zusammenhang der Energieversorgung des eHighway-Systems liegt darüber hinaus auf der Berücksichtigung umfassender **elektrischer Schutzvorkehrungen**: Beteiligte sind vor potentiellen Gefahren, die von einer elektrischen Anlage wie des eHighway-Systems ausgehen können, zu schützen. Für Details wird hierzu auf die Literatur verwiesen, beispielsweise auf LEHMANN, SOMMER, U. A. (2021). Der Basisaufbau und die Anordnung der wesentlichen Komponenten einer Oberleitungsanlage wird in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9: Wesentliche Teilkomponenten der energiebereitstellenden Oberleitungsanlage**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an LEHMANN, SOMMER, U. A. (2021, S. 46); Bild: Eigene Aufnahme)

### 2.2.3 FAHRWEG DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Damit O-Lkw eine Oberleitungsanlage nutzen können, bedarf es grundsätzlich eines Fahrwegs. Das eHighway-System wird hierzu **in eine bereits bestehende Straßeninfrastruktur integriert**. Es sind zunächst **keine umfassenden Anpassungen an bestehenden Fahrwegen notwendig**, gleichwohl vorherrschende Rahmenbedingungen die Integration einer Oberleitungsanlage auf bestimmten Streckenabschnitten beeinflussen und auch verhindern können. Insbesondere der mögliche Aufstellbereich der Oberleitungsmasten zeigt sich hiervon betroffen.



---

Im Zusammenhang mit dem Fahrweg ist weiterhin auf die Erhaltung der **Sichtbarkeit vorhandener Beschilderung** zu achten, die durch eine Oberleitungsanlage beeinträchtigt werden kann (Lehmann, Schemmel, u. a. 2021). Außerdem erfordert die Errichtung einer Oberleitungsanlage die Berücksichtigung einer geeigneten **passiven Schutzeinrichtung**. Die passive Schutzeinrichtung dient insbesondere dazu, im Falle eines Unfallereignisses Betroffene vor dem Anprallen an die im Seitenraum errichteten Oberleitungsmasten zu bewahren (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24 & S. 26). In vorstehender Abbildung 9 wird dargestellt, wie eine Oberleitungsanlage in eine bestehende Straßeninfrastruktur integriert werden kann.

#### 2.2.4 FAHRZEUGE DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Lastkraftwagen müssen über besondere technische Ausstattungsmerkmale verfügen, damit diese elektrische Energie von einer Oberleitungsanlage beziehen können. Sogenannte Oberleitungs-Lastkraftwagen, auch **O-Lkw**, müssen mindestens mit einer **E-Maschine**, einem **elektrischen Energiespeicher** sowie einem **Stromabnehmer** (auch **Pantograph** genannt) ausgestattet sein (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 26-27). Ein O-Lkw kann darüber hinaus mit einem weiteren Antriebssystem inklusive weiterem Energiespeicher kombiniert werden. In diesem Fall ist auch die Bezeichnung „**Oberleitungs-Hybrid-Lastkraftwagen**“ geläufig. Der Antriebsstrang kann dabei sowohl als Parallelhybrid, serieller Hybrid oder leistungsverzweigter Hybrid ausgelegt sein. Das genaue Antriebskonzept eines O-Lkws bestimmt sich aus aktuellem Stand der Forschung, dem technischen Fortschritt sowie dem vorgesehenen Einsatzzweck des O-Lkws. So lässt sich einerseits ein Hybrid aus elektrischem Antriebssystem mit einem Verbrennungsmotor andenken. Andererseits können anstatt eines Verbrennungsmotors aber auch Hybride aus einem elektrischen Antriebssystem geknüpft mit beispielsweise einer Brennstoffzelle oder einem Erdgasantrieb gebildet werden. Oder aber der O-Lkw ist als reiner batterieelektrischer Lastkraftwagen konzipiert.

Zentraler Bestandteil eines O-Lkws ist der **Pantograph**, der zur Aufrechterhaltung der für den Straßengüterverkehr charakteristisch hohen räumlichen Flexibilität flexibel gehoben, beziehungsweise gesenkt werden können muss. Über den Pantographen wird die elektrische Energie aus der Oberleitungsanlage entnommen. Hieraus resultierend wird die elektrische Energie einerseits für die Traktion aufgewendet, andererseits um den elektrischen Energiespeicher des O-Lkws für Fahrtabschnitte ohne Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage zu laden.

Etwaige **Schutzkonzepte** am und im O-Lkw schützen Beteiligte und Dritte vor ausgehenden Gefahren des Fahrzeugs im Kontext elektrischer Anlagen (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 26-27; Lehmann, Bühs, u. a. 2021, S. 86-91 & S. 94-95).

#### 2.2.5 ENTWICKLUNGSPFAD DES EHIGHWAY-SYSTEMS<sup>11</sup>

Der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr wird seit 2010 intensiver erforscht. Die Anfänge gehen auf die **Forschungsprojekte ENUBA** (*Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung in Ballungsräumen*) (Siemens AG 2012) und **ENUBA 2** (Siemens AG u. a. 2016) zurück, in denen zunächst die grundsätzliche Machbarkeit einer Oberleitungs-Technologie für den Straßengüterverkehr und erste grundlegende Fragestellungen untersucht wurden. Es wurde hierzu eine **erste eHighway-Testanlage** auf einem stillgelegten Militärflughafen in Groß Dölln (nahe Berlin) errichtet (Lehmann & Sommer 2021a, S. 230-231; Siemens AG 2012, S. 19; Siemens AG u. a. 2016, S. 61).

Der grundlegende Nachweis der Machbarkeit eines oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs (Siemens AG 2012) mündete in den darauffolgenden Jahren in einer Vielzahl weiterer Forschungs-

---

<sup>11</sup> Dem Anhang (S. A8) lässt sich eine weitergehende Zusammenfassung zum Stand der Forschung des eHighway-Systems entnehmen.

---

projekte und Studien – insbesondere zu strategischen Untersuchungen und Querschnittsthemen. Ein breites Spektrum vielfältiger Forschungsaktivitäten lässt sich vor allem hinsichtlich allgemeiner, technischer Verbesserungen des eHighway-Systems identifizieren (u. a. (Siemens Mobility GmbH 2020; BMWK o. J.; BMWK o. J.; RWTH Aachen 2022; RWTH Aachen 2020)). Zur gleichen Zeit wurden und werden **diverse Markteinführungs- und Markthochlaufstrategien** erarbeitet, flankiert von breit angelegten **Technologievergleichen** (u. a. (Hacker, Blanck, u. a. 2020; Jöhrens u. a. 2020; Hacker, Jöhrens, u. a. 2020; Jöhrens, Allekotte, u. a. 2022; Göckeler u. a. 2022; Bergk u. a. 2016)).

Zwar findet sich grundsätzlich eine große Vielfalt von Untersuchungen, die bislang im Kontext der eHighway-Forschung bereits durchgeführt wurden, beziehungsweise gegenwärtig durchgeführt werden. Doch zeigt sich bei näherer Betrachtung, dass die bislang zum **Stand der Forschung** beigetragenen Ergebnisse mangels vorhandener Daten aus praktischen Erprobungen unter realen Bedingungen vor allem theoretischer Natur sind und vorwiegend auf Annahmen beruhen. Auch wenn das **eHighway-System technisch grundsätzlich einer Serienreife nah** zu sein scheint, bedarf es zunächst vor allem belastbarer Kenntnisse und Ergebnisse aus einer Erprobung des eHighway-Systems unter Realbedingungen – so unter anderem auch HACKER, JÖHRENS U. A. (2020, S. 35-36).

Besondere Meilensteine in der Entwicklung des eHighway-Systems stellen deshalb die **praktischen Erprobungen** im öffentlichen Verkehrsraum dar. 2016 wurde hierzu die erste öffentlich zugängliche eHighway-Teststrecke nördlich von Stockholm (Schweden) in Betrieb genommen. Etwa zwei Kilometer der Autobahn E16 wurden mit Oberleitungen elektrifiziert, zwei Testfahrzeuge waren bis 2020 für Forschungszwecke im Einsatz (Siemens AG 2015, o. S.; Lehmann & Sommer 2021b, S. 234). In 2017 wurde nahe dem Hafen von Los Angeles (USA) das zweite eHighway-System erprobt, das sich im öffentlichen Verkehrsraum befand. Etwa 1,6 Kilometer wurden elektrifiziert, drei Versuchsfahrzeuge mit jeweils unterschiedlichem Antriebsstrang wurden betrieben (Morris 2017, o. S.; Siemens AG 2017, o. S.).

Spätestens mit Beginn der öffentlich-wahrnehmbaren Bauarbeiten an der zum hessischen **Forschungsprojekt ELISA** (*Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen*) gehörenden eHighway-Teststrecke in 2018 (Riegelhuth u. a. 2020, S. 29), ist eine breite öffentliche Aufmerksamkeit zum eHighway-System auch wieder in Deutschland angelangt. Mit den weiteren Teststrecken – eine Teststrecke in Schleswig-Holstein (Forschungsprojekt **FESH** – Feldversuch Elektromobilität Schleswig-Holstein) (Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, Verbundprojekt FESH 2017) und eine Teststrecke in Baden-Württemberg (Forschungsprojekt **eWayBW**) (Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg 2020) – befinden sich gegenwärtig (August 2023) drei eHighway-Teststrecken in Deutschland im Realbetrieb.<sup>12</sup>

Auf das Forschungsprojekt ELISA wird aufgrund seiner zentralen Bedeutung für das Forschungsvorhaben dieser Dissertationsschrift im Folgenden exponiert eingegangen.

## 2.2.6 EINFÜHRUNG IN DAS FORSCHUNGSPROJEKT ELISA

Mit der eHighway-Teststrecke in Hessen und dem zugehörigen **Forschungsprojekt ELISA** wird das **eHighway-System erstmalig in Deutschland** im öffentlich zugänglichen Verkehrsraum unter realen Einsatzbedingungen erprobt und dabei wissenschaftlich untersucht. Essenzielle Realdaten im späteren Systemumfeld werden erhoben und ausgewertet. Das ELISA-Forschungsprojekt trägt entscheidend zur Entwicklung des eHighway-Systems bei. Das ELISA-Forschungsprojekt wurde hierfür zunächst in **zwei Teilprojekte** untergliedert (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 132).

---

<sup>12</sup> Dem Anhang (S. A7) kann eine Übersichtskarte der räumlichen Verortung der eHighway-Teststrecken in Deutschland entnommen werden.

## TEILPROJEKT ELISA I

Das **Teilprojekt ELISA I**, mit einer Laufzeit von 2017 bis 2018, diente maßgeblich sämtlichen Aufgaben hinsichtlich der **Planung, Genehmigung und des Aufbaus einer Oberleitungsanlage**. Als Standort für die Oberleitungsanlage entschied sich das damalige Projektkonsortium (bestehend aus *Hessen Mobil – Straßen- und Verkehrsmanagement* sowie dem *Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt*) für den Streckenabschnitt der Bundesautobahn BAB 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt. Ferner wurden erste interessierte Transportunternehmen für den späteren Einsatz der O-Lkw auf der Teststrecke akquiriert (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 132-133; Riegelhuth u. a. 2020; Boltze & Wauri 2019).

## TEILPROJEKT ELISA II

Das **Teilprojekt ELISA II**, mit einer ursprünglich vorgesehenen Laufzeit von Ende 2018 bis Dezember 2022, zwischenzeitlich verlängert bis Mitte 2025, dient vor allem den Aufgaben der **Vorbereitung, Durchführung und umfassenden Begleitforschung des erstmaligen Betriebs eines eHighway-Systems in seiner späteren realen Einsatzumgebung**. Aus förderpolitischen Gründen ist das Teilprojekt ELISA II weiter untergliedert in:

- **ELISA II-A**, mit der Abdeckung sämtlicher betrieblicher Belange zur Oberleitungsanlage, und
- **ELISA II-B**, in dessen Rahmen maßgeblich die wissenschaftliche Begleitforschung durchgeführt wird (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 132-133).

**Die Ergebnisse dieser Dissertationsschrift basieren auf dem Forschungsprojekt ELISA II-B, auf dessen Besonderheiten im Folgenden weiter eingegangen wird.**

## TEILPROJEKT ELISA II-B

Das **Teilprojekt ELISA II-B** wird in einem Verbund aus den Projektpartnern *Die Autobahn GmbH des Bundes*, dem *Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt*, der *e-Netz Südhessen AG* sowie der *Siemens Mobility GmbH* bearbeitet (BMWK o. J., o. S.). In diesem Rahmen wird eine **Vielzahl an Forschungsfragen aus der verkehrlich-technischen, ökonomischen, ökologischen, rechtlich-organisatorischen und akzeptanzspezifischen Perspektive** untersucht. In Kürze zusammengefasst wird mit dem Forschungsprojekt ELISA II-B maßgeblich dazu beigetragen, das eHighway-System insoweit unter Realbedingungen zu erforschen, um es für einen flächendeckenden Einsatz vorzubereiten. Damit das funktioniert, werden O-Lkw im operativen Tagesgeschäft ausgewählter Transportunternehmen integriert. Die *Spedition Hans Adam Schanz GmbH & Co. KG*, die *Ludwig Meyer GmbH & Co. KG*, die *Contargo GmbH & Co. KG*, die *Knauf Gips KG* sowie die *Merck KGaA* agieren im Teilprojekt ELISA II-B als assoziierte Partner und betreiben die O-Lkw (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 132-138; Boltze u. a. 2022, S. 2-7).

## CHARAKTERISTIKA DER ELISA-TESTSTRECKE

Die für die ELISA-Teststrecke errichtete Oberleitungsanlage verfügt über verschiedene Besonderheiten. Auf dem **Streckenabschnitt der BAB 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt**, konkret zwischen den Anschlussstellen Langen/Mörfelden und Weiterstadt, wurde auf einer Länge von **fünf Kilometern in jede Fahrtrichtung** der jeweils rechte (von in Summe vier) Richtungsfahstreifen durch die Oberleitungsanlage elektrifiziert (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 134; Boltze, Wauri, Riegelhuth & Reußwig 2021, S. 145). Es ergibt sich hierdurch eine Gesamtlänge der mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Strecke von zehn Kilometern. Der elektrifizierte Streckenabschnitt zeichnet sich dabei durch eine vorwiegend gestreckte **Linienführung** und eine weitestgehend ebene **Topographie** aus – die maximale Längsneigung beträgt 0,5 Prozent. Die Oberleitungsanlage wurde

---

ferner zu weiten Teilen in einem bewaldeten Gebiet errichtet. Lediglich der südliche Teil der Oberleitungsanlage ist auch aus der Ferne wahrnehmbar. Darüber hinaus liegt auf dem elektrifizierten Streckenabschnitt keine Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vor (Boltze, Wauri, Riegelhuth & Reußwig 2021, S. 145-147).

Bezüglich der **Energieversorgung** ist die Oberleitungsanlage an das **20-kV-Mittelspannungsnetz** angeschlossen. **Zwei Gleichrichterunterwerke**, jeweils in einem 20-Fuß-Container untergebracht, wurden für die im ELISA-Forschungsprojekt errichtete Oberleitungsanlage entlang des Streckenabschnitts berücksichtigt (Boltze, Wauri, Riegelhuth & Reußwig 2021, S. 145-149). Die Gleichrichterunterwerke wandeln den durch das Mittelspannungsnetz bezogenen Wechselstrom in Gleichstrom um und gewährleisten, dass **die O-Lkw schlussendlich mit einer Gleichspannung von 670 V** versorgt werden. Die ELISA-Oberleitungsanlage wurde dabei grundsätzlich so ausgelegt, dass gleichzeitig mindestens fünf O-Lkw mit elektrischer Traktions- und Ladeenergie versorgt werden können. Der maximale Stromfluss beträgt je O-Lkw 450 A, die sich auf 250 A Traktionsstrom und 200 A Ladestrom aufteilen (Giebel & Hahn 2021, S. 150-151).

Die benötigten **Oberleitungsmaste** wurden mit einem durchschnittlichen **Abstand von 50 Metern** (maximal 57 Meter) zueinander errichtet (Boltze, Wauri, Riegelhuth & Reußwig 2021, S. 147; Giebel & Hahn 2021, S. 152). In Summe wurden **229 Oberleitungsmaste** errichtet – 223 hiervon im Randstreifen, sechs im Mittelstreifen. Die **Regelhöhe des Fahrdrachts beträgt 5,1 Meter** über der Fahrbahnoberfläche. Der Abstand zwischen den beiden Fahrdrächten beträgt 1,15 Meter. Grundsätzlich wurde die Beschaffenheit des Fahrdrachts für eine maximale Geschwindigkeit der stromabnehmenden O-Lkw von 100 km/h ausgelegt. Da die aufgestellten Oberleitungsmaste eine neue Gefahrenquelle im seitlichen Fahrbahnraum darstellen, wurde weiterhin die ursprünglich bestehende passive Schutzeinrichtung durch eine neue **passive Schutzeinrichtung** mit der höchsten Rückhaltstufe (H4b) ersetzt (Giebel u. a. 2021, S. 152-156).

Der Entscheidung, die ELISA-Oberleitungsanlage auf dem Streckenabschnitt zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt zu errichten, lagen verschiedene Beweggründe zugrunde. So zeigt sich einerseits ein überdurchschnittlich **hohes Verkehrsaufkommen** auf dem gewählten Streckenabschnitt der ELISA-Teststrecke. Außerdem zeichnet sich dieses Verkehrsaufkommen durch einen **hohen Schwerverkehrsanteil** aus (größer zehn Prozent). Das vorherrschende Verkehrsaufkommen ist prädestiniert, um die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse auf einen potentiellen Aufbau des eHighway-Systems auch auf anderen Streckenabschnitten im In- und Ausland zu extrapolieren (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 133; Boltze, Wauri, Riegelhuth & Reußwig 2021, S. 145). Andererseits weist der Streckenabschnitt eine Reihe an Vorteilen bezüglich der **baulichen Machbarkeit** für die Errichtung einer Oberleitungsanlage auf. Auch bezüglich der Frequentierung der Oberleitungsanlage mit O-Lkw zeigt sich ein hoher Nutzen dieses Standorts: Der **Streckenabschnitt liegt vorteilhaft** hinsichtlich des Tourenprofils zahlreicher Transportunternehmen. Nicht zu unterschätzen ist zugleich die **hohe öffentliche Sichtbarkeit** der Oberleitungsanlage, die der gewählte Standort mit sich bringt (Boltze, Wauri, Riegelhuth, Reußwig, u. a. 2021, S. 133). Vor dem Hintergrund eines potentiellen Auf- und Ausbaus eines Oberleitungsnetzes auf (deutschen) Fernstraßen, lässt sich durch diesen Standort frühzeitig ein Eindruck über die **Akzeptanz auf Seiten der Gesellschaft** gewinnen. Die eHighway-Teststrecke wurde am 7. Mai 2019 offiziell in Betrieb genommen.

#### **CHARAKTERISTIKA DER IM FORSCHUNGSPROJEKT ELISA II-B EINGESETZTEN O-LKW**

Die im **Forschungsprojekt ELISA II-B betriebenen O-Lkw** verfügen im Wesentlichen alle über die gleiche technische Konfiguration. Marginale und zu vernachlässigende Abweichungen in der technischen Konfiguration sind auf den Prototypen-Charakter zurückzuführen, den die O-Lkw aufgrund des gegen-



wärtigen Entwicklungsprozesses und sukzessiv vorgenommener Verbesserungen vorweisen. Grundsätzlich basieren die im Forschungsprojekt ELISA II-B eingesetzten O-Lkw auf einem **Scania R450 A4x2 NB R17N**. Dieser ist ausgestattet mit einem Verbrennungsmotor (331 kW respektive 450 PS), ergänzt durch eine E-Maschine mit einer Leistung von 130 kW. Der Antriebsstrang des O-Lkws ist dabei als Parallelhybrid ausgelegt.

Die im Teilprojekt ELISA II-B eingesetzten O-Lkw sind ferner mit einem **Stromabnehmer** ausgestattet, auch als **Pantograph** bezeichnet, der die **elektrische Energie aus der Oberleitung** aufnimmt. Ein elektrischer Energiespeicher mit einer Bruttokapazität von 18,5 kWh komplettiert die technische Konfiguration des O-Lkws. Eine Ladung dieses elektrischen Energiespeichers kann ausschließlich dynamisch über die Oberleitung oder durch fahrzeuginterne Prozesse erfolgen, da die zum Einsatz kommende O-Lkw-Generation bislang über keine Plug-in-Ladefunktion verfügt (Boltze u. a. 2020; Schöpp u. a. 2021a; Schöpp u. a. 2021b; Schöpp u. a. 2022; Boltze u. a. 2022).

Aus der für Transportunternehmen relevanten **operativ-betrieblichen Perspektive** handelt es sich bei der zum Einsatz kommenden O-Lkw-Generation um Fahrzeuge, die gemeinsam mit einem Sattelaufliieger einen sogenannten **Sattelaufliieger-Zug** (Zugmaschine plus Sattelaufliieger, kurz Sattelzug) der **EG-Fahrzeugklasse N<sub>3</sub>** bilden und vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Nah-, Regional- und Fernverkehr zulassen (Gudehus 2012b, S. 848-850; KBA 2022, S. 25). Grundsätzlich besitzen Sattelaufliieger-Züge ein (in Deutschland gesetzlich beschränktes) zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen (beziehungsweise 44 Tonnen im intermodalen/kombinierten Verkehr) (§34 StVZO). Rund 27 Tonnen stehen dabei als Nutzlast zur Verfügung (Gudehus 2012b, S. 849). Die für den O-Lkw benötigte Pantographentechnik führt dabei zunächst zu einem Mehrgewicht des Sattelaufliieger-Zugs. Damit sich dieses Mehrgewicht für Transportunternehmen nicht negativ auf die Nutzlast auswirkt, konnte im Rahmen des ELISA II-B-Projekts eine Sonderzulassung erwirkt werden. Das Gesamtgewicht des Sattelaufliieger-Zugs darf um das Mehrgewicht, das die Pantographentechnik verursacht, überschritten werden und beträgt nunmehr 41,786 Tonnen. Darüber hinaus verfügen O-Lkw über diverse standardmäßige als auch explizit den Pantographenbetrieb unterstützende Assistenzsysteme (Boltze u. a. 2022, S. 9-12).

#### **Hinweis zum voranschreitenden, dynamischen und schnelllebigen Forschungsumfeld**

*Das Forschungsprojekt ELISA II-B befindet sich in einem dynamischen Umfeld und wird beeinflusst durch schnelllebige Entwicklungen. So sind Änderungen an der ELISA-Oberleitungsanlage (bspw. Verlängerung der Oberleitungsanlage in südliche Richtung um sieben weitere Kilometer – „ELISA III“) oder in das Forschungsprojekt hinzukommende, technisch anders konfigurierte Fahrzeuggenerationen möglich („Laufzeitverlängerung des Teilprojekts ELISA II-B“). Diese Dissertationsschrift basiert im Wesentlichen auf den vorstehend dargestellten Rahmenbedingungen mit Redaktionsschluss zum 31. Dezember 2022 (= Ende der Datenerhebung). Die erarbeiteten Ergebnisse bilden dabei eine essenzielle Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten im Kontext des eHighway-Systems und im Speziellen im Rahmen der ELISA-Projektreihe. Sofern notwendig und sinnvoll wird in den folgenden Ausführungen an relevanten Stellen ein Ausblick auf die potentiell zu erwartenden Veränderungen und Ergebnisabweichungen aufgrund der voranschreitenden Entwicklungen gegeben.*

### **2.3 IDENTIFIKATION VON FORSCHUNGSLÜCKEN IN DER EHIGHWAY-FORSCHUNG**

Zunächst festzuhalten ist: Forschende zum eHighway-System sind sich weitestgehend einig, dass das eHighway-System durchaus die Fähigkeit innehat, den Straßengüterverkehr zu transformieren und einen positiven Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzziele zu leisten. Die im Anhang (S. A8) zur Verfügung gestellte Zusammenfassung zum Stand der Forschung im eHighway-Kontext führt hierzu entsprechend aus. Doch trotz der vielfältigen Forschungsaktivitäten, die bislang bereits durchgeführt wurden, zeigt sich noch immer eine **offene Fragestellung** mit hoher Relevanz:

Wie kann das eHighway-System *konkret* dazu beitragen, die (nationalen) Klimaschutzziele zu erreichen?

Zwei bedeutende Erfolgsfaktoren, die über das Zukunftspotenzial des eHighway-Systems ganz wesentlich entscheiden werden, lassen sich basierend auf der Literatur identifizieren: Einerseits ist es die Frage, welches **Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial O-Lkw** tatsächlich zulassen werden. Andererseits ist es die Frage, inwiefern das **eHighway-System auf Seiten der Gesellschaft akzeptiert** wird. Die Untersuchung dieser beiden Erfolgsfaktoren stellen das Haupt- beziehungsweise Nebenziel dieser Dissertationsschrift dar.

#### **HAUPTZIELSTELLUNG: QUANTIFIZIERUNG DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS VON O-LKW**

Die vorstehend in Anlehnung an die „*Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse*“ (EVP) (FGSV Verlag 2018a) durchgeführte Zustandsanalyse zu gegenwärtigen Entwicklungen im Kontext des eHighway-Systems macht deutlich, dass **bisherige Studien aufgrund mangelnder Verfügbarkeit an Daten aus einem Realbetrieb** ihre Ergebnisse zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw lediglich auf Annahmen und Hochrechnungen basieren konnten. Zwar gehen all diese Hochrechnungen von einem ähnlichen Treibhausgasemissionseinsparungspotenzial in Höhe von ungefähr neun bis 12 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr aus – vorausgesetzt, es steht ein umfassend ausgebautes Netz an Oberleitungsanlagen von (je nach Studie) 3.200 bis 4.300 Kilometern zur Verfügung (Hacker, Blanck, u. a. 2020; Jöhrens u. a. 2020; Hacker, Jöhrens, u. a. 2020). Auch kommt eine Studie zu dem Ergebnis, dass – die Fahrzeugebene betrachtend – ein Diesel-Hybrid-O-Lkw in der Lage sei, etwa 26 % weniger Treibhausgase zu emittieren als ein herkömmlicher Diesel-Lkw. Im besten Falle eines rein batterieelektrischen O-Lkws reduzierten sich die Treibhausgasemissionen sogar um fast die Hälfte (Jöhrens u. a. 2020, S. 10). Doch **sämtliche dieser Studien konnten sich bislang lediglich auf theoretische Annahmen** berufen. Als eine der wenigen Studien, die bisher auf Realdaten zurückgreifen konnte, ist der Beitrag von HANESCH U. A. (2022) hervorzuheben. Doch zeigt sich auch bei diesem Beitrag eine lediglich limitiert zur Verfügung stehende Grundlage an Realdaten. Es lässt sich zusammenfassen:

**Bislang fehlt es an belastbaren Daten, die aus einem Realbetrieb gewonnen wurden. Dies zeigt sich insbesondere bezüglich des Beitrags zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr, den das eHighway-System unter realen Einsatzbedingungen zu leisten vermag.**

Mit dem hessischen **Forschungsprojekt ELISA** ist es nun erstmalig in der Entwicklungshistorie des eHighway-Systems möglich, das tatsächliche Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw sehr tiefgehend und belastbar zu untersuchen. **Basierend auf rund drei Jahren Realbetrieb** auf der zugehörigen eHighway-Teststrecke konnten hierfür mehr als eine halbe Million gefahrene Kilometer von in Summe fünf O-Lkw ausgewertet werden. Hiermit steht eine vorher noch nie in vergleichbarer Form vorliegende Datenbasis zur Verfügung, die die Erarbeitung einzigartiger, exklusiver und belastbarer Ergebnisse erlaubt. Anhand dieser Datenbasis soll mit der vorliegenden Dissertationsschrift die derzeit noch vorliegende Forschungslücke geschlossen werden und das **tatsächliche Einsparpotenzial von O-Lkw im Regelbetrieb unter realen Einsatzbedingungen nachgewiesen** werden.

**Hauptziel** Die Dissertationsschrift setzt sich als primäres Ziel, die Treibhausgasemissionen eines O-Lkws, basierend auf den ausgewerteten Realbetriebsdaten der fünf im ELISA-Forschungsprojekt eingesetzten O-Lkw, zu analysieren und zu quantifizieren.

#### **NEBENZIELSTELLUNG: BETRACHTUNGEN ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES EHIGHWAY-SYSTEMS**

Ein zweites Forschungsfeld, das ebenfalls bedeutend über Erfolg oder Misserfolg des eHighway-Systems beitragen wird und in der bisherigen eHighway-Historie annähernd unbearbeitet blieb, eröffnet sich in **Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz** des eHighway-Systems. Die seither in diesem Kontext stattgefundene Akzeptanzforschung beschränkt sich einerseits auf wenige Ausnahmen und

tangiert andererseits statt der breiten Öffentlichkeit lediglich einzelne Fokusgruppen wie Transport- oder Energieversorgungsunternehmen (siehe unter anderem GÖCKELER U. A. (2022), PLÖTZ U. A. (2018) oder HEIN U. A. (2023)). Dabei sind sich Experten durchaus bewusst, dass eine mangelnde Akzeptanz des eHighway-Systems zu Herausforderungen führen kann, die sich insbesondere im Falle eines Markthochlaufs des eHighway-Systems bemerkbar machen können (Bergk u. a. 2016, S. 20-22; Burghard & Scherrer 2020, S. 30 & S. 38).

Auf den ersten Blick verwundert es, dass trotz des vorhandenen Bewusstseins über die Bedeutung der Akzeptanz sowie deren große Lücke im eHighway-Kontext bislang kaum Forschungsaktivitäten diesbezüglich unternommen wurden (so beispielsweise auch HACKER, JÖHRENS U. A. (2020, S. 35-36) oder BURGHARD & SCHERRER (2020, S. 5)). Einzig BURGHARD & SCHERRER (2020) trugen bis dato etwas umfangreicher zur Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems bei, gleichwohl ihre Analysen nur einen ersten Ansatzpunkt liefern können und sich im Wesentlichen auf eine Medienanalyse – basierend auf Zeitungsartikeln – beschränken. Es kann festgehalten werden:

**Bislang fehlt es an einer empirischen Untersuchung zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems.**

Auf den zweiten Blick zeigt sich jedoch, dass eine fundierte Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems aufgrund einer mangelnden Betroffenheit der Öffentlichkeit vom eHighway-System durch eine fehlende Konfrontation mit diesem bislang auch nur schwer möglich war. Durch die in Hessen erbaute eHighway-Teststrecke ist erstmalig eine solche unmittelbare **Konfrontation zwischen eHighway-System und der breiten Öffentlichkeit** erzeugt worden. Noch nie war es in der Historie der eHighway-Forschung vorher möglich, auf Basis einer solch betroffenen Stichprobe die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems zu betrachten.

Auch wenn **der eigentliche Fokus dieser Dissertationsschrift auf der Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems** liegt, darf zumindest eine erste allgemeine Beleuchtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems basierend auf einer vom eHighway-System betroffenen Stichprobe nicht fehlen. So wird die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems zu der Schlussfolgerung führen, dass es für den wirksamen Einsatz des eHighway-Systems eines größeren Kernnetzes an Oberleitungsanlagen bedarf. Ein solcher Ausbau kann aufgrund verschiedener Faktoren jedoch auf eine mangelnde Akzeptanz und Ablehnung in der Gesellschaft stoßen. Wird es nicht gelingen, den Ausbau eines Netzes an Oberleitungsanlagen und die gesellschaftliche Akzeptanz in Einklang zu bringen, wird der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr mangels ausreichender Netzdichte nicht zum Erreichen der nationalen Klimaschutzziele beitragen können. Dieser Aufgabe – nämlich **einer ersten, allgemeinen Betrachtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** – soll im zweiten Teil der vorliegenden Dissertationsschrift als ergänzende Nebenzielstellung nachgegangen werden.

**Nebenziel** Die Dissertationsschrift setzt sich als sekundäres Ziel, die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems auf Basis der über dreijährigen Praxiserfahrungen im Rahmen des ELISA-Forschungsprojekts mittels standardisierter Online-Befragung in Form eines ergänzenden Exkurses allgemein zu beleuchten.

## 2.4 ZWISCHENFAZIT

Deutschlands Verkehrssektor benötigt schleunigst eine Transformation: Sofern das Erreichen der gesetzten Klimaschutzziele – Treibhausgasneutralität bis 2045 – nicht gefährdet werden soll, bedarf es eines zügigen und wirksamen Handelns. Zwar muss die Dekarbonisierung so oder so in sämtlichen Verkehrsbereichen stattfinden, doch besonderes Potenzial zur effektiven und schnellen Reduzierung der

---

Treibhausgasemissionen bieten vor allem schwere Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen<sup>13</sup> im Straßengüterverkehr. Eine verhältnismäßig geringe Anzahl an Fahrzeugen ist verantwortlich für rund ein Viertel sämtlicher im Verkehrssektor emittierten Treibhausgase. Eine Substitution dieser Fahrzeuge durch Fahrzeuge mit alternativer und klimafreundlicher Antriebstechnologie könnte es erlauben, bereits kurzfristig messbare Erfolge zu realisieren.

Der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr, auch bekannt als eHighway-System, stellt hierfür einen vielversprechenden Ansatz dar – zumindest in der Theorie. Das eHighway-System ist technisch der Serienreife nah, und Expertinnen und Experten versprechen sich ein hohes Erfolgspotenzial zur Einsparung von Treibhausgasemissionen. Es verwundert nicht, dass das eHighway-System bereits Gegenstand einiger Forschungsvorhaben war und gegenwärtig nach wie vor ist. Viele offene Fragen konnten bereits beantwortet werden, insbesondere hinsichtlich der eigentlichen eHighway-Technik sowie zu einem potentiellen Markthochlauf. Bisher weitestgehend fehlend ist jedoch eine umfassende Untersuchung des eHighway-Systems unter realen Einsatzbedingungen. Waren die bisher vorliegenden Erkenntnisse vorwiegend theoretischer Natur, lassen sich nunmehr erstmalig in der Historie der eHighway-Forschung auch Daten aus einem Realbetrieb verarbeiten: Mit der hessischen eHighway-Teststrecke zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt wurde im Rahmen der Forschungsprojektreihe „ELISA“ in 2019 Deutschlands erstes eHighway-System im öffentlichen Verkehrsraum eröffnet. Fünf O-Lkw wurden zwischen Sommer 2019 und Sommer 2020 von fünf Transportunternehmen mit diversifiziertem Anforderungsprofil sukzessive in Betrieb genommen.

Der zusammengetragene Stand der Forschung zum eHighway-System und die hierbei durchgeführte Zustandsanalyse zeigen auf, dass Forschungslücken zum eHighway-System vor allem in zweierlei Hinsicht dringend geschlossen werden müssen:

1. Es fehlt an belastbaren Ergebnissen zum tatsächlichen **Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial** des eHighway-Systems. Bisherige Erkenntnisse konnten aufgrund fehlender Realerprobungen lediglich auf Hochrechnungen und Annahmen basieren. Es ist essenziell, diese Forschungslücke durch die nun mögliche Verarbeitung von Realdaten zu schließen. Dieser Aufgabe wird als Hauptzielstellung in der vorliegenden Dissertationsschrift nachgegangen.
2. Es fehlt an Betrachtungen zur **gesellschaftlichen Akzeptanz** des eHighway-Systems. Dieses Forschungsfeld zeigt sich bislang sogar annähernd komplett unbearbeitet. O-Lkw werden, sollen sie merklich zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr beitragen, ein sinnvoll ausgebautes Netz an Oberleitungsanlagen bedürfen. Ein solcher Ausbau kann auf Seiten der Gesellschaft auf Akzeptanz, aber auch auf Ablehnung stoßen. Es erscheint zielführend, die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems aus diesem Grund als ergänzende Nebenzielstellung mit zu betrachten und damit zeitgleich zum Schließen dieser Forschungslücke beizutragen.

Die Dissertationsschrift setzt an dieser Stelle an und nimmt sich zum Ziel – basierend auf den gewonnenen Realdaten im Rahmen des Testbetriebs auf der ELISA-Teststrecke – die identifizierten Forschungslücken zu schließen.

---

<sup>13</sup> Zulässiges Gesamtgewicht von 12 Tonnen und mehr.

---

### 3. FACHLICHE UND METHODISCHE GRUNDLAGEN ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS

---

Das vorliegende Kapitel ist der Aufbereitung relevanter fachlicher und methodischer Grundlagen zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems gewidmet. Dies umfasst einerseits eine Einführung in den Treibhauseffekt sowie allgemein zu Treibhausgasen. Andererseits werden Grundlagen zum Energieverbrauch von Fahrzeugen zusammengetragen und etwaige Einflussfaktoren identifiziert. Zusätzlich wird ein geeignetes Verfahren zur Quantifizierung von Treibhausgasemissionen im Verkehrswesen vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Einführung in den allgemeinen Verfahrensablauf von Untersuchungen im Verkehrsbereich.

#### 3.1 EINFÜHRUNG IN DIE ÖKOLOGISCHEN WIRKUNGEN DES STRABEN(GÜTER)VERKEHRS

Neben all den positiven Wirkungen und Effekten, die Verkehrsprozesse allgemein ermöglichen, lassen sich auch einige negative Wirkungen nicht leugnen, insbesondere mit **Einfluss auf die Umwelt**<sup>14</sup>. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang, beispielsweise nach den *Hinweisen zu Energie, luftbezogenen Emissionen und Immissionen im Straßenverkehr*, kurz „H EEIS“ (FGSV Verlag 2018b), die sogenannte **Humantoxizität**<sup>15</sup>, **Sommersmog**<sup>16</sup>, **Eutrophierung**<sup>17</sup>, **Versauerung**<sup>18</sup> und die Beeinflussung des **Treibhauseffekts**<sup>19</sup>. Der **verkehrsbedingte Umwelteintrag** besteht dabei vor allem aus den Schadstoffen Ammoniak, Blei, Distickstoffmonoxid, Kohlenmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Kohlenwasserstoffen (Nicht-methankohlenwasserstoffe, Methan, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dioxine, Furane), PM10, PM2,5, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden<sup>20</sup> (FGSV Verlag 2018b, S. 7-8). **Schadstoffe** sind generell definiert als „Verunreinigungen, die für den Menschen oder die Biosphäre schädlich sind“ (Wellburn 1997, S. 1). Als wesentliche **Emissionsquellen für straßenverkehrsbedingte Schadstoffe** zählen einerseits vor allem die Verbrennung fossiler Kraftstoffe zur Bereitstellung von Traktionsenergie für Fahrzeuge sowie andererseits Reifen-, Brems-, Kupplungs- und Straßenoberflächenabrieb. Auch eine erneute Aufwirbelung von Schadstoffen, die sich bereits auf etwaigen Flächen abgesetzt haben, ist möglich (FGSV Verlag 2018b, S. 7). In diesem Zusammenhang finden häufig die Begriffe „Emission“ und „Immission“ Verwendung.

#### ABGRENZUNG DER BEGRIFFE „EMISSION“ UND „IMMISSION“

Unter einer „**Emission**“ wird grundsätzlich das Aussenden („Emittieren“) eines Schadstoffes oder allgemein eines Störfaktors in die Umwelt verstanden (Posset u. a. 2014, S. 304; FGSV Verlag 2018b, S. 4). Unterscheiden lassen sich dabei Emissionen, die natürlichen Ursprungs sind, sowie Emissionen, die auf den Menschen zurückgeführt werden. Natürliche Emissionsquellen sind zum Beispiel Vulkanausbrüche oder über Meeresoberflächen abgegebene Emissionen (Wasserdampf). Durch den Menschen hervorgerufene Emissionen sind beispielsweise Resultat der Energieerzeugung, industrieller oder verkehrlicher

---

<sup>14</sup> Unter dem Begriff „Umwelt“ wird im Rahmen dieser Dissertationsschrift die zunächst vom Menschen grundsätzlich unbeeinflusste Natur verstanden. Das Begriffsverständnis zu „Natur“ folgt der Definition nach Duden. Unter dem Begriff „Natur“ wird „alles, was an organischen und anorganischen Erscheinungen ohne Zutun des Menschen existiert oder sich entwickelt“ (Bibliographisches Institut GmbH 2022b, o. S.) verstanden.

<sup>15</sup> Unter „Humantoxizität“ wird „Ausmaß der Giftwirkung für den Menschen toxisch wirkender Stoffe“ (FGSV Verlag 2018b, S. 4) verstanden.

<sup>16</sup> Unter „Sommersmog“ wird die „Belastung der bodennahen Luft durch eine hohe Ozonkonzentration“ (FGSV Verlag 2018b, S. 5) verstanden.

<sup>17</sup> Unter „Eutrophierung“ wird die „Anreicherung eines Ökosystems (Gewässer, Boden) mit Nährstoffen, insbesondere mit Stickstoff- und/oder Phosphorverbindungen, die zu einem vermehrten Wachstum von Algen und höheren Formen des pflanzlichen Lebens und damit zu einer unerwünschten Beeinträchtigung des biologischen Gleichgewichts führt“ (FGSV Verlag 2018b, S. 4) verstanden.

<sup>18</sup> Unter „Versauerung“ wird die „Absenkung des pH-Wertes in Wasser und Boden. Meist verursacht durch anthropogen bedingte Schwefel- und Stickstoffemissionen“ (FGSV Verlag 2018b, S. 6) verstanden.

<sup>19</sup> Unter dem „Treibhauseffekt“ wird die „Wirkung von Treibhausgasen in der Atmosphäre auf die Temperatur am Boden“ (FGSV Verlag 2018b, S. 5) verstanden.

<sup>20</sup> Weitere Informationen zu den einzelnen Schadstoffen lassen sich der Literatur entnehmen, bspw. den H EEIS (FGSV Verlag 2018b).



---

Prozesse (Lenz & Cozzarini 1998, S. 3; Posset u. a. 2014, S. 285). Jeder Emission folgt eine „**Immission**“, die das Einwirken des emittierten Schadstoffs auf die Umwelt beschreibt. Dies können beispielsweise Geräusche sein, aber auch Erschütterungen oder Licht (Posset u. a. 2014, S. 306; FGSV Verlag 2018b, S. 4).

### **TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND TREIBHAUSEFFEKT**

Der Fokus dieser Dissertationsschrift liegt auf den **straßenverkehrsbedingten, klimabeeinflussenden Treibhausgasemissionen**, welche in der breiten Öffentlichkeit häufig mit dem Ausstoß von Kohlenstoffdioxid („CO<sub>2</sub>-Emissionen“) gleichgesetzt werden. Dies ist zwar nicht gänzlich falsch, aber auch nicht vollumfänglich richtig. **Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)** ist zunächst ein Gas, das weder brennt, noch durch den Geruchs- oder Geschmackssinn des Menschen wahrgenommen werden kann. Ebenfalls ist es durch seine Farblosigkeit charakterisiert. Ist ein Mensch einer zu hohen Konzentration an Kohlenstoffdioxid ausgesetzt, kann dies zu einer schwerwiegenden Vergiftung oder gar zum Tod führen. Kohlenstoffdioxid entsteht vor allem bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe (zum Beispiel Dieselkraftstoff) und ist außerdem *ein* wichtiges Treibhausgas (FGSV Verlag 2018b, S. 8). Die Betonung liegt dabei aber in der Tat auf *ein* Treibhausgas: Zwar ist Kohlenstoffdioxid mit einem Anteil von fast 90% an den insgesamt vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen das wesentliche Treibhausgas, das sich erderwärmend auf das Klima auswirken kann, doch gibt es darüber hinaus weitere Treibhausgase, die von nicht unerheblicher Bedeutung sind (Günther & Gniffke 2021, S. 68). So wurden beispielsweise im Kyoto Protokoll (United Nations 1998) neben Kohlenstoffdioxid zusätzlich die Treibhausgase Methan, Distickstoffmonoxid, teil- und vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe sowie Schwefelhexafluorid festgehalten (United Nations 1998, S. 19; Lenz & Cozzarini 1998, S. 8)<sup>21</sup>. Diese Treibhausgase haben im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid zwar mengenmäßig einen wesentlich geringeren Anteil an den in Summe emittierten Treibhausgasen; sie haben dagegen aber ein wesentlich höheres sogenanntes **Erderwärmungspotenzial** – auch bekannt unter dem englischen Begriff „**global warming potential**“. Bevor hierzu weiter ausgeführt wird, soll vorab in den Treibhauseffekt eingeführt werden.

Aufgrund des **Treibhauseffekts** herrschen auf der Erdoberfläche Temperaturen, die ein adäquates Lebensumfeld für Pflanzen, Tiere und Menschen erlauben. Ohne den Treibhauseffekt herrschten auf der Erde deutlich kältere Temperaturen – Experten gehen von einer Temperatur von etwa -18 Grad Celsius aus. Durch den Treibhauseffekt wird verhindert, dass die von der Sonne ausgehende Energie, die auf die Erde eintrifft, in gleichem Umfang wieder zurückgegeben wird. Die vorstehend bereits eingeführten Treibhausgase, auch bezeichnet als sogenannte *natürliche Spurengase*, sind dafür verantwortlich, dass ein Teil der Sonnenenergie in der Erdatmosphäre erhalten bleibt – entsprechend dem Effekt eines Treibhauses für Pflanzen im heimischen Garten. Aufgrund dieses Treibhauseffekts wurde menschliches Leben auf der Erde möglich. Man spricht hierbei auch von dem sogenannten **natürlichen Treibhauseffekt**. Durch diesen natürlichen Treibhauseffekt hat sich auf der Erdoberfläche eine globale und recht beständige mittlere Durchschnittstemperatur von circa +15 Grad Celsius eingestellt (Quaschnig 2020, S. 50-51; Lenz & Cozzarini 1998, S. 7-8; Wellburn 1997, S. 187-188).

Grundsätzlich ist die Konzentration der natürlichen Treibhausgase in der Atmosphäre – und damit die mittlere Durchschnittstemperatur auf der Erdoberfläche – zwar schon seit jeher kleineren und auch mal größeren Schwankungen unterlegen, doch regulieren sich diese über kurz oder lang weitestgehend selbst und stagnieren auf ausgewogenem Niveau. Allerdings wird seit geraumer Zeit, etwa seit einem Jahrhundert, ein Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration beobachtet, der mit keiner natürlichen Ursache erklärt werden kann. Lange Zeit uneinig, zeigt sich die Forschung inzwischen nun doch überzeugt, dass die Zunahme der Treibhausgaskonzentration auf den Menschen zurückzuführen

---

<sup>21</sup> Darüber hinaus gibt es noch weitere Treibhausgase, die der Literatur entnommen werden können.

---

ist (Lenz & Cozzarini 1998, S. 2; Quaschnig 2020, S. 56; Posset u. a. 2014, S. 285). Dies wird als der sogenannte **anthropogene Treibhauseffekt** bezeichnet. Der Anstieg der Konzentration der Spurengase führt zu einem Anstieg der Temperatur auf der Erdoberfläche – auch unter dem Begriff der globalen Erderwärmung bekannt (Quaschnig 2020, S. 51; Lenz & Cozzarini 1998, S. 8; Wellburn 1997, S. 187-188). Die Wissenschaft ist sich weitestgehend einig, dass eine Zunahme der mittleren Durchschnittstemperatur auf der Erdoberfläche von mehr als 1,5 Grad Celsius als kritische Marke zähle, „ab der zunehmend extreme und nicht mehr beherrschbare Folgen des Klimawandels auftreten werden“ (Quaschnig 2020, S. 63). Nimmt die Erderwärmung zu, „muss sich die Menschheit auf häufigere und stärkere Extremwetterereignisse und langfristige Umweltveränderungen einstellen.“ (BMZ 2023, o. S.) Die Folgen sind verheerend: Es wird beispielsweise zu stärkeren und länger anhaltenden Hitzewellen kommen, Überschwemmungen werden zunehmen, weitreichende Flächenbrände sind anzunehmen, Gletscher werden schmelzen, ein Anstieg des Meeresspiegels wird erfolgen, Ozeane werden versauern und Böden versalzen. Kurz: Die Lebensgrundlage für Mensch und Tier wird sukzessive genommen (BMZ 2023, o. S.).

### „CO<sub>2</sub>-ÄQUIVALENTE“ IM KONTEXT DES ERDERWÄRMUNGSPOTENZIALS VON TREIBHAUSGASEN

Es wurde bereits geklärt, dass Treibhausgasemissionen nicht nur aus Kohlenstoffdioxid bestehen. Trotz des wesentlich geringeren Anteils der anderen Treibhausgase haben diese allerdings ein deutlich höheres **Erderwärmungspotenzial** als Kohlenstoffdioxid. Zum Vergleich: Methan wirkt in etwa 25 Mal stärker auf die Erderwärmung ein als Kohlenstoffdioxid, und Distickstoffmonoxid sogar fast 300 Mal stärker. Kohlenwasserstoffe wirken gar bis zu 15.000 Mal stärker auf die Erderwärmung ein als die gleiche Menge an Kohlenstoffdioxid<sup>22</sup> (Quaschnig 2020, S. 56; Posset u. a. 2014, S. 288).

Trotz dieses teils erheblich höheren Erderwärmungspotenzials hat sich dennoch Kohlenstoffdioxid als das *bedeutendste* und im Volksmund auch als das *bekannteste* Treibhausgas durchgesetzt (Quaschnig 2020, S. 51; Bernstein u. a. 2008, S. 40; Lenz & Cozzarini 1998, S. 10). Dennoch bedarf es bei der Analyse der Wirkungen von anthropogenen Treibhausgasen einer gesamtheitlichen Betrachtung. Würden nur Kohlenstoffdioxidemissionen Berücksichtigung finden, wären die ermittelten Ergebnisse nicht hinreichend genau (Posset u. a. 2014, S. 288; Lenz & Cozzarini 1998, S. 10). In diesem Zuge hat sich der Begriff der sogenannten CO<sub>2</sub>-Äquivalente etabliert.

Unter **CO<sub>2</sub>-Äquivalenten** wird die in Kohlenstoffdioxidemissionen umgerechnete Menge, die ein Treibhausgas entsprechend seines Erderwärmungspotenzials zur Erderwärmung beitragen würde, verstanden. Kohlenstoffdioxid wird dabei der Faktor 1 zugewiesen, Methan beispielsweise hingegen der Faktor von – je nach Literatur – ungefähr 25. Der Ausstoß eines Kilogramms an Methan würde entsprechend mit rund 25 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bilanziert werden (Posset u. a. 2014, S. 288). Wird in der breiten Öffentlichkeit also von CO<sub>2</sub>-Emissionen gesprochen, so handelt es sich hierbei (zumindest in den meisten Fällen) korrekterweise eigentlich entsprechend um CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

Grundsätzlich folgt das dieser Dissertationsschrift zugrunde liegende **Begriffsverständnis von „Treibhausgasemissionen“** dem Begriffsverständnis nach Bundes-Klimaschutzgesetz, in welchem Treibhausgasemissionen definiert werden als „die anthropogene Freisetzung von Treibhausgasen in Tonnen Kohlen[stoff]dioxidäquivalent, wobei eine Tonne Kohlen[stoff]dioxidäquivalent eine Tonne Kohlen[stoff]dioxid oder die Menge eines anderen Treibhausgases ist, die in ihrem Potenzial zur Erwärmung der Atmosphäre einer Tonne Kohlen[stoff]dioxid entspricht“ (§2 KSG).

---

<sup>22</sup> Die jeweiligen Faktoren können je nach Literatur Schwankungen unterliegen (Lenz & Cozzarini 1998, S. 10).



---

## TREIBHAUSGASEMISSIONEN IM KONTEXT DES STRABEN(GÜTER)VERKEHRS

Der Verkehrssektor, und in diesem vor allem der **Straßen(güter)verkehr**, zählt allgemein als *ein wesentlicher Emittent von Treibhausgasen*. Dies liegt insbesondere an seiner hohen Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen – die vorherigen Ausführungen sind hierauf bereits eingegangen. Fossile Kraftstoffe bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen. Bei der Verbrennung des fossilen Kraftstoffs erfolgt eine Oxidation, durch die Energie freigesetzt wird. Diese Energie wird für die Traktion eines Fahrzeugs genutzt. Angestrebt wird, dass eine möglichst vollständige Verbrennung des fossilen Kraftstoffs und dabei eine möglichst vollständige Oxidation erfolgt – auch als Maximaloxidation bezeichnet. Als **Verbrennungsprodukt** würden in Folge Kohlenstoffdioxid sowie Wasser entstehen. Eine solche Maximaloxidation ist im Realbetrieb von Fahrzeugen jedoch selten. Durch die stattdessen erfolgende Teiloxidation entstehen Nebenprodukte im Verbrennungsprozess, unter anderem auch durch Reaktionen mit Sauerstoff, der für den Verbrennungsprozess notwendig ist und aus der Umgebungsluft gewonnen wird (FGSV Verlag 2018b, S. 11-12). Im Ergebnis stehen verschiedene Emissionen zu Buche, die Folge des Verbrennungsprozesses fossilen Kraftstoffs sind. Für den Fokus dieser Arbeit zeigen sich insbesondere die entstehenden Treibhausgasemissionen von Relevanz.

Als Lösungsansatz nun beispielsweise vollends auf elektrische Antriebskonzepte zu setzen, birgt hinsichtlich der Betrachtung von Treibhausgasemissionen allerdings auch Potenzial für Fehlinterpretationen. Zwar ist es korrekt, wie zahlreichen Publikationen gelegentlich zu entnehmen, dass Elektrofahrzeuge lokal keinerlei Treibhausgasemissionen freisetzen. Jedoch können bei der **Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie** durchaus Treibhausgasemissionen entstehen (FGSV Verlag 2018b, S. 12). Die weiteren Ausführungen dieser Dissertationsschrift werden hierauf an geeigneter Stelle genauer eingehen. Generell ist zunächst festzuhalten, dass die freiwerdenden **Treibhausgasemissionen eines Fahrzeugs** in einem **proportionalen Verhältnis zum Energieverbrauch** stehen (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 180). Es erscheint somit zielführend, sich zunächst detaillierter mit den Grundlagen des Energieverbrauchs von Fahrzeugen auseinanderzusetzen.

### 3.2 ENERGIEVERBRAUCH VON FAHRZEUGEN UND WESENTLICHE EINFLUSSFAKTOREN

Damit ein Fahrzeug einen Weg von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B zurücklegen kann, benötigt dieses Fahrzeug Energie. Diese Energie wird dem Fahrzeug von extern hinzugefügt – unabhängig davon, ob das Antriebskonzept eines Fahrzeugs auf einem stationären oder dynamischen Energieversorgungskonzept basiert. Als **Energieträger** kommen (bislang vor allem) fossile Kraftstoffe und/oder elektrische Energie zum Einsatz. Diese **chemische** beziehungsweise **elektrische Energie** wird beim Beschleunigungsprozess des Fahrzeugs in **mechanische** und schließlich in **kinetische** Energie umgewandelt. Verharrt ein Fahrzeug bei einer konstanten Geschwindigkeit, so wird auch hierfür Energie benötigt, um die in der jeweiligen Situation vorherrschenden sogenannten Fahrwiderstände zu überwinden und nicht an Geschwindigkeit zu verlieren. Wird das Fahrzeug durch die Fahrenden gebremst, wird vorhandene Bewegungsenergie in **thermische** Energie – *Wärme* – umgewandelt. Je nach Fahrzeugtechnik lässt sich ein Teil dieser Bremsenergie, die bei konventionellen Fahrzeugen als Verlustenergie zu betrachten ist, als elektrische Energie zurückgewinnen und für spätere Beschleunigungsprozesse in einem Energiespeicher zwischenspeichern. Dieser Prozess wird als **Rekuperation** bezeichnet. Generell bemisst sich der gesamte Energieverbrauch eines Fahrzeugs aus einem Zusammenspiel von insbesondere der technischen Konfiguration des Fahrzeugs, dem Einfluss der Fahrenden sowie dem Anwendungsfall, in dem das Fahrzeug jeweils betrachtet wird (FGSV Verlag 2018b, S. 11; Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 97 & S. 163; Hilgers 2016c, S. 9-10).<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> **Exkurs zum Energieerhaltungssatz:** Aus physikalischem Blickwinkel betrachtet ist es nicht möglich, Energie zu verbrauchen oder zu erzeugen. Es ist lediglich möglich, Energie von einer Form in eine andere zu transformieren. In einem herkömmlichen Fahrzeug mit Diesel-

## ÜBERSICHT ÜBER DIE WESENTLICHEN EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH VON FAHRZEUGEN

Der Energieverbrauch von Fahrzeugen im Straßenverkehr bemisst sich im Wesentlichen aus dem Zusammenspiel der nachfolgenden, übergeordneten Einflussfaktoren:

- 1. Technische Konfiguration des Fahrzeugs** (z. B. Art der Fahrzeugtechnik und des Antriebskonzepts; Wirkungsgrad des Antriebsstrangs; Rollwiderstand infolge eingesetzter Reifen; bauliche Form des Fahrzeugs und hieraus resultierender Aerodynamik; Art und Anzahl von Nebenverbrauchern; Art, Form, Aerodynamik sowie Bereifung des Aufliegers; ...);
- 2. Fahrende** (z. B. Erfahrung und Schulungsgrad der Fahrenden; Fahrverhalten, wie z. B. verbrauchoptimiert-vorausschauendes Fahren, Beschleunigungs-/Bremsverhalten; ...);
- 3. Anwendungsfall** (z. B. zu überwindende Fahrwiderstände als Resultat aus Topografie, Straßenbelag oder Geschwindigkeit in der bzw. mit der das Fahrzeug im betrachteten Anwendungsfall operiert; Witterungsbedingungen/Jahreszeit; Beladung bzw. Gesamtgewicht des Sattelzugs; vorherrschendes Verkehrsgeschehen; ...) (Hilgers 2016c, S. 9-10).

Nachfolgende Abbildung 10 zeigt das Zusammenspiel der energieverbrauchsbeeinflussenden Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrenden in einem jeweils zu betrachtenden, spezifischen Anwendungsfall auf.



**Abbildung 10: Energieverbrauchsbeeinflussende Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Fahrenden und Umfeld**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHRAMM U. A. (2018), MITSCHKE & WALLENTOWITZ (2014), HILGERS (2016A), HILGERS (2016B), HILGERS (2016c), FGSV VERLAG (2018B) und BREUER & KOPP (2016))

Bei den in vorstehender Abbildung 10 dargestellten Wechselwirkungen handelt es sich im Wesentlichen um einen Regelkreis: Die Charakteristika des Fahrzeugs beeinflussen die Fahrenden; die Charakteristika der Fahrenden beeinflussen wiederum das Betriebsverhalten des Fahrzeugs; Fahrzeug und Fahrende

Verbrennungsmotor, als Beispiel, wird chemische Energie zu Teilen in kinetische Bewegungsenergie umgewandelt. Verschiedene Faktoren führen dazu, dass jedoch ein Teil der ursprünglich aufgewendeten chemischen Energie nicht nur für den Bewegungsprozess des Fahrzeugs genutzt werden kann, sondern in Form von Wärme an die Umwelt abgegeben wird. Diese Wärme kann von einem konventionellen Diesel-Fahrzeug nicht genutzt werden, um sie erneut für die Traktion in kinetische Energie umzuwandeln – diese Energie ist faktisch verbraucht und muss als Verlustenergie abgeschrieben werden, obwohl diese Energiemenge nach wie vor in Form von thermischer Energie vorhanden ist (Quaschnig 2020, S. 29). In diesem Zusammenhang ist es durchaus üblich, auch von einem *Energieverbrauch* zu sprechen.

befinden sich in einem spezifischen Anwendungsfall – das heißt, sie befinden sich zu einem spezifischen Zeitpunkt, an einem spezifischen Ort, unter spezifischen Rahmenbedingungen. Aus dem betrachteten Anwendungsfall, in dem sich Fahrzeug und Fahrende befinden, ergeben sich letztlich zusätzliche Besonderheiten, die sowohl das Fahrzeug, als auch die Fahrenden und die resultierende Fahrzeug-Fahrende-Interaktion beeinflussen können. Das Zusammenspiel aller Einflüsse bestimmt schlussendlich den Energieverbrauch des Fahrzeugs. Eine ganz wesentliche Grundlage in diesem Zusammenhang stellt die sogenannte **Fahrwiderstandsgleichung** dar. Anhand dieser lassen sich die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs beschreiben. Die Fahrwiderstandsgleichung wird im Folgenden kurz erläutert.

### **DIE FAHRWIDERSTANDSGLEICHUNG ALS ZENTRALE GRUNDLAGE ZUM VERSTÄNDNIS DES ENERGIEVERBRAUCHS VON FAHRZEUGEN SOWIE WESENTLICHER EINFLUSSFAKTOREN<sup>24</sup>**

Der zu überwindende Fahrwiderstand eines Fahrzeugs ist der wesentliche Einflussfaktor auf den Energieverbrauch. Auf Basis der zu überwindenden Fahrwiderstände ergibt sich letztlich die Mindestleistung, die durch den Fahrzeugantrieb bereitgestellt werden muss (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 75; FGSV Verlag 2018b, S. 11). Die Fahrwiderstandsgleichung ist definiert als Summe aus der *Rollwiderstandskraft*  $F_R$ , der *Luftwiderstandskraft*  $F_L$ , der *Steigungswiderstandskraft*  $F_{St}$  und der *Beschleunigungswiderstandskraft*  $F_B$  (siehe Formel 1):

$$F_{\text{Fahrwiderstand,gesamt}} = F_R + F_L + F_{St} + F_B$$

#### **Formel 1: Allgemeine Fahrwiderstandsgleichung**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an MITSCHKE & WALLENTOWITZ (2014, S. 78))

Die Fahrwiderstandsgleichung lässt sich auch parametrisieren, so dass bereits auf den ersten Blick wesentliche Einflussfaktoren auf den jeweiligen Fahrwiderstand ersichtlich werden – siehe Formel 2:

$$F_{\text{Fahrwiderstand,gesamt}} = mgf_R + \frac{1}{2}\rho_L c_W A v^2 + mg \frac{q}{100} + m\ddot{x}$$

#### **Formel 2: Parametrisierte Fahrwiderstandsgleichung**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BREUER & KOPP (2016, S. 38))

Die **Rollwiderstandskraft**  $F_R$  ergibt sich aus dem Produkt aus dem Gewicht  $m$  eines Fahrzeugs multipliziert mit der Erdbeschleunigung  $g$  sowie dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$ . Der Rollwiderstandsbeiwert ist von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschiedlich und gibt letztendlich an, welche Reibung zwischen Fahrzeugrädern und Straßenoberfläche besteht. Von besonderer Bedeutung, insbesondere bei Sattelzügen, ist im Zusammenhang des Rollwiderstands auch die Anzahl der Achsen und entsprechend der Reifen, die einen Kontakt zur Fahrbahn haben. Auch die Qualität der Reifen sowie die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche wirken auf den Rollwiderstand ein und spiegeln sich im Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  wider. Dabei gilt: Je geringer der Rollwiderstand, desto geringer der Energieverbrauch (Hilgers 2016c, S. 32; Breuer & Kopp 2016, S. 38-39).

Die **Luftwiderstandskraft**  $F_L$  ist ein ganz wesentlicher Einflussfaktor auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, da diese mit zunehmender Geschwindigkeit exponentiell ansteigt (FGSV Verlag 2018b, S. 11; Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 55). Ganz allgemein ist die Luftwiderstandskraft definiert als das Produkt aus der Luftdichte  $\rho_L$ , dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$ , der Querschnittsfläche der Fahrzeugfront  $A$  sowie der quadratisch in die Berechnung eingehenden Geschwindigkeit  $v$  (Breuer & Kopp 2016, S. 38-39). Die Luftdichte  $\rho_L$  bestimmt sich in Abhängigkeit des barometrischen Drucks, der Lufttemperatur sowie der Luftfeuchtigkeit. Allgemein nimmt die Dichte der Luft mit abnehmender Temperatur zu, das

<sup>24</sup> Für über die in diesem Abschnitt hinausgehende Details zu den Grundlagen von Fahrwiderständen eines Fahrzeugs wird an dieser Stelle auf die grundständige Literatur verwiesen, wie zum Beispiel MITSCHKE & WALLENTOWITZ (2014) oder BREUER & KOPP (2016).

---

heißt, dass in Wintermonaten die Luftdichte grundsätzlich höher ist als in Sommermonaten. Mitunter hierin begründet lassen sich in Wintermonaten höhere Energieverbrauchswerte von Fahrzeugen feststellen<sup>25</sup> (Breuer & Kopp 2016, S. 54).

Besondere Bedeutung im Zusammenhang mit der Luftwiderstandskraft wird dem sogenannten Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  beigemessen. Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  lässt sich umschreiben als Kennwert zur aerodynamischen Güte des Designs eines Fahrzeugs und gibt Auskunft über die Strömungseigenschaften des Fahrzeugs. Ein niedriger  $c_w$ -Wert spricht dabei für eine bessere, ein höherer  $c_w$ -Wert entsprechend für eine schlechtere Aerodynamik (Hilgers 2016b, S. 44; Breuer & Kopp 2016, S. 54; Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 55; Hilgers 2016c, S. 17). Der  $c_w$ -Wert sollte grundsätzlich immer kombiniert mit der Querschnittsfläche  $A$  der Fahrzeugfront betrachtet werden. Zwar gibt ein hoher  $c_w$ -Wert zunächst Auskunft darüber, dass die Luft ein Fahrzeug schlechter umströmt, als wie dies bei einem Fahrzeug mit geringerem  $c_w$ -Wert der Fall wäre. Verfügt die Fahrzeugfront jedoch über eine geringe Querschnittsfläche, so resultiert das Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  und Querschnittsfläche  $A$  des Fahrzeugs dennoch in einem verhältnismäßig geringen Gesamtwert (siehe Formel 1-Rennwagen). Herausforderungen ergeben sich in diesem Zusammenhang allerdings vor allem bei der Betrachtung von Nutzfahrzeugen und Lastkraftwagen, welche charakteristisch weder über einen niedrigen Luftwiderstandsbeiwert, noch über eine geringe Querschnittsfläche der Fahrzeugfront verfügen. Um dennoch Verbesserungen der Aerodynamik zu ermöglichen, werden unter anderem die Form des Fahrzeugdachs, die Neigung der Windschutzscheibe sowie die Anordnung und Art der Rück- und Frontspiegel beziehungsweise Sonderausstattungen wie zusätzliche Scheinwerfer in der Fahrzeugentwicklung fokussiert. Nicht unerheblich ist im gleichen Zuge auch die Kombination einer Sattelzugmaschine mit ihrem Auflieger (Breuer & Kopp 2016, S. 54 & S. 74-86; Hilgers 2016c, S. 22). Einerseits ergeben sich Zwischenräume zwischen Sattelzugmaschine und Sattelaufliager, die zu verbrauchssteigernden Luftverwirrbellungen führen können. Andererseits ist die Form beziehungsweise die Bauart des Sattelaufliagers von Bedeutung. Verschiedene Bauarten von Sattelaufliegern haben verschiedene aerodynamische Eigenschaften. Ein Kofferaufbau hat beispielsweise einen anderen Luftwiderstand als ein Auflieger mit Plane; ein Containeraufbau mit einer rauen und unebenen Oberfläche führt zu einem höheren Luftwiderstand als ein Container, der über eine glatte Oberfläche verfügt (Hilgers 2016c, S. 34-35). Allgemein ist es möglich, mit Luftleitblechen Verbesserungen der Strömungseigenschaften von Nutzfahrzeugen und Lastkraftwagen inklusive ihrer Auflieger und/oder Anhänger zu realisieren (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 63). Auch ein Einfluss durch vorherrschende Winde auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen ist dabei festzustellen (Hilgers 2016c, S. 18). Vor allem Seitenwinde können zu einer Erhöhung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen und Lastkraftwagen aufgrund der bereits erwähnten Zwischenräume, die sich zwischen Sattelzugmaschine und Auflieger befinden, führen (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 63).

Die beiden vorstehend beschriebenen Fahrwiderstände – Roll- und Luftwiderstand – bestimmen sich maßgeblich aus fahrzeugbezogenen Charakteristika und hängen im Wesentlichen vom Design des jeweils betrachteten Fahrzeugs ab. Neben diesen Fahrwiderständen sind ferner solche Widerstände von Relevanz, die sich vorwiegend aus dem jeweiligen Anwendungsfall ableiten, in dem sich ein Fahrzeug befindet: *Steigungswiderstand* und *Beschleunigungswiderstand* (Breuer & Kopp 2016, S. 38-39).

Die **Steigungswiderstandskraft**  $F_{st}$  berechnet sich aus dem Gewicht  $m$  eines Fahrzeugs, multipliziert mit der Erdbeschleunigung  $g$  sowie dem Steigungsfaktor  $q$ . Der Steigungsfaktor  $q$  entspricht dabei der Steigung des betrachteten Streckenabschnitts in Prozent (Breuer & Kopp 2016, S. 44-46). Die Steigungswiderstandskraft ergibt sich also einerseits aus dem Eigengewicht des Fahrzeugs und der jeweiligen Zuladung, andererseits aus der durch die Topographie vorgegebenen Ist-Situation und der

---

<sup>25</sup> Auch Winterreifen und schlechtere Fahrbahnbedingungen führen unter anderem zu einem höheren Energieverbrauch in Wintermonaten (Breuer & Kopp 2016, S. 54).

---

hieraus resultierenden Steigung der Fahrbahn. Zu beachten ist, dass die Steigungswiderstandskraft nicht nur positive Werte annehmen kann: Sollte sich ein Fahrzeug hangabwärts bewegen, so führt dies entsprechend zu negativen Werten (Breuer & Kopp 2016, S. 38-39).

Die **Beschleunigungswiderstandskraft**  $F_B$  berechnet sich, vereinfachend ausgedrückt, aus der Multiplikation des Fahrzeuggewichts  $m$  mit einem Beschleunigungsfaktor  $\ddot{x}$ , der die Trägheit von zu beschleunigenden, rotierenden Massen berücksichtigt. Hierunter ist zu verstehen, dass rotierende Komponenten eines Fahrzeugs (wie beispielsweise Räder oder Gelenkwellen) im unbeschleunigten Zustand zunächst gewissermaßen *träge* sind. Damit sich diese Komponenten in eine rotierende Bewegung überführen lassen, muss eine Mindestschwelle an Kraftaufwand aufgebracht und überschritten werden – das sogenannte Trägheitsmoment (Breuer & Kopp 2016, S. 38-44; Hilgers 2016b, S. 45). Die Berücksichtigung dieses Trägheitsmoments, kombiniert mit der durch die Fahrenden ausgelösten Beschleunigungsabsicht, wird durch den Beschleunigungsfaktor  $\ddot{x}$  sichergestellt. Weitere Einflussgrößen auf die Beschleunigungswiderstandskraft leiten sich ferner aus dem jeweils vorherrschenden Verkehrsgeschehen sowie den Fahrzeugeigenschaften der Fahrenden ab (Breuer & Kopp 2016, S. 38-39).

In Kürze zusammenfassen lässt sich, dass der Gesamtfahrwiderstand eines Fahrzeugs von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig ist. Hervorzuheben sind

- das Gewicht des Fahrzeugs und seiner Zuladung;
- die Qualität der Bereifung, die aerodynamische Form und die hieraus abgeleiteten aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs/Sattelzugs;
- die vom Anwendungsfall abhängige Geschwindigkeit des Fahrzeugs/Sattelzugs, Witterungsbedingungen, topographische Gegebenheiten, das vorherrschende Verkehrsgeschehen;
- sowie der Einfluss der Fahrenden.

### VOM FAHRWIDERSTAND ZUR BENÖTIGTEN ANTRIEBSLEISTUNG

Der Fahrwiderstand ist einer der wesentlichen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen. Die Kenntnis über den Fahrwiderstand allein führt jedoch noch nicht dazu, dass sich ein Fahrzeug von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B bewegen wird. Der Fahrwiderstand ist im Grunde genommen lediglich ein Äquivalent zur Kraft, die aufgebracht werden muss, um ein Fahrzeug zu bewegen. Diese aufzubringende Kraft, auch als *Zug- oder Antriebskraft* bezeichnet, wird erst durch den *Antrieb eines Fahrzeugs* zur Verfügung gestellt. Durch die Multiplikation der notwendigen Antriebskraft zur Überwindung der Fahrwiderstände mit der Geschwindigkeit, die das Fahrzeug einnehmen soll, ergibt sich die sogenannte benötigte **Antriebsleistung**  $P_{An}$ . Die Mindest-Antriebsleistung eines Fahrzeugs sollte ausgerichtet sein am Einsatzprofil des Fahrzeugs – also des zu überwindenden Fahrwiderstands bei zu erzielender Wunschgeschwindigkeit im späteren Realbetrieb (Hilgers 2016b, S. 44-47). Die Mindest-Antriebsleistung berechnet sich gemäß Formel 3:

$$P_{An} = F_R \times v + F_L \times v + F_{St} \times v + F_B \times v$$

**Formel 3: Berechnung der Mindest-Antriebsleistung von Fahrzeugen**

(Quelle: In Anlehnung an HILGERS (2016b, S. 45))

Erst die Verknüpfung aus Fahrwiderstand und Geschwindigkeit und die hieraus resultierende benötigte Antriebsleistung ermöglichen stichhaltige Aussagen zum tatsächlichen Energieverbrauch eines Fahrzeugs. Zur Bereitstellung der notwendigen Antriebsleistung setzen Fahrzeughersteller zunehmend auf verschiedene Antriebskonzepte. Es ist zielführend, sich an dieser Stelle also kurz mit den wesentlichen charakteristischen Eigenschaften von solchen Antriebskonzepten auseinanderzusetzen. Im Kontext der eHighway-Forschung sind dabei *Verbrennungsmotoren*, *E-Maschinen* und *Parallelhybride* von besonderer Bedeutung.



## EINFLUSS DER FAHRZEUGTECHNIK AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH VON FAHRZEUGEN<sup>26</sup>

Die **Fahrzeugtechnik**, im engeren Sinn das *Antriebskonzept eines Fahrzeugs*, kann sich erheblich auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs auswirken (Küçükay 2022, S. 581). Sowohl Verbrennungsmotoren als auch E-Maschinen kommt die Aufgabe der **Energieumwandlung** zu (Küçükay 2022, S. 281; Schreiner 2017, S. 1). Sie stellen – entweder aus chemischer oder elektrischer Energie – mechanische Energie für die Traktionsaufgabe eines Fahrzeugs bereit (FGSV Verlag 2018b, S. 11). Die Energieumwandlung erfolgt dabei nicht ohne Verluste. Ein typischer Kennwert, der die Höhe der Verluste ausdrückt, ist der sogenannte Wirkungsgrad.

Der **Wirkungsgrad** gibt das Verhältnis zwischen der schlussendlich nutzbaren Traktionsenergie und der hierfür ursprünglich einmal aufgewendeten Energie an (FGSV Verlag 2018b, S. 12; Schramm u. a. 2017, S. 211; Schreiner 2017, S. 2). Die durch den Verbrennungsmotor und/oder E-Maschine bereitgestellte mechanische Energie muss anschließend bis an die (angetriebenen) Räder weitergegeben werden. Auch hierbei entstehen Verluste, unter anderem im Getriebe, in den Achsen oder durch die Reifen selbst (Hilgers 2016c, S. 13). Der Wirkungsgrad des gesamten Antriebsstrangs inklusive der verschiedenen Verluste wirkt sich dabei auf den Energieverbrauch aus (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 165; Hilgers 2016c, S. 7). Die Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren und E-Maschinen unterscheiden sich erheblich zugunsten der E-Maschine (Schramm u. a. 2017, S. 215). Ein hoher Wirkungsgrad ist dabei als Indiz für eine bessere, ein niedriger Wirkungsgrad entsprechend für eine schlechtere Energieeffizienz zu werten (Röth u. a. 2018, S. 310). Die folgenden Ausführungen gehen hierauf weiter ein. Außerdem gilt es in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der sogenannten Rekuperation, also die Rückgewinnung von Bremsenergie, zu beachten. Auch hierbei unterscheiden sich die verschiedenen Antriebskonzepte: „Beim Bremsen wird bei den konventionellen Fahrzeugen die kinetische Energie in Wärme umgewandelt und bleibt deshalb ungenutzt. Bei Fahrzeugen mit E-Maschinen kann man einen Teil dieser Energie elektrisch zurückgewinnen (sog. Rekuperation).“ (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 97)

Im Folgenden wird zu den wesentlichen technischen Besonderheiten und den jeweiligen Unterschieden von Verbrennungsmotoren, E-Maschinen und (Parallel-)Hybriden kurz ausgeführt.

### VERBRENNUNGSMOTOREN

Das **Grundkonzept von Verbrennungsmotoren** basiert auf der Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Energie. Die chemische Energie ist dabei, je nach Verbrennungsmotorenkonzept, entweder in flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen gebunden und wird durch Verbrennung zunächst in thermische Energie, anschließend in mechanische Energie zur Traktion des Fahrzeugs umgewandelt (Hilgers 2016c, S. 7; FGSV Verlag 2018b, S. 11; Küçükay 2022, S. 282; Schreiner 2017, S. 1). Es lassen sich hierbei vor allem zwei Subtypen von Verbrennungsmotoren unterscheiden: Der durch einen elektrischen Funken fremdgezündete Otto-Motor, sowie der das Luft-Kraftstoffgemisch selbstzündende Diesel-Motor (Küçükay 2022, S. 282).

Der **Verbrennungsprozess des Kraftstoffs**, welcher durch die Anreicherung mit Umgebungsluft ein Luft-Kraftstoffgemisch bildet, findet in einem Brennraum statt. Sogenannte Hubkolben bewegen sich in einer translatorischen Bewegung in einem Zylinder auf und ab. Die Hubkolben sind dabei über Pleuelstangen mit einer Kurbelwelle verbunden und versetzen diese in eine rotatorische Bewegung. Die grundsätzliche Betriebsweise eines Verbrennungsmotors ist hierbei in der Regel vom sogenannten **Viertakt** charakterisiert. Am Beispiel eines Otto-Motors wird im ersten Takt – der Kolben bewegt sich im Zylinder

<sup>26</sup> Die im Rahmen dieser Dissertationsschrift dargestellten Ausführungen zur Fahrzeugtechnik beschränken sich auf wesentliche Grundlagen, mit dem Ziel, ein notwendiges Grundwissen zum besseren Verständnis der im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführten Analysen darzubieten. Für weitere Informationen in diesem Themenfeld wird auf die grundständige Literatur verwiesen, z. B. auf KÜÇÜKAY (2022).



---

nach unten – das Luft-Kraftstoffgemisch angesaugt. Ist für den Motor eine Direkteinspritzung vorgesehen, wird lediglich Luft angesaugt und der Kraftstoff unmittelbar in den Brennraum eingespritzt. Im zweiten Takt – der Kolben bewegt sich im Zylinder bei nun geschlossenem Einlassventil wieder nach oben – wird das Luft-Kraftstoffgemisch verdichtet. Im dritten Takt wird das Gemisch aus Luft und Kraftstoff bei Otto-Motoren durch einen elektrischen Zündfunken gezündet (Schramm u. a. 2017, S. 204-208; Küçükay 2022, S. 282-284; Karle 2020, S. 52-53). (Zum Vergleich: Bei Diesel-Motoren entzündet sich das Gemisch an dieser Stelle aufgrund der hohen Kompression und eines hieraus resultierenden starken Temperaturanstiegs von selbst (Küçükay 2022, S. 283; Schreiner 2017, S. 3-4)). Die dabei entstehende Expansionskraft führt dazu, dass sich der Kolben abwärts bewegt und somit über die Pleuelstange die entstandene Kraft auf die Kurbelwelle überträgt. Im vierten Takt werden über ein Auslassventil die entstandenen Abgase durch die erneute Aufwärtsbewegung des Kolbens ausgestoßen (Schramm u. a. 2017, S. 204-208; Schreiner 2017, S. 5-6; Karle 2020, S. 52-53).

Ein Verbrennungsmotor allein ist dabei nicht in der Lage, einen sinnvollen Fahrzeugbetrieb zu ermöglichen. Es sind **weitere Komponenten im Antriebsstrang** erforderlich. Hierunter zählen vor allem **Drehzahl- und Drehmomentwandler** – auch bekannt unter den Begriffen „Kupplung“ und „Getriebe“ (Schramm u. a. 2017, S. 204; Küçükay 2022, S. 325).

**Kupplung und Getriebe** sind bei Verbrennungsmotoren aus zwei Gesichtspunkten erforderlich: „Einerseits steht das Drehmoment eines Verbrennungsmotors erst ab einer bestimmten Mindestdrehzahl zur Verfügung und andererseits ist es nicht möglich, mit dem Drehzahlbereich eines Verbrennungsmotors den gewünschten Geschwindigkeitsbereich eines Fahrzeugs auch nur ansatzweise abzudecken [...]“ (Schramm u. a. 2017, S. 226).

Die **Mindestdrehzahl** eines Verbrennungsmotors ist notwendig, damit der Motor „nicht stehen bleibt“. In diesem Zusammenhang findet auch der Begriff der *Leerlaufdrehzahl* Verwendung, die folglich über der Mindestdrehzahl liegen muss. Die Leerlaufdrehzahl charakterisiert die geringste Drehzahl, die ein Motor im Betrieb einnehmen kann (beispielsweise im Stillstand); alle Drehzahlen unter der Leerlaufbeziehungweise Mindestdrehzahl führen dazu, dass der Motor von allein ausgeht. Der Bereich, in dem sich die Drehzahl zwischen null und der Leerlaufdrehzahl befindet, wird auch als *Drehzahllücke* umschrieben.

Um die **Drehzahllücke** zu überwinden, bedarf es einer Trennung des Motors vom restlichen Antriebsstrang. Dies wird durch eine sogenannte Anfahrkupplung ermöglicht (Küçükay 2022, S. 286-287). Eine Kupplung dient ferner dazu, den Verbrennungsmotor auch während der Fahrt temporär vom nachgelagerten Antriebsstrang zu trennen. Dies ist erforderlich, damit ein Gangwechsel zur Anpassung des Drehzahlbereichs des Verbrennungsmotors an die von den Fahrzeugfahrenden gewünschte Geschwindigkeit erfolgen kann (Schramm u. a. 2017, S. 227; Küçükay 2022, S. 325).

Die Verbrennung des Luft-Kraftstoffgemischs in Verbrennungsmotoren findet grundsätzlich unter keinen optimalen Bedingungen statt. Der Wirkungsgrad – also die durch den Verbrennungsmotor schlussendlich bereitgestellte mechanische Energie, die aus der zuvor aufgewendeten chemischen Energie gewonnen wurde – ist dabei begrenzt und wird in der Literatur gewöhnlich mit etwa 40 % angegeben (FGSV Verlag 2018b, S. 12; Schramm u. a. 2017, S. 211 & S. 215; Schreiner 2017, S. 25). Einfluss auf den **Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren** haben unter anderem das Temperaturniveau, zu der die Verbrennung stattfindet, das Verdichtungsverhältnis des Luft-Kraftstoffgemischs, der Gütegrad der Verbrennung, der Wirkungsgradverlust aufgrund der unvollständigen Verbrennung des Luft-Kraftstoffgemischs oder auch die mechanischen Verluste des Motors sowie der Nebenaggregate (Schramm u. a. 2017, S. 211-212). Auch die zusätzlich verbauten Komponenten sowie allgemeine Reibungsverluste im Antriebsstrang reduzieren den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren (Schramm u. a. 2017, S. 228-229).

Das **Grundkonzept von E-Maschinen** basiert auf der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie (und umgedreht) (Küçükay 2022, S. 288). Eine E-Maschine kann dabei im Wesentlichen zwei Aufgaben erfüllen: Einerseits dient diese der Beschleunigung des Fahrzeugs – hierbei wird elektrische Energie in mechanische Traktionsenergie umgewandelt. Die hierfür notwendige elektrische Energie wird dabei entweder in einem elektrischen Energiespeicher im Fahrzeug mitgeführt, oder aber dynamisch während der Fahrt dem Fahrzeug über ein externes Energieversorgungssystem zur Verfügung gestellt (zum Beispiel durch eine Oberleitung). Andererseits ist es einer E-Maschine im Gegensatz zu einem Verbrennungsmotor möglich, die beim Bremsen freiwerdende Energie durch Rekuperation zurückzugewinnen und als elektrische Energie dem elektrischen Energiespeicher wieder zuzuführen (oder in das externe Energieversorgungssystem zurückzuspeisen) (FGSV Verlag 2018b, S. 12; Hilgers 2016a, S. 9 & S. 19; Schramm u. a. 2017, S. 215).

Grundsätzlich sind **elektrische Antriebskonzepte** simpler aufgebaut, als Antriebskonzepte, die auf einem Verbrennungsmotor basieren. So können in vielen Fällen die für Verbrennungsmotoren zwingend benötigte Kupplung oder ein komplexes Getriebe, Abgasreinigungssystem, Anlasser oder diverse Pumpen entfallen – hierdurch sinken unter anderem auch Wartungskosten von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Hilgers 2016a, S. 9; Schramm u. a. 2017, S. 215; Karle 2020, S. 29). Im Wesentlichen besteht der Antriebsstrang eines elektrischen Fahrzeugs aus der E-Maschine, einem Generator, einem elektrischen Energiespeicher, der Leistungselektronik sowie der Kühlung (Hilgers 2016a, S. 8). Als Bauart von E-Maschinen werden für Fahrzeuge meist sogenannte **Drehstrommaschinen** verwendet, entweder ausgelegt als *hybrid-erregte Synchronmaschine*, *permanent-erregte Synchronmaschine*, *strom-erregte Synchronmaschine* oder als *Asynchron-/Induktionsmaschine*. Drehstrommaschinen bestehen aus einem Stator und einem Rotor. Ihre verschiedenen Ausprägungsformen unterscheiden sich vor allem darin, wie sie das Magnetfeld erzeugen, mit welchem der für die Traktion des Fahrzeugs benötigte elektrische Strom bereitgestellt wird (Schramm u. a. 2017, S. 216-217 & S. 288-289; Karle 2020, S. 63-66).

Im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor ist für den Betrieb einer E-Maschine keine Mindest- oder Leerlaufdrehzahl notwendig. Eine Drehzahllücke, die grundsätzlich überwunden werden müsste, existiert bei E-Maschinen nicht (Küçükay 2022, S. 292). Es bedarf folglich auch keiner Anfahrkupplung (Küçükay 2022, S. 325). Von besonderer Bedeutung bei elektrischen Antriebskonzepten ist jedoch die jeweilige **Leistungselektronik**. Die Leistungselektronik ist das wesentliche Bindeglied zwischen dem elektrischen Energiespeicher und der E-Maschine. Sie übernimmt die Aufgabe des Energiemanagements. **Energiemanagement** bedeutet in diesem Fall, dass der Betrieb von E-Maschinen grundsätzlich Wechsel-/Drehstrom erfordert. Der aus dem elektrischen Energiespeicher zur Verfügung gestellte Strom ist dabei jedoch Gleichstrom (Karle 2020, S. 67 & S. 89; Röth u. a. 2018, S. 310). „Die Umsetzung von Gleich- in Wechselstrom erfolgt durch eine entsprechende Leistungselektronik, den sogenannten Wechselrichter, auch als Umrichter oder Inverter bezeichnet.“ (Karle 2020, S. 29)

Von deutlicher Relevanz für Fahrzeuge, die über einen (teil-)elektrifizierten Antriebsstrang verfügen, ist weiterhin der **elektrische Energiespeicher**, der (im Regelfall) die für den Betrieb der E-Maschine benötigte elektrische Energie zwischenspeichert. Als Energiespeicher kommen sogenannte **Akkumulatoren**, kurz *Akkus*, zum Einsatz. Im Sprachgebrauch findet sich häufig auch die Verwendung des Begriffs einer „Batterie“ wieder. Streng genommen erlaubt eine Batterie lediglich eine einmalige Entladung der in ihr gespeicherten elektrischen Energie. Ein erneutes Aufladen einer Batterie, wie dies für Akkus Standard ist, ist nicht möglich. Die weite Verbreitung des Begriffs „Batterie“ als Synonym für Akkumulatoren ist dabei vermutlich auf den englischen Sprachgebrauch zurückzuführen. Im Englischen wird keine Unterscheidung zwischen den Begriffen Akkumulator und Batterie vorgenommen, sondern beides gleichermaßen mit „battery“ übersetzt – siehe hierfür unter anderem die Verwendung des Begriffs

---

„battery electric vehicles“ (Karle 2020, S. 78; Sauer u. a. 2018, S. 61). Der synonyme Sprachgebrauch von Batterie und Akku/Akkumulator, der sich bisweilen durchgesetzt hat, kann auch im Folgenden dieser Dissertationsschrift gelegentlich Anwendung finden.

Elektrofahrzeuge bieten im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor vor allem den Vorteil, dass sie lokal frei von Treibhausgasemissionen betrieben werden können (Schramm u. a. 2017, S. 215). Die Bereitstellung elektrischer Energie kann aber durchaus im Vorhinein zur Freisetzung von Treibhausgasemissionen geführt haben (FGSV Verlag 2018b, S. 12; Schreiner 2017, S. 44). Es wird im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift hierauf noch detaillierter eingegangen. Weiterhin lässt sich feststellen, dass der **Wirkungsgrad von E-Maschinen** um ein Vielfaches höher ist als der von Verbrennungsmotoren. Der Wirkungsgrad von E-Maschinen wird in der Literatur mit etwa 90 % angegeben (Schramm u. a. 2017, S. 215).

#### PARALLELHYBRIDE

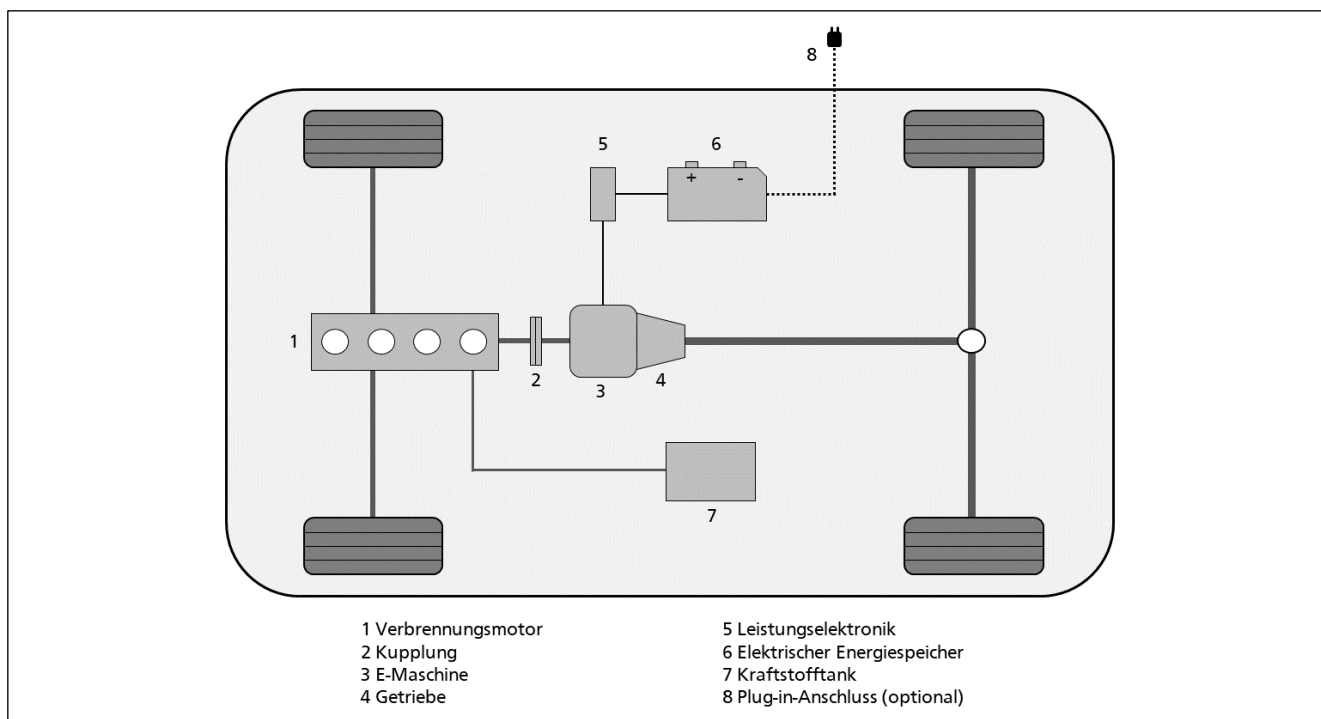
Allgemein wird unter einem Hybridfahrzeug ein Fahrzeug verstanden, das durch (mindestens) zwei Antriebssysteme angetrieben wird und dementsprechend auch über (mindestens) zwei verschiedene Energiespeicher verfügt (Hilgers 2016a, S. 19; Küçükay 2022, S. 344; Schreiner 2017, S. 42; Tschöke 2019, S. 17). Zur **Typisierung von Hybrid-Fahrzeugen** lassen sich zunächst grundsätzlich der *serielle Hybrid*, der *Parallelhybrid* sowie der *leistungsverzweigte Hybrid* unterscheiden. Bei **seriellen Hybriden** wird durch einen Verbrennungsmotor ein Generator angetrieben und hierdurch elektrische Energie erzeugt. Diese elektrische Energie wird in Folge durch die E-Maschine verwendet, um das Fahrzeug anzutreiben. Bei einem **Parallelhybrid** können sowohl ein Verbrennungsmotor, als auch eine E-Maschine vollkommen eigenständig die Traktionsenergie für das Fahrzeug bereitstellen – beide Antriebe sind mechanisch mit den Rädern verbunden. Hierbei können entweder der Verbrennungsmotor oder die E-Maschine jeweils allein, oder aber auch beide gleichzeitig agieren (Schramm u. a. 2017, S. 220; Hilgers 2016a, S. 24). **Leistungsverzweigte Hybride** zeichnen sich dadurch aus, dass sowohl Verbrennungsmotor, als auch E-Maschine über ein sogenanntes Planetengetriebe ihre jeweilige Leistung kombinieren (Schramm u. a. 2017, S. 220). Die folgenden Ausführungen fokussieren sich auf den Grundtyp „Parallelhybrid“ und hierbei auf die Kombination eines Verbrennungsmotors mit einer E-Maschine. Ein solches Konzept findet in seinen Grundzügen auch Verwendung für Fahrzeuge der im Rahmen dieser Dissertationsschrift betrachteten O-Lkw-Generation.

Allgemein verfolgen Hybridfahrzeuge das Ziel, die Vorteile der jeweils verbauten Antriebskonzepte zu vereinen, beziehungsweise die jeweils vorliegenden Nachteile zu minimieren (Karle 2020, S. 31). Der Verbrennungsmotor dient zunächst dazu, den Fahrenden auch das Zurücklegen längerer Distanzen zu ermöglichen; E-Maschinen weisen diesbezüglich noch Verbesserungspotenziale auf, insbesondere im Hinblick auf die Herausforderung einer möglichst gewichtseinsparenden Speicherung elektrischer Energie im Fahrzeug. Eine E-Maschine hingegen bringt ihre Vorteile bei einem Parallelhybrid-Fahrzeug vor allem hinsichtlich der nicht vorhandenen Drehzahllücke beim Anfahren sowie der Möglichkeit der Rekuperation ein (Karle 2020, S. 31; FGSV Verlag 2018b, S. 12; Hilgers 2016a, S. 19). Im Ergebnis zeigen sich einerseits Verbesserungen im Energieverbrauch und damit in den Treibhausgasemissionen. Andererseits lassen sich somit ebenfalls laufende Betriebskosten des Fahrzeugs senken. Negativ zu Buche schlagen jedoch vor allem das zusätzliche Gewicht aufgrund des komplexeren Antriebsstrangs sowie der erhöhte Kaufpreis eines solchen Fahrzeugs (Karle 2020, S. 31-32).

Aufgrund der Kombination von Verbrennungsmotor und E-Maschine ist eine klug abgestimmte **Steuerungslogik** essenzieller Bestandteil eines Parallelhybrids, der die beiden Antrieboptionen ideal und aufeinander abgestimmt einsetzt. Hierbei wird gewährleistet, dass die Traktion unter möglichst optimalen, verbrauchs- sowie verschleißarmen Gesichtspunkten bewerkstelligt werden kann (Hilgers

2016a, S. 9 & S. 20). Unmittelbar von der Steuerungslogik beeinflusst wird der Kraftstoffverbrauch und die in Folge resultierenden Treibhausgasemissionen. Ferner zeigen sich aber auch Gesichtspunkte wie die Beeinflussung der Lebensdauern einzelner Komponenten oder die Fahreigenschaften des Fahrzeugs von Bedeutung (Schramm u. a. 2017, S. 233). Als zusätzliches Ausstattungsmerkmal können Hybridfahrzeuge auch als sogenannte **Plug-in-Hybride** ausgelegt werden. Hierunter wird die Möglichkeit verstanden, den im Fahrzeug eingebauten elektrischen Energiespeicher während Stillstandzeiten auch mittels Anschluss an das Stromnetz aufzuladen (Hilgers 2016a, S. 38).

Nachfolgende Abbildung 11 zeigt vereinfachend auf, wie ein **Antriebsstrang eines Parallelhybrid-Fahrzeugs** aufgebaut sein kann. Der Abbildung lassen sich die für den Antriebsstrang eines Parallelhybrid-Fahrzeugs maßgebenden Komponenten entnehmen.



**Abbildung 11: Vereinfachtes Schema des Antriebsstrangs eines Parallelhybrid-Fahrzeugs**  
 (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tschöke (2019, S. 22) und Hilgers (2016a, S. 31))

#### NEBENVERBRAUCHER

Der Energieverbrauch von Fahrzeugen wird ebenfalls von Nebenverbrauchern beeinflusst. Zu den bekanntesten Nebenverbrauchern von Fahrzeugen gehört unter anderem die **Klimaanlage** (Schramm u. a. 2017, S. 193). Je nach Antriebskonzept verfügt ein Fahrzeug über unterschiedlichste Nebenverbraucher. Viele Nebenverbraucher, die für den Betrieb eines Verbrennungsmotors zwingend notwendig sind, entfallen bei der Verwendung von E-Maschinen – Hilgers (2016a, S. 13) spricht hier beispielsweise von der Hochdruckpumpe für die Kraftstoffeinspritzung, Öl- und Kühlmittelpumpe, Lüftungskomponenten des Kühlersystems oder aber auch von Komponenten im Zusammenhang mit der Abgasnachbehandlung.

Nebenverbraucher in Fahrzeugen, die mit einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, können in der Regel über diesen mitversorgt werden – sie werden an den Verbrennungsmotor angeflanscht. In E-Fahrzeugen ist dies (bislang) nur beschränkt möglich; es bedarf anderweitiger Lösungen, die meist dazu führen, dass entsprechend weniger Traktionsenergie für die eigentliche Fahraufgabe zur Verfügung steht. Insbesondere im Kontext von Nutzfahrzeugen und Lastkraftwagen können jedoch auch im Zusammenhang mit Aufliegern beziehungsweise Anhängern zusätzliche Nebenverbraucher von Bedeutung sein. Wird zum Beispiel ein Kühlaufleger für eine Transportaufgabe benötigt, so bedarf es



---

entsprechend der Bereitstellung von Energie zur Kühlung der transportierten Güter. Dieser Nebenverbrauch kann sich auf den gesamten Energieverbrauch auswirken (Hilgers 2016c, S. 34-35). Der **Energieverbrauch von Nebenverbrauchern** ist jedoch im Allgemeinen beschränkt. In der Literatur wird bei Nutzfahrzeugen der Energieverbrauch von Nebenverbrauchern mit lediglich rund einem Prozent des Gesamtenergieverbrauchs angegeben (Hilgers 2016a, S. 13; Hilgers 2016c, S. 8).

#### EINFLUSS DES FAHRZEUGZUSTANDS

Von Bedeutung im Kontext des Energieverbrauchs von Fahrzeugen ist ebenfalls der **technische Zustand eines Fahrzeugs**. Ist ein Fahrzeug gut gewartet, so kann sich dies positiv auf den Energieverbrauch auswirken. Liegt hingegen ein Wartungsstau vor (zum Beispiel schleifende Bremsen; nicht intakte und verstopfte Leitungen; unzureichende Versorgung von Motor-, Getriebe- oder Achskomponenten mit Schmieröl), kann dies den Energieverbrauchswert negativ beeinflussen. Auch Reifen, die über einen inkorrekten Luftdruck verfügen, können sich verbrauchssteigernd bemerkbar machen. So führt ein zu niedriger Luftdruck beispielsweise zu einem erhöhten Energieverbrauch (da höherer Rollwiderstand).

In diesem Zusammenhang ist auch der **Einfluss des verwendeten Kraftstoffs** auf den Energieverbrauch zu nennen: Ein höherer Anteil an beigemischtem Bio-Kraftstoff kann zu höheren Verbrauchswerten eines Fahrzeugs führen (Hilgers 2016c, S. 47-48).

#### EINFLUSS DER FAHRENDEN AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH VON FAHRZEUGEN

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs wird ebenfalls durch die Fahrenden beeinflusst. In diesem Zusammenhang wird nicht selten auch von einem sogenannten Fahrzeug-Fahrenden-Regelkreis gesprochen, der zusätzlich Faktoren aus der Umgebung berücksichtigt (siehe hierzu auch Abbildung 10, S. 36). Es handelt sich dabei um eine gegenseitige Beeinflussung. Das Fahrzeug wirkt sich auf das Verhalten der Fahrenden aus, welche wiederum durch ihr Verhalten das Fahrzeug beeinflussen. Wahrgenommene Situationen aus dem Umfeld, beispielsweise das allgemeine Verkehrsaufkommen oder auch Witterungsbedingungen, zeigen ebenfalls Auswirkungen auf das Verhalten der Fahrenden. Der mentale und körperliche Zustand der Fahrenden, sowie auch Erfahrungswerte und Schulungen zur eingesetzten Fahrzeugtechnik in verschiedenen Situationen, können darüber hinaus zusätzlich zu messbaren Änderungen des Energieverbrauchs von Fahrzeugen führen. Erfordert der Betrieb des Fahrzeugs beispielsweise eine Fahrzeug-Fahrenden-Interaktion – muss beispielsweise zur Aktivierung eines bestimmten Fahrzustands/Betriebsmodus ein Knopf betätigt werden – ist die Qualität dieser Interaktion immer beeinflusst durch den Schulungs- und Erfahrungsstand der Fahrenden. Ferner lässt sich als Beispiel ein möglichst verbrauchoptimiertes Fahren nennen: Sind Fahrende in dieser Hinsicht geschult und/oder erfahren, sind beispielsweise Energieeinsparungen möglich; erfolgen hingegen viele Beschleunigungs- und Bremsmanöver und ein wenig vorausschauendes Fahren, wird sich ein höherer Energieverbrauch einstellen. Auch ein möglichst gutes Ausnutzen der durch das Gelände vorgegebenen Bedingungen kann sich positiv auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs auswirken. Weiterhin können Assistenzsysteme die Fahrenden dabei unterstützen, das Fahrzeug möglichst verbrauchoptimal zu manövrieren (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 1-3 & S. 607-611 & S. 719-721; Schramm u. a. 2018, S. 10-11; Hilgers 2016c, S. 45).

#### EINFLUSS DES BETRACHTETEN ANWENDUNGSFALLS AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH VON FAHRZEUGEN

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs hängt ganz wesentlich von dem jeweiligen Anwendungsfall ab, in dem sich das Fahrzeug befindet (Hilgers 2016a, S. 40-41). Die Betrachtung *eines Fahrzeugs*, mit *einer fahrenden Person*, in *einem Anwendungsfall* fasst schlussendlich die vorstehend bereits erläuterten Einzel-Einflussfaktoren zusammen.

---

So ist es zunächst das Fahrzeug selbst, das den Energieverbrauch bestimmt. Die technische Konfiguration des Fahrzeugs – basiert das Antriebskonzept beispielsweise auf einem Verbrennungsmotor, auf einer E-Maschine oder auf einem (Parallel-)Hybrid – wirkt sich erheblich auf den Energieverbrauch aus. Weiterhin sind es die Fahrwiderstände, die sich in dem jeweiligen Anwendungsfall abzeichnen. Ist das Fahrzeug beispielsweise in einem bergigen Gelände unterwegs, so wird sich ein deutlich höherer Steigungswiderstand identifizieren lassen, als in einem weitestgehend ebenen Gelände. Die Fahrenden wirken ebenfalls auf den Energieverbrauch ein – sei es durch ein bewusst energiezehrendes Fahrverhalten oder aufgrund eines noch aufzuholenden Schulungsbedarfs hinsichtlich vorausschauenden und verbrauchs-optimierten Fahrens. Ferner ist es das Gewicht des Fahrzeugs, also die Kombination aus Eigengewicht und dem Gewicht der Zuladung, das den Energieverbrauch beeinflusst und dabei auch einen deutlichen Einfluss auf die jeweiligen Fahrwiderstände nimmt (Hilgers 2016c, S. 33). Je schwerer das Fahrzeug plus seiner Zuladung ist, desto größer sind beispielsweise Rollwiderstand, Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstand. Je höher die zu überwindenden Fahrwiderstände sind, desto mehr Antriebskraft wird benötigt. Je mehr Antriebskraft über eine längere Zeit erforderlich ist, desto größer muss die aufgebrachte Leistung des Fahrzeugs sein und entsprechend höher ist der Energieverbrauch.

Ferner ist es das Verkehrsgeschehen, das sich auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen auswirken kann. Ein dichter Verkehr führt grundsätzlich zu einem verstärkten Bedarf an verbrauchsintensiveren Brems- und Beschleunigungsmanövern. Im freien Verkehr lassen sich bessere Energieverbrauchswerte realisieren (FGSV Verlag 2018b, S. 16-17; Hilgers 2016c, S. 38). Ein höheres Verkehrsaufkommen führt aber nicht per se zu einem erhöhten Energieverbrauch. Ist es einem Fahrenden möglich, das Fahrzeug in dem Windschatten eines anderen Fahrzeugs zu manövrieren, so kann sich dies verbrauchssenkend auswirken. Auch das vorausfahrende Fahrzeug kann aufgrund des sich bildenden Staudrucks hiervon profitieren – es wird gewissermaßen von hinten angeschoben. Voraussetzung ist, dass der Abstand zwischen den Fahrzeugen hinreichend klein ist. Die Einhaltung vorgeschriebener Sicherheitsabstände spricht hier entgegen – in der Praxis ist ein solcher Einflussfaktor allerdings durchaus möglich (Hilgers 2016c, S. 40). Zusätzlich kann sich auch entgegenkommender Verkehr erhöhend auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen auswirken. Entgegenkommender Verkehr erzeugt eine Art Luftwand und schiebt diese vor sich her. Eine Erhöhung des Luftwiderstands führt in der Folge zu einem erhöhten Energieverbrauch, da mehr Leistung zur Überwindung eben dieses Widerstands benötigt wird (Hilgers 2016c, S. 39).

### 3.3 GRUNDLAGEN ZUR QUANTIFIZIERUNG VERKEHRSBEDINGTER TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Wesentliche Einflüsse auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen konnten bereits geklärt werden. Von besonderem Interesse muss nun sein, wie sich der Energieverbrauch und die hierdurch entstehenden Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr möglichst korrekt und belastbar erfassen lassen.

#### DIFFERENZIERUNGSMÖGLICHKEITEN VON TREIBHAUSGASEMISSIONEN IM STRABEN(GÜTER)VERKEHR

Zentrale Voraussetzung für die zielführende Durchführung von Analysen zu Treibhausgasemissionen im Straßen(güter)verkehr ist ein sicheres Verständnis über die Fachbegriffe „*Tank-to-Wheel*“, „*Well-to-Tank*“ und „*Well-to-Wheel*“.

Die **direkten Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen** (auch TTW-Treibhausgasemissionen) sind solche Treibhausgase, die unmittelbar durch die eigentliche Transportaufgabe am Ort des Geschehens, beispielsweise durch die Verbrennung des Dieselmotors im Verbrennungsmotor zur Bereitstellung der Traktionsenergie, von einem Fahrzeug emittiert werden. Es handelt sich dabei, vereinfachend ausgedrückt, um die Treibhausgasemissionen *vom Tank zum Rad* (Posset u. a. 2014, S. 287-288; Schramm u. a. 2017, S. 3; FGSV Verlag 2018b, S. 10).



---

**Indirekte Treibhausgasemissionen**, auch **Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen** (WTT-Treibhausgasemissionen), zielen auf die Erfassung solcher Treibhausgasemissionen ab, die im Verlauf der Herstellung der chemischen beziehungsweise elektrischen Energie entstehen (Posset u. a. 2014, S. 287-288; Schramm u. a. 2017, S. 3; FGSV Verlag 2018b, S. 10). Bezüglich der Herstellung des Dieselkraftstoffs werden zum Beispiel sämtliche Treibhausgasemissionen „von der Gewinnung des Rohöls über dessen Transport zur Raffinerie bis zur eigentlichen Destillation des Diesels und dessen Transport zur Tankstelle berücksichtigt“ (Posset u. a. 2014, S. 287). Außerdem zu berücksichtigen ist dabei, dass die Qualität eines Dieselkraftstoffs die Höhe der durch ein Fahrzeug emittierten Treibhausgase beeinflussen kann. Auch der Anteil eines beigemischten Bio-Kraftstoffs wirkt sich auf die Höhe der Treibhausgasemissionen aus (FGSV Verlag 2018b, S. 19; Hilgers 2016a, S. 4). Hierbei gilt: Ein höherer Anteil an beigemischten Bio-Kraftstoffen führt zu geringeren Treibhausgasemissionen (DIN EN 16258, S. 27). Beachtet werden sollte in diesem Zusammenhang jedoch, wie vorstehend bereits erwähnt, dass ein höherer Anteil eines beigemischten Bio-Kraftstoffs allerdings auch zu einem allgemein höheren Kraftstoffverbrauch führen kann, der sich wiederum negativ auf die Treibhausgasemissionsbilanz auswirken kann (Hilgers 2016c, S. 47-48). Vor allem aber die Betrachtung der Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen hinsichtlich der Bereitstellung von elektrischer Energie lässt Spielraum für Fehlinterpretationen. Zwar sind elektrisch angetriebene Fahrzeuge lokal durchaus frei von Treibhausgasemissionen, jedoch muss die Bereitstellung der elektrischen Energie gesondert betrachtet werden. Werden für die Erzeugung elektrischer Energie beispielsweise Kohlekraftwerke eingesetzt, so zeigt sich eine beachtliche Menge an Treibhausgasemissionen, die dem Betrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zugerechnet werden muss. Wird das Fahrzeug hingegen auf Basis regenerativer Energien angetrieben, so lassen sich durchaus erhebliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen realisieren (Posset u. a. 2014, S. 287-288; FGSV Verlag 2018b, S. 10; Schreiner 2017, S. 44-45). In Deutschland sind die Emissionsfaktoren für die Erzeugung elektrischer Energie seit geraumer Zeit rückläufig. Dies begründet sich in einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix – der Anteil an der sogenannten *Kohleverstromung* nimmt ab (Icha u. a. 2022, S. 8). Je nach Strommix, der für die Berechnungen herangezogen wird, können sich folglich erhebliche Unterschiede in den bilanzierten Ergebnissen bemerkbar machen.

Wird die gesamte Kette der Treibhausgasemissionen betrachtet, also von Gewinnung des Rohöls bis zum schlussendlichen Verbrauch des Kraftstoffs/der elektrischen Energie am Ort des Geschehens durch das Fahrzeug, so werden diese Emissionen als die **gesamten Treibhausgasemissionen**, beziehungsweise auch **Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen** (WTW-Treibhausgasemissionen), bezeichnet (Posset u. a. 2014, S. 287-288; Schramm u. a. 2017, S. 3)

#### **VERFAHREN ZUR QUANTIFIZIERUNG VERKEHRSBEDINGTER TREIBHAUSGASEMISSIONEN**

Zur Quantifizierung verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen können verschiedene Verfahren herangezogen werden. Die **Verfahrenswahl** wird insbesondere durch den Anspruch an die Granularität der Ergebnisse sowie durch die Qualität vorhandener Eingangsdaten bestimmt. Quantifizierungen von Treibhausgasemissionen können dabei eine räumliche oder zeitliche Schwerpunktsetzung aufweisen (zum Beispiel stundenbasierte Emissionsermittlung für einen ausgewählten Knotenpunkt versus Emissionserfassung in Jahresscheiben für den gesamten Verkehrssektor) (FGSV Verlag 2018b, S. 16 & S. 19-20).

Die eigentliche **Emissionsermittlung** erfolgt entweder durch Messungen oder Modellierungen: „Die Modellierung erfolgt dabei auf Basis aufbereiteter, typisierter, überwiegend aus Messungen abgeleiteter Emissionsfaktoren.“ (FGSV Verlag 2018b, S. 16) Meist ist das Vorgehen zur Quantifizierung von Treibhausgasemissionen also zunächst geprägt von einer vorangestellten Messung der emittierten Treibhausgase eines Einzelfahrzeugs oder weniger Fahrzeuge im Verbund. Sollte ein Fahrzeug in verschiedenen *Betriebsmodi* operieren – die späteren Ausführungen in dieser Dissertationschrift werden

hierauf noch genauer eingehen – so sollten für jeden Betriebsmodus separate Messungen durchgeführt werden. Die in diesem Schritt ermittelten Kennwerte dienen in weiteren Verfahrensschritten als wichtige Eingangsgröße für etwaige Modellierungen und Skalierungen. Je fundierter diese Kennwerte ermittelt wurden, desto belastbarer die Schlussfolgerungen, die gezogen werden können. Hierbei von besonderer Bedeutung ist die umfassende und korrekte Berücksichtigung der bereits in den vorstehenden Ausführungen dargelegten Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen (FGSV Verlag 2018b, S. 16 & S. 19-20).

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift ist vor allem das Verfahren nach **DIN EN 16258** von Bedeutung. Diese Norm stellt eine **Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen gezielt für Transportdienstleistungen** zur Verfügung. Es werden dabei vor allem die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen aus dem unmittelbaren Betrieb eines Verkehrsmittels erfasst, außerdem wird ein gesamtheitlicher Ansatz des Fahrzeugbetriebs verfolgt – das heißt, dass sämtliche aus dem Fahrzeugbetrieb resultierenden Treibhausgasemissionen erfasst werden, also beispielsweise auch solche, die aufgrund des Betriebs von Nebenverbrauchern (zum Beispiel Klimaanlage) freigesetzt werden. In Ergänzung werden ebenfalls die Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen berücksichtigt (DIN EN 16258, S. 5 & S. 11-13).

Grundsätzlich besteht der **Bilanzierungsansatz nach DIN EN 16258** aus drei Schritten. Im ersten Schritt wird die zurückzulegende Transportstrecke hinsichtlich ihrer Charakteristik analysiert und, sofern erforderlich, in Teilstrecken vereinzelt. Eine Vereinzelnung einer Transportdienstleistung von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B in voneinander separat zu betrachtenden Teilstrecken ist insofern notwendig, sollten sich merkliche Änderungen in den Rahmenbedingungen während dieses Transportvorgangs ergeben (beispielsweise ein Wechsel des Verkehrsmittels im kombinierten Verkehr oder ein Wechsel des aufgewendeten Kraftstoffs/der elektrischen Energie durch den Fahrzeugantrieb – also ein Wechsel des Betriebsmodus). Im zweiten Schritt erfolgen für jede Teilstrecke dezidierte Berechnungen des jeweiligen Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen. Im dritten Schritt werden die Einzelergebnisse sämtlicher betrachteter Teilstrecken zu einem Gesamtergebnis aufsummiert (DIN EN 16258, S. 13-17 & S. 20) – siehe hierzu auch nachfolgende Abbildung 12.

**Schritt 1:** Sofern erforderlich, Zerlegung der zu bilanzierenden Transportdienstleistung in Teilstrecken

**Schritt 2:** Berechnung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen für jede identifizierte Teilstrecke

**Schritt 3:** Addition der Einzelergebnisse von jeder Teilstrecke zu einem Gesamtergebnis

**Abbildung 12: Methode zur Berechnung von Treibhausgasemissionen nach DIN EN 16258 (vereinfachte Darstellung)**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN 16258)

Im Wesentlichen zeigt sich, dass vor allem **fundierte und qualitätsgesicherte Eingangsdaten von höchster Priorität** sind, so dass das Quantifizierungsverfahren im Ergebnis belastbare und möglichst genaue Schlussfolgerungen zulässt. Neben den Eingangsdaten hinsichtlich des Energieverbrauchs von Fahrzeugen sind dabei zusätzlich die den Berechnungen zugrunde gelegten Emissionsfaktoren für den Kraftstoff und die elektrische Energie von exorbitanter Bedeutung.

### **3.4 ALLGEMEINE ARBEITSSCHRITTE VON FORSCHUNGSVORHABEN IM VERKEHRSBEREICH**

Werden das vorstehend zusammengetragene Wissen und die dargelegten Methoden unüberlegt angewendet, werden sicherlich Ergebnisse erarbeitet werden können. Sollen diese Ergebnisse dabei aber nicht nur willkürlichen, sondern auch wissenschaftlich belastbaren Charakters sein, bedarf es eines sorgfältig erarbeiteten und strukturierten **Verfahrenskonstrukts**. Für die Durchführung von Erhebungen

im Verkehrsbereich werden durch das von der *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* aufgestellte Regelwerk „*Empfehlungen für Verkehrserhebungen*“ (EVE) (FGSV Verlag 2012) nützliche Grundlagen zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 13).

<b>1. Grundlagenkonzipierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhebungsanlass</li> <li>- Untersuchungsziel</li> <li>- Aussagegüte</li> <li>- Randbedingungen</li> <li>- Sekundärstatistiken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassungseinheit(en)</li> <li>- Hypothesen</li> <li>- Merkmale</li> <li>- Datenschutz</li> </ul>
<b>2. Erhebungsvorbereitung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhebungsmethode</li> <li>- Zählformular/Fragebogen</li> <li>- Pretest/Überprüfung technischer Geräte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stichprobe</li> <li>- Zeit und Dauer</li> <li>- Räumliche Abgrenzung</li> <li>- Datengenauigkeit</li> </ul>
<b>3. Erhebungsorganisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhebungsunterlagen</li> <li>- Abstimmung mit Behörden</li> <li>- Personalschulung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eventuell Öffentlichkeitsarbeit</li> <li>- Materialien</li> </ul>
<b>4. Erhebungsdurchführung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Orts- und Zeitbezug</li> <li>- eventuell Öffentlichkeitsarbeit</li> <li>- Fremdhilfe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Witterungsbezug</li> <li>- Besonderheiten dokumentieren</li> <li>- Kontrollen</li> </ul>
<b>5. Datenaufbereitung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plausibilisierung</li> <li>- Prüfungen/Vergleiche</li> <li>- Mängelaufdeckung/Korrekturen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewichtung/Hochrechnung</li> <li>- Dateierstellung/Datenbank</li> </ul>
<b>6. Datenanalyse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tabellenprogramm</li> <li>- Auswertung</li> <li>- Interpretation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hypothesenprüfung</li> <li>- Zielerreichung</li> </ul>
<b>7. Dokumentation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beschreibung der Datenstruktur</li> <li>- Bereitstellung der Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metadaten</li> </ul>

**Abbildung 13: Arbeitsschritte einer Verkehrserhebung**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an die *Empfehlungen für Verkehrserhebungen* (FGSV Verlag 2012, Blatt 7))

Nach den EVE (FGSV Verlag 2012) empfiehlt es sich für Untersuchungen im Verkehrsbereich **sieben Arbeitsschritte** vorzusehen. Zunächst sind im Rahmen einer *Grundlagenkonzipierung* die theoretischen Grundlagen zu erarbeiten. Es ist hierbei unter anderem die Zielstellung zu definieren, ebenso sind Forschungshypothesen aufzustellen. Der zweite Schritt widmet sich der *Erhebungsvorbereitung*. Geeignete Erhebungsmethoden sind zu identifizieren, Erhebungsinstrumente wie Leitfäden oder Fragebögen sind zu konstruieren und zu testen. *Erhebungsorganisation* und *Erhebungsdurchführung* folgen in den Schritten drei und vier. Sie widmen sich der geordneten und zielführenden Datenerfassung. Wurden Daten erhoben, werden diese im fünften Schritt *aufbereitet*. Neben Plausibilitätskontrollen werden die erfassten Daten um fehlerhafte Werte bereinigt und in einem geeigneten Format für die weiteren Bearbeitungsschritte zur Verfügung gestellt. Hierauf aufbauend erfolgt die *Datenanalyse* mitsamt den Teilschritten der eigentlichen Auswertung der Daten, der Interpretation der Daten, der Hypothesen- sowie der Zielerreichungsprüfung. Die *Dokumentation* des Forschungsvorhabens wird im siebten Schritt vorgenommen (siehe Abbildung 13) (FGSV Verlag 2012, Blatt 6-8).

Die in den folgenden Kapiteln dieser Dissertationsschrift durchzuführende Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems wird aufgrund der Terra incognita des eHighway-Systems zunächst die grundlegende Entwicklung eines zielführenden Verfahrens erfordern. Die vorstehend dargestellten Arbeitsschritte können dabei als wichtige strukturgebende Orientierung dienen.

---

### 3.5 ZWISCHENFAZIT

Soll das eHighway-System erfolgreich zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr beitragen, muss dieses eine merkliche **Reduktion an Treibhausgasemissionen** nachweislich zulassen können. Das vorliegende Kapitel hat sich aus diesem Grund mit der Aufbereitung relevanter fachlicher und methodischer Grundlagen auseinandergesetzt. Auf Basis des zusammengetragenen Wissens kann im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift nunmehr eine belastbare Quantifizierung von Treibhausgasemissionen vorgenommen werden. Die nachfolgenden Ausführungen resümieren als essenzielle Voraussetzung für das Verständnis der weiteren Darlegungen dieser Dissertationsschrift nochmals in Kürze zu den wesentlichen Erkenntnissen bezüglich fachlicher und methodischer Grundlagen zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems.

#### ZUSAMMENFASSUNG FACHLICHER UND METHODISCHER GRUNDLAGEN ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Treibhausgase haben menschliches Leben auf der Erde überhaupt erst möglich gemacht. Aufgrund des sogenannten natürlichen Treibhauseffekts hat sich auf der Erdoberfläche eine globale und recht beständige mittlere Durchschnittstemperatur von circa +15 Grad Celsius eingestellt. Die Konzentration von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre ist dabei seit jeher kleineren und auch mal größeren Schwankungen unterlegen. Seit etwa einem Jahrhundert nimmt die Treibhausgaskonzentration in der Erdatmosphäre allerdings merklich zu. Dies wird auf menschliches Handeln zurückgeführt, auch bezeichnet als sogenannter *anthropogener Treibhauseffekt*. Eine Zunahme der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre führt wiederum zu einem Anstieg der Temperatur auf der Erdoberfläche. Das besonders Problematische hieran: Steigt die Durchschnittstemperatur auf der Erdoberfläche zu stark an ( $>1,5^\circ\text{C}$ ), wovon aktuell ausgegangen werden muss, ist die Existenzgrundlage menschlichen und tierischen Lebens immens gefährdet.

Treibhausgasemissionen entstehen im Straßengüterverkehr fast ausschließlich durch die Herstellung und der anschließenden Verbrennung fossiler Kraftstoffe in Fahrzeugen zur Bereitstellung benötigter Traktionsenergie. Werden weniger fossile Kraftstoffe benötigt, sondern stattdessen anderweitig substituiert, können im Umkehrschluss Treibhausgasemissionen eingespart werden – vorausgesetzt, das Substitut weist eine entsprechend bessere Klimaverträglichkeit vor. So kann beispielsweise auch die Verwendung elektrischer Energie zu Treibhausgasemissionen führen, wurde diese zum Beispiel in einem Kohlekraftwerk erzeugt. Die Höhe der Treibhausgasemissionen ist generell proportional zur Höhe des Energieverbrauchs eines Fahrzeugs.

Das eHighway-System versucht an dieser Stelle anzusetzen, indem statt Dieselkraftstoff regenerativ erzeugte elektrische Energie für die Traktion des O-Lkws genutzt wird. Aufgrund des deutlich überlegenen Wirkungsgrads von E-Maschinen gegenüber Verbrennungsmotoren benötigen O-Lkw zusätzlich von Grund auf weniger Primärenergie als konventionelle Vergleichsfahrzeuge. Soll eine belastbare Quantifizierung des hierdurch vermuteten Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials durchgeführt werden, bedarf es in Konsequenz fundierter Kenntnisse über den Energieverbrauch von Fahrzeugen. Der Energieverbrauch von Fahrzeugen bestimmt sich im Wesentlichen aus dem Zusammenspiel von der technischen Konfiguration des Fahrzeugs, von den Fahrzeugfahrenden sowie dem Anwendungsfall, in dem sich das Fahrzeug jeweils befindet. Konnten fundierte und qualitätsgesicherte Eingangsdaten zum Energieverbrauch eines Fahrzeugs erarbeitet werden, kann für die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen auf die nach DIN EN 16258 angebotene Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen gezielt für Transportdienstleistungen zurückgegriffen werden.

---

## 4. QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES EHIGHWAY-SYSTEMS

---

Im Folgenden wird die Bearbeitung des primären Ziels dieser Dissertationsschrift – die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems – adressiert. Es wird hierfür zunächst in das übergeordnete Verfahren, das zur Ergebniserzeugung entwickelt wurde, eingeführt. Anschließend wird das Verfahren sukzessive angewendet und die erarbeiteten Ergebnisse dargelegt. Dies umfasst sowohl die Definition und Identifikation sogenannter Betriebsmodi, die Ermittlung von Energieflüssen, die Berechnung charakteristischer Energieverbrauchskennwerte, als auch die Analyse von Treibhausgasemissionskennwerten eines O-Lkws. Weiterhin werden die durch den Fahrzeugbetrieb eingesparten Gesamt-Treibhausgasemissionen im ELISA-Forschungsprojekt dargelegt. Abschließend wird ein Skalierungs- und Vergleichsrechner („ERSparnis“) zur Abschätzung des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials infolge der Implementierung von O-Lkw unter Berücksichtigung verschiedener und sich ändernder Rahmenbedingungen entwickelt.

### 4.1 VERFAHRENTWICKLUNG

Soll die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems zu belastbaren Ergebnissen führen, bedarf es **eines objektiven, reliablen und validen Untersuchungsverfahrens**. Das Verfahren muss dabei den tatsächlichen Betrieb eines O-Lkws in seiner realen Einsatzumgebung möglichst exakt erfassen können.

Als essenzielle Grundlage wurde in den vorherigen Ausführungen dieser Dissertationsschrift bereits geklärt, dass die wesentliche Quelle von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr die Verbrennung fossiler Kraftstoffe darstellt. Allerdings kann auch die Verwendung elektrischer Energie Treibhausgasemissionen verursachen, sollte diese nicht ausschließlich regenerativ hergestellt worden sein (FGSV Verlag 2018b, S. 7 & S. 12). Es wurde in diesem Zusammenhang zusätzlich festgestellt, dass die während des Fahrzeugbetriebs emittierten Treibhausgase in einem proportionalen Verhältnis zum Energieverbrauch des Fahrzeugs stehen (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 180).

Für einen O-Lkw, der die Verwendung sowohl fossiler Kraftstoffe als auch elektrischer Energie kombiniert, bedarf es also zwingend einer **gesamtheitlichen Betrachtung des Energieverbrauchs**, um in Folge eine Quantifizierung von Treibhausgasemissionen mit hoher Ergebnisqualität überhaupt erst zu ermöglichen. Diese Aufgabe ist nicht trivial; sie erfordert einige Vorüberlegungen.

### DARLEGUNGEN ZUM ENTWICKLUNGSBEDARF EINES NEUEN QUANTIFIZIERUNGSVERFAHRENS

Wie im vorstehenden Kapitel 3 dargelegt, ließe sich – so die Theorie – der Energieverbrauch eines Fahrzeugs grundsätzlich auf Basis der **Fahrwiderstandsgleichung** berechnen. Die nicht ganz unbedeutende Krux hierbei ist allerdings, dass die Verwendung der Fahrwiderstandsgleichung die Kenntnis fein granularer Eingangsdaten voraussetzt. Fehlen diese Eingangsdaten, oder auch nur einige, ist eine auf der Fahrwiderstandsgleichung beruhende Berechnung des Energieverbrauchs förmlich gegenstandslos.

Mit über einhundert erfassten Parametern zum realen Fahrzeugbetrieb eines O-Lkws – die nachfolgenden Ausführungen werden hierauf nochmals detailliert eingehen – dürfte angenommen werden, dass grundsätzlich eine große und auch ausreichende Vielfalt notwendiger Eingangsdaten vorliegen sollte. Nun erfordert die Verwendung der Fahrwiderstandsgleichung zum Beispiel allerdings die Kenntnis über den für die Berechnung des Luftwiderstands so wichtigen Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ . Doch ist exempli causa ausgerechnet dieser bislang weitestgehend unbekannt, beziehungsweise liegt in keiner solchen Form vor, als dass dieser für belastbare Berechnungen herangezogen werden könnte. Dies zu ignorieren und ersatzweise auf einen  $c_w$ -Standardwert für einen herkömmlichen Lastkraftwagen aus der Literatur zurückzugreifen, wäre nicht zielführend: Es muss davon ausgegangen werden, dass die Aerodynamik eines O-Lkws (zumindest zeitweise) aufgrund der durch den ausgefahrenen Pantographen



---

größeren Querschnittsfläche der Fahrzeugfront schlechter ist als die eines konventionellen Vergleichsfahrzeugs ohne entsprechenden Stromabnehmer. Als Resultat zeigt sich ein (temporär) höherer  $c_w$ -Wert, hierdurch ein höherer Fahrwiderstand und schlussendlich ein höherer Energieverbrauch.

Allerdings stellt nicht nur die **Analyse des realen Fahrwiderstands eines O-Lkws eine Herausforderung** dar. Auch die Bereitstellung der Antriebsleistung zur Überwindung des Fahrwiderstands ist als eine unbekannte und diffizil zu bestimmende Variable zu werten. Als Beispiel lässt sich das noch vor Beginn des ELISA-Forschungsprojekts weitestgehend unbekanntes Zusammenspiel der im O-Lkw verbauten konventionellen und elektrischen Antriebsoptionen anführen. Zwar basiert das Antriebskonzept eines O-Lkws auf dem Prinzip eines Parallelhybrids – es ließen sich hierfür grundsätzlich durchaus Standardwerte aus der Literatur beziehen – jedoch war unklar, auf welche Art und Weise sich der Oberleitungsbetrieb auf das reale Fahrzeugverhalten und schlussendlich auf den Energieverbrauch auswirken wird. Es könnten sicherlich theoretische Abschätzungen angestellt werden; ob diese aber auch belastbare Ergebnisse hervorbrächten, die einen realen Betrieb des Fahrzeugs widerspiegeln, darf und muss kritisch hinterfragt werden.

Die Herausforderung im Kontext des eHighway-Systems besteht also nicht darin, ein bestehendes Verfahren zur **Quantifizierung von Treibhausgasemissionen** im Straßen(güter)verkehr moderat anzupassen und ohne Weiteres anzuwenden. Die Herausforderung besteht vielmehr darin, zunächst die vorhandene Datenbasis zu verstehen sowie eine umfassende Kenntnis zum Betriebsverhalten eines O-Lkws zu entwickeln. Nur dann erscheint es möglich, das Betriebsverhalten eines O-Lkws erstens zu verstehen, zweitens datenbasiert identifizieren und drittens auch datenbasiert auswerten zu können. Einzig auf dieser Basis kann der Versuch unternommen werden, zutreffende Schlussfolgerungen hinsichtlich des Energieverbrauchs von O-Lkw zu ziehen, hieraus belastbare Treibhausgasemissionen zu berechnen und schließlich auch belastbare Prognosen für zukünftige, hypothetische Anwendungsfälle ableiten zu können. Bestehende Quantifizierungsverfahren können dabei zwar als Orientierung dienen, eine unüberlegte und willkürliche Anwendung wird jedoch keine belastbaren Ergebnisse hervorbringen. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der großen Vielzahl der verschiedensten Einflüsse, die sich auf das Betriebsverhalten eines Fahrzeugs auswirken können, es kaum möglich sein wird, auch all diese Einflüsse tatsächlich zu berücksichtigen. Zielführender erscheint es, sich auf das Wesentliche zu fokussieren und hierfür einige Vernachlässigungen zu akzeptieren (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 2).

Das **zu entwickelnde Verfahren** muss also ein vertretbares Maß an Vernachlässigungen nachrangiger, zeitgleich aber ausreichender Berücksichtigung essenzieller Einflussfaktoren gewährleisten können. Es kann festgehalten werden:

**Für die Analyse und Quantifizierung von Treibhausgasemissionen eines O-Lkws kann auf kein bestehendes Quantifizierungsverfahren zurückgegriffen werden. Die Entwicklung eines neuen objektiven, reliablen und validen Quantifizierungsverfahrens ist erforderlich.**

#### **ZIELKONZEPT, HINWEISE ZUM VERFAHRENAUFBAU UND VERFAHRENSÜBERBLICK**

Erfahrungen aus fast vier Jahren eHighway-Testbetrieb haben es ermöglicht, ein objektives, reliables und valides **Verfahren zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen von O-Lkw** zu entwickeln und im zeitlichen Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts kontinuierlich zu verbessern.

Dem entwickelten Quantifizierungsverfahren wurden entsprechend der vorstehenden Ausführungen zum Entwicklungsbedarf eines neuen, statt der Verwendung eines bestehenden Quantifizierungsverfahrens, zunächst **zwei wesentliche Doktrinen** zugrunde gelegt: Erstens galt es, die vorhandene aber weitestgehend **unbekannte Datenbasis zu verstehen**, um diese sicher und korrekt verarbeiten zu



---

können; Zweitens galt es, das **Betriebsverhalten des O-Lkws nachzuvollziehen**, um dieses datenbasiert identifizieren und auch auswerten zu können. Erst auf dieser Basis erscheint es möglich, weiterführende Berechnungen und Analysen durchführen zu können.

Aufbauend auf diesen beiden Doktrinen setzt sich das entwickelte Quantifizierungsverfahren aus einem **dreistufigen Prozess** zusammen. Jede der *Stufen* repräsentiert dabei ein der Dissertationsschrift zugrunde liegendes *Oberziel*. Die definierten Oberziele wurden einerseits aus der im vorstehenden Kapitel durchgeführten Grundlagenaufbereitung abgeleitet, andererseits auf Grundlage der Erfahrungen des mehrjährigen Testbetriebs sukzessive aufgestellt. Eine gegenseitige Abhängigkeit der Oberziele liegt vor. So baut ein nachfolgendes Oberziel nicht nur auf den vorherigen Oberzielen auf, nachfolgende Oberziele setzen zusätzlich die (zumindest vorläufig) erfolgreiche Zielerreichung eines vorherigen Oberziels zwingend voraus – ähnlich eines kritischen Pfads. Auch sind dabei Rückkopplungsprozesse möglich. Das heißt, dass sich aufgrund der Bearbeitung eines nachfolgenden Oberziels Anpassungsbedarfe ergeben können, die die Anpassung eines bereits bearbeiteten Oberziels erfordern. Das bedeutet konkret:

- Oberziel 1** Aufgrund der Komplexität des Antriebsstrangs eines O-Lkws und des Zusammenspiels der verschiedenen Komponenten wie Verbrennungsmotor, E-Maschine oder Pantograph ist anzunehmen, dass sich verschiedene Betriebszustände für einen O-Lkw ergeben. Sogenannte **Betriebsmodi eines O-Lkws** sind als essenzielle Grundlage zu definieren und zu identifizieren. Dies muss auch datenbasiert realisierbar sein. Hierfür ist zuerst ein umfassendes Verständnis für die vorliegende Datenbasis zu entwickeln.
- Oberziel 2** Entsprechend des Betriebsmodus<sup>27</sup> werden sich **individuelle Energieflüsse** feststellen lassen. Diese Energieflüsse gilt es nachzuvollziehen und datenbasiert zu berechnen. Erst wenn die Betriebsmodi und Energieflüsse eines O-Lkws datenbasiert zuverlässig identifiziert werden konnten, lassen sich hierauf aufbauend **spezifische Energieverbrauchs-kennwerte** individuell für jeden Betriebsmodus berechnen. Entsprechende Kalkulationen sind vorzunehmen.
- Oberziel 3** Nur wenn belastbare und nach Betriebsmodi differenzierte Energieverbrauchskennwerte vorliegen, können Untersuchungen zu **charakteristischen Treibhausgas-emissionskennwerten** eines O-Lkws und in Folge Aussagen zum **Reduktionspotenzial an Treibhausgasen durch O-Lkw** in Abhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen erarbeitet werden. Zum Abschluss des dreistufigen Quantifizierungsverfahrens sind entsprechende Untersuchungen und Auswertungen anzustellen.<sup>27</sup>

*Oberziele* stellen die erste von **drei Ebenen im Quantifizierungsverfahren** dar. Für jedes Oberziel wurde im Anschluss ein individuelles und in sich geschlossenes *Teilverfahren*, basierend auf den allgemeinen Arbeitsschritten von Forschungsvorhaben im Verkehrsbereich gemäß EVE (FGSV Verlag 2012), entwickelt. Die Teilverfahren setzen sich dabei jeweils aus mehreren *Verfahrensschritten* zusammen. Die Verfahrensschritte bilden die zweite Ebene im Quantifizierungsverfahren. Jeder Verfahrensschritt besteht wiederum aus einzelnen zu bearbeitenden *Teilaufgaben* auf der dritten Ebene. Aufgrund der hierarchischen Dreiteilung des Verfahrens in

- *Stufen/Oberziele auf der ersten Ebene,*
- *Verfahrensschritte auf der zweiten Ebene und*
- *Teilaufgaben auf der dritten Ebene*

---

<sup>27</sup> In diesem Zusammenhang konnte bereits durch eigene Forschungsarbeit zum Stand des eHighway-Wissens beigetragen werden. Hervorzuheben sind insbesondere die Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen BOLTZE U. A. (2020), SCHÖPP U. A. (2021A), SCHÖPP U. A. (2021B) und SCHÖPP U. A. (2022). Sie sind wesentlicher Bestandteil der nachfolgenden Ausführungen in dieser Dissertationsschrift.

wird das Quantifizierungsverfahren auch als **3-Ebenen-Modell zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems** bezeichnet. Wurden alle Teilaufgaben eines Verfahrensschritts bearbeitet, kann zum nachfolgenden Verfahrensschritt und zu den jeweils dort verorteten Teilaufgaben übergegangen werden. Wurden alle Verfahrensschritte abgeschlossen, resultiert hieraus die Zielerreichung eines Oberziels. Wurden alle Oberziele final bearbeitet, lässt sich auf das primäre Ziel dieser Dissertationsschrift schließen. Abbildung 14 zeigt den grundlegenden Verfahrensaufbau des entwickelten 3-Ebenen-Modell nochmals grafisch auf.

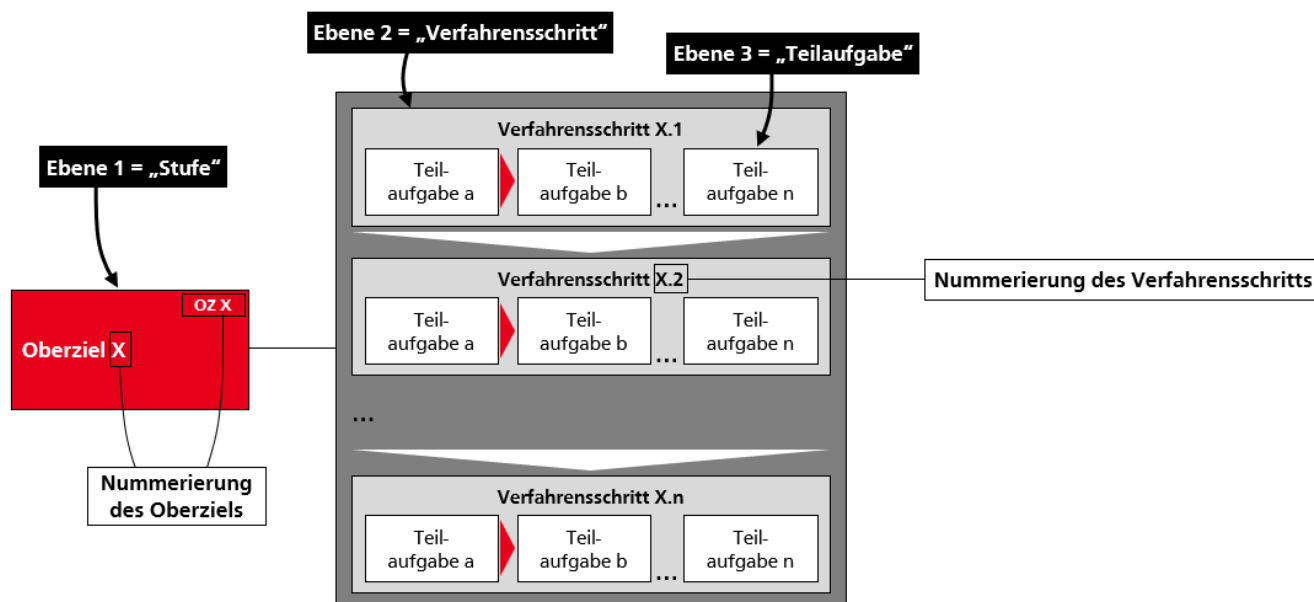


Abbildung 14: Hinweise zum Aufbau des entwickelten 3-Ebenen-Modells zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems (Quelle: Eigene Darstellung)

Nachfolgende Abbildung 15 zeigt schließlich das entwickelte **3-Ebenen-Modell** zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems grafisch auf. Der Abbildung lassen sich zum einen die drei zu untersuchenden **Oberziele** entnehmen (links in Rot), zum anderen werden die je Oberziel zu durchlaufenden **Verfahrensschritte** dargestellt (mittig in Dunkelgrau). Die je Verfahrensschritt zu bearbeitenden **Teilaufgaben** werden in Abbildung 15, mit Ausnahme eines repräsentativen Beispiels (siehe in der Abbildung oben rechts), nicht im Detail aufgeführt. Dies ist in der Aufrechterhaltung der Lesbarkeit der Abbildung begründet. Statt der Aufnahme sämtlicher (feingranularer) Teilaufgaben wurde ein allgemeiner Ablauf zum methodischen Vorgehen als Zusammenfassung integriert – bestehend aus einem Zusammenwirken von *Forschungsfahrten; graphischen und rechnerischen Auswertungen von Fahrzeugdaten; Herleitung und Validierung eines Berechnungsverfahrens; Literaturrecherche; Erweiterung des Berechnungsverfahrens; sowie Entwicklung eines Skalierungs- und Vergleichsrechners*. Die je Verfahrensschritt zu erledigenden Teilaufgaben werden jedoch essenzielle Bestandteile der nachfolgenden Unterkapitel 4.2 bis 4.4 darstellen und an diesen Stellen dezidiert vertieft.

Ferner ist bei dem entwickelten 3-Ebenen-Modell zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems zu beachten, dass mit voranschreitender Bearbeitung der Oberziele der **Fokus von einer Fahrzeug- und Feldversuchsebene sukzessive auf eine allgemeingültigere Skalierungsebene geweitet** wird. Es wird auf Basis der im ELISA-Forschungsprojekt umfassend erhobenen und ausgewerteten Daten von der mikroskopischen Ebene graduell auf die makroskopische Ebene geschlossen.

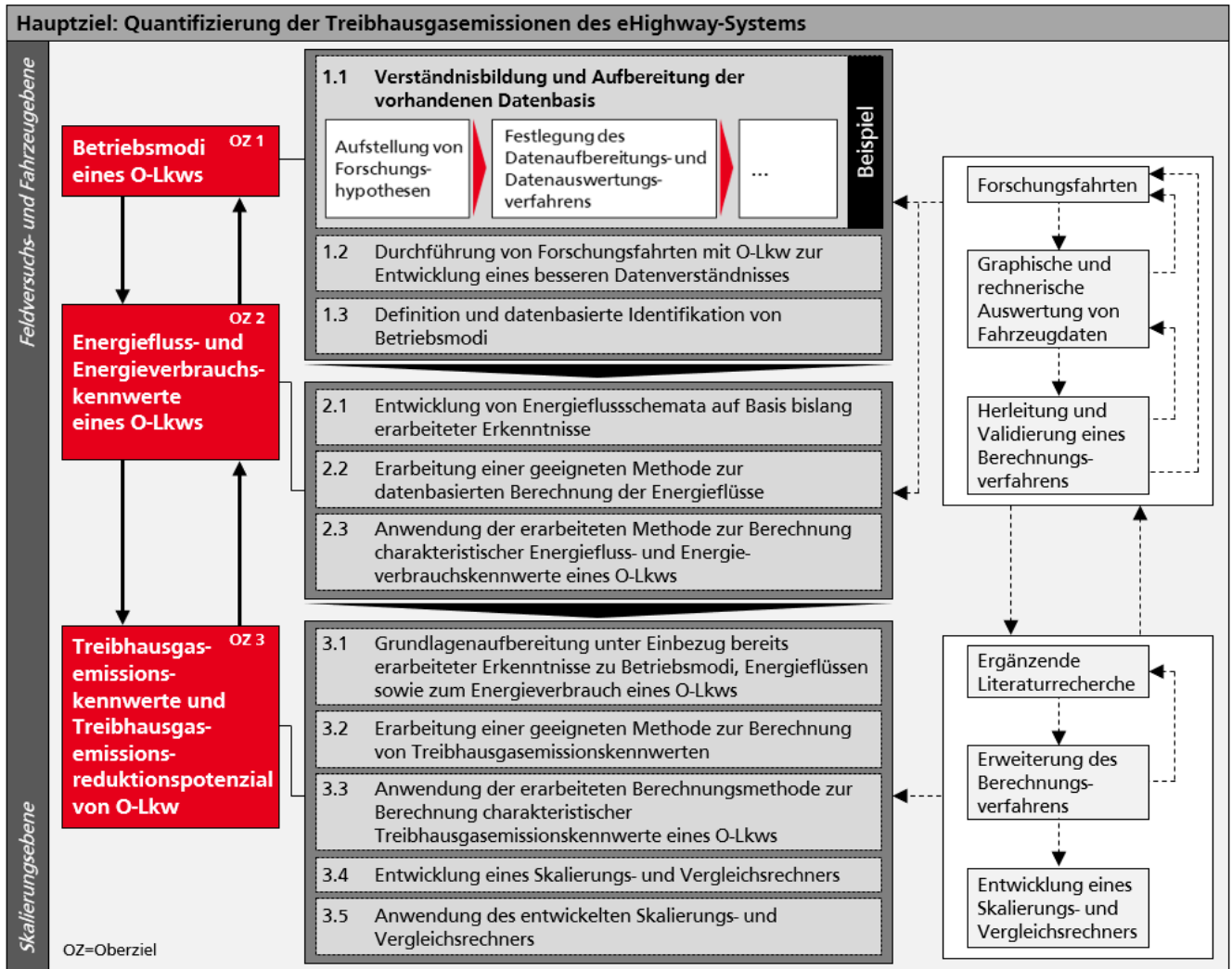


Abbildung 15: 3-Ebenen-Modell zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems (Quelle: Eigene Darstellung)

## 4.2 BETRIEBSMODI EINES O-LKWS

### 4.2.1 TEILVERFAHREN ZUR IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs wird durch vielfältige Faktoren beeinflusst (siehe Kapitel 3). Einer dieser Einflussfaktoren stellt die technische Konfiguration des Fahrzeugs und dabei vor allem die Art und Weise der Bereitstellung der benötigten Antriebsleistung dar. Wird die Antriebsleistung bei konventionellen Fahrzeugen durch lediglich einen Verbrennungsmotor und bei rein elektrischen Fahrzeugen lediglich durch E-Maschinen zur Verfügung gestellt, gestaltet sich die Bereitstellung der Antriebsleistung bei Hybridfahrzeugen durch die Kombination von (mindestens) zwei Antriebsoptionen bereits komplexer (siehe Kapitel 3.2). Zusätzlich ist zu beachten, dass die Energieversorgung aller genannten Antriebsoptionen hierbei auf einem stationären Konzept basiert – also der Fahrt zur Zapf- oder Ladesäule und des Energiebezugs im Stillstand des Fahrzeugs. Wird der Fokus nun auf O-Lkw gerichtet, vereint dieser nicht nur die Antriebsoptionen „Verbrennungsmotor“ und „E-Maschine“ und dabei die stationäre Energieversorgung, sondern gleichermaßen auch eine dynamische Energieversorgung via Oberleitung während der Fahrt. Die Schwierigkeit der Ermittlung eines gesamtheitlichen Energieverbrauchs wird dadurch ungemein gesteigert. Die Bereitstellung der Antriebsleistung sowie der Energiebezug eines O-Lkws wird derweil abhängig von der Betrachtungsperspektive sein: Es ist anzunehmen, dass der O-Lkw verschiedene Betriebsmodi einnehmen wird – ob aktiver oder inaktiver Verbrennungsmotor, ob

---

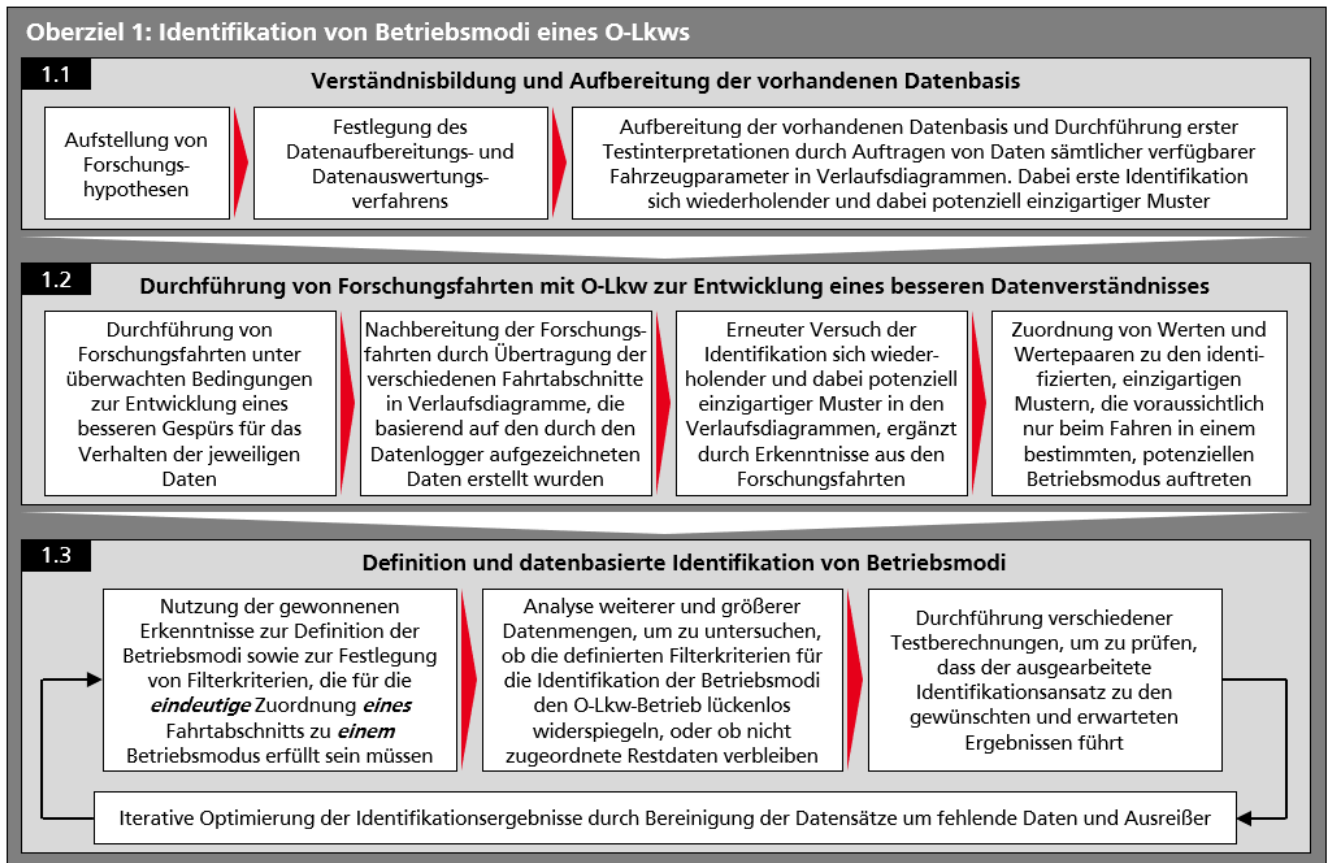
Energiebezug via Oberleitung oder kein Energiebezug, ob Energiebezug via Oberleitung mit zeitgleich aktivem Verbrennungsmotor, et cetera. Soll der Energieverbrauch eines O-Lkws aber belastbar ermittelt werden und indes auch die Möglichkeit für Hochrechnungen für potenzielle Zukunftsszenarien eröffnen, ist eine ausführliche Auseinandersetzung mit den verschiedenen Möglichkeiten von Betriebsmodi eines O-Lkws unausweichlich. Die Zerlegung des O-Lkw-Betriebs in Betriebsmodi orientiert sich dabei an dem vorgeschlagenen Vorgehen nach DIN EN 16258 (siehe Kapitel 3.3), nach welchem eine Zergliederung einer Transportrelation in ihre Einzelbestandteile immer dann erforderlich wird, sollten sich merkliche Änderungen in den Rahmenbedingungen des betrachteten Transportvorgangs ergeben. Ein Wechsel des Betriebsmodus kann als eine solche Veränderung in den Rahmenbedingungen erachtet werden. Der **Analyse, Definition und datenbasierten Identifikation der Betriebsmodi eines O-Lkws** soll im Folgenden – als zentrale Grundlage sämtlicher weiterer Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertationsschrift – differenziert nachgegangen werden. Sollen die auf den Betriebsmodi aufbauenden Untersuchungen dabei zu belastbaren Ergebnissen führen, ist es von essenzieller Bedeutung, die Betriebsmodi eines O-Lkws einerseits *nachvollziehbar und korrekt*, andererseits aber auch *sinnvoll* zu definieren und identifizieren. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurde ein aus drei Verfahrensschritten und elf Teilaufgaben bestehendes Teilverfahren entwickelt.

Der **erste Verfahrensschritt** fokussiert auf die *Verständnisbildung und Aufbereitung der vorhandenen Datenbasis*. In diesem Zusammenhang werden zunächst Forschungshypothesen aufgestellt, gefolgt von einer Festlegung des Datenaufbereitungs- und -auswertungsverfahrens. Auf Basis erster Testinterpretationen durch Auftragen von zur Verfügung stehenden Daten von sämtlichen verfügbaren Fahrzeugparametern in Verlaufsdiagramme soll geprüft werden, ob sich wiederholende und dabei gegebenenfalls auch einzigartige Verhaltensmuster von Daten identifizieren lassen. Solche einzigartigen und sich gegenseitig ausschließenden Muster könnten erste Anhaltspunkte für eine Zuordnung einzelner Fahrtabschnitte zu einem Betriebsmodus offenbaren und damit die Grundlage einer datenbasierten Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws darstellen.

Um die ersten Erkenntnisse zur Identifikation von Betriebsmodi zu festigen, sollen im **zweiten Verfahrensschritt** *Forschungsfahrten mit O-Lkw zur Entwicklung eines besseren Datenverständnisses* durchgeführt werden. Die durchzuführenden Forschungsfahrten sollen dabei unter überwachten Bedingungen stattfinden. Das heißt, es soll ein vorgegebener (und dadurch bekannter) Ablauf einer Fahrt von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B erfolgen, der es erlaubt, den Fahrtablauf zu rekonstruieren und im Nachhinein auf die während der Forschungsfahrt erhobenen Daten zu übertragen. Es soll hierdurch ermöglicht werden, ein besseres Gespür für die bis dahin noch weitestgehend unbekannte Datenbasis zu entwickeln, um das Verhalten der jeweiligen Daten besser nachvollziehen zu können. Durch dieses Übereinanderlegen der dokumentierten Fahrtabschnitte und der durch einen Datenlogger erfassten Daten soll die Identifikation sich wiederholender und dabei potenziell einzigartiger Muster verbessert und weiter konkretisiert werden. Den jeweils identifizierten Mustern sollen im Anschluss Werte und Wertepaare zugeordnet werden, die nach dem bis dahin erlangten Kenntnisstand nur beim Fahren in einem vermuteten, potenziellen Betriebsmodus auftreten werden.

Wurden die ersten beiden Verfahrensschritte erfolgreich durchgeführt, können im **dritten Verfahrensschritt** schließlich die endgültige *Definition und datenbasierte Identifikation von Betriebsmodi* erfolgen. Durch die Nutzung der erarbeiteten Erkenntnisse in den beiden vorherigen Verfahrensschritten können einerseits Definitionsversuche von zu unterscheidenden Betriebsmodi vorgenommen, sowie andererseits Filterkriterien festgelegt werden, die für eine *eindeutige* Zuordnung *eines* Fahrtabschnitts zu *einem* Betriebsmodus erfüllt sein müssen. Um zu überprüfen, ob die definierten Betriebsmodi und Filterkriterien den O-Lkw-Betrieb lückenlos widerspiegeln, oder ob nicht zugeordnete Dateneinträge verbleiben, sollen die bislang definierten Filterkriterien an einer vergrößerten Datenmenge getestet

werden. Zusätzlich sind verschiedene Testberechnungen durchzuführen, um zu verifizieren, dass der ausgearbeitete Identifikationsansatz zu den gewünschten und erwarteten Ergebnissen führt. Der dritte Verfahrensschritt wird dabei als Iteration ausgelegt und ist gegebenenfalls mehrfach zu durchlaufen. Es sind so lange Anpassungen vorzunehmen, bis eine erschöpfende Anzahl an Betriebsmodi definiert wurde, die eine lückenlose und eindeutige Zuordnung der vorhandenen Records zu den final definierten Betriebsmodi ermöglicht. Ferner soll eine Bereinigung der Datensätze um fehlende Daten sowie um Ausreißer eine hohe Ergebnisqualität sicherstellen. Nachfolgende Abbildung 16 fasst das entwickelte Teilverfahren zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws nochmals grafisch zusammen. In den nachfolgenden Ausführungen wird das Teilverfahren entsprechend angewendet.



Oberziel 2: Ermittlung und Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws

Oberziel 3: Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte und Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw

**Abbildung 16: Teilverfahren zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP U. A. (2021A, S. 6))

#### 4.2.2 VERSTÄNDNISBILDUNG UND AUFBEREITUNG DER VORHANDENEN DATENBASIS

In einer ersten kompakteren Untersuchung durch BOLTZE U. A. (2020), die am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt erfolgte, konnte während einer durchgeführten Forschungsfahrt mit einem O-Lkw beobachtet werden, dass ein solcher in verschiedenen Betriebsmodi operiert. Es wurde geschlussfolgert, dass voraussichtlich sechs Betriebsmodi zu differenzieren sind – hiervon drei dominiert durch den Verbrennungsmotor und drei auf Basis der E-Maschine. Im gleichen Zuge wurde festgestellt, dass nicht nur die technische Konfiguration des O-Lkws



die Zusammensetzung der Betriebsmodi determiniert, sondern zusätzlich ein Einfluss durch die O-Lkw-Fahrenden vorliegt (Boltze u. a. 2020). Die von BOLTZE U. A. (2020) durchgeführte Untersuchung liefert dabei erste grundlegende Erkenntnisse zu den Betriebsmodi eines O-Lkws, die Untersuchung war allerdings nicht abschließend und bedarf weiterer Vertiefungen. Die ausstehenden Vertiefungen werden in den nachfolgenden Ausführungen dieser Dissertationsschrift adressiert. Entsprechend des ausgearbeiteten Teilverfahrens zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws sollen hierfür zuerst den Analysen Struktur gebende Forschungshypothesen aufgestellt werden.

## **FORSCHUNGSHYPOTHESEN**

Trotz der Vorarbeiten durch BOLTZE U. A. (2020) erscheint es aufgrund der essenziellen Bedeutung der Betriebsmodi eines O-Lkws für die weiteren Untersuchungen dieser Dissertationsschrift zielführend, sich zu Beginn erneut dem grundlegenden und belastbaren Nachweis der tatsächlichen Existenz verschiedener Betriebsmodi eines O-Lkws zu widmen. Es lässt sich hieraus die erste Forschungshypothese ableiten, die in dieser Dissertationsschrift untersucht und beantwortet werden soll:

### **Forschungshypothese H1a: Ein O-Lkw operiert in verschiedenen Betriebsmodi.**

Wurde grundsätzlich nachgewiesen, dass verschiedene Betriebsmodi eines O-Lkws existieren, sollte der Fokus im Folgenden darauf gerichtet werden, durch welche Komponenten ein Betriebsmodus maßgeblich charakterisiert werden kann. Unterstützen können hierbei die in Kapitel 3.2 zusammengetragenen Grundlagen zum Aufbau des Antriebsstrangs eines Parallelhybrid-Fahrzeugs (siehe Abbildung 11, S. 44), auf dessen Plattform ein O-Lkw konstruiert wird. Es ist zu prüfen:

### **Forschungshypothese H1b: Die Betriebsmodi eines O-Lkws werden durch das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Antriebsstrangs und der externen Energieversorgung bestimmt.**

Wurden durch BOLTZE U. A. (2020) erste Identifikationsversuche von Betriebsmodi aufgestellt, basierten diese Identifikationsversuche bis dahin weitestgehend auf Beobachtungen, die während einer Forschungsfahrt durchgeführt wurden. Offen bleibt dabei die Frage, inwieweit die beobachteten Betriebsmodi allerdings auch *eindeutig* und *überschneidungsfrei* voneinander abgegrenzt werden können. Hieraus folgt die Notwendigkeit einer Prüfung der Forschungshypothese:

### **Forschungshypothese H1c: Die Betriebsmodi eines O-Lkws können funktional eindeutig voneinander abgegrenzt werden.**

Die Betriebsmodi eines O-Lkws lediglich beobachten zu können, um sie auf dieser Basis voneinander abzugrenzen, wird dem Anspruch der nachfolgenden Analysen nicht genügen. Sollen umfassende Untersuchungen zum Energieverbrauch und zu den von O-Lkw emittierten Treibhausgasen erfolgen, wird es einer auf Daten basierenden automatisierten Abgrenzung von Betriebsmodi bedürfen. In diesem Zusammenhang ist auch zu prüfen, ob der Betrieb eines O-Lkws durch die bis dahin definierten Betriebsmodi lückenlos wiedergegeben wird. Es ist die Forschungshypothese festzuhalten:

### **Forschungshypothese H1d: Die Betriebsmodi eines O-Lkws können auch datenbasiert eindeutig voneinander abgegrenzt werden.**

## **FESTLEGUNG DES DATENAUFBEREITUNGS- UND -AUSWERTUNGSVERFAHRENS**

Für die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems kann auf die Datenbasis der fünf im ELISA-Forschungsprojekt betriebenen O-Lkw zurückgegriffen werden. Jeder O-Lkw verfügt dafür über einen eigenen **Datenlogger**, welcher mit einer Frequenz von bis zu 100 Millisekunden Daten zu über einhundert verschiedenen Parametern im Zusammenhang des O-Lkw-Betriebs erfasst. Ein solcher, alle 100 Millisekunden generierter Dateneintrag, wird dabei auch als „Record“ bezeichnet (Schöpp u. a.



2021b, S. 41).<sup>28</sup> Die durch die Datenlogger erfassten Parameter liegen in einem **.csv-Dateiformat**<sup>29</sup> vor. Nachfolgende Abbildung 17 zeigt zum Verständnis einen Auszug einer solchen .csv-Rohdatendatei auf und führt zur im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift verwendeten Nomenklatur aus.

TIME	BatteryCurrent	BatterySOC	BatteryStackOperationMode	BatteryVoltage
2019-12-04T15:56:25.0286700Z	-59,8	51,588	2	684,05
2019-12-04T15:56:25.1286000Z	-59,85	51,592	2	684,05
2019-12-04T15:56:25.2286540Z	-59,85	51,598	2	684,1
2019-12-04T15:56:25.3286790Z	-59,85	51,604	2	684,05
2019-12-04T15:56:25.4285980Z	-59,3	51,61	2	684,05

**Abbildung 17: Auszug einer .csv-Rohdatendatei (Daten bereits in Spalten getrennt)**  
(Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf den zur Verfügung gestellten Fahrzeugdaten)

Für die **Datenauswertung** kann eine Vielzahl an Software-Anwendungen Verwendung finden. Aufgrund der intuitiven Nutzeroberfläche und der weiten Verbreitung erscheint es für die Erarbeitung eines grundlegenden Datenverständnisses jedoch zielführend, zunächst auf das Tabellenkalkulationsprogramm **MS Excel** (Microsoft Corporation 2019a) zurückzugreifen. In Anbetracht der zu erwartenden großen Datenmengen im gesamten Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts ist allerdings anzunehmen, dass die Leistungsfähigkeit von MS Excel ab einem gewissen Datenumfang erschöpft sein wird. Wurden die grundlegenden Zusammenhänge der verfügbaren Daten nachvollzogen, soll die kontinuierliche und automatisierte Datenauswertung unter Anwendung der Statistik-Programmiersprache R erfolgen. Zurückgegriffen wird dabei auf die Entwicklungsumgebung **R Studio** (R Studio 2022). Aufgrund der sukzessiven Inbetriebnahme der fünf im ELISA-Forschungsprojekt betriebenen O-Lkw liegt für jeden O-Lkw ein **individueller Datenerhebungszeitraum** vor (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5: Datenerhebungszeitraum der im ELISA-Forschungsprojekt betriebenen O-Lkw**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Name des O-Lkws	El Leon	El Fidel	El Fondo	El Femina	El Salto
<b>Beginn der Datenerhebung</b>	06/2019	09/2019	07/2020	07/2020	07/2020
<b>Ende der Datenerhebung*</b>	12/2022	12/2022	12/2022	12/2022	12/2022

*\*Lediglich Ende des berücksichtigten Datenerhebungszeitraums für die Analysen im Rahmen dieser Dissertationsschrift.*

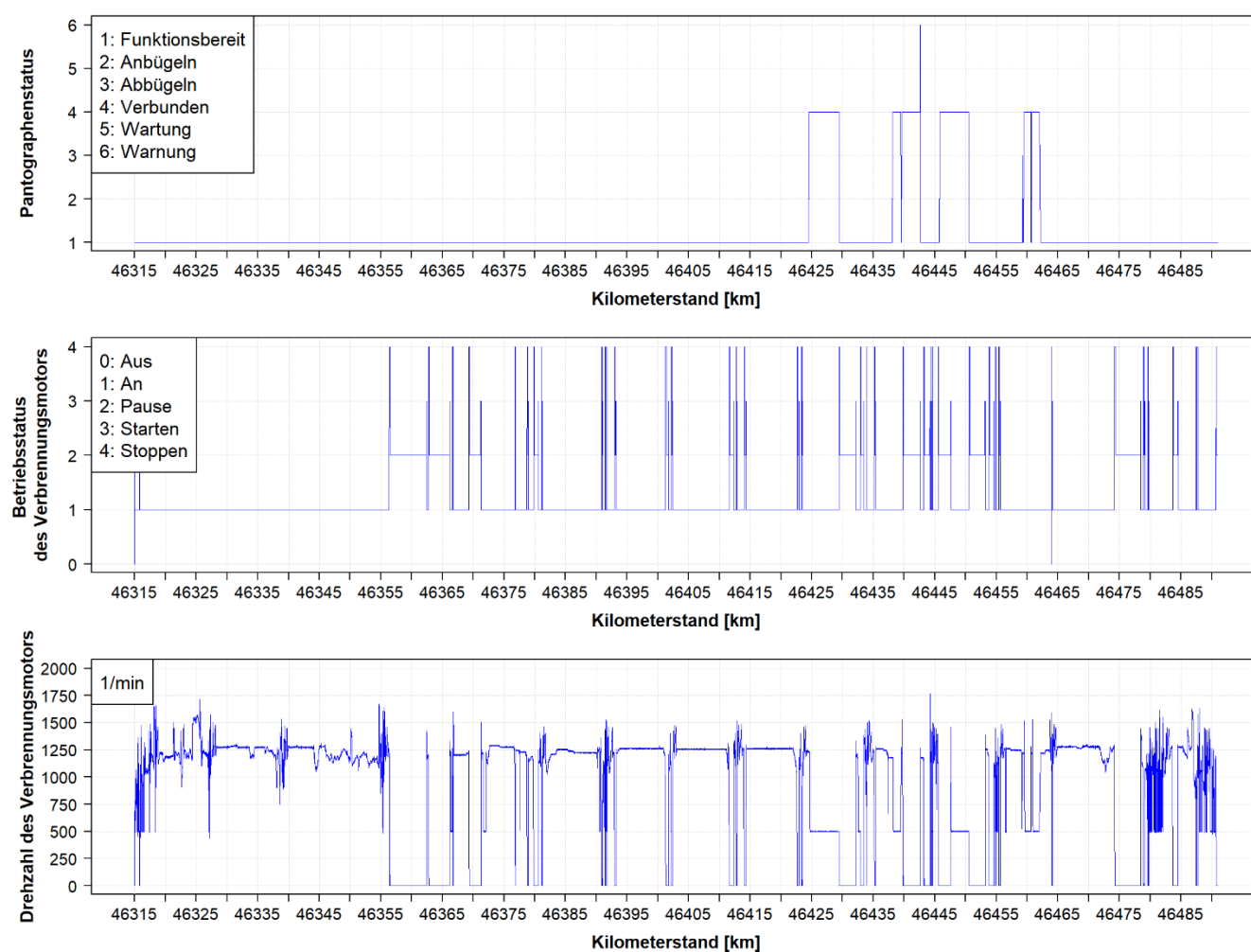
## AUFBEREITUNG DER DATENBASIS SOWIE DURCHFÜHRUNG ERSTER TESTINTERPRETATIONEN UND IDENTIFIKATIONSVERSUCHE AUF BASIS VON VERLAUFSDIAGRAMMEN

Zu den durch die Datenlogger erhobenen Fahrzeugdaten lagen **zu Beginn des Testbetriebs im ELISA-Forschungsprojekt keine nennenswerten Erfahrungswerte** vor, auf welche unter Umständen hätte aufgebaut werden können. Es war notwendig, zunächst eigenständig ein umfassendes Datenverständnis zu entwickeln. Um ein solches zu erhalten und dabei herauszuarbeiten, welche der vielfältigen Parameter für die angestrebten Analysen relevant sein könnten, wurde zunächst ein kompakter Beispieldatensatz (~ein Tag) umfassend untersucht. Sämtliche Parameter wurden hierbei einzeln analysiert, indem diese in **kilometerbasierte Verlaufsdiagramme** aufgetragen wurden. Eine anschließende Sichtprüfung verfolgte das Ziel der Überprüfung, erstens, ob für den betrachteten Parameter überhaupt Daten eingehen oder dieser Inaktivität vorweist und zweitens, ob sich bereits erste wiederholende und

<sup>28</sup> Dem Anhang (S. A18) kann eine Auflistung aller durch die Datenlogger erfassten Parameter entnommen werden.

<sup>29</sup> „csv“ ist eine Abkürzung des englischen Begriffs „comma-separated values“ und bedeutet „durch Kommas getrennte Werte“.

gegebenenfalls **einzigartige Muster in den jeweiligen Verläufen** identifizieren lassen – siehe hierzu auch Abbildung 18, welche dieses Vorgehen anhand der Fahrzeugparameter *Pantographenstatus*<sup>30</sup>, *Betriebsstatus des Verbrennungsmotors*<sup>31</sup> sowie *Drehzahl des Verbrennungsmotors*<sup>32</sup> exemplarisch aufzeigt. Es wurden in diesem Zuge gleichzeitig anfängliche Versuche unternommen, geeignete Parameter für die Betriebsmodiidentifikation zu determinieren. Simultan galt die Bearbeitung dieser Teilaufgabe des Sammelns von Erfahrungen zum jeweils **gültigen Wertebereich eines Parameters**. Insbesondere im Hinblick auf eines noch zu integrierenden Datenbereinigungsverfahrens wird die Definition des gültigen Wertebereichs zur Wahrung einer hohen Ergebnisqualität von entscheidender Bedeutung sein. Für sämtliche Parameter wurden in diesem Zusammenhang ferner zusätzlich bereits initiale Werte und Wertepaare festgelegt, die sich theoretisch einstellen müssten, sollte ein O-Lkw in dem jeweils vermuteten Betriebsmodus operieren.



**Abbildung 18: Graphische Aufbereitung der Verlaufsdiagramme ausgewählter Fahrzeugparameter zur Betriebsmodiidentifikation (Quelle: SCHÖPP U. A. (2021B, S. 42))**

### 4.2.3 DURCHFÜHRUNG VON FORSCHUNGSFAHRTEN ZUR VERBESSERUNG DES DATENVERSTÄNDNISSES

Erlaubte die bisherige Aufbereitung der vorhandenen Datenbasis das Aufstellen erster Vermutungen zu grundlegenden Zusammenhängen der Fahrzeugdaten, sollen diese durch die Durchführung überwachter Forschungsfahrten verifiziert und zu fundierten Schlussfolgerungen weiterverarbeitet werden.

<sup>30</sup> Originalname des Parameters im zur Verfügung gestellten Datensatz: „PantographActualStatus“.

<sup>31</sup> Originalname des Parameters im zur Verfügung gestellten Datensatz: „PowerManagerEngineState“.

<sup>32</sup> Originalname des Parameters im zur Verfügung gestellten Datensatz: „EngineSpeed (rpm)“.

---

## VORBEREITUNG, ORGANISATION UND DURCHFÜHRUNG VON FORSCHUNGSFAHRTEN

Die für die erfolgreiche Identifikation von Betriebsmodi besonders ausschlaggebenden **Forschungsfahrten unter überwachten Bedingungen** wurden am 4. Dezember 2019 mit dem O-Lkw „El Leon“ durchgeführt. Die Vorbereitung, Organisation und Durchführung der Forschungsfahrten erfolgte dabei in einem Team aus dem Fahrer des O-Lkws sowie mehreren wissenschaftlichen Mitarbeitenden des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Zur **Vorbereitung der durchzuführenden Forschungsfahrten** wurde ein Fahrtenprofil ausgearbeitet, das die bis dahin bereits erlangten Erkenntnisse nach BOLTZE U. A. (2020) und hierbei vor allem die sechs vermuteten Betriebsmodi berücksichtigen sollte. Zur eigentlichen Durchführung der Forschungsfahrten sollte der O-Lkw dabei so gut wie möglich nicht aus seinem vorgesehenen Realbetrieb herausgezogen werden. So wurde den Forschungsfahrten eine Standard-Transportaufgabe im öffentlichen Verkehrsraum als Basis zugrunde gelegt. Als Startpunkt der Forschungsfahrten wurde der Betriebshof des O-Lkws in Ober-Ramstadt definiert. Enden sollten die Forschungsfahrten beim Kunden in Frankfurt am Main. Das definierte Fahrtenprofil führt dabei über die Bundesstraße B 426, die Bundesautobahn BAB 5 inklusive ELISA-Teststrecke, die Bundesautobahn BAB 3, die Bundesautobahn BAB 661 sowie durch den Offenbacher und Frankfurter Stadtverkehr (sowie retour). Einzig hinsichtlich der Befahrung der ELISA-Teststrecke sollte vom eigentlichen Realbetrieb des O-Lkws abgewichen werden: Um die Anzahl an Fahrten auf der ELISA-Teststrecke für eine größere Datenbasis zur Nachbereitung der Forschungsfahrten zu erhöhen, wurden mehrere Rundläufe über die Teststrecke eingeplant – also ein Pendeln zwischen den Anschlussstellen Langen/Mörfelden (Nr. 24) und Weiterstadt (Nr. 25).

Besonderheiten während der Durchführung der Forschungsfahrten galt es möglichst exakt zu erfassen (mit Zeitstempel), um diese im Rahmen der **Nachbereitung der Forschungsfahrten** mit den durch den Datenlogger erfassten Fahrzeugdaten übereinanderzulegen. Es wurde als zielführend erachtet, einerseits die Aktivitäten im Führerhaus des O-Lkws zu dokumentieren. Hierzu sollte eine Person aus dem Team der wissenschaftlichen Mitarbeitenden auf dem Beifahrersitz des O-Lkws Platz nehmen. Andererseits erschien es sinnig, den O-Lkw auch in seinem Umfeld von „außen“ zu erfassen. Hierfür sollte der O-Lkw durch einen hinterherfahrenden Pkw begleitet werden, besetzt durch eine den Pkw fahrende Person sowie eine Person für die Dokumentation der Besonderheiten. Ferner sollte simultan eine Überprüfung der Datenerfassung durch den Datenlogger von remote erfolgen, um sicherzustellen, dass die für die Nachbereitung der Forschungsfahrten notwendigen Fahrzeugdaten gesichert erhoben werden. Zur Kommunikation zwischen den Beteiligten erschien es weiterhin sinnvoll, via parallel verlaufender Telefonkonferenz für Ad hoc-Rücksprachen verbunden zu sein. Zusätzlich wurden vor Beginn der Forschungsfahrten umfassende Unterweisungen mit sämtlichen an den Forschungsfahrten beteiligten Personen durchgeführt.

Die Forschungsfahrten wurden schließlich entsprechend des definierten Fahrtenprofils, der festgelegten Arbeitsteilung und der mehrfachen Befahrung des ELISA-Teststreckenabschnitts durchgeführt. Besonderheiten während der Fahrten wurden erfasst, die Datenerhebung erfolgte reibungslos.<sup>33</sup>

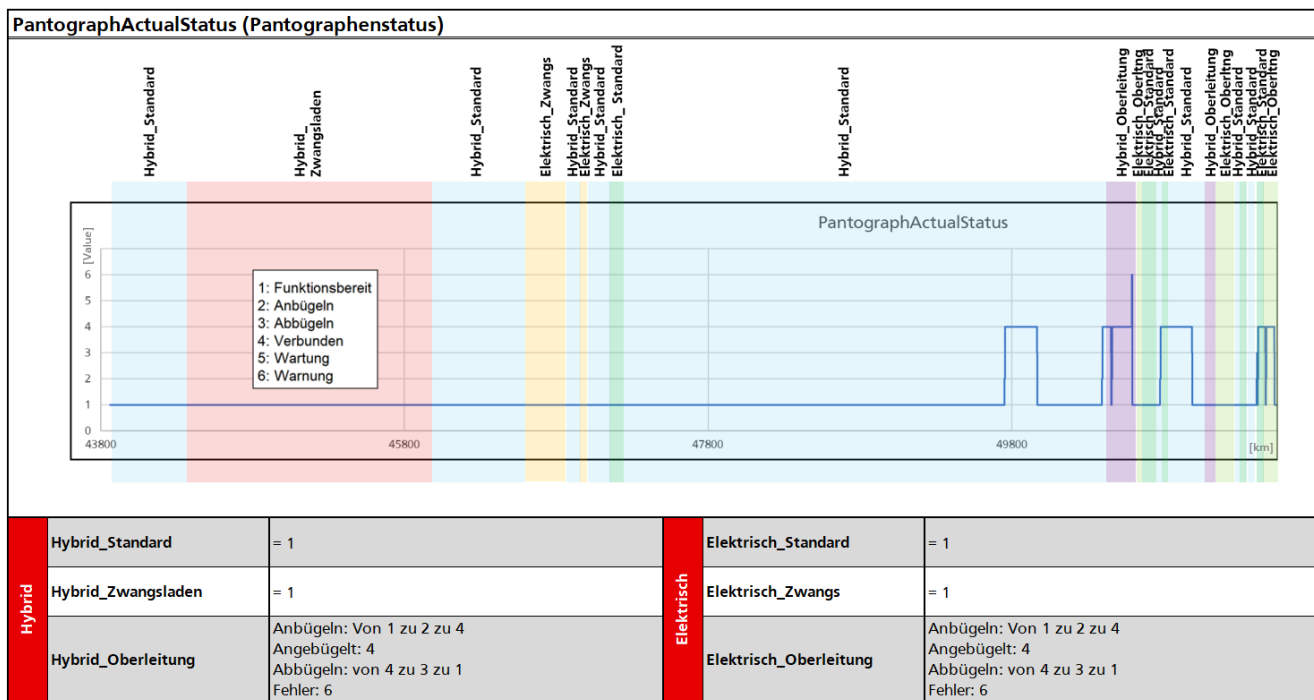
## NACHBEREITUNG DER FORSCHUNGSFAHRTEN, ERNEUTE IDENTIFIKATIONSVERSUCHE EINZIGARTIGER MUSTER SOWIE ÜBERPRÜFUNG ZUGEORDNETER WERTE UND WERTEPAARE ZU DEN IDENTIFIZIERTEN MUSTERN

Im **Nachgang der Forschungsfahrten** galt es, diese zielführend aufzubereiten. Zunächst wurden hierfür die durch den Datenlogger erhobenen Fahrzeugdaten für die Datenauswertung vorbereitet, indem die .csv-Dateien in ein durch MS Excel bearbeitungsfähiges .xlsx-Dateiformat transferiert wurden. Hierauf

---

<sup>33</sup> Die durchgeführten Forschungsfahrten dienten neben der Untersuchung von Betriebsmodi weiteren Zwecken, entsprechend der Interessen der zusätzlich an den Forschungsfahrten beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeitenden.

aufbauend wurde das abgefahrte Fahrtenprofil umfassend analysiert und mit den während der durchgeführten Forschungsfahrten gesammelten Erfahrungswerten nachvollzogen. Im Vordergrund stand dabei die Untersuchung, welche Komponenten des O-Lkws die einzelnen Fahrtabschnitte durch Aktivität beziehungsweise Inaktivität charakterisierten. Um den Untersuchungserfolg zu steigern, wurden – wie bereits aus dem vorherigen Verfahrensschritt bekannt – für jeden Parameter erneut kilometerbasierte Verlaufsdiagramme angefertigt. Ergänzt um das sukzessiv abgefahrte Fahrtenprofil sowie um die dokumentierten Besonderheiten während der Forschungsfahrten konnten wichtige Zusammenhänge einerseits aufgedeckt und andererseits nachvollzogen werden. Anhand der Analyse der Verlaufsdiagramme wurden die bereits im vorherigen Verfahrensschritt für jeden Parameter voraufgestellten initialen Werte und Wertepaare, die sich entsprechend der bis zu diesem Zeitpunkt vermuteten Betriebsmodi nach BOLTZE U. A. (2020) jeweils hätten einstellen müssen, kontrolliert, verifiziert und – sofern notwendig – angepasst. Zugleich wurde eine ergänzende Plausibilisierung der erhobenen Fahrzeugdaten vorgenommen und die bis hierhin angenommenen, gültigen Wertebereiche je Parameter geschärft. In nachfolgender Abbildung 19 wird das vorstehend beschriebene Vorgehen am Beispiel des Parameters „Pantographenstatus“ nochmals grafisch dargelegt. Die in der Abbildung verwendeten Farben kennzeichnen dabei das abgefahrte Fahrtenprofil während der Forschungsfahrten auf Basis der nach BOLTZE U. A. (2020) unterschiedenen Betriebsmodi.



**Abbildung 19: Übertragung des Fahrtenprofils in Verlaufsdiagramme erhobener Fahrzeugdaten (Beispiel)**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

#### 4.2.4 DEFINITION UND DATENBASIERTE IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS

Die Durchführung der vorherigen beiden Verfahrensschritte erlaubt die Schlussfolgerung, dass die Zerlegung des Betriebs eines O-Lkws in verschiedene Betriebsmodi zielführend ist. Es kann festgehalten werden, dass die Betriebsmodi anhand des **Zusammenspiels der Komponenten**

- Verbrennungsmotor,
- E-Maschine,
- elektrischer Energiespeicher,
- Pantograph sowie
- Oberleitungsanlage

---

einerseits charakterisiert, andererseits aber auch eindeutig voneinander abgegrenzt werden können. Neben den bis hierhin vermuteten sechs Betriebsmodi, die durch BOLTZE U. A. (2020) angenommen wurden, zeigen sich bei der Betrachtung größerer Datenmengen jedoch wenige weitere Fahrtabschnitte, die aufgrund einer uneindeutigen Interaktion der vorstehend genannten Komponenten bislang keinem der angedachten Betriebsmodi zugeordnet werden konnten. Eine detaillierte Untersuchung dieser jeweils verbliebenen Records führt zu der Erkenntnis, dass es sich dabei stets um den Übergang zwischen zwei Betriebsmodi handelt. Hierfür ist ein weiterer Betriebsmodus zu definieren. Die vorliegenden Kenntnisse erlauben nun, Definitionen von sinnigerweise zu unterscheidenden Betriebsmodi eines O-Lkws vorzunehmen.

#### **DEFINITION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS<sup>34</sup>**

Die Beschreibung des vielfältigen Betriebsverhaltens eines O-Lkws erfordert die Zerlegung einer Fahrt von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B in verschiedene Betriebsmodi, angelehnt an das Vorgehen gemäß DIN EN 16258. Soll die Zerlegung dabei einerseits eindeutig und überschneidungsfrei sowie andererseits lückenlos erfolgen, bedarf es einer Differenzierung von insgesamt „6+1“ **Betriebsmodi eines O-Lkws**. Diese sind wie folgt zu definieren:

**Hybrid-Standardmodus:** „Während der [O-Lkw] im Hybrid-Standardmodus operiert, ist der Verbrennungsmotor immer aktiv. Die Traktion wird durch die Interaktion zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine sichergestellt, wobei der Verbrennungsmotor in diesem Modus die Hauptleistung erbringt. Der Pantograph wird in diesem Modus nicht verwendet. Leistungsüberschüsse und/oder Rekuperation laden die Batterie. Energiequellen für die Traktion sind hauptsächlich Dieselmotorkraftstoff (primäre Energiequelle), aber auch elektrische Energie aus der Batterie (sekundäre Energiequelle).“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 42)

**Hybrid-Zwangslademodus:** „Während der [O-Lkw] im Hybrid-Zwangslademodus operiert, ist der Verbrennungsmotor immer aktiv. Die Traktion wird durch die Interaktion zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine sichergestellt, wobei der Verbrennungsmotor in diesem Modus die Hauptleistung erbringt. Der Pantograph wird in diesem Modus nicht verwendet. Leistungsüberschüsse und/oder Rekuperation laden die Batterie. Energiequellen für die Traktion sind hauptsächlich Dieselmotorkraftstoff (primäre Energiequelle), aber auch elektrische Energie aus der Batterie (sekundäre Energiequelle). Zusätzlich zum Hybrid-Standardmodus wird in diesem Betriebsmodus der Verbrennungsmotor aktiv genutzt, um einen Leistungsüberschuss zum Laden der Batterie zu erzwingen.“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 42)

**Hybrid-Oberleitungsmodus:** „Während der [O-Lkw] im Hybrid-Oberleitungsmodus [(mit Laden)] operiert, ist der Verbrennungsmotor immer aktiv. Die Traktion wird durch die Interaktion zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine sichergestellt. Der Pantograph ist mit der Oberleitung verbunden. Leistungsüberschüsse sowohl aus der Oberleitung als auch aus dem Verbrennungsmotor sowie Rekuperation laden gegebenenfalls die Batterie. Energiequellen für die Traktion sind sowohl Dieselmotorkraftstoff als auch elektrische Energie aus der Oberleitung (beide Energiequellen sind in diesem Fall die primäre Energiequelle).“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 42)

**Elektrisch-Standardmodus:** „Während der [O-Lkw] im Elektrisch-Standardmodus operiert, ist der Verbrennungsmotor nicht in Betrieb. Die Traktion wird nur durch die E-Maschine gewährleistet. Der Pantograph wird nicht eingesetzt. Die Batterie kann durch Rekuperation geladen werden. Energiequelle für die Traktion ist ausschließlich elektrische Energie aus der Batterie (primäre Energiequelle).“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 42)

---

<sup>34</sup> Die erarbeiteten Ergebnisse zu den Betriebsmodi eines O-Lkws konnten im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts bereits veröffentlicht werden, siehe SCHÖPP U. A. (2021B). Die nachfolgenden Definitionen wurden aus der Veröffentlichung zitiert.



---

**Elektrisch-Zwangsmodus:** „Während der [O-Lkw] im Elektrisch-Zwangsmodus operiert, ist der Verbrennungsmotor nicht in Betrieb. Die Traktion wird nur durch die E-Maschine gewährleistet. Der Pantograph wird nicht eingesetzt. Die Batterie kann durch Rekuperation geladen werden. Energiequelle für die Traktion ist ausschließlich elektrische Energie aus der Batterie (primäre Energiequelle). Der Unterschied zwischen diesem Betriebsmodus und dem Elektrisch-Standardmodus besteht darin, dass der [O-Lkw von den Fahrenden] mittels Knopfdrucks gezwungen wird, ausschließlich die E-Maschine für die Traktion zu verwenden.“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 42)

**Elektrisch-Oberleitungsmodus:** „Während der [O-Lkw] im Elektrisch-Oberleitungsmodus [(mit Laden)] operiert, ist der Verbrennungsmotor nicht in Betrieb. Die Traktion wird nur durch die E-Maschine gewährleistet. Der Pantograph ist mit der Oberleitung verbunden. Leistungsüberschüsse aus der Oberleitung und/oder Rekuperation laden gegebenenfalls die Batterie. Energiequelle für die Traktion ist elektrische Energie aus der Oberleitung (primäre Energiequelle).“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 42-43)

**Übergangsmodus:** „Es können Übergänge zwischen zwei Betriebsmodi auftreten. Während ein Übergang stattfindet, sind verschiedene und nicht eindeutig zuzuordnende Betriebszustände möglich. Die Drehzahl des Verbrennungsmotors ist Null, wenngleich der Betriebszustand des Verbrennungsmotors bereits auf aktiv gesetzt wurde.“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 43)

Im weiteren Verlauf dieser Dissertationsschrift wird es sich zusätzlich als zielführend erweisen, eine **ergänzende Differenzierung hinsichtlich der Oberleitungs-Betriebsmodi** vorzunehmen: Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierte Strecke zu kurz, um den elektrischen Energiespeicher des O-Lkws vollständig mit elektrischer Energie aus der Oberleitungsanlage aufzuladen. Dies bedeutet, dass ein O-Lkw gegenwärtig *immer* mit elektrischer Traktionsenergie *und* Ladeenergie aus der Oberleitungsanlage versorgt wird, sobald durch den Pantographen eine Verbindung zum Fahrdrabt hergestellt wurde. Mit einem zunehmenden Ausbaugrad von Oberleitungsanlagen und der damit einhergehenden Zunahme verfügbarer, elektrifizierter Streckenabschnitte wird sich diesbezüglich allerdings eine Änderung ergeben: Ist ein durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierter Streckenabschnitt ausreichend lang ausgebaut, kann die maximale Speicherkapazität des elektrischen Energiespeichers während der angebugelten Fahrt nicht nur ausgeschöpft werden, sie wird sogar überschritten. Tritt dieser Fall ein, bezieht ein O-Lkw ab diesem Zeitpunkt nur noch Traktionsenergie von der Oberleitungsanlage; der Energiebezug reduziert sich in Folge um die Höhe der Ladeenergie. Nun wird sich im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift zeigen, dass die insgesamt durch die Oberleitungsanlage bereitgestellte und durch einen O-Lkw bezogene elektrische Gesamtenergiemenge von erheblicher Bedeutung für die berechnete Höhe der Treibhausgasemissionen eines O-Lkws sein wird. Sollen im weiteren Verlauf dieser Dissertationsschrift ausgewählte **Zukunftsszenarien für das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial** von O-Lkw entwickelt werden, wird der Zustand des vollständigen Ladens des elektrischen Energiespeichers während der angebugelten Fahrt des O-Lkws eintreten. Den Aspekt zu ignorieren, dass ab diesem Zeitpunkt lediglich Traktionsenergie und keine Ladeenergie mehr bezogen wird, würde zu falschen Ergebnissen des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials durch die Implementierung von O-Lkw führen – mit falschen und dabei auch schlechteren Treibhausgasemissionswerten für den O-Lkw. Spätestens für die Berechnung des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw sollten in Konsequenz also zusätzlich die beiden weiteren Betriebsmodi „Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)“ sowie „Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)“ differenziert werden:

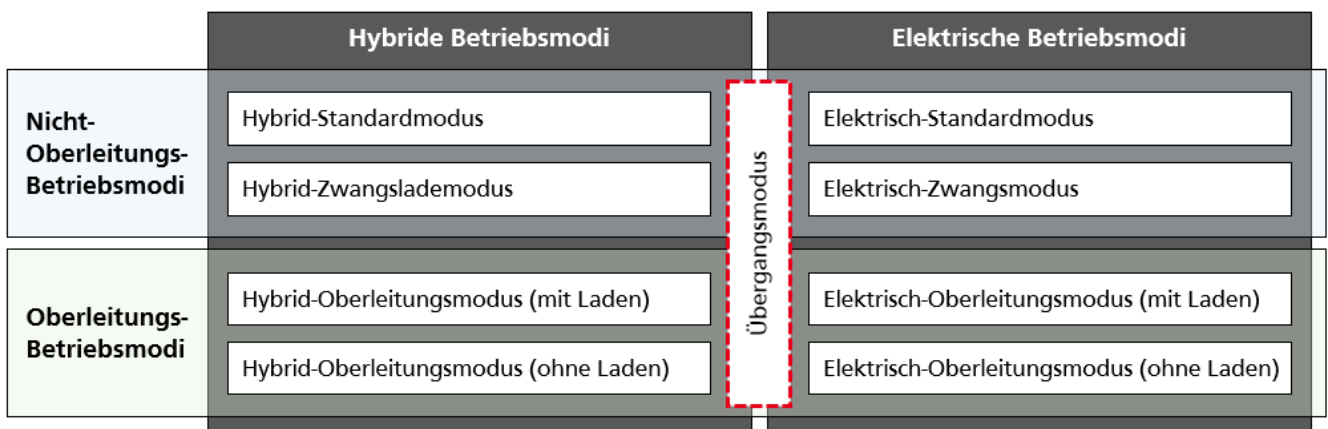
**Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden):** Während der O-Lkw im Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden) operiert, ist der Verbrennungsmotor immer aktiv. Die Traktion wird durch die Interaktion zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine sichergestellt. Der Pantograph ist mit der Oberleitung



verbunden. Leistungsüberschüsse sowohl aus der Oberleitung als auch aus dem Verbrennungsmotor sowie Rekuperation können nicht mehr aufgenommen werden, da der Ladestand der Batterie bereits seine Kapazitätsgrenze erreicht hat. Energiequellen für die Traktion sind sowohl Dieselkraftstoff als auch elektrische Energie aus der Oberleitung (beide Energiequellen sind in diesem Fall die primäre Energiequelle).

**Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden):** Während der O-Lkw im Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden) operiert, ist der Verbrennungsmotor nicht in Betrieb. Die Traktion wird nur durch die E-Maschine gewährleistet. Der Pantograph ist mit der Oberleitung verbunden. Leistungsüberschüsse aus der Oberleitung oder durch Rekuperation können nicht mehr aufgenommen werden, da der Ladestand der Batterie bereits seine Kapazitätsgrenze erreicht hat. Energiequelle für die Traktion ist elektrische Energie aus der Oberleitung (primäre Energiequelle).

Nachfolgende Abbildung 20 zeigt „die **Zusammensetzung und das Zusammenwirken der Betriebsmodi** auf. Abhängig von der jeweiligen Intention lassen sich bei der Interpretation einzelner Betriebsmodi verschiedene funktionelle Kombinationen bilden. So können die identifizierten Betriebsmodi einerseits zu hybriden und elektrischen Betriebsmodi zusammengefasst werden (vertikal). Andererseits ist eine Zusammenfassung der Betriebsmodi hinsichtlich Fahrten mit beziehungsweise ohne Nutzung der Oberleitung[sanlage] möglich (horizontal).“ (Schöpp u. a. 2021b, S. 43)



**Abbildung 20: Betriebsmodi eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP U. A. (2021b, S. 43))

#### FILTERKRITERIEN FÜR DIE DATENBASIERTE IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS

Die Herausforderung besteht nun darin, anhand einer **minimalen Anzahl an Parametern** auch die **datenbasierte Identifikation von Betriebsmodi** zu realisieren. Eine minimale Anzahl an Parametern gilt es aus diesem Grund zu finden, da mit einer zunehmenden Anzahl an für die Betriebsmodi-identifikation benötigten Parametern die Anzahl an potenziell fehlenden sowie fehlerbehafteten Daten steigt. Eine steigende Anzahl von fehlenden beziehungsweise fehlerbehafteten Daten wird in einem noch zu implementierenden Datenbereinigerungsverfahren zu einer steigenden Anzahl an von den Analysen auszuschließenden Records führen. Die Anzahl der für die Betriebsmodiidentifikation (sowie auch für die weiteren Analysen im Nachfolgenden) notwendigen Parameter ist deswegen auf ein minimal mögliches Maß zu beschränken.

Die durchgeführten Forschungsaktivitäten lassen die Schlussfolgerung zu, dass für die zuverlässige Zuordnung eines Fahrtabschnitts zu einem der definierten Betriebsmodi der Einbezug von lediglich drei Parametern genügt: Das Zusammenspiel der Parameter „Drehzahl des Verbrennungsmotors“, „Betriebsstatus des Verbrennungsmotors“ sowie „Pantographenstatus“ lässt solch einzigartige Wertekombinationen zu, dass die erforderliche Zuordnung vorgenommen werden kann.

---

Hinsichtlich des Parameters „**Drehzahl des Verbrennungsmotors**“ sind dabei zwei Zustände zu differenzieren: Ist der Verbrennungsmotor aktiv, ist seine Drehzahl größer als 0 Umdrehungen pro Minute (U/min); Ist der Verbrennungsmotor inaktiv, nimmt seine Drehzahl den Wert von 0 U/min an.

Der Parameter „**Betriebszustand des Verbrennungsmotors**“ ist ein Kennwert für die Beteiligung des Verbrennungsmotors an der Traktionsaufgabe des O-Lkws. Verschiedene Werte für diesen Parameter sind möglich. Der Wert "0" bedeutet, dass der O-Lkw grundsätzlich nicht in Betrieb ist. Sollte der Verbrennungsmotor aktiv sein, wird dies durch den Wert "1" charakterisiert. Wird der Verbrennungsmotor während der Fahrt von seiner Traktionsaufgabe entbunden – er wird in eine Art Pausenzustand transferiert – wird dies datenseitig durch einen Wechsel der Werte von „1“ (Verbrennungsmotor aktiv) über „4“ (Verbrennungsmotor stoppt) zu „2“ (Verbrennungsmotor pausiert) dargestellt. Ist der Verbrennungsmotor nicht an der Traktionsaufgabe beteiligt – der O-Lkw fährt in Folge ausschließlich auf Basis der E-Maschine und damit rein elektrisch – wird dies entsprechend über den Wert „2“ ausgedrückt. Soll der Verbrennungsmotor wieder zugeschaltet werden, erfolgt eine Sequenz aus den Werten „2“ (Verbrennungsmotor pausiert) über „3“ (Verbrennungsmotor startet) zu „1“ (Verbrennungsmotor aktiv). Der Parameter kann überdies weitere Werte annehmen, die verschiedene Fehler kennzeichnen sollen. Solche Fahrabschnitte sind für die weiteren Analysen irrelevant; ein O-Lkw ist bei Annahme solcher Werte in der Regel nicht funktionsfähig. Diese Werte werden von den Untersuchungen grundsätzlich ausgeschlossen.

Der Parameter „**Pantographenstatus**“ lässt erkennen, ob der Pantograph mit der Oberleitung verbunden ist oder nicht. Auch dieser Parameter kann verschiedene Werte annehmen. Der Wert "1" gibt zunächst grundsätzlich an, dass der Pantograph funktionsbereit ist. Der Wert „2“ charakterisiert den Anbügelprozess des Pantographen, also das aktive Heben des Stromabnehmers, um einen Kontakt zum Fahrdrabt der Oberleitungsanlage herzustellen. Der Wert „3“ entspricht dem aktiven Senken des Pantographen, der Wert „4“ dem verbundenen Zustand. Auch für diesen Parameter sind weitere (Fehler-)Werte grundsätzlich möglich, allerdings ebenfalls ohne Relevanz für die in dieser Dissertationschrift durchzuführenden Analysen.

Zum besseren Verständnis des Verhaltens der drei für die Betriebsmodiidentifikation relevanten Fahrzeugparameter lässt sich dieses in bereits vorstehend aufgezeigter Abbildung 18 nachvollziehen (siehe Seite 60). Der folgenden Tabelle 6 (siehe Seite 67) lassen sich wiederum die notwendigen **Werte-kombinationen der drei Parameter** entnehmen, die je erfüllt sein müssen, sofern ein Fahrabschnitt einem betreffenden Betriebsmodus zugeordnet werden soll.

Eine nähere Betrachtung von Tabelle 6 wird die bis heute andauernde **Herausforderung der datenbasierten Identifikation der Betriebsmodi „Hybrid-Zwangslademodus“ sowie „Elektrisch-Zwangsmodus“** auf Basis der zur Verfügung stehenden Parameter aufzeigen. Es kann bislang keine datenbasierte Unterscheidung zwischen dem Hybrid-Standardmodus und dem Hybrid-Zwangslademodus beziehungsweise zwischen dem Elektrisch-Standardmodus und dem Elektrisch-Zwangsmodus vorgenommen werden. Die zur Verfügung stehenden Parameter offenbaren an dieser Stelle einen Mangel an Vielfalt: Die beiden Zwangs-Betriebsmodi werden grundsätzlich manuell durch die O-Lkw-Fahrenden aktiviert. Den O-Lkw-Fahrenden stehen hierfür entsprechende Bedienelemente im Führerhaus des O-Lkws zur Verfügung – BOLTZE U. A. (2020) führten hierzu bereits aus. Es sollte angenommen werden, dass sich das Betätigen eines solchen Bedienelements auch datenbasiert abzeichnen würde und sich in Folge somit automatisiert identifizieren ließe. Dem ist jedoch nicht so. Es steht weder ein direktes Signal, noch eine indirekt ableitbare Kombination verschiedener Parameter zur Verfügung, die eine solche Bedienelementbetätigung durch die O-Lkw-Fahrenden datenbasiert erkennen ließe. Trotz nachdrücklichen Einwirkens an den verantwortlichen Stellen während des ELISA-Forschungsprojekts, zwei zusätzliche Fahrzeugparameter zum Abgreifen der Signale des Betätigens der

entsprechenden Bedienelemente in die zur Verfügung gestellte Datenbasis aufzunehmen, wurde dieser Anforderung nicht nachgekommen: Die Integration der zwei als Lösungsansatz erarbeiteten Parameter „**Hybrid Forced Charging Mode Request**“ sowie „**Electric Drive Mode Request**“, die das Aktivieren der jeweiligen Bedienelemente erfasst hätten, hätte die anhaltende Herausforderung egalisiert.

Aufgrund der **unzureichenden Datenbasis** können der Hybrid-Standardmodus und der Hybrid-Zwangslademodus, äquivalent der Elektrisch-Standardmodus und der Elektrisch-Zwangsmodus, somit bislang nicht voneinander getrennt, sondern nur gemeinsam betrachtet werden. Das heißt konkret: Die im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift dargestellten Ergebnisse für den Hybrid-Standardmodus setzen sich zusammen aus den kombinierten Ergebnissen für den Hybrid-Standardmodus und den Hybrid-Zwangslademodus; die Ergebnisse für den Elektrisch-Standardmodus inkludieren zusätzlich stets die Ergebnisse für den Elektrisch-Zwangsmodus.

**Tabelle 6: Filterkriterien zur datenbasierten Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP U. A. (2021A, S. 11))

Betriebsmodus des O-Lkws	Drehzahl des Verbrennungsmotors <sup>1</sup>	Betriebszustand des Verbrennungsmotors <sup>2</sup>	Pantographenstatus <sup>3</sup>
Hybrid-Standardmodus	> 0 U/Min	= 1, 3 oder 4	≠ 4
Hybrid-Zwangslademodus <sup>4</sup>	> 0 U/Min	= 1, 3 oder 4	≠ 4
Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)	> 0 U/Min	= 1, 3 oder 4	= 4
Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden) <sup>5</sup>	> 0 U/Min	= 1, 3 oder 4	= 4
Elektrisch-Standardmodus	= 0 U/Min	= 2	≠ 4
Elektrisch-Zwangsmodus <sup>4</sup>	= 0 U/Min	= 2	≠ 4
Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)	= 0 U/Min	= 2	= 4
Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden) <sup>5</sup>	= 0 U/Min	= 2	= 4
Übergangsmodus	= 0 U/Min	= 1, 3 oder 4	≠ 4

<sup>1</sup> U/Min = Umdrehungen pro Minute

<sup>2</sup> 1=Verbrennungsmotor aktiv, 2=Verbrennungsmotor pausiert, 3=Verbrennungsmotor startet, 4=Verbrennungsmotor stoppt

<sup>3</sup> 4=Pantograph verbunden

<sup>4</sup> Aufgrund unzureichender Datenbasis keine datenbasierte Differenzierung zwischen Hybrid-Standardmodus und Hybrid-Zwangslademodus beziehungsweise zwischen Elektrisch-Standardmodus und Elektrisch-Zwangsmodus möglich. Standard- und Zwangs-Betriebsmodi werden im Folgenden zusammen betrachtet. Weitere Erläuterungen hierzu können den im Text genannten Ausführungen entnommen werden.

<sup>5</sup> Oberleitungs-Betriebsmodi mit oder ohne Laden unterscheiden sich in ihrer datenbasierten Identifikation (aktuell) nicht – aufgrund der gegenwärtig limitierten Länge eines durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts erfolgt die Fahrt mit angebügeltem Pantographen eines O-Lkws derzeit immer unter Bezug sowohl elektrischer Traktions- als auch Ladeenergie. Die Oberleitungs-Betriebsmodi ohne Laden sind bislang theoretischer Natur, notwendig für Hochrechnungen im Zusammenhang der Entwicklung von Zukunftsszenarien. Um diese zu bestimmen, erfolgt eine Subtraktion der Ladeenergie von der insgesamt durch den O-Lkw von der Oberleitungsanlage bezogenen Energiemenge. Die nachfolgenden Ausführungen im Rahmen dieser Dissertationsschrift führen hierzu weiter aus.

Die **Auswirkungen der kombinierten Betrachtung** der Standard- und Zwangs-Betriebsmodi auf die im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift zu ermittelnden Energieverbrauchs- und Treibhausgasemissionskennwerte sind weitestgehend vernachlässigbar: Hinsichtlich der elektrischen Betriebsmodi erfolgt hierdurch keinerlei Beeinflussung der Ergebnisse. Der kombinierte Hybrid-Standardmodus wird voraussichtlich jedoch einen höheren Dieselkraftstoffverbrauch aufweisen, als dies in Realität tatsächlich der Fall wäre. Durch die auf Knopfdruck erzwungene Zusatzleistung, die der Verbrennungsmotor zum Laden des elektrischen Energiespeichers aufbringen muss, wird in Konsequenz mehr Dieselkraftstoff benötigt. Der genaue Mehrverbrauch hängt ab vom jeweiligen Verhalten der O-Lkw-Fahrenden und ihrer Frequenz des Aktivierens der Zwangsladefunktion. Diese bleibt aber für die im Rahmen dieser Dissertationsschrift durchzuführenden Analysen eine unbekannt Variable. Basierend auf den während des ELISA-Forschungsprojekts gesammelten Erfahrungen zeigt sich jedoch, dass von der Funktion des Zwangsladens lediglich selten Gebrauch gemacht wird.

Ein weiterer Blick auf Tabelle 6 offenbart, dass sich die Filterkriterien für die **Identifikation der Oberleitungs-Betriebsmodi mit beziehungsweise ohne Laden** (aktuell noch) nicht unterscheiden.

---

Aufgrund der gegenwärtig limitierten Länge eines durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts erfolgt die Fahrt mit angebügeltem Pantographen eines O-Lkws derzeit *immer unter gleichzeitigem Bezug sowohl elektrischer Traktions- als auch Ladeenergie*. Die Oberleitungs-Betriebsmodi ohne Laden sind bislang ausschließlich theoretischen Charakters. Sie sind aber notwendig für Hochrechnungen in Zusammenhang mit der Entwicklung von Zukunftsszenarien. Um die Oberleitungs-Betriebsmodi ohne Laden zu bestimmen, erfolgt im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift eine Subtraktion der Ladeenergie von der insgesamt durch den O-Lkw von der Oberleitungsanlage bezogenen Energiemenge.

#### **DATENBEREINIGUNGSVERFAHREN IM KONTEXT DER IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS**

Zur **Gewährleistung einer hohen Ergebnisqualität** bedarf es der Integration eines ausgereiften Datenbereinigungsverfahrens. Vorstehend wurde auf die Notwendigkeit eines solchen bereits gelegentlich hingewiesen. Hinsichtlich der Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws ist besonders Wert zu legen auf eine hohe Datenqualität der drei hierfür relevanten Parameter „Drehzahl des Verbrennungsmotors“, „Betriebszustand des Verbrennungsmotors“ sowie „Pantographenstatus“. Eine Detailanalyse zeigt auf, dass diese drei Parameter bereits von Grund auf über eine hohe Erfassungsqualität verfügen. Die wenigen verbleibenden Ausreißer werden durch die jeweils definierten Filterkriterien zur Betriebsmodiidentifikation automatisch eliminiert, beziehungsweise durch nicht mögliche Wertepaarungen ohnehin von den weiteren Analysen ausgeschlossen. Es kann festgehalten werden, dass es für diese drei Parameter keines individuellen und komplexeren Datenbereinigungsverfahrens bedarf. Allerdings lassen sich gelegentlich gänzlich fehlende Dateneinträge detektieren. Ohne Verfügbarkeit eines Datums einer der drei Parameter ist es in Folge nicht möglich, die Betriebsmodiidentifikation vorzunehmen. In Konsequenz sind also sämtliche Records, die über fehlende Dateneinträge der drei fokussierten Parameter verfügen, durch das Datenbereinigungsverfahren herauszufiltern und von den weiteren Analysen auszuschließen.

Das bis hierhin aufgestellte **Datenbereinigungsverfahren** stellt lediglich den Ausgangspunkt für zusätzlich zu integrierende Parameter im Rahmen der weiteren Untersuchungen dieser Dissertationsschrift dar. Konkret handelt es sich hierbei zunächst um den ersten von zwei Teilen des insgesamt zu durchlaufenden Datenbereinigungsverfahrens. Das Datenbereinigungsverfahren wird ergänzt im Kontext der Analyse von Energieflüssen eines O-Lkws (siehe Kapitel 4.3).

#### **4.2.5 ZUSAMMENFASSUNG ZU DEN BETRIEBSMODI EINES O-LKWS**

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws kann resümiert werden:

**Ein O-Lkw operiert in verschiedenen Betriebsmodi.** Die Fahrt eines O-Lkws von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B sollte in sieben Betriebsmodi (auch als „6+1“ Betriebsmodi bezeichnet) unterteilt werden. Zu unterscheiden sind einerseits die drei hybriden Betriebsmodi *Hybrid-Standardmodus*, *Hybrid-Zwangslademodus* und *Hybrid-Oberleitungsmodus*. Andererseits ist zwischen den drei elektrischen Betriebsmodi *Elektrisch-Standardmodus*, *Elektrisch-Zwangsmodus* und *Elektrisch-Oberleitungsmodus* zu differenzieren. Ferner konnte festgestellt werden, dass zwischen dem Übergang von einem Betriebsmodus zu einem anderen Betriebsmodus Übergangsphasen entstehen. Es handelt sich dabei zwar lediglich um sehr kurze Phasen (in der Regel weniger als eine Sekunde), für die lückenlose Erfassung des Betriebs eines O-Lkws ist es dennoch zielführend, zusätzlich einen *Übergangsmodus* zu definieren. Im Hinblick auf anzufertigende Hochrechnungen im Kontext der Erstellung von Zukunftsszenarien ist es zusätzlich sinnvoll, hinsichtlich der Oberleitungs-Betriebsmodi eine weitere Untergliederung in einmal *mit* und einmal *ohne Laden* des elektrischen Energiespeichers vorzunehmen. Sollte

---

ein durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierter Streckenabschnitt zur Verfügung stehen, der es erlaubt, die maximal mögliche Speicherkapazität des elektrischen Energiespeichers nicht nur auszuschöpfen, sondern theoretisch zu überschreiten, reduziert sich ab diesem Punkt die insgesamt durch den O-Lkw von der Oberleitungsanlage bezogene Energiemenge. Unter den aktuellen Bedingungen im ELISA-Forschungsprojekt tritt dieser Zustand aufgrund der beschränkten Länge der Teststrecke noch nicht ein. Für Zukunftsszenarien sollte dieser Aspekt jedoch Berücksichtigung finden.

**Die Betriebsmodi eines O-Lkws werden durch das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Antriebsstrangs und der externen Energieversorgung bestimmt.** Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die Interaktion aus Verbrennungsmotor, E-Maschine, elektrischer Energiespeicher, Pantograph sowie Oberleitungsanlage.

**Die Betriebsmodi eines O-Lkws können funktional eindeutig voneinander abgegrenzt werden.** Die definierten Betriebsmodi schließen sich gegenseitig aus. Wird eine Zergliederung einer Fahrt eines O-Lkws entsprechend der eingeführten Betriebsmodi vorgenommen, so wird *jeder Fahrtabschnitt* dabei lediglich *einem Betriebsmodus* zugeordnet. Es erfolgen keine Mehrfachzuweisungen. Auch Überlappungen sind aufgrund der je Betriebsmodus definierten Charakteristika ausgeschlossen.

**Die Betriebsmodi eines O-Lkws können auch datenbasiert eindeutig voneinander abgegrenzt werden,** zumindest insofern, als dass jedenfalls ein hinreichend feines Maß an Ergebnisgranularität erreicht werden kann. Für die datenbasierte Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws stehen im ELISA-Forschungsprojekt grundsätzlich rund einhundert verschiedene Parameter zur Verfügung, die von in den O-Lkw verbauten Datenloggern erfasst werden. Auf Basis der drei Parameter „Drehzahl des Verbrennungsmotors“, „Betriebsstatus des Verbrennungsmotors“ sowie „Pantographenstatus“ lässt sich die Betriebsmodiidentifikation vornehmen – mit Ausnahme des Hybrid-Zwangslademodus sowie des Elektrisch-Zwangsmodus. Trotz der an sich umfangreichen Datenbasis ermöglicht weder ein direktes Signal, noch eine indirekt ableitbare Kombination verschiedener Parameter die datenbasierte Identifikation der Zwangs-Betriebsmodi. Zwar wurde ein möglicher Lösungsvorschlag – die Aufnahme weiterer Signale in die zur Verfügung gestellte Datenbasis – an verantwortlicher Stelle platziert, doch wurde eine Umsetzung durch die Verantwortlichen bislang nicht realisiert. Die Zwangs-Betriebsmodi werden aus diesem Grund mit ihrem jeweiligen Standard-Betriebsmodi-Pendant gemeinsam betrachtet: Der Hybrid-Zwangslademodus wird in den Hybrid-Standardmodus und der Elektrisch-Zwangsmodus in den Elektrisch-Standardmodus integriert. Hieraus resultierende Auswirkungen sind zum aktuellen Zeitpunkt vernachlässigbar.

**Insgesamt kann festgehalten werden,** dass sämtliche der aufgestellten Forschungshypothesen zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws unter Beachtung der vorstehenden Erläuterungen bestätigt werden können. Tabelle 7 fasst die Forschungshypothesen inklusive ihres Antwortstatus nochmals in Kürze zusammen. Die durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang der Betriebsmodi-identifikation eines O-Lkws haben ferner einen essenziellen Beitrag dazu leisten können, ein sogenanntes „**Codebook**“ zu entwickeln. Das Codebook fasst Kenntnisse zu den verfügbaren Fahrzeugdaten zusammen und wurde im Verbund einiger Beteiligter von diversen Forschungsprojekten im Kontext der eHighway-Forschung sukzessive zusammengestellt.



**Tabelle 7: Forschungshypothesen zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

<b>Oberziel 1: Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws</b>		<b>Status</b>
H1a:	Ein O-Lkw operiert in verschiedenen Betriebsmodi.	<b>Bestätigt</b>
H1b:	Die Betriebsmodi eines O-Lkws werden durch das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Antriebsstrangs und der externen Energieversorgung bestimmt.	<b>Bestätigt</b>
H1c:	Die Betriebsmodi eines O-Lkws können funktional eindeutig voneinander abgegrenzt werden.	<b>Bestätigt</b>
H1d:	Die Betriebsmodi eines O-Lkws können auch datenbasiert eindeutig voneinander abgegrenzt werden.	<b>Bestätigt</b>

### 4.3 ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS

#### 4.3.1 TEILVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG CHARAKTERISTISCHER ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS

Konnten wesentliche Zusammenhänge zu den Betriebsmodi eines O-Lkws im vorstehenden Kapitel 4.2 erarbeitet werden – *die Betriebsmodi eines O-Lkws werden durch das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Antriebsstrangs determiniert* – soll hierauf aufbauend der Fokus nun auf die **Analysen zu Energieflüssen** und in diesem Rahmen auch zu **Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws** gerichtet werden.

Als Ausgangspunkt der Untersuchungen ist nicht nur anzunehmen, dass sich entsprechend des Betriebsmodus eines O-Lkws individuelle und dabei vor allem auch stark inhomogene Energieflüsse feststellen lassen werden – es erscheint vielmehr als logische Konsequenz. Ist beispielsweise im Hybrid-Standardmodus der Verbrennungsmotor maßgeblich für die Bereitstellung von Traktionsenergie verantwortlich, weist dieser im Elektrisch-Standardmodus Inaktivität auf. Im Hybrid-Standardmodus sollte sich also ein Durchfluss an Dieselmotorkraftstoff registrieren lassen, im Elektrisch-Standardmodus hingegen nicht. Es werden sich entsprechend des Betriebsmodus eines O-Lkws somit unterschiedliche Energieflüsse und als weiteres Resultat auch unterschiedliche Energieverbräuche feststellen lassen.

Welche Besonderheiten im Zusammenhang mit Energieflüssen eines O-Lkws zu beachten sind, ob sich die Energieflüsse eines O-Lkws überhaupt nachweisen lassen und wenn ja, ob dies auch datenbasiert möglich sein wird, soll im nachfolgenden Abschnitt der Dissertationsschrift geklärt werden. Die Analyse der Energieflüsse und hieraus resultierend des Energieverbrauchs eines O-Lkws stellt deswegen einen weiteren essenziellen Meilenstein zur belastbaren Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems dar. Um diesen Meilenstein – *das zweite Oberziel* – erfolgreich zu bearbeiten, wurde ein aus drei Verfahrensschritten und 16 Teilaufgaben bestehendes Teilverfahren entwickelt.

Der **erste Verfahrensschritt** fokussiert zunächst die *Entwicklung von Energieflussschemata auf Basis bislang erarbeiteter Erkenntnisse*. Zu Beginn dieses Verfahrensschritts werden Forschungshypothesen aufgestellt, die dem zweiten Oberziel allgemein zugrunde gelegt werden – äquivalent zum Vorgehen, das bereits zur Betriebsmodiidentifikation Anwendung fand. Abschließend werden für jeden Betriebsmodus vereinfachte Energieflussschemata abgeleitet, basierend auf dem bis hierhin erlangten Kenntnisstand. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs eines O-Lkws wird hierfür nochmals eingehend aufgearbeitet. Die Aufstellung der vereinfachten Energieflussschemata dient vor allem der Identifikation von Energieflüssen eines O-Lkws, die grundsätzlich überhaupt unterschieden werden sollten. Damit die identifizierten Energieflüsse auch datenbasiert berechnet werden können, gilt es entsprechende Vorbereitungen zu treffen: Es muss eine Erweiterung der bislang aufgestellten

---

Datenbasis um solche Parameter erfolgen, die für die Ermittlung von Energieflüssen eines O-Lkws potenziell von Relevanz sein könnten. Die potenzielle Relevanz eines Parameters für die anzustellenden Analysen wird dabei einerseits nach logischen Kriterien vorgenommen (*die Bezeichnung des Parameters im zur Verfügung gestellten Datensatz lässt potenziell eine Eignung für die durchzuführenden Analysen vermuten; für den Parameter werden Daten aufgezeichnet*). Andererseits wird die potenzielle Relevanz der Parameter erneut anhand von parameterindividuell erstellten Verlaufsdiagrammen geprüft.

Im **zweiten Verfahrensschritt** wird die *Erarbeitung einer geeigneten Methode zur datenbasierten Berechnung der Energieflüsse* in den Fokus gestellt. Es sind gültige und auf die Zielstellung ausgerichtete Berechnungsgrundlagen aufzustellen, die die Berechnung der identifizierten Energieflüsse auf Basis der vorhandenen Fahrzeugdaten erlauben. Von besonderer Herausforderung wird hierbei sein, die im vorherigen Verfahrensschritt bereits voranalysierten Parameter auch den korrekten Energieflüssen zuzuordnen – „Herausforderung“ aus den Gründen, da die im Datensatz enthaltenen Parameter weder zwingend über selbsterklärende Namen verfügen, noch die Anzahl an potenziell relevanten Parametern derart limitiert ist, als dass sich aufgrund eines Mangels an anderweitigen Alternativen infolge eines Ausschlussverfahrens automatisch eine korrekte Zuordnung von *dem* Parameter zu *dem* Energiefluss vornehmen ließe. Der Vergleich der Parameter *“ActualDcLinkSupplyCurrent”* und *„ActualDcLink-SupCurrent“* soll dabei lediglich als *ein exemplarisches Beispiel* dienen, um aufzuzeigen, wie ähnlich sich die Namen verschiedener Parameter durchaus sein können.

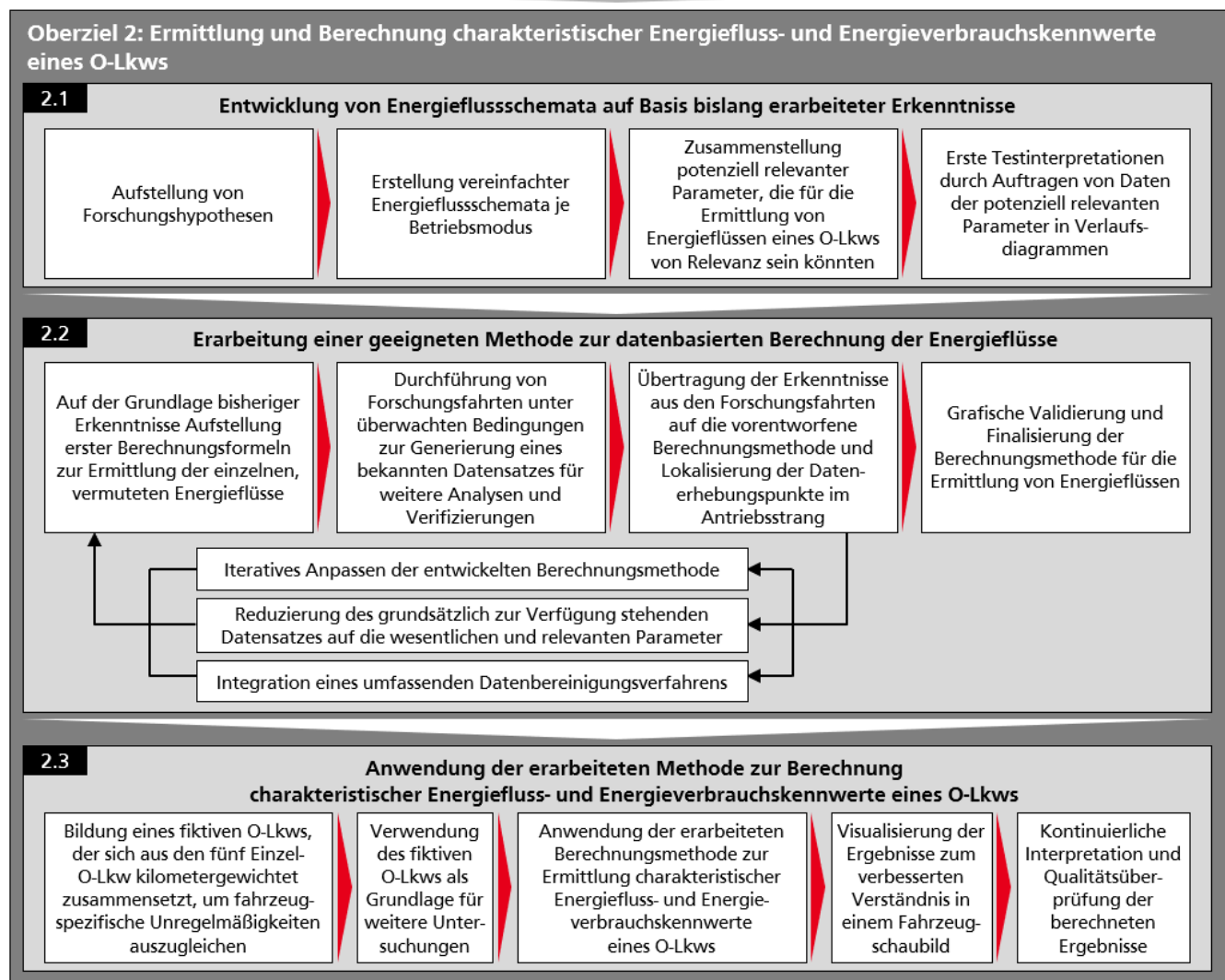
Auch wird das Zusammenwirken der Parameter zu klären sein. So wird es beispielsweise einer Verrechnung von Spannungs-Parametern mit den jeweils zugehörigen Stromstärke-Parametern bedürfen, um Rückschlüsse auf die jeweils resultierende elektrische Leistung des betrachteten Energieflusses ziehen zu können. Evident werden muss hierbei jedoch zunächst, welche Parameterkombinationen überhaupt zulässig und korrekt sein werden. Denn ebenfalls unbekannt sind die Datenerhebungspunkte, an denen die jeweiligen Parameter im O-Lkw gemessen werden. Für diese insgesamt als „unbekannt“ zu bewertende Situation muss jedoch dringend Klarheit geschaffen werden, damit im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens korrekte Ergebnisse berechnet und aufbauend belastbare Schlussfolgerungen für den O-Lkw gezogen werden können. Erlangte Erkenntnisse aus überwachten Forschungsfahrten – an dieser Stelle wird sich unter anderem nochmals an den Forschungsfahrten bedient, die bereits im Rahmen der Betriebsmodiidentifikation durchgeführt wurden – sollen die notwendige Abhilfe schaffen. Es sollen erstens solche Parameter identifiziert werden, die für die Analysen tatsächlich von Relevanz sind. Zweitens sollen für die identifizierten Parameter die jeweiligen Datenerhebungspunkte im Antriebsstrang (zumindest grob) lokalisiert werden. Und drittens soll anhand der sich sukzessiv verbessernden Erkenntnissituation das vorentworfenen Berechnungsverfahren kontinuierlich optimiert und schlussendlich finalisiert werden.

Aufgrund der vielen Unbekannten in diesem Verfahrensschritt werden die Teilaufgaben in einen iterativ auszuführenden Prozess eingebettet. Es wird einiger Versuche bedürfen, bis einerseits die wesentlichen und relevanten Parameter identifiziert werden konnten und andererseits die aufgestellten Berechnungsformeln zu belastbaren und auch *richtigen* Ergebnissen für die jeweils zu analysierenden Energieflüssen führen. Zur Sicherstellung einer hohen Ergebnisqualität wird auch das bereits im Zuge der Betriebsmodiidentifikation aufgesetzte Datenbereinigungsverfahren zu ergänzen sein. Wurde eine ausreichende Anzahl an Iterationsschritten durchlaufen und konnte ein zulässiges Berechnungsverfahren entwickelt werden, wird dieses anhand einer grafischen Analyse von Verlaufsdiagrammen validiert.

Im **dritten Verfahrensschritt** erfolgt die Anwendung der erarbeiteten Methode zur Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws. Aufgrund des Testcharakters, der im ELISA-Forschungsprojekt unbestreitbar vorliegt, und den hieraus resultierenden Unwägbarkeiten erscheint es zielführend, die O-Lkw zwar zunächst auch einzeln zu betrachten – für die

weiteren Analysen sollte aber eine kombinierte Auswertung angestrebt werden: Um fahrzeugindividuelle Unregelmäßigkeiten auszugleichen, soll ein fiktiver O-Lkw gebildet werden. Der fiktive O-Lkw wird kilometergewichtet aus den fünf Einzel-O-Lkw zusammengesetzt. Der fiktive O-Lkw dient als Grundlage für die weiteren Untersuchungen, und die aufgestellte Berechnungsmethode wird schließlich für diesen angewendet. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden die Berechnungsergebnisse, neben einer textlichen und tabellarischen Darlegung, zusätzlich in einem Fahrzeugschaubild visualisiert. Abschließen wird das Teilverfahren zur Ermittlung und Berechnung charakteristischer Energiefluss-, Kraftstoff- und Stromverbrauchskennwerte eines O-Lkws mit einer Interpretation der erarbeiteten Ergebnisse. Nachfolgende Abbildung 21 zeigt das entwickelte Teilverfahren nochmals grafisch auf.

Oberziel 1: Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws



Oberziel 3: Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte und Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw

Abbildung 21: Teilverfahren zur Ermittlung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP U. A. (2022, S. 7))

### 4.3.2 ENERGIEFLUSSSCHEMATA FÜR EINEN O-LKW

Um den Analysen zu den Energieflüssen und charakteristischen Energieverbrauchswerten eines O-Lkws Struktur zu verleihen, werden zunächst zu prüfende Forschungshypothesen aufgestellt.

## FORSCHUNGSHYPOTHESEN

Bereits aus dem vorherig durchgeführten Teilverfahren zur Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws ist bekannt, dass ein Zusammenspiel von verschiedenen Komponenten darüber entscheidet, welcher Betriebsmodus sich jeweils einstellen wird. Es ist also zu vermuten, dass sich entsprechend des Betriebsmodus unterschiedliche Energieflüsse feststellen lassen werden. Ist beispielsweise im Elektrisch-Standardmodus der Verbrennungsmotor nicht aktiv, sollte sich in diesem Betriebsmodus auch kein Durchfluss an Dieselmotorkraftstoff registrieren lassen. Besteht keine Verbindung zwischen Pantographen und Fahrdrabt, sollte dies in einer ausbleibenden Übertragung elektrischer Energie von der Oberleitungsanlage via Pantographen zur E-Maschine beziehungsweise zum elektrischen Energiespeicher resultieren. Je Betriebsmodus müssten sich also verschiedene Energieflüsse detektieren lassen. Es erscheint nur logisch, deshalb zunächst die Forschungshypothese zu prüfen:

**Forschungshypothese H2a: Entsprechend dem Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws.**

Eingangs von Kapitel 4 wurde dargelegt, dass die Berechnung des Energieverbrauchs eines O-Lkws nicht ohne Weiteres möglich ist. Auf Basis der Fahrwiderstandsgleichung lässt sich der Energieverbrauch beispielsweise wegen fehlender Eingangsgrößen nicht berechnen. Unter Umständen ist eine theoriebasierte Berechnung jedoch auch gar nicht notwendig: Sollte es möglich sein, die Energieflüsse eines O-Lkws auf Grundlage der vorhandenen Vielfalt an Daten aus dem O-Lkw-Realbetrieb stichhaltig zu berechnen, entsprächen diese realdatenbasierten Ergebnisse dem überhaupt höchstmöglichen Detaillierungsgrad. Der Detaillierungsgrad überstiege dabei sogar den von solchen Ergebnissen, die aus der Anwendung einer lediglich theoriebasierten Formel resultierten. Es wurde bereits in Kapitel 3.2 ausgeführt, dass der Energieverbrauch von Fahrzeugen allgemein von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. In Kurzform zusammengefasst handelt es sich dabei um die Fahrzeugtechnik, die Fahrenden sowie den Anwendungsfall, in dem sich ein Fahrzeug befindet (FGSV Verlag 2018b, S. 11; Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 97 & S. 163; Hilgers 2016c, S. 9-10). Unter anderem MITSCHKE & WALLENTOWITZ (2014, S. 2) wiesen darauf hin, dass es in der Regel nicht möglich sein wird, auch all diese Einflussfaktoren bei Energieverbrauchsberechnungen berücksichtigen zu können; Abstriche und Vernachlässigungen seien in Kauf zu nehmen. An dieser Stelle wird jedoch zu hinterfragen sein, ob die auf den Realdaten basierenden Berechnungen der Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte überhaupt Einbußen hinsichtlich zu berücksichtigender Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch des O-Lkws einfordern werden. Denn lassen sich die Energieflüsse eines O-Lkws auf Basis der zur Verfügung stehenden Fahrzeugdaten berechnen, ließen sich darauf aufbauend auch präzise Schlussfolgerungen zum Energieverbrauch und ferner auch zu den Treibhausgasemissionen sowie zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials eines O-Lkws erarbeiten. Es ist deshalb zu prüfen:

**Forschungshypothese H2b: Die Energieflüsse eines O-Lkws können datenbasiert berechnet werden.**

Ergeben sich in Abhängigkeit des Betriebsmodus eines O-Lkws unterschiedliche Energieflüsse, muss angenommen werden, dass sich entsprechend des Betriebsmodus auch unterschiedliche Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws einstellen werden. Dies ist zu prüfen:

**Forschungshypothese H2c: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus des O-Lkws.**

Lassen sich durch die Verwendung feingranularer Daten aus dem Realbetrieb der O-Lkw zwar grundsätzlich sämtliche Einflussfaktoren des Energieverbrauchs berücksichtigen, resultiert dies am Ende zunächst allerdings auch in Ergebnissen, die lediglich Aussagen aggregierten Charakters erlauben.

Erfolgt keine umfassend kritische Reflektion, bergen die berechneten Ergebnisse großes Potenzial für Fehlinterpretationen. So wären auf dieser Basis beispielsweise allgemeine Hochrechnungen für das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des (zukünftigen) eHighway-Systems nur bedingt möglich; vertiefende Ausführungen hierzu erfolgen im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift. An dieser Stelle jedoch bereits relevant: Bekannt ist – siehe Kapitel 3.2 – dass sich die *Fahrzeugtechnik*, im engeren Sinn das Antriebskonzept eines Fahrzeugs, erheblich auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs auswirken kann (Küçükay 2022, S. 581). In einem O-Lkw agieren sowohl Verbrennungsmotor, als auch E-Maschine. Sie stellen entweder gemeinsam, oder die E-Maschine allein, die benötigte Traktionsenergie zur Verfügung. Kritisch zu hinterfragen sind jedoch unter anderem die Leistungsfähigkeit der E-Maschine und die hieraus resultierenden Auswirkungen auf den möglichen elektrischen Betrieb des O-Lkws. Bereits bei einem lediglich flüchtigen Blick auf die technischen Daten des O-Lkw-Antriebs zeigt sich ein unausgewogenes Verhältnis zwischen der Leistungsfähigkeit der verbauten E-Maschine mit 130 kW und dem verbauten Verbrennungsmotor mit 331 kW (450 PS). Es erscheint fraglich, ob die Leistungsfähigkeit der E-Maschine generell genügen wird, um den O-Lkw auch alleinig anzutreiben und falls ja, ob dies auch in jedem Anwendungsfall möglich sein wird. Die Leistungsfähigkeit der E-Maschine wird den Energieverbrauch des O-Lkws vermutlich also maßgeblich beeinflussen. So ist zu prüfen:

**Forschungshypothese H2d: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine.**

Einen Transport frei von Treibhausgasemissionen für den Straßengüterverkehr zu ermöglichen (oder zumindest deutlich reduziert im Vergleich zu einem konventionellen Pendant), indem ein O-Lkw während der Fahrt elektrische Energie von einer Oberleitungsanlage bezieht und diese anschließend für die Traktion verwendet, ist der Grundgedanke des eHighway-Systems. Der in einem O-Lkw verbaute elektrische Energiespeicher erlaubt dabei auch die elektrische Fahrt abseits von Strecken, die über eine Oberleitungsanlage verfügen (Lehmann, Wauri, u. a. 2021, S. 24; Wietschel u. a. 2017, S. 19; Jöhrens, Lehmann, u. a. 2022, S. 5). Nun kann ein O-Lkw allerdings nur dann elektrisch betrieben werden, wenn diesem entweder eine Oberleitungsanlage zur Verfügung steht, aus welcher durch den Pantographen elektrische Energie bezogen werden kann, oder aber der elektrische Energiespeicher über einen ausreichenden Ladestand zur Überwindung der zurückzulegenden Distanz verfügt. Steht keine Oberleitungsanlage zur Energiebereitstellung zur Verfügung oder ist die elektrische Energie im elektrischen Energiespeicher aufgebraucht, muss der Verbrennungsmotor die Traktionsaufgabe übernehmen oder aber der O-Lkw müsste seinen Betrieb einstellen. Je größer der Anteil an Streckenabschnitten ist, auf denen der Verbrennungsmotor die Traktion des O-Lkws maßgeblich übernimmt, desto mehr Dieselkraftstoff wird verbraucht. Oder im Umkehrschluss: Je größer der Anteil der zurückzulegenden Distanz, die durch den O-Lkw elektrisch gefahren werden kann, desto geringer wird der Verbrauch an Dieselkraftstoff ausfallen. Je weniger Dieselkraftstoff verbraucht wird, desto eher kann das eHighway-System seiner Zielstellung nachkommen – nämlich der Substitution von Streckenanteilen, die auf Basis des Verbrennungsmotors zurückgelegt werden durch Streckenanteile, die elektrisch bedient werden können. Der Anteil der durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierten Strecke, gemessen an der insgesamt zurückzulegenden Distanz, wird also einen ganz erheblichen Einfluss auf den sich einstellenden Energieverbrauch nehmen – so die Theorie. Es ist zu prüfen:

**Forschungshypothese H2e: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken.**



---

Ganz allgemein gilt es zu prüfen, ob der Energieverbrauch eines O-Lkws durch die Nutzung einer Oberleitungsanlage schlussendlich auch tatsächlich gesenkt werden kann. Zusammenfassend soll die Forschungshypothese untersucht werden:

**Forschungshypothese H2f: Der Energieverbrauch eines O-Lkws wird durch die Nutzung der Oberleitungsanlage gesenkt.**

#### **ERSTELLUNG VEREINFACHTER ENERGIEFLUSSSCHEMATA DIFFERENZIIERT NACH BETRIEBSMODI**

Im Rahmen der Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws wurde festgestellt, dass der Betrieb eines solchen vor allem durch die Interaktion der Komponenten *Verbrennungsmotor*, *E-Maschine*, *elektrischer Energiespeicher*, *Pantograph* und *Oberleitungsanlage* charakterisiert wird (siehe Kapitel 4.2). Es stellt sich nunmehr die Frage, wie diese Komponenten konkret miteinander interagieren, ob sich in Folge **verschiedene Energieflüsse** feststellen lassen und ob diese zu Besonderheiten hinsichtlich des sich einstellenden Energieverbrauchs führen können. Orientiert an den zusammengetragenen Grundlagen zur Fahrzeugtechnik in Kapitel 3.2 (siehe Ausführungen zu Verbrennungsmotoren, E-Maschinen und Parallelhybriden ab S. 40), lassen sich folgende Grundaxiome für die Energieflüsse eines O-Lkws aufstellen:

Die Traktionsaufgabe des O-Lkws kann entweder durch die E-Maschine allein oder durch das gemeinsame Agieren von E-Maschine und Verbrennungsmotor erfolgen. Für den **Verbrennungsmotor** lassen sich dabei grundsätzlich zwei Energieflüsse vermuten: (1) Entweder geht dieser seiner vorgesehenen Aufgabe nach, also der Verbrennung fossilen Dieselkraftstoffs zur Bereitstellung mechanischer Energie für die Traktion des O-Lkws. (2) Wird der Verbrennungsmotor aktiv genutzt, um einen Leistungsüberschuss zum Laden des elektrischen Energiespeichers zu erzeugen, bedarf es aber auch in irgendeiner Form der Verknüpfung mit dem elektrischen Teil des Antriebsstrangs des O-Lkws. Der Verbrennungsmotor kann dabei den elektrischen Energiespeicher allerdings nicht direkt bedienen – es bedarf zunächst einer Umwandlung der durch den Verbrennungsmotor erzeugten mechanischen Energie in speicherbare elektrische Energie. Die E-Maschine wird hierfür vermutlich als Generator zwischengeschaltet sein, bevor die Leistungsüberschüsse des Verbrennungsmotors durch den elektrischen Energiespeicher aufgenommen werden können.

Nun liegt der Grundgedanke des eHighway-Systems allerdings nicht darin begründet, stets auf die Verwendung eines Verbrennungsmotors angewiesen zu sein. Vielmehr soll durch das eHighway-System ein **vollständig elektrischer Betrieb von O-Lkw** ermöglicht werden, der perspektivisch die Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr (im Idealfall *vollständig*) unterbindet. Zwar verfügt die in dieser Dissertationsschrift betrachtete O-Lkw-Generation (noch) über einen Verbrennungsmotor, die Existenz dessen ist aber vor allem in dem Testcharakter des ELISA-Forschungsprojekts und der limitierten Verfügbarkeit an Streckenabschnitten mit nutzbarer Oberleitungsanlage begründet. Zur Aufrechterhaltung der Einsatzfähigkeit des aktuellen O-Lkws im Realbetrieb eines Transportunternehmens bedarf es schlichtweg einer Rückfallebene. Wird in Zukunft ein größeres Netz an Oberleitungsanlagen zur Verfügung stehen, kann gegebenenfalls jedoch auf den ergänzenden Einbau eines Verbrennungsmotors in O-Lkw verzichtet werden. Da der Verbrennungsmotor aber schon jetzt während des Betriebs des O-Lkws gelegentlich von seiner Traktionsaufgabe entbunden wird – beispielsweise im Elektrisch-Standardmodus – ist davon auszugehen, dass die E-Maschine das zentrale und unverzichtbare Schlüsselement im Antriebsstrang eines O-Lkws darstellt.

Es ist anzunehmen, dass die **E-Maschine** entweder als Energieverbraucher oder als Energiegenerator fungieren wird. Betrachtet werden soll zunächst die Funktion als Energiegenerator. Diesbezüglich zeigt sich einerseits der soeben beschriebene Energiefluss ausgehend von den Leistungsüberschüssen des Ver-

---

brennungsmotors, welcher via E-Maschine zum elektrischen Energiespeicher führen sollte. Andererseits sollte durch Rekuperationsprozesse kinetische Energie in elektrische Energie zurückgewonnen werden können, die ebenfalls – sofern nicht direkt wieder zur Traktion aufgewendet – an den elektrischen Energiespeicher tradiert wird. Kommt die E-Maschine hingegen ihrer Traktionsaufgabe nach, bedarf es hierzu eines gespiegelten Energieflusses. Es ist anzunehmen, dass die E-Maschine die für die Traktionsaufgabe benötigte elektrische Energie während des Oberleitungsbetriebs logischerweise auch aus der Oberleitungsanlage bezieht – es dürfte also ein Energiefluss zwischen Pantographen und E-Maschine bestehen. Der elektrische Betrieb des O-Lkws ohne Verbindung des Pantographen mit dem Fahrdrabt einer Oberleitungsanlage wird den Energiebezug aus dem elektrischen Energiespeicher erfordern, oder aber es erfolgen die vorstehend bereits beschriebenen Energieflüsse durch Leistungsüberschüsse des Verbrennungsmotors beziehungsweise durch Rekuperation.

Wird der **elektrische Energiespeicher** fokussiert, lässt sich für diesen einerseits die bereits beschriebene Versorgungs- und Empfängerabhängigkeit mit der E-Maschine festhalten. Darüber hinaus sollte sich außerdem entsprechend des Grundgedankens des eHighway-Systems – die dynamische Energieversorgung eines O-Lkws während der Fahrt mit elektrischer Energie aus einer Oberleitungsanlage – ein Energiefluss zwischen Pantographen und elektrischem Energiespeicher feststellen lassen.<sup>35</sup>

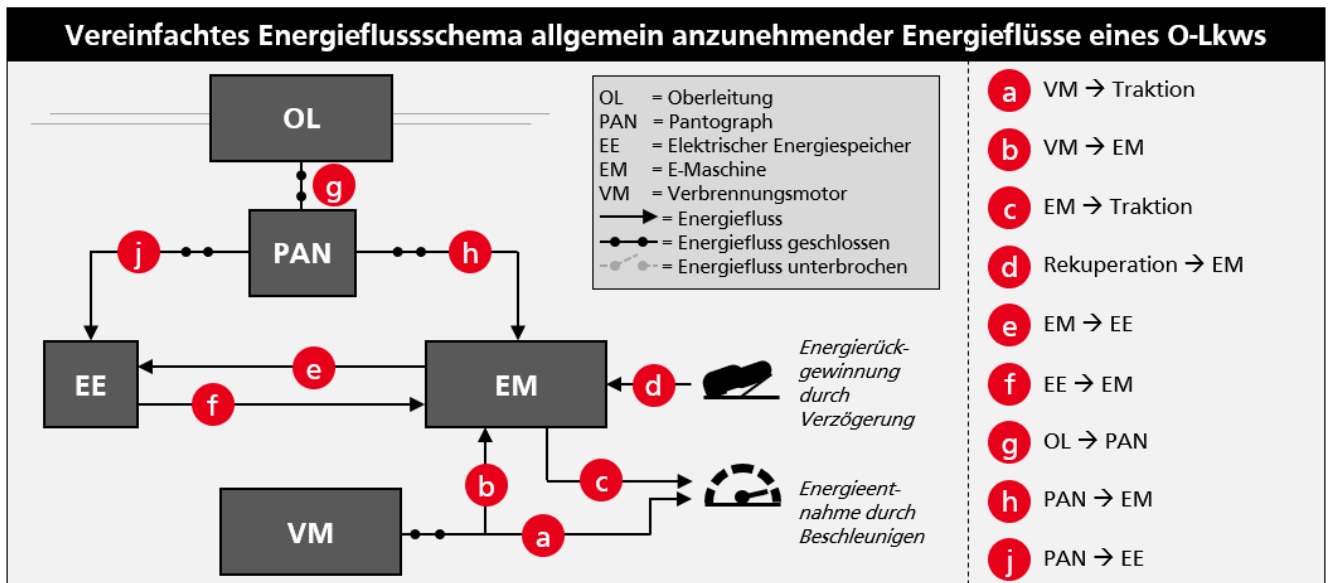
Auch für den **Pantographen** lassen sich mehrere Energieflüsse ableiten, die aus den vorstehenden Ausführungen teils bereits hervorgehen: Der Pantograph erhält elektrische Energie aus der Oberleitungsanlage aufgrund seiner kraftschlüssigen Verbindung mit dem Fahrdrabt. In Folge kann die aufgenommene elektrische Energie über zwei Stränge fahrzeugseitig weitergegeben werden: Entweder wird die elektrische Energie unmittelbar der E-Maschine für die Traktionsaufgabe zur Verfügung gestellt, oder der elektrische Energiespeicher wird mit Ladeenergie versorgt.<sup>35</sup>

Energieflüsse, die im Zusammenhang mit der **Oberleitungsanlage** zu vermuten sind, werden aus den vorstehenden Ausführungen ebenfalls bereits ersichtlich: Es handelt sich dabei im Wesentlichen um lediglich einen Energiefluss, ausgehend von der Oberleitungsanlage hin zum Pantographen, um den O-Lkw mit elektrischer Traktionsenergie sowie elektrischer Ladeenergie zu versorgen.<sup>35</sup>

Werden die vorstehend beschriebenen Zusammenhänge gesamtheitlich betrachtet, zeigen sich summa summarum also mindestens *neun Energieflüsse eines O-Lkws*, die sich unterscheiden lassen sollten (zumindest in der Theorie). Angelehnt an das in Kapitel 3.2 eingeführte vereinfachte Schema zum Antriebsstrang eines Parallelhybrid-Fahrzeugs (siehe Abbildung 11, S. 44), fasst nachfolgende Abbildung 22 die vermuteten Energieflüsse eines O-Lkws zur besseren Nachvollziehbarkeit nochmals grafisch in Form eines allgemeinen O-Lkw-Energieflussschemas zusammen. Dem Anhang (S. A19) lassen sich darüber hinaus zusätzlich Energieflussschemata differenziert nach sämtlichen identifizierten Betriebsmodi entnehmen.

---

<sup>35</sup> Theoretisch wäre auch eine Rückeinspeisung von elektrischer Energie vom O-Lkw via Pantographen in die Oberleitungsanlage und von dort aus in das Stromnetz möglich. Dies wird aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen gegenwärtig allerdings technisch verhindert. So resultiert hieraus, dass oberleitungsanlagenseitig lediglich ein Energiefluss von Oberleitungsanlage zum Pantographen möglich ist.



**Abbildung 22: Energieflussschema vermuteter Energieflüsse eines O-Lkws**  
 (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Herausforderung wird nun darin bestehen, die vermuteten Energieflüsse eines O-Lkws auch datenbasiert identifizieren und berechnen zu können. Ohne Zweifel bedarf es hierfür der Verfügbarkeit geeigneter Eingangsdaten. Fraglich ist allerdings, ob die vorhandene Datenbasis entsprechende Energieflussberechnungen zulassen wird.

Aufbauend auf den bereits erlangten Erkenntnissen im Zusammenhang der Betriebsmodiidentifikation von O-Lkw im vorherig durchgeführten Teilverfahren (siehe Kapitel 4.2), wird dieser Frage nun in den nachfolgenden Abschnitten dieser Dissertationsschrift durch die Zusammenstellung von für die Berechnungen potenziell relevanten Parametern nachgegangen.

#### ZUSAMMENSTELLUNG VON FÜR DIE BERECHNUNGEN POTENZIELL RELEVANTEN PARAMETERN

Die Sichtung der erfassten Fahrzeugdaten gemäß den aufgestellten Logik-Kriterien (*Bezeichnung des Parameters im zur Verfügung gestellten Datensatz lässt Eignung für die durchzuführenden Analysen vermuten; für den Parameter werden Daten aufgezeichnet* – siehe Kapitel 4.3.1) führt zunächst zu **26 Parametern, die für die Berechnung von Energieflüssen** gegebenenfalls geeignet sein könnten. Tabelle 8 führt hierzu entsprechend aus.

Eine aufbauende Analyse dieser 26 vorausgewählten Parameter mithilfe von Verlaufsidagrammen<sup>36</sup> zeigt jedoch, dass für vier der Parameter zwar eingehende Daten festgestellt werden können, diese aber dauerhaft einen gleichbleibenden, konstanten Wert aufweisen. Diese vier Parameter erweisen sich für die Durchführung der weiteren Untersuchungen als ungeeignet und sind von den aufbauenden Überlegungen entsprechend auszuschließen. Dennoch verbleiben 22 Parameter, die – sollten sie korrekt gedeutet werden können und über plausible Werte verfügen – vielversprechendes Potenzial bergen.

Die im nachfolgenden Verfahrensschritt durchzuführenden Teilaufgaben werden zeigen, ob sich die bis hierhin angenommenen Energieflüsse eines O-Lkws als weiteren essenziellen Meilenstein zur belastbaren Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems also tatsächlich berechnen lassen werden. Aufgrund der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Parameter erscheint dies aber vermutlich keine unlösbare Herausforderung darzustellen.

<sup>36</sup> Die erstellten und für diese Teilaufgabe analysierten Verlaufsdiagramme können dem Anhang (S. A20) entnommen werden.

**Tabelle 8: Für die Berechnung von Energieflüssen eines O-Lkws potenziell geeignete Parameter**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

BatteryCurrent	<i>AvailableGridReturnCurrent</i>	MeasuredVehicleVoltageGbox
BatterySOC	AvailableGridSupplyCurrent	EM_Current (A)
BatteryVoltage	ReqDcLinkSupplyCurrent	EM_Voltage (V)
ActualDcLinkSupplyCurrent	ActualDcdcVoltage	FuelRate (L/h)
ActualGridSupplyCurrent	ActualDcLinkSupCurrent	InstantaneousFuelEconomy (km/L)
ActualGridVoltage	MeasuredOclCurrent	<i>TripFuel(L)</i>
AuxiliaryVcbCurrent	MeasuredOclCurrentGbox	TotalFuelUsed (L)
<i>AvailableDcLinkReturnCurrent</i>	MeasuredOclVoltage	<i>AverageFuelEconomy (km/L)</i>
AvailableDcLinkSupplyCurrent	MeasuredOclVoltageGbox	

*Für die durchgestrichenen Parameter lassen sich lediglich konstante Werte feststellen. Sie erweisen sich für die weiteren Untersuchungen als ungeeignet.*

### 4.3.3 METHODE ZUR DATENBASIERTEN BERECHNUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS

Unter Einbezug der bislang erarbeiteten Erkenntnisse soll eine **Methode entwickelt** werden, deren Anwendung die datenbasierte Berechnung der neun identifizierten Energieflüsse eines O-Lkws (siehe Abbildung 22) erlaubt. Um eine solche Berechnungsmethode aufzustellen, wurde iterativ vorgegangen.

Die im vorstehenden Verfahrensschritt zusammengestellten Parameter, die für die Berechnung der Energieflüsse potenziell geeignet sein könnten, wurden hierfür zu Beginn einer Detailanalyse unterzogen. Es wurden **entsprechend der Parameterbezeichnungen sinnvolle Gruppierungen** gebildet. So erscheint es logisch, dass beispielsweise die Parameter „MeasuredOclCurrent“ und „MeasuredOclVoltage“ zusammen zu betrachten sind, genauso wie beispielsweise „MeasuredOclCurrentGbox“ und „MeasuredOclVoltageGbox“.

Ferner wurde versucht, die zusammengestellten Parametergruppierungen – beziehungsweise auch Einzelparameter, sollten sich diese in keine der gebildeten Parametergruppierung einsortieren lassen – einem vermeintlich zugehörigen Energiefluss zuzuordnen. Durch zahlreiche Zuordnungsversuche und Testberechnungen war es letztlich möglich, die **Datenerhebungspunkte einiger Parameter im Antriebsstrang des O-Lkws zu lokalisieren** und hierauf aufbauend die Berechnung der wesentlichen Energieflüsse eines O-Lkws auf Basis der vorliegenden Fahrzeugdaten tatsächlich vorzunehmen. Zeitgleich wurde jedoch festgestellt, dass die vorliegende Datenbasis nicht genügt, um auch alle der angenommenen Energieflüsse zu berechnen. Die nachfolgenden Erläuterungen führen hierzu entsprechend aus.

#### BERECHNUNGSGRUNDLAGEN ZUR DATENBASIERTEN ERMITTLUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS

Zur Berechnung von Energieflusskennwerten eines O-Lkws zeigt sich, dass in Summe neun der 22 vorausgewählten Parameter (siehe Tabelle 8) herangezogen werden können. Sollen die Energieflusskennwerte dabei differenziert nach den zu unterscheidenden Betriebsmodi berechnet werden, bedarf es in logischer Konsequenz ebenfalls der drei zur Betriebsmodiidentifikation benötigten Parameter, welche in Kapitel 4.2.4 bereits eingeführt wurden.

Allgemein zeigt sich, dass es zur Berechnung von Energieflusskennwerten darüber hinaus der Kenntnis über die zwischen zwei Records zurückgelegte Distanz sowie der zwischen zwei Records verstrichenen Zeit bedarf. Diese Informationen lassen sich den zur Verfügung stehenden Fahrzeugdaten entnehmen („Time“ und „HighResolTotalVehicleDistance“).

In Summe sind die 14 in Tabelle 9 gelisteten **Parameter für die Berechnung von Energieflusskennwerten eines O-Lkws** heranzuziehen.

**Tabelle 9: Für die Berechnung von Energieflüssen eines O-Lkws heranzuziehende Parameter**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Originalname des Parameters im zur Verfügung gestellten Datensatz	Abgeleiteter „Klarname“ des Parameters	Verwendete Abkürzung des Parameters im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift
Time	Zeitstempel	$t$
HighResolTotalVehicleDistance	Kilometerstand	- keine -
EngineSpeed (rpm)	Drehzahl des Verbrennungsmotors	- keine -
PowerManagerEngineState	Betriebszustand des Verbrennungsmotors	- keine -
PantographActualStatus	Pantographenstatus	- keine -
FuelRate (L/h)	Fließrate Dieselkraftstoff	- keine -
EM_Current (A)	Stromstärke an der E-Maschine	$EM_{Stromstärke}$
EM_Voltage (V)	Spannung an der E-Maschine	$EM_{Spannung}$
BatteryCurrent	Stromstärke am elektrischen Energiespeicher	$EE_{Stromstärke}$
BatteryVoltage	Spannung am elektrischen Energiespeicher	$EE_{Spannung}$
MeasuredOclCurrentGbox	Stromstärke am Fahrdrat	$OL_{Stromstärke}$
MeasuredOclVoltageGbox	Spannung am Fahrdrat	$OL_{Spannung}$
MeasuredOclCurrent	Stromstärke am Pantographen	$PAN_{Stromstärke}$
MeasuredOclVoltage	Spannung am Pantographen	$PAN_{Spannung}$

#### VORÜBERLEGUNG ZUR AUFSTELLUNG VON BERECHNUNGSGRUNDLAGEN ZUR DATENBASIERTE ERMITTLUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS

Bevor die Aufstellung von Berechnungsgrundlagen zur datenbasierten Ermittlung von Energieflüssen eines O-Lkws erfolgen kann, ist es zielführend, eine Vorüberlegung zur angestrebten **Ergebnisgranularität** vorwegzunehmen:

Es ist weithin geläufig, dass Energieflusskennwerte meist als **standardisierte Durchschnittswerte** vorliegen. Die bekanntesten Energieflusskennwerte sind bei einem Verbrennungsmotor der Kraftstoffverbrauch, bei Elektrofahrzeugen der Verbrauch elektrischer Energie (umgangssprachlich auch als *Stromverbrauch* bezeichnet) beziehungsweise die Laderate des elektrischen Energiespeichers. Gebräuchlich ist die Angabe eines Energieflusskennwerts je 100 Kilometer. Hierdurch wird eine Vergleichbarkeit verschiedener Fahrzeuge und Fahrzeugtypen sichergestellt. Es erscheint folglich zielführend, Energieflusskennwerte eines O-Lkws ebenfalls in einer solchen Granularität aufzubereiten.

#### BERECHNUNG DER ENERGIEFLÜSSE DES VERBRENNUNGSMOTORS EINES O-LKWS

Zuerst werden die Berechnungen der Energieflüsse des Verbrennungsmotors eines O-Lkws fokussiert. Für den Verbrennungsmotor wurden gemäß Abbildung 22 zwei wesentliche Energieflüsse identifiziert: einerseits die Bereitstellung von Traktionsenergie (*Energiefluss a*), andererseits die Erzeugung von Leistungsüberschüssen zum Laden des elektrischen Energiespeichers (*Energiefluss b*). Auf Basis der vorliegenden Fahrzeugdaten lässt sich eine solche Differenzierung für die Berechnung der Energieflüsse des Verbrennungsmotors allerdings nicht vornehmen. Es kann nur **ein gesamter Energiefluss des Verbrennungsmotors** berechnet werden, ausgedrückt als der in Summe verbrauchte Dieselkraftstoff (*entspricht der Summe aus den Energieflüssen a+b*). Inwieweit sich der verbrauchte Dieselkraftstoff in Folge in die Bereitstellung von Traktions- beziehungsweise Ladeenergie aufteilt, kann datenbasiert nicht weiter konkretisiert werden. Wie an vorheriger Stelle in dieser Dissertationsschrift bereits ausgeführt, zeigen gesammelte Erfahrungen im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts jedoch, dass durch die Fahrenden des O-Lkws von der Funktion des Zwangsladens nur verhältnismäßig selten Gebrauch



gemacht wird<sup>37</sup>. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei dem berechneten Dieseldieselfkraftstoffverbrauch im Wesentlichen also um die Bereitstellung der benötigten Traktionsenergie handeln dürfte. Um den Dieseldieselfkraftstoffverbrauch in der gängigen Einheit  $l/100km$  zu berechnen, konnte schlussendlich nachfolgende Formel 4 aufgestellt werden:

$$VM_{Kraftstoffverbrauch, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{l}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \text{Fließrate Dieseldieselfkraftstoff } f_k \left[ \frac{l}{h} \right] \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

**Formel 4: Berechnung des Kraftstoffverbrauchs eines O-Lkws**

(Quelle: Eigene Darstellung)

Das **Grundprinzip der aufgestellten Gleichung** basiert auf einer Division aus benötigtem Dieseldieselfkraftstoff für eine zurückgelegte Distanz. Die Gleichung fußt dabei im Wesentlichen auf einer Verrechnung des Parameters „Fließrate Dieseldieselfkraftstoff“. Jeder Record gibt Aufschluss über die unmittelbar zum Erhebungszeitpunkt gemessene Fließrate des Dieseldieselfkraftstoffs, erfasst zwischen Dieseltank und Verbrennungsmotor sowie vorliegend in der Einheit  $l/h$ . Eine Multiplikation dieses Werts mit der Zeitdifferenz von 0,1 Sekunden zwischen zwei Records – umgerechnet in die Einheit  $h$  – ermöglicht die Berechnung, wie viel Dieseldieselfkraftstoff (in  $l$ ) in dieser Zeit geflossen ist. Wird die aufgewendete Menge an Dieseldieselfkraftstoff anschließend in ein Verhältnis gesetzt mit der in der gleichen Zeit durch den O-Lkw zurückgelegten Distanz in  $km$  (also die Differenz aus dem erfassten Kilometerstand eines Records  $k$  mit dem erfassten Kilometerstand des vorherig erfassten Records  $k - 1$ ), so resultiert hieraus ein Durchschnittswert für den Dieseldieselfkraftstoffverbrauch eines O-Lkws in der Einheit  $l/km$ . Um die für Vergleichszwecke häufig wiederzufindende Angabe eines Durchschnittswerts für den Kraftstoffverbrauch in der Einheit  $l/100 km$  zu ermitteln, erfolgt abschließend zusätzlich eine Multiplikation des Ergebnisses mit dem Faktor 100.

Die Fließrate des Dieseldieselfkraftstoffs eines O-Lkws unterliegt in Abhängigkeit des Anwendungsfalls, in dem ein O-Lkw operiert, (teils erheblichen) Schwankungen: Bedarf es zur Überwindung von Steigungen einer höheren Antriebsleistung, wird beispielsweise mehr Dieseldieselfkraftstoff fließen; fährt der O-Lkw bergab, wird eine geringere, gegebenenfalls sogar eine gegen Null gehende Fließrate des Dieseldieselfkraftstoffs festzustellen sein<sup>38</sup>. Es ist also **nicht sinnig, lediglich einen Record** für die Berechnung eines durchschnittlichen Kennwerts für den Dieseldieselfkraftstoffverbrauch eines O-Lkws heranzuziehen. Vielmehr bedarf es der Aufsummierung vieler Einzelrecords  $n$ . Je größer die Anzahl der für die Berechnung herangezogenen Records dabei ist, desto höher wird die Ergebnisgenauigkeit schlussendlich auch sein.

Soll eine **Berechnung differenziert nach Betriebsmodi** erfolgen, sind sinnigerweise nur solche Records für die Berechnung zu berücksichtigen, die im Vorhinein dem jeweils zu betrachtenden Betriebsmodus zugeordnet wurden.<sup>39</sup>

**BERECHNUNG DER ENERGIEFLÜSSE DER E-MASCHINE EINES O-LKWS**

Die **E-Maschine stellt den zentralen Dreh- und Angelpunkt im Antriebsstrang eines O-Lkws** dar. Es verwundert nicht, dass dies in Folge auch in einer Vielzahl von Energieflüssen resultiert, für welche die E-Maschine eine Empfänger- beziehungsweise eine Versenderrolle einnehmen kann. Aus Abbildung 22 geht hervor, dass die Aktivität der E-Maschine in bis zu sechs Energieflüssen resultieren kann (*Energieflüsse c, d, e, f und h*). Die Analyse der vorliegenden Fahrzeugdaten zeigt jedoch, dass auf Basis der E-Maschine selbst lediglich zwei aggregierte, aber dennoch sehr wesentliche Energieflüsse berechnet

<sup>37</sup> Siehe hierzu auch Ausführungen in Kapitel 4.2.4.

<sup>38</sup> Siehe hierzu auch Abbildung 83, S. A23.

<sup>39</sup> Der Aufbau der nachfolgenden Gleichungen 5 bis 10 basiert auf dem gleichen, vorstehend beschriebenen Grundprinzip. Es wird im Folgenden auf erneute, repetitive Erläuterungen des dargelegten Grundprinzips verzichtet. Es werden lediglich Besonderheiten explizit hervorgehoben.

werden können: Einerseits lässt sich die in Summe durch die E-Maschine aufgewendete elektrische Energie ermitteln. Andererseits ist es möglich, ebenfalls die durch die E-Maschine erzeugte elektrische Energie zu berechnen. Hierfür genutzt werden können die beiden Parameter  $EM_{Stromstärke}$  sowie  $EM_{Spannung}$ . Die Multiplikation beider Parameter resultiert in der je Record verbrauchten beziehungsweise erzeugten Menge elektrischer Energie in  $W$ . Die Division durch den Faktor 1.000 erlaubt die Umrechnung von  $W$  in  $kWh$ .

Ob die **E-Maschine elektrische Energie aufwendet, oder aber erzeugt**, lässt sich datenbasiert anhand des Parameters  $EM_{Stromstärke}$  feststellen. Auf Basis der Erkenntnisse aus überwachten Forschungsfahrten konnte analysiert werden, dass immer dann, wenn für diesen Parameter positive Werte registriert werden, elektrische Energie verbraucht wird. Sobald hingegen negative Werte vorliegen, wird entsprechend elektrische Energie erzeugt. Da lediglich das Vorzeichen dieses Parameters über Verbrauch beziehungsweise Erzeugung elektrischer Energie entscheidet, ist es von besonderer Wichtigkeit, diesen Zusammenhang durch eine Einschränkung des zulässigen Definitionsbereichs in den aufzustellenden Berechnungsgleichungen zu verankern. Formel 5 und Formel 6 führen hierzu entsprechend aus:

$$EM_{Stromverbrauch, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{EM_{Stromstärke,k} [A] \times EM_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

mit  $D = \{EM_{Stromstärke} [A] \mid \geq 0\}$

**Formel 5: Berechnung des Stromverbrauchs eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

$$EM_{Stromerzeugung, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{EM_{Stromstärke,k} [A] \times EM_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

mit  $D = \{EM_{Stromstärke} [A] \mid < 0\}$

**Formel 6: Berechnung der Stromerzeugung eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

#### BERECHNUNG DER ENERGIEFLÜSSE DES ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERS EINES O-LKWS

Die **Energieflüsse im Zusammenhang des elektrischen Energiespeichers eines O-Lkws** lassen Parallelen zu den Erkenntnissen der Berechnung von Energieflüssen der E-Maschine erkennen. So lassen sich auch für den elektrischen Energiespeicher ausschließlich zwei Energieflüsse berechnen: Auf Basis der vorliegenden Fahrzeugdaten kann einerseits ermittelt werden, wie viel elektrische Energie durch den elektrischen Energiespeicher der E-Maschine für ihre Traktionsaufgabe zur Verfügung gestellt wird, ausgedrückt als  $EE_{Traktionsstrom}$  (siehe Formel 8). Andererseits lässt sich berechnen, wie viel elektrische Energie dem elektrischen Energiespeicher als Ladeenergie insgesamt zugeht, ausgedrückt als  $EE_{Laderate, gesamt}$  (siehe Formel 7). Der berechnete Wert für die  $EE_{Laderate, gesamt}$  setzt sich dabei zusammen aus der durch die E-Maschine bereitgestellten elektrischen Energie, sowie gegebenenfalls aus der via den Pantographen bereitgestellten Ladeenergie aus der Oberleitungsanlage. Zur Berechnung dieser beiden Energieflüsse bedarf es der beiden Parameter  $EE_{Stromstärke}$  sowie  $EE_{Spannung}$ , ebenfalls mit besonderem Augenmerk auf den Definitionsbereich des Parameters  $EE_{Stromstärke}$ . Nimmt dieser Parameter negative Werte an, wird der elektrische Energiespeicher geladen; nimmt dieser Parameter positive Werte an, wird durch den elektrischen Energiespeicher Traktionsstrom für die E-Maschine bereitgestellt.

$$EE_{Laderate, gesamt, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{EE_{Stromstärke,k} [A] \times EE_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

mit  $D = \{EE_{Stromstärke} [A] | < 0\}$

**Formel 7: Berechnung der Gesamt-Laderate des elektrischen Energiespeichers eines O-Lkws**

(Quelle: Eigene Darstellung)

$$EE_{Traktionsstrom, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{EE_{Stromstärke,k} [A] \times EE_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

mit  $D = \{EE_{Stromstärke} [A] | \geq 0\}$

**Formel 8: Berechnung der Bereitstellung von Traktionsstrom durch den elektrischen Energiespeicher eines O-Lkws**

(Quelle: Eigene Darstellung)

#### BERECHNUNG DER ENERGIEFLÜSSE VON OBERLEITUNGSANLAGE UND PANTOGRAPHEN EINES O-LKWS

Als einziger Kontaktpunkt zwischen O-Lkw und Oberleitungsanlage wird dem **Pantographen** eine **zentrale Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des O-Lkws** beigemessen. Der Pantograph nimmt die aus der Oberleitungsanlage bereitgestellte elektrische Energie auf (siehe *Energiefluss g* in Abbildung 22, S. 77) und transferiert diese einerseits an die E-Maschine (*Energiefluss h*) beziehungsweise andererseits an den elektrischen Energiespeicher (*Energiefluss j*). Die intensive Auseinandersetzung mit den vorliegenden Fahrzeugdaten zeigt, dass zumindest zwei der drei Energieflüsse unmittelbar berechnet werden können. Es ist möglich, die insgesamt durch den Pantographen aus der Oberleitungsanlage bezogene elektrische Energiemenge, ausgedrückt als  $PAN_{Gesamtstromaufnahme}$ , datenbasiert zu berechnen. Für diese Berechnung herangezogen werden die fahrzeugseitig erfassten Parameter  $OL_{Stromstärke}$  sowie  $OL_{Spannung}$  (siehe Formel 9).

Auch der Energiefluss vom Pantographen zur E-Maschine, ausgedrückt als  $PAN_{Traktionsstrom}$ , lässt sich basierend auf den vorliegenden Fahrzeugdaten unmittelbar berechnen. Die aufgestellte Gleichung bedient sich hierbei der beiden Parameter  $PAN_{Stromstärke}$  und  $PAN_{Spannung}$  (siehe Formel 10).

Für beide Gleichungen – Formel 9 und Formel 10 – muss eine Einschränkung des Definitionsbereichs berücksichtigt werden. Wie vorstehend bereits erläutert, ist eine Rückspeisung elektrischer Energie durch den O-Lkw in das Mittelspannungsnetz via Oberleitungsanlage theoretisch möglich, wird derzeit jedoch technisch unterbunden (insbesondere aus rechtlichen Gründen). Die Auswertung der Fahrzeugdaten zeigt allerdings, dass (zwar selten) aber gelegentlich durchaus eine solche Energierückspeisung auftreten kann. Um sicherzustellen, dass diese Energierückspeisung die berechneten Ergebnisse nicht verfälscht (die Energieströme würden sich gegenseitig zu Teilen neutralisieren), muss der Definitionsbereich für die Parameter  $OL_{Stromstärke}$  und  $PAN_{Stromstärke}$  auf ausschließlich positive Werte beschränkt werden.

$$PAN_{Gesamtstromaufnahme, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{OL_{Stromstärke,k} [A] \times OL_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

mit  $D = \{OL_{Stromstärke} [A] | \geq 0\}$

**Formel 9: Berechnung der Gesamtstromaufnahme durch den Pantographen eines O-Lkws aus der Oberleitungsanlage**

(Quelle: Eigene Darstellung)

$$PAN_{Traktionsstrom, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = \frac{\sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{PAN_{Stromstärke,k} [A] \times PAN_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]}{\sum_{k=i}^n [Kilometerstand_k [km] - Kilometerstand_{k-1} [km]]} \times 100$$

mit  $D = \{OL_{Stromstärke} [A] \mid \geq 0\}$

**Formel 10: Berechnung der Bereitstellung von Traktionsstrom durch den Pantographen eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Der **Energiefluss vom Pantographen zum elektrischen Energiespeicher**, also die pantographen-basierte Laderate, lässt sich anhand der zur Verfügung stehenden Fahrzeugdaten nicht unmittelbar berechnen. Dieser Energiefluss, auch als  $PAN_{Laderate}$  bezeichnet, ist für die weiteren Analysen jedoch von unschätzbarem Wert. Die gesamtheitliche Betrachtung der vorstehend bereits aufgestellten Berechnungsgrundlagen führt allerdings zu der Erkenntnis, dass auf Basis einer Differenzbildung zumindest indirekt auf diese bedeutungsvolle Information geschlossen werden können sollte. Es lässt sich eine Annäherungsgleichung aufstellen, basierend auf den bereits vorliegenden Kenntnissen zum Verhalten der Energieflüsse des elektrischen Energiespeichers: Der elektrische Energiespeicher kann bekanntermaßen aus zwei Quellen mit elektrischer Energie geladen werden: der E-Maschine sowie dem Pantographen. Die Menge an elektrischer Energie, die durch die E-Maschine bereitgestellt wird, ist bekannt – siehe Formel 6. Auch ist bekannt, wie hoch die Laderate des elektrischen Energiespeichers in Summe ist – siehe Formel 7. Da der elektrische Energiespeicher zusätzlich ausschließlich weitere elektrische Energie vom Pantographen erhalten kann, muss es in Folge also möglich sein, eine Differenz zu berechnen. Diesen Zusammenhang macht sich die aufgestellte Formel 11 zu Nutzen und bildet zur Berechnung der  $PAN_{Laderate}$  entsprechend also die Differenz aus der insgesamt in den elektrischen Energiespeicher eingehenden elektrischen Energiemenge  $EE_{Laderate, gesamt}$  abzüglich der durch die E-Maschine bereitgestellten elektrischen Energie  $EM_{Stromerzeugung}$ . Nachfolgende Formel 11 zeigt die aufgestellte Annäherungsgleichung zur Berechnung der Laderate des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen eines O Lkws entsprechend auf:

$$PAN_{Laderate, Betriebsmodus} \times \left[ \frac{kWh}{100km} \right] = EE_{Laderate, gesamt, Betriebsmodus} - EM_{Stromerzeugung, Betriebsmodus}$$

**Formel 11: Berechnung der Laderate des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

In Theorie ließen sich auch anderweitige Verrechnungen anstellen, um Informationen über die  $PAN_{Laderate}$  zu erhalten. So könnte beispielsweise auch eine Differenz gebildet werden aus den beiden errechneten Größen  $PAN_{Gesamtstromaufnahme}$  abzüglich  $PAN_{Traktionsstrom}$ . Der **maßgebende Vorteil von dem in Formel 11 realisierten Zusammenhang** ist jedoch dieser, dass hierdurch etwaige Widerstände, Nebenverbraucher und Verluste im betrachteten Energiefluss berücksichtigt werden können; es erfolgt eine Berechnung der  $PAN_{Laderate}$  auf Basis der tatsächlich eingehenden Energiemenge am elektrischen Energiespeicher, nicht auf Basis der ausgehenden Energiemenge am Pantographen. Denn so wird sich im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift zeigen, dass die Aufnahme elektrischer Energie durch den Pantographen von der Oberleitungsanlage durchaus zu Widerständen/Verlusten führt, beziehungsweise Nebenverbraucher mitversorgt werden. Es sollte angenommen werden, dass die Addition der elektrischen Energiemengen der beiden möglichen Energieflüsse  $PAN_{Traktionsstrom}$  und  $PAN_{Laderate}$  zumindest ungefähr gleich der elektrischen Energiemenge der berechneten Größe  $PAN_{Gesamtstromaufnahme}$  sein dürfte. Doch zeigt sich an dieser Stelle ein nicht ganz unerhebliches Delta, vermutlich zurückzuführen auf entsprechende Nebenverbraucher und/oder Widerstände und Verluste. Gegebenenfalls handelt es sich hierbei (zusätzlich) auch um einen Eigenbedarf des Pantographen.<sup>40</sup> Es erscheint folglich nur konsequent, auch

<sup>40</sup> Eine vertiefende Analyse solcher Nebenverbraucher wird im Rahmen dieser Dissertationsschrift nicht durchgeführt, sollte aber Untersuchungsgegenstand aufbauender Forschungsarbeiten sein.

einen solchen Kennwert, ausgedrückt als  $PAN_{NV\&V_{Stromverbrauch}}$ , für eine gesamtheitliche Betrachtung der Energieflüsse eines O-Lkws auszuweisen. Dies erfolgt anhand der nachfolgenden Formel 12:

$$PAN_{NV\&V_{Stromverbrauch, Betriebsmodus X}} \left[ \frac{kWh}{100km} \right] =$$

$$PAN_{Gesamtstromaufnahme, Betriebsmodus X} - PAN_{Traktionsstrom, Betriebsmodus X} - PAN_{Laderate, Betriebsmodus X}$$

**Formel 12: Berechnung des Stromverbrauchs durch Nebenverbraucher und allgemeine Verluste während der angebugelten Fahrt eines O-Lkws** (Quelle: Eigene Darstellung)

BERECHNUNG DER GESAMTSTROMAUFNAHME DURCH DEN PANTOGRAPHEN EINES O-LKWS AUS DER OBERLEITUNGSANLAGE, OHNE ZEITGLEICHES LADEN DES ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERS

Es wurde bereits dazu ausgeführt, dass sich die Betriebsmodizusammensetzung des O-Lkw-Betriebs bei zunehmender Verbreitung des eHighway-Systems verändern kann. Stehen mehr und dabei auch längere Streckenabschnitte zur Verfügung, die mit Oberleitungsanlagen elektrifiziert wurden, wird der elektrische Energiespeicher eines O-Lkws gegebenenfalls seine maximale Kapazitätsgrenze erreichen. Tritt dieser Fall ein, wird der O-Lkw ab diesem Zeitpunkt nur noch für die Traktion benötigte elektrische Energie aus der Oberleitungsanlage beziehen. Dieser Zustand tritt im aktuellen ELISA-Forschungsprojekt aufgrund der beschränkten elektrifizierten Streckenlänge noch nicht ein. Für Hochrechnungen ist diese Veränderung und der reduzierte Gesamtstrombezug des O-Lkws aus der Oberleitungsanlage aber zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4.2.4).

Um die durch den Pantographen eines O-Lkws **aus der Oberleitungsanlage bezogene elektrische Energiemenge** zu berechnen, **ohne dass dabei zeitgleich der elektrische Energiespeicher** durch den Pantographen mit Ladeenergie aus der Oberleitungsanlage versorgt wird, wird nachfolgende Formel 13 eingeführt. Es ist aus den vorstehenden Ausführungen bekannt, dass sich die durch den Pantographen insgesamt aus der Oberleitungsanlage bezogene elektrische Energie  $PAN_{Gesamtstromaufnahme}$  zusammensetzt aus einer Addition der Größen  $PAN_{Traktionsstrom}$ ,  $PAN_{Laderate}$  und  $PAN_{NV\&V_{Stromverbrauch}}$ . Erfolgt nun keine Ladung des elektrischen Energiespeichers mit elektrischer Energie aus der Oberleitungsanlage, wird sich die durch den Pantographen insgesamt aufgenommene elektrische Energie via Oberleitungsanlage entsprechend um diese nun ausbleibende elektrische Energiemenge  $PAN_{Laderate}$  reduzieren.

$$PAN_{Gesamtstromaufnahme, ohne Laden, Betriebsmodus X} \left[ \frac{kWh}{100km} \right] =$$

$$PAN_{Gesamtstromaufnahme, Betriebsmodus X} - PAN_{Laderate, Betriebsmodus X}$$

**Formel 13: Berechnung der Gesamtstromaufnahme durch den Pantographen eines O-Lkws aus der Oberleitungsanlage, ohne Laden des elektrischen Energiespeichers** (Quelle: Eigene Darstellung)

## DATENBEREINIGUNGSVERFAHREN IM KONTEXT DER ERMITTLUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS

Bereits im Zusammenhang mit der Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws wurde auf die Notwendigkeit der **Integration eines Datenbereinigungsverfahrens** hingewiesen – siehe Kapitel 4.2.4, insbesondere ab S. 68. Für die datenbasierte Zuordnung von Records zu jeweils einem Betriebsmodus genügen drei Parameter; es war möglich, das bisherige Datenbereinigungsverfahren entsprechend schmal auszuprägen. Die datenbasierte Berechnung von Energieflüssen eines O-Lkws erfordert nun allerdings die Integration weiterer elf Parameter. Das bis hierhin verwendete Datenbereinigungsverfahren behält im Grundsatz seine Gültigkeit, wird aber entsprechend der nachfolgenden Aspekte ergänzt.

Es wird ein **aus zwei Arbeitsschritten aufgebautes Datenbereinigungsverfahren** erarbeitet. Im ersten Arbeitsschritt wird der Rohdatensatz um unvollständige Records bereinigt: Fehlen für einen der für die Analysen zwingend benötigten Parameter Daten (im Datensatz gekennzeichnet durch die Angabe „N/A“), so können solche Records für die weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt werden. Diese Records werden aus dem weiterzuverwendenden Datensatz entsprechend entfernt. Im zweiten Teil-



schritt erfolgt eine Bereinigung der vorhandenen Daten um Ausreißer. Hierfür werden individuell je Parameter untere und obere Schwellenwerte festgelegt. Sollten für einen Parameter Werte außerhalb des festgelegten Bereichs festgestellt werden, führt dies zu einem Ausschluss des gesamten betroffenen Records von den weiteren Analysen. Im Einzelnen werden folgende Schwellenwerte implementiert:

Die **Zeitdifferenz** zwischen zwei Records darf eine Differenz von 0,15 Sekunden nicht überschreiten. Hinsichtlich der **Erfassung des Kilometerstands** wurde beobachtet, dass dieser entgegen der anderen Parameter nicht alle 0,1 Sekunden, sondern lediglich jede Sekunde aktualisiert wird (also jeden zehnten Record). Nun dürfte ein O-Lkw bei maximal zulässiger Höchstgeschwindigkeit für Lastkraftwagen in Deutschland von 80 km/h zwischen zwei Records – also einer Zeitdifferenz von etwa 0,1 Sekunden – rund 2,22 Meter zurücklegen. Dadurch, dass sich der Kilometerstand aber lediglich jede Sekunde beziehungsweise etwa jeden zehnten Record aktualisiert, wird die datenseitige Veränderung des Werts nicht maximal 2,22 Meter, sondern vielmehr bis zu 22,22 Meter betragen. Findet dieser Aspekt im Datenbereinigungsverfahren keine Berücksichtigung, führt dies zu einer Aussonderung sämtlicher Records. Dies gilt es zu vermeiden. So wird als maximal zulässige Wegelücke zwischen zwei Records der Wert von 40 Metern (beziehungsweise angegeben in der Einheit Kilometer, also 0,04 km) festgelegt. Dies ließe eine theoretische Maximalgeschwindigkeit eines O-Lkws von bis zu 144 km/h zu.

Für die **Drehzahl und den Betriebszustand des Verbrennungsmotors** sowie für den **Pantographenstatus** bedarf es, wie bereits bekannt, keiner Festlegung von Schwellenwerten. Für die **Fließrate des Dieselkraftstoffs** wird ein gültiger Wertebereich von 0 bis 200 l/h definiert. Ferner wurden Schwellenwerte für die **Stromstärke- und Spannungs-Parameter** erarbeitet. Die genauen Schwellenwerte lassen sich nachfolgender Tabelle 10 entnehmen.

**Tabelle 10: Festgelegte Schwellenwerte für relevante Parameter im Datenbereinigungsverfahren**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Abgeleiteter „Klarname“ des Parameters	Festgelegte Schwellenwerte im Rahmen des Datenbereinigungsverfahrens		
Zeitstempel	0 s	<	$t_k - t_{k-1} \leq 0,15 \text{ s}$
Kilometerstand	0 km	≤	$\text{Kilometerstand}_k - \text{Kilometerstand}_{k-1} \leq 0,04 \text{ km}$
Drehzahl des Verbrennungsmotors	- keine -		(ausreichende Datenerfassungsqualität)
Betriebszustand des Verbrennungsmotors	- keine -		(ausreichende Datenerfassungsqualität)
Pantographenstatus	- keine -		(ausreichende Datenerfassungsqualität)
Fließrate Dieselkraftstoff	0 l/h	≤	Fließrate Dieselkraftstoff ≤ 200 l/h
Stromstärke an der E-Maschine	-300 A	≤	$EM_{\text{Stromstärke}} \leq 300 \text{ A}$
Spannung an der E-Maschine	300 V	≤	$EM_{\text{Spannung}} \leq 800 \text{ V}$
Stromstärke am elektrischen Energiespeicher	-300 A	≤	$EE_{\text{Stromstärke}} \leq 300 \text{ A}$
Spannung am elektrischen Energiespeicher	300 V	≤	$EE_{\text{Spannung}} \leq 800 \text{ V}$
Stromstärke am Fahrdrabt	-50 A	≤	$OL_{\text{Stromstärke}} \leq 400 \text{ A}$
Spannung am Fahrdrabt	-50 V	≤	$OL_{\text{Spannung}} \leq 850 \text{ V}$
Stromstärke am Pantographen	-50 A	≤	$PAN_{\text{Stromstärke}} \leq 300 \text{ A}$
Spannung am Pantographen	-50 V	≤	$PAN_{\text{Spannung}} \leq 850 \text{ V}$
Fahrgeschwindigkeit <sup>41</sup>	0 km/h	≤	Fahrgeschwindigkeit ≤ 120 km/h
Ladestand elektrischer Energiespeicher <sup>42</sup>	0 %	≤	$EE_{\text{Ladestand}} \leq 100 \%$

Hervorgehoben werden sollen an dieser Stelle kurz die definierten **unteren Schwellenwerte für die Parameter**  $OL_{\text{Stromstärke}}$ ,  $OL_{\text{Spannung}}$ ,  $PAN_{\text{Stromstärke}}$  und  $PAN_{\text{Spannung}}$ . Es wurde aus den aufgestellten Berechnungsformeln bereits ersichtlich, dass der zulässige Definitionsbereich zumindest für die Stromstärke-

<sup>41</sup> Originalname des Fahrzeugparameters im zur Verfügung gestellten Datensatz: „WheelBasedVehicleSpeed (km/h)“.

<sup>42</sup> Originalname des Fahrzeugparameters im zur Verfügung gestellten Datensatz: „BatterySOC“.

---

Parameter bereits eingeschränkt wurde auf Werte mindestens gleich oder größer Null. Nun stellt sich an dieser Stelle die Frage, warum Werte kleiner Null nicht einfach durch das Datenbereinigungsverfahren von Beginn an von den Analysen ausgeschlossen werden. Es hat sich im Rahmen der durchgeführten Iterationsschritte gezeigt, dass der Datenlogger für Parameter, die einen Zusammenhang mit dem Pantographen beziehungsweise der Oberleitungsanlage aufweisen, auch ohne Verbindung des Pantographen mit dem Fahrdrabt eine Art „Ruhewert“ erfasst. Diese Ruhewerte pendeln knapp unter dem Wert Null. Erst nachdem durch den Pantographen eine kraftschlüssige Verbindung zum Fahrdrabt hergestellt wurde, führt die Datenerfassung zu plausiblen Werten. Würde nun im Datenbereinigungsverfahren als untere Schwelle der Wert Null festgesetzt werden, würde dies zu einer Eliminierung sämtlicher Records führen, zu denen der Pantograph über keine Verbindung zum Fahrdrabt verfügt – also sämtliche Fahrtabschnitte abseits eines Streckenabschnitts, der mit einer Oberleitungsanlage elektrifiziert wurde. Um dies zu verhindern, ist es essenziell, als untere Schwelle eben nicht den Wert Null zu definieren, sondern einen solchen Wert, der die Ruhewerte inkludiert. Es wurde festgestellt, dass sich ein Schwellenwert von *-50 Ampere* beziehungsweise von *-50 Volt* als geeignet erweist.

Um die Datenqualität zusätzlich zu erhöhen, wurden als weitere **qualitätsoptimierende Parameter** einerseits die durch den Datenlogger gemessene Fahrgeschwindigkeit, andererseits der gemessene Ladezustand des elektrischen Energiespeichers in das Datenbereinigungsverfahren mitaufgenommen. Es hat sich gezeigt, dass diese beiden Parameter als Indikatoren für allgemeine Fehler in der Datenerfassung dienen können. Im Ergebnis liegt schlussendlich eine bereinigte und qualitätsgesicherte Datenbasis für die Verbrauchsberechnungen vor.

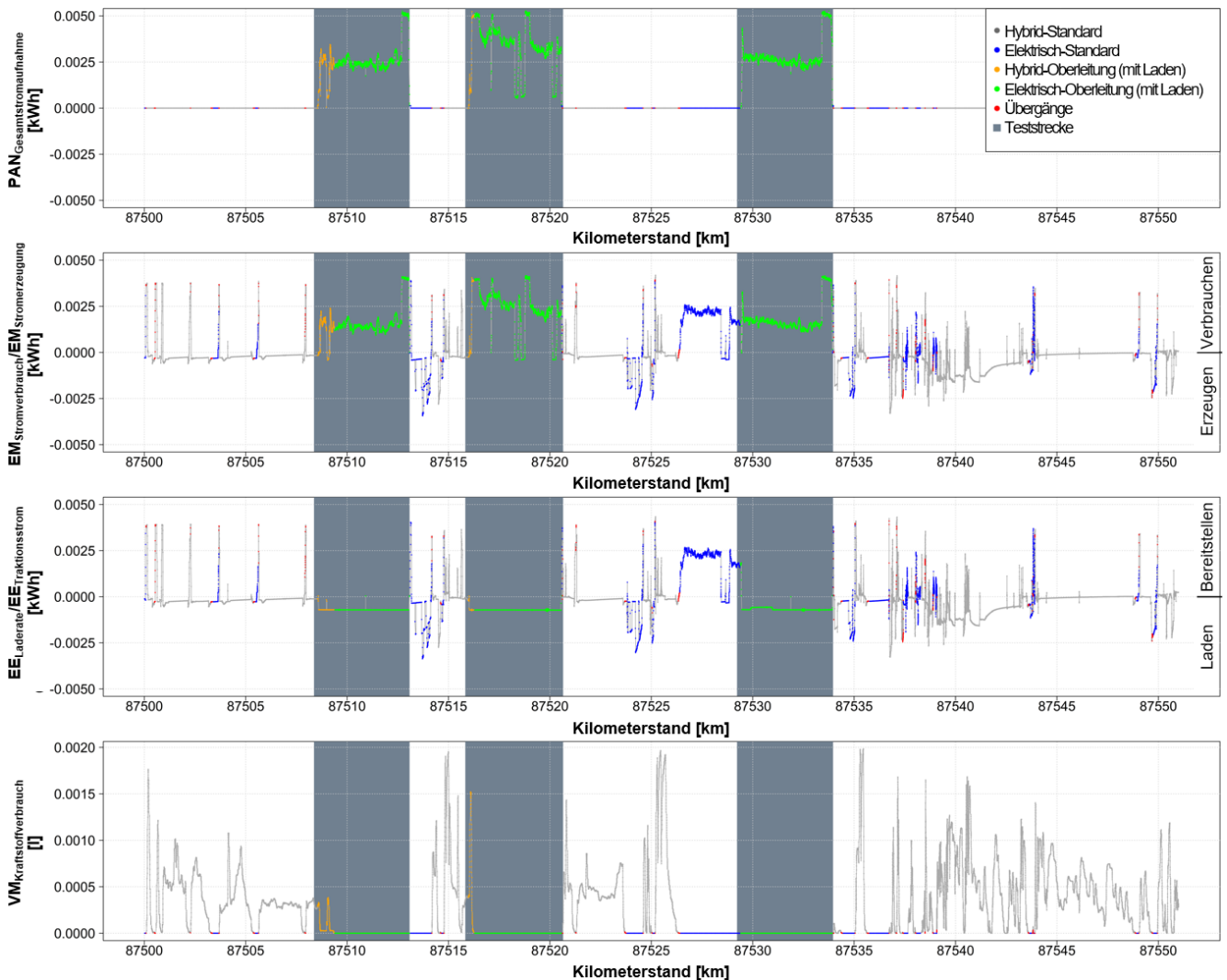
Das implementierte Datenbereinigungsverfahren führt einerseits zwar zu einer Verbesserung der Daten- und damit auch der Ergebnisqualität. Doch **birgt ein sehr stringentes Datenbereinigungsverfahren auch die Gefahr**, die ursprünglich zur Verfügung stehende Datenbasis stark zu limitieren. Um zu überprüfen, wie groß die verbliebene und bereinigte Datenmenge schlussendlich noch ist, wird ein Vergleich angestellt. Über das Flottenmanagementprogramm (FMP) des O-Lkw-Herstellers kann die tatsächlich durch den O-Lkw gefahrene Strecke in Erfahrung gebracht werden. Wird nun diese in Realität zurückgelegte Strecke des O-Lkws mit der Strecke verglichen, die letztlich nach Durchlaufen des Datenbereinigungsverfahrens noch ausgewertet werden konnte, lassen sich Rückschlüsse auf die nicht auswertbaren Daten beziehungsweise Kilometer der O-Lkw ziehen.

#### **GRAFISCHE VALIDIERUNG DER ENTWICKELTEN BERECHNUNGSMETHODE**

Zur **Validierung der erarbeiteten Methode** zur datenbasierten Berechnung der Energieflüsse eines O-Lkws wurden überwachte Forschungsfahrten durchgeführt – äquivalent zum Vorgehen, welches bereits im Zusammenhang mit der Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws Anwendung fand. Hierdurch konnte ein Datensatz generiert werden, dessen zugrunde liegendes Fahrtenprofil und die zugehörigen Besonderheiten bekannt waren (wie beispielsweise Fahrt Im Hybrid- oder Elektrisch-Oberleitungsmodus). Die entwickelte Berechnungsmethode wurde für diesen Datensatz angewendet. Die berechneten Ergebnisse wurden auf Plausibilität geprüft, zusätzlich wurde eine grafische Validierung der Berechnungsergebnisse vorgenommen. Nachfolgender Abbildung 23 kann ein Auszug des grafischen Validierungsverfahrens entnommen werden.

Abbildung 23 zeigt einen **Ausschnitt von Verlaufsdigrammen ausgewählter berechneter Energieflüsse**, basierend auf dem ausgewählten Datensatz. Abschnitte in den Verlaufsdigrammen, in denen der O-Lkw mit der Oberleitung verbunden war, sind Grau hinterlegt. Ferner wird die Zuordnung einzelner Records zu den Betriebsmodi farblich hervorgehoben (Hybrid-Standardmodus beispielsweise in Hellgrau, Elektrisch-Standardmodus in Blau, et cetera). Die Verlaufsdigramme zeigen, dass die **aufgestellten Berechnungsgrundlagen zu plausiblen Ergebnissen** führen. Am Beispiel des Verlaufs-

diagramms zu  $PAN_{Gesamtstromaufnahme}$  (oberster Graph in Abbildung 23) lässt sich erkennen, dass sobald eine Verbindung zwischen Pantographen und Fahrdrabt der Oberleitungsanlage besteht, ein plausibler Ausschlag der berechneten Werte festzustellen ist. Sobald der Pantograph abbügelt, findet kein Energiefluss mehr statt – die Berechnungsergebnisse führen folgerichtig zum Wert *Null*. Ähnliches zeigt sich auch für die weiteren dargestellten Verlaufsdiagramme. Deutlich zu sehen ist zum Beispiel auch der ausbleibende Dieselmotorenverbrauch, sobald der O-Lkw im Elektrisch-Oberleitungsmodus operiert (siehe letzter Graph). Ferner zeigt sich im dritten Graph von oben, wie der elektrische Energiespeicher aufgrund der Verbindung des Pantographen zur Oberleitungsanlage geladen wird.



**Abbildung 23: Grafisches Validierungsverfahren berechneter Energieflüsse eines O-Lkws (Auszug)**  
(Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an SCHÖPP U. A. (2022))

*Hinweis zu Abbildung 23: Die dargestellten Verlaufsdiagramme zeigen zur besseren Erkennbarkeit der Plausibilität die absolut berechneten Ergebnisse je Record noch vor Durchführung der Ergebnismittlung zu gängigen Durchschnittswerten. Am Beispiel der eingeführten Größe  $PAN_{Gesamtstromaufnahme}$  berechnet sich ein Datenpunkt im Verlaufsdiagramm beispielsweise wie folgt:*

$$PAN_{Gesamtstromaufnahme, Betriebsmodus} [kWh] = \left[ \left( \frac{0,1 [s]}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} \right) \times \left( \frac{OL_{Stromstärke,k} [A] \times OL_{Spannung,k} [V]}{1000} \right) \right]$$

mit  $D = \{OL_{Stromstärke} [A] \mid \geq 0\}$

**Formel 14: Gleichung zur Validierung der entwickelten Berechnungsmethode (Beispiel)**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

---

#### 4.3.4 CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS

Die ausgearbeitete Berechnungsmethode soll nun angewendet werden, um **charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte von O-Lkw** zu ermitteln. Es wird hierfür zunächst ein *fiktiver O-Lkw* gebildet, der sich aus den fünf Einzel-O-Lkw *El Leon*, *El Fidel*, *El Fondo*, *El Femina* und *El Salto* zusammensetzt. Hintergrund dieses Vorgehens ist die **Glättung fahrzeugspezifischer Unregelmäßigkeiten** – weitere Erläuterungen hierzu können den nachfolgenden Ausführungen entnommen werden. Der fiktive O-Lkw dient nunmehr als Grundlage für die aufbauenden Analysen. Neben textlichen und tabellarischen Darlegungen der Berechnungsergebnisse zu den charakteristischen Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws wird zum besseren Verständnis zusätzlich eine Visualisierung der Ergebnisse in einem grafischen Schaubild angefertigt.

##### BILDUNG EINES FIKTIVEN O-LKWS

Bevor die im vorstehenden Unterkapitel 4.3.3 entwickelte Methode zur Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws angewendet wird, soll zunächst ein sogenannter **fiktiver O-Lkw** gebildet werden. Es hat sich gezeigt – insbesondere aufgrund der Prototypencharakteristik der O-Lkw – dass hinsichtlich des Betriebsverhaltens der einzelnen O-Lkw kleinere, aber auch mal größere Unregelmäßigkeiten auftreten können.

Das Betriebsverhalten eines O-Lkws wird dabei einerseits durch die Fahrerinnen und Fahrer beeinflusst: Es handelt sich hierbei nicht nur um die grundlegenden Einflüsse, die Fahrende auf das Betriebsverhalten nehmen können (siehe Ausführungen in Kapitel 3.2) – einen O-Lkw betreffend sind hierunter vor allem auch die Interaktionen der Fahrenden hinsichtlich des Aktivierens der Zwangsladefunktion durch den Verbrennungsmotor oder des Pantographeneinsatzes zu verstehen. Ein weiterer Aspekt, der die Bildung eines fiktiven O-Lkws erklärt, lässt sich in der Datenerfassung durch die in den O-Lkw verbauten Datenlogger vorfinden. Es sollte sich im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts zeigen, dass **bezüglich der Datenerfassung regelmäßig Herausforderungen** auftraten, die es zu lösen galt. Solche Herausforderungen konnten beispielsweise sein, dass

- ein oder auch mehrere Datenlogger für unbestimmte Zeit grundsätzlich nicht funktionierten;
- ein oder auch mehrere Datenlogger einzelne Parameter nicht erfassten und Records dadurch nicht weiterverwendet werden konnten;
- ein oder auch mehrere Datenlogger fehlerbehaftete Daten aufzeichneten, wie zum Beispiel die doppelte Erfassung des gleichen Records oder die Erfassung von „eingefrorenen“ Werten.

Um einen Einblick in die auswertbaren Daten zu gewähren, führt nachfolgende Abbildung 24 zur jeweiligen **Datenverfügbarkeit der einzelnen O-Lkw in Monatscheiben** aus.



Abbildung 24: Visualisierung der für die durchzuführenden Analysen verfügbaren Daten (Quelle: Eigene Darstellung)



Anhand von Abbildung 24 ist deutlich zu erkennen, dass **teils erhebliche Datenlücken** festzustellen sind. Wird beispielsweise die Übersicht zur Datenverfügbarkeit von *El Leon* betrachtet (erster Graph), lassen sich vor allem zwei größere Datenlücken identifizieren:

Die erste Datenlücke – von Juni bis Oktober 2019 – resultierte aus allgemeinen Startschwierigkeiten hinsichtlich der Datenerfassung zu Beginn des ELISA-Forschungsprojekts. Die zweite Datenlücke – von September 2020 bis Juli 2021 – entstand vor allem aufgrund fehlerhaft erfasster Daten („eingefrorene“ Werte, vor allem für die Erfassung des Parameters „Fließrate Dieselkraftstoff“).

Um solche **fahrzeugspezifischen Unregelmäßigkeiten auszugleichen**, empfiehlt es sich für die weiteren Analysen entsprechend auf einen fiktiven O-Lkw zurückzugreifen. Der fiktive O-Lkw setzt sich dabei kilometergewichtet aus den fünf Einzel-O-Lkw zusammen. Inwieweit die fünf Einzel-O-Lkw jeweils zum fiktiven O-Lkw beitragen, kann nachfolgender Tabelle 11 entnommen werden. Ferner wird durch den letzten Graphen in vorstehender Abbildung 24 die monatsbasierte Datenverfügbarkeit für den gebildeten, fiktiven O-Lkw ersichtlich.

**Tabelle 11: Kilometergewichtete Zusammensetzung des fiktiven O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Betriebsmodus	Hybrid-Standardmodus		Übergangsmodus	Hybrid-Oberleitungsmodus		Elektrisch-Oberleitungsmodus		Gesamt
	(mit Laden)	(ohne Laden)		(mit Laden)	(ohne Laden)			
<i>O-Lkw</i>	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
El Leon	130.029	11.815	2.430	4.234	0.00	886	0.00	149.394
El Fidel	136.618	16.167	3.058	4.294	0.00	3.281	0.00	163.418
El Fondo	101.907	8.897	1.858	2.346	0.00	220	0.00	115.228
El Femina	92.449	7.453	1.805	2.078	0.00	1.843	0.00	105.628
El Salto	88.742	10.342	1.659	7.300	0.00	1.385	0.00	109.428
<b>Fiktiver O-Lkw</b>	<b>549.745</b>	<b>54.674</b>	<b>10.810</b>	<b>20.252</b>	<b>0.00</b>	<b>7.615</b>	<b>0.00</b>	<b>643.096</b>

**Die weiteren Untersuchungen können auf einer Datenbasis von in Summe 643.096 ausgewerteten Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs im ELISA-Forschungsprojekt durchgeführt werden.**

#### CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS-, KRAFTSTOFF- UND STROMVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS

Die **Anwendung der entwickelten Methode** zur Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerten führt zu den in Tabelle 12 strukturiert dargelegten Ergebnissen.

*(Die in Tabelle 12 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den fiktiven O-Lkw. Dem Anhang (S. A20) können darüber hinaus zusätzlich auch die charakteristischen Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte individuell für jeden Einzel-O-Lkw entnommen werden.)*

Die berechneten Ergebnisse werden einerseits differenziert nach den bereits in Kapitel 4.2 definierten Betriebsmodi eines O-Lkws präsentiert. Andererseits wurde nachfolgende Tabelle 12 nach dem Prinzip entworfen, dass in der linken Spalte solche Betriebsmodi gelistet werden, in denen ein O-Lkw ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage operiert. Die in der rechten Spalte enthaltenen Betriebsmodi sind folglich solche Betriebsmodi, in denen ein O-Lkw über eine Verbindung des Pantographen zum Fahrdrabt der Oberleitungsanlage verfügt.

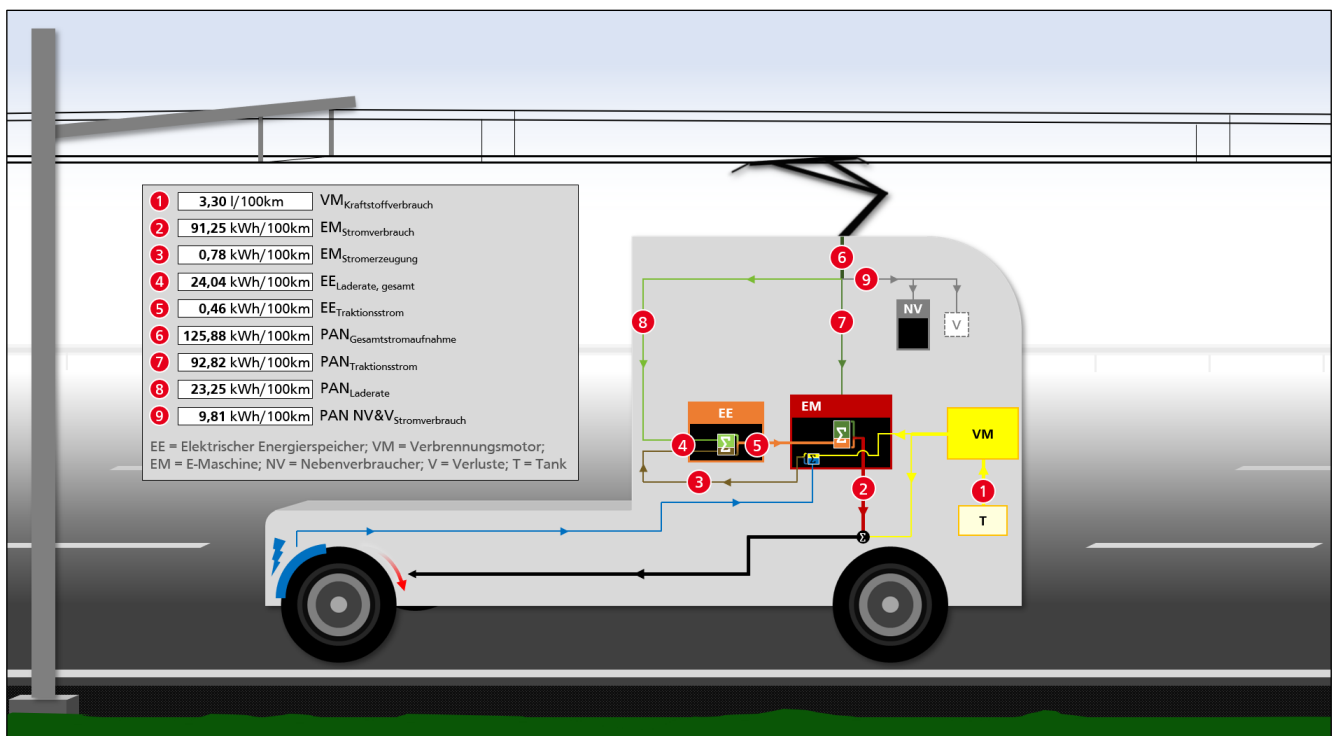
**Tabelle 12: Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für den fiktiven O-Lkw. Datenbasis: Juni 2019 bis Dezember 2022)

<b>Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws*</b>			
<b>Hybrid-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	30,53 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	3,30 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	9,50 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	91,25 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	20,64 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,78 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	16,99 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	24,04 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	11,83 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,46 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	125,88 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	92,82 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	23,25 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,81 kWh/100km
<b>Elektrisch-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	3,30 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	59,61 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	91,25 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	40,97 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,78 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	36,74 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,78 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	79,98 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,46 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	102,63 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	92,82 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,81 kWh/100km
<b>Übergangsmodus</b>		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,13 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	53,57 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	100,37 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	31,42 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,38 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	28,36 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	26,96 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	58,00 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,87 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	138,07 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	102,21 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	26,58 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,28 kWh/100km
		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
		VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
		EM <sub>Stromverbrauch</sub>	100,37 kWh/100km
		EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,38 kWh/100km
		EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,38 kWh/100km
		EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,87 kWh/100km
		PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	111,49 kWh/100km
		PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	102,21 kWh/100km
		PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
		PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,28 kWh/100km
<p>* Die dargestellten Werte basieren auf 643.096 auswertbaren Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration der O-Lkw.</p> <p>** Bei den Oberleitungs-Betriebsmodi ohne zeitgleiches Laden des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen handelt es sich um hypothetische Betriebsmodi. Die EE<sub>Laderate, gesamt</sub> kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht datenbasiert berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese jedoch zwischen 0,00 bis maximal des Werts der EM<sub>Stromerzeugung</sub> betragen wird.</p>			

Nun lassen sich Tabelle 12 zwar sämtliche relevanten Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte je Betriebsmodus entnehmen, die den Betrieb eines O-Lkws charakterisieren, doch sind die einzelnen Werte auf dieser recht theoretischen Basis (insbesondere für Dritte) gegebenenfalls noch etwas schwer

nachvollziehbar. Für ein besseres Verständnis sollen **die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens deshalb ergänzend grafisch visualisiert** werden. Aufgrund seiner hohen Komplexität wird für die Ergebnisvisualisierung exemplarisch der Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden) herangezogen (siehe Abbildung 25).

Operiert ein O-Lkw im Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden), resultiert dies in einem Dieselkraftstoffverbrauch von durchschnittlich 3,30 l/100 km (*Energiefluss 1*). Die E-Maschine benötigt im Durchschnitt 91,25 kWh/100 km um ihrer Traktionsaufgabe nachzugehen (*Energiefluss 2*). Infolge von Rekuperationsprozessen und gegebenenfalls durch vom Verbrennungsmotor generierte Leistungsüberschüsse können durch die E-Maschine 0,78 kWh/100 km an elektrischer Energie zurückgewonnen werden (*Energiefluss 3*). Der elektrische Energiespeicher wird mit elektrischer Energie einerseits vom Pantographen und andererseits von der E-Maschine kommend durchschnittlich mit einer Laderate von 24,04 kWh/100 km geladen (*Energiefluss 4*). Der E-Maschine wird durch den elektrischen Energiespeicher elektrische Energie in Höhe von 0,46 kWh/100 km bereitgestellt (*Energiefluss 5*). Hinsichtlich des Oberleitungs-betriebs nimmt der O-Lkw im Durchschnitt 125,88 kWh/100 km elektrische Energie aus der Oberleitungsanlage auf (*Energiefluss 6*). Von dieser aufgenommenen Energiemenge werden 92,82 kWh/100 km zur Realisierung der Traktionsaufgabe an die E-Maschine (*Energiefluss 7*) und 23,25 kWh/100 km zum Laden an den elektrischen Energiespeicher weitergegeben (*Energiefluss 8*). 9,81 kWh/100 km sind Nebenverbrauchern und Widerständen beziehungsweise Verlusten durch den Oberleitungsbetrieb zuzurechnen (*Energiefluss 9*).



**Abbildung 25: Visualisierung der Energieflüsse eines O-Lkws im Hybrid-Oberleitungsmodus**  
(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP U. A. (2022, S. 15))

#### INTERPRETATION DER BERECHNERGEBNISSE

Die berechneten **Ergebnisse zu den charakteristischen Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws bedürfen einer angemessenen Interpretation**. Die Interpretation der Ergebnisse kann unter Beachtung vielfältiger Facetten erfolgen. Die nachfolgenden Ausführungen fokussieren vor allem die Abhängigkeit des Energieverbrauchs eines O-Lkws erstens von den Betriebsmodi, zweitens von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine und drittens von dem Anteil an durch Oberleitungsanlagen

---

elektrifizierten Streckenabschnitten, gemessen an der Gesamtstrecke. Über diese drei Kernbereiche hinaus lassen sich weitere Kernbereiche andenken, die Auswirkungen auf die Energieflüsse beziehungsweise den Energieverbrauch von O-Lkw haben können. So wird sicherlich beispielsweise das Gewicht des O-Lkws<sup>43</sup> oder auch die Geschwindigkeit, mit der ein O-Lkw operiert<sup>44</sup>, von analytischer Relevanz sein. Die nachfolgenden Ausführungen erheben an dieser Stelle aber nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen vielmehr einen ersten Eindruck vermitteln, von welchen vielfältigen Aspekten der Energieverbrauch eines O-Lkws beeinflusst werden kann. Dieser Einblick soll dabei vor allem als Ausgangspunkt weiterer Forschungsaktivitäten im Kontext der noch verhältnismäßig jungen eHighway-Forschung dienen.

#### ABHÄNGIGKEIT DES ENERGIEVERBRAUCHS EINES O-LKWS VON DEN BETRIEBSMODI

Wird erneut Tabelle 12 (S. 91) betrachtet, und werden dabei vor allem die verschiedenen Betriebsmodi miteinander verglichen, sind **merkliche Unterschiede in den jeweils berechneten Kennwerten je Betriebsmodus** festzustellen. Dies ist einerseits anhand logischer Gesichtspunkte zu erklären, andererseits bedarf es einer detaillierten Untersuchung der jeweiligen Unterschiede.

Zunächst ist festzuhalten, dass sich in der Tat **entsprechend des jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws unterschiedlich ausgeprägte Energieflüsse** und in Folge auch deutlich unterschiedliche Energieverbräuche eruieren lassen. So ist der Verbrauch eines O-Lkws an Dieselkraftstoff im Hybrid-Standardmodus am höchsten – es werden durchschnittlich 30,53 l/100 km verbraucht. Im Hybrid-Oberleitungsmodus (mit/ohne Laden) beträgt dieser hingegen lediglich 3,30 l/100 km, im Übergangsmodus 0,13 l/100 km und in sämtlichen elektrischen Betriebsmodi – logischerweise, der Verbrennungsmotor ist inaktiv – 0,00 l/100 km. Ähnliche Darlegungen ließen sich auch für die anderen Energieflüsse des O-Lkws anstellen, hiervon wird aufgrund einer nicht notwendigen Repetition aber Abstand genommen. Schlussendlich ist festzuhalten:

Die ermittelten Energieflüsse und die hieraus resultierenden **charakteristischen Energieverbräuche eines O-Lkws unterscheiden sich** je nach Betriebsmodus teils erheblich. Dies liegt daran, dass entsprechend des Betriebsmodus unterschiedliche Komponenten des Antriebsstrangs eines O-Lkws (beziehungsweise des eHighway-Systems in Gänze) aktiv sind. Die resultierenden Energieflüsse werden fahrzeugseitig durch den Verbrennungsmotor, die E-Maschine, den elektrischen Energiespeicher sowie den Pantographen bestimmt. Infrastrukturseitig wirkt sich das Wechselspiel zwischen Pantographen und Oberleitungsanlage auf die sich einstellenden Energieflüsse und den hieraus resultierenden Energieverbrauch aus. Das zentrale Schlüsselement bildet in jedem Betriebsmodus die Interaktion zwischen E-Maschine und elektrischem Energiespeicher. Unabhängig vom Betriebsmodus zeigen diese beiden Komponenten zu jeder Zeit Aktivität. Das Wechselspiel zwischen Pantographen und Oberleitungsanlage ist ausschließlich dann festzustellen, wenn ein O-Lkw in einem oberleitungsbasierten Betriebsmodus operiert. Energieflüsse hinsichtlich des Verbrennungsmotors sind nur während des O-Lkw-Betriebs in einem hybriden Betriebsmodus zu registrieren.

Ein Energiefluss beziehungsweise ein Energieverbrauch kann sich letztlich logischerweise immer nur dann ergeben, sollte die den Energiefluss bestimmende Komponente im Antriebsstrang des O-Lkws auch Aktivität aufweisen. Die **Aktivität einer Komponente wird durch den Betriebsmodus bestimmt**. Je nachdem in welchem Betriebsmodus ein O-Lkw operiert, werden sich unterschiedliche Energieflüsse und somit auch unterschiedliche Energieverbräuche feststellen lassen.

---

<sup>43</sup> Analysen zur Abhängigkeit der Energieflüsse und des Energieverbrauchs eines O-Lkws vom jeweiligen Gewicht des Sattelzugs konnten aufgrund einer unzureichenden Datenbasis im ELISA-Forschungsprojekt nicht durchgeführt werden.

<sup>44</sup> Der Einfluss der Geschwindigkeit wird zumindest indirekt in den nachfolgenden Ausführungen berücksichtigt.

Das eHighway-System soll ermöglichen, dass Lastkraftwagen ihre Abhängigkeit von Dieselmotoren zugunsten der Verwendung elektrischer Energie sukzessive lösen und dabei zunehmend ihre Treibhausgasemissionsbilanz reduzieren. Die vorstehend durchgeführten Analysen zeigen auf, dass ein **O-Lkw durchaus vollelektrisch operieren** und dabei – im entsprechenden Betriebsmodus – seinen Dieselmotorenstoffverbrauch um bis zu 100% reduzieren kann. Doch sind bei der Analyse der berechneten Ergebnisse insbesondere zwei Besonderheiten aufgefallen, die eine vertiefende Untersuchung verlangen:

1. Der Stromverbrauch im Elektrisch-Standardmodus ist mit durchschnittlich 59,61 kWh/100 km deutlich geringer als der durchschnittliche Stromverbrauch im Hybrid- oder Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit/ohne Laden) mit 91,25 kWh/100 km beziehungsweise 100,37 kWh/100 km. Weiterhin erschien anfangs unklar, warum ein O-Lkw im Elektrisch-Standardmodus nicht nur über einen vergleichsweise geringen Stromverbrauch verfügt, sondern ferner auch mit einem Durchschnittswert von 40,97 kWh/100 km verhältnismäßig viel elektrische Energie erzeugt.
2. Es erscheint fraglich, aus welchem Grund ein O-Lkw im Oberleitungsbetrieb gelegentlich auf ein Mitwirken des Verbrennungsmotors angewiesen ist (siehe Hybrid-Oberleitungsmodus mit/ohne Laden). Zwar zeigt sich im Hybrid-Oberleitungsmodus (mit/ohne Laden) nur ein geringer Dieselmotorenstoffverbrauch in Höhe von 3,30 l/100 km, doch ist unklar, weshalb sich überhaupt ein solcher Dieselmotorenstoffverbrauch einstellen soll.

Beide identifizierten Besonderheiten lassen sich auf die **Leistungsfähigkeit der in den O-Lkw verbauten E-Maschinen** zurückführen. Es wurde eingangs von Kapitel 4.3.2 hierzu bereits die Vermutung aufgestellt, dass der derzeit verbaute E-Maschinen-Typ hinsichtlich der Leistungsfähigkeit gegebenenfalls Defizite aufweisen könnte. Dies lässt sich nun bestätigen:

**Soll ein O-Lkw vollelektrisch fahren**, erfordert dies eine zuverlässige Übernahme der Traktionsaufgabe ausschließlich durch die verbaute E-Maschine. Es hat sich gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit der E-Maschine auch genügt, um den O-Lkw in einem *stationären* Zustand alleinig anzutreiben. „Stationär“ bedeutet an dieser Stelle *eine Fahrt, durchaus mit Höchstgeschwindigkeit und maximaler Zuladung des O-Lkws, im weitestgehend ebenen Gelände sowie ohne wesentliche Verzögerungsprozesse*. Diese Rahmenbedingungen liegen auf dem durch die ELISA-Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitt auf der BAB 5 vor. So ist es möglich, dass der O-Lkw die ELISA-Teststrecke im Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit/ohne Laden) zuverlässig befahren kann. Schaltet sich hierbei der Verbrennungsmotor zu – der O-Lkw operiert nun also im Hybrid-Oberleitungsmodus (mit/ohne Laden) – so ist dies einerseits zwar durchaus darauf zurückzuführen, dass der Verbrennungsmotor die Traktion gelegentlich unterstützt. Andererseits kann es aber auch zu Situationen kommen, zu denen der Verbrennungsmotor aus *sekundären Gründen* durch Aktivität gekennzeichnet ist: Sinkt die Motortemperatur beispielsweise zu stark, so kann dies ein „Mitlaufen“ des Verbrennungsmotors erfordern, um ein zu starkes Abkühlen des Verbrennungsmotors zu verhindern. Auch wurde beobachtet, dass der Betrieb der Klimaanlage das Mitlaufen des Verbrennungsmotors erfordern kann.

Operiert ein O-Lkw nun im Verkehrsnetz, das einer Autobahn nachgelagert ist – beispielsweise im Stadtverkehr – so treten immer seltener solche **stationären Zustände im Fahrzeugbetrieb** auf. Vielmehr wird der Fahrzeugbetrieb gekennzeichnet von zahlreichen Beschleunigungs- und Bremsmanövern, beziehungsweise ganz allgemein von Situationen, die das Anforderungsprofil an die Leistungsbereitstellung durch den Antriebsstrang des O-Lkws verändern. So konnte zwar festgestellt werden, dass die E-Maschine gelegentlich die Traktion des O-Lkws übernimmt; übersteigt der zu überwindende Fahrwiderstand die Leistungsfähigkeit der E-Maschine, so schaltet sich jedoch der Verbrennungsmotor zu. In diesem Moment wechselt der Betriebsmodus vom Elektrisch-Standard- in den Hybrid-Standardmodus.



---

Die höhere Leistungsanforderung, und damit auch der theoretisch höhere Energieverbrauch um die Traktion des O-Lkws alleinig zu übernehmen, wird quasi also vom Elektrisch-Standardmodus „abgeschnitten“ und stattdessen dem Hybrid-Standardmodus zugerechnet. Der Stromverbrauchswert im Elektrisch-Standardmodus ist im Ergebnis also (noch) nicht repräsentativ, um den Stromverbrauch eines O-Lkws im vollelektrischen Betrieb ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage zu beschreiben.

Der **hohe Stromerzeugungswert durch die E-Maschine im Elektrisch-Standardmodus** ist durch eine ähnliche Kausalität zu erklären. Gewinnt ein O-Lkw Energie zurück, geschieht dies in der Regel ohne zeitgleiche Leistungsanforderung an den Antriebsstrang. Als Beispiel lässt sich eine Fahrt im abschüssigen Gelände anführen. Dadurch, dass der O-Lkw in solchen Situationen keine Fahrwiderstände überwinden muss, ist die Leistungsfähigkeit der E-Maschine zur Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit des O-Lkws vollkommen ausreichend – der Verbrennungsmotor wird parallel in einen inaktiven Zustand versetzt. Die Energierückgewinnung wird nun alleinig dem Elektrisch-Standardmodus zugeschrieben. Dadurch, dass sich die Lage des gegenwärtig mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts durch eine weitestgehend ebene Topographie kennzeichnet, ist ein solcher Stromerzeugungswert übrigens nicht in den Oberleitungs-Betriebsmodi wiederzufinden. Dies wird sich ändern, sollten auch Streckenabschnitte mit einer anderen Topographie mittels Oberleitungsanlagen elektrifiziert werden.

Generell kann festgehalten werden, dass die **Leistungsfähigkeit der aktuell verwendeten E-Maschine** den wesentlichen Anforderungen im ELISA-Forschungsprojekt gerecht wird, gelegentlich sogar den vollelektrischen Betrieb eines O-Lkws erlaubt. Eine Verwendung von E-Maschinen mit höherer Leistungsfähigkeit wird es ermöglichen, den Weg zu ebnen, zukünftig gänzlich auf den Einbau eines Verbrennungsmotors in O-Lkw zu verzichten.

#### ABHÄNGIGKEIT DES KRAFTSTOFF- UND STROMVERBRAUCHS EINES O-LKWS VON DEM ANTEIL AN DURCH OBERLEITUNGSANLAGEN ELEKTRIFIZIERTEN STRECKENABSCHNITTEN

Es wurde vorstehend bereits dargelegt, dass eine **Abhängigkeit zwischen dem Energieverbrauch sowie den Betriebsmodi** eines O-Lkws vorliegt. Je nachdem, in welchem Betriebsmodus ein O-Lkw operiert, lassen sich teils deutliche Unterschiede im Energieverbrauchsverhalten feststellen. Ein ganz wesentlicher Einfluss auf den Energieverbrauch eines O-Lkws resultiert aus dem **Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi**, gemessen an der insgesamt durch den O-Lkw zurückgelegten Strecke. Da die betrachtete O-Lkw-Generation über keine Plug-in-Ladefunktion verfügt, könnte ein O-Lkw ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage lediglich dann elektrisch operieren, wenn entweder ausreichend elektrische Energie durch Rekuperationsprozesse zurückgewonnen, oder aber der Verbrennungsmotor zur Erzeugung von Leistungsüberschüssen gezwungen wurde. Die **elektrische Reichweite** wäre somit einerseits äußerst limitiert, andererseits entspräche dies nicht der Idee, die der Entwicklung des eHighway-Systems zugrunde gelegt wurde. Erst die Nutzung einer Oberleitungsanlage führt durch die dynamische Energieversorgung während der Fahrt zu sinnvollen Einsatzszenarien eines O-Lkws. Nicht nur, dass in den Oberleitungs-Betriebsmodi erheblich Dieselkraftstoff eingespart wird, zusätzlich wird der elektrische Energiespeicher geladen, um auch abseits von Strecken mit Oberleitungsanlage elektrisch fahren zu können. Je höher der Anteil an Streckenabschnitten ist, die durch eine Oberleitungsanlage elektrifiziert wurden, desto höher ist in Folge die elektrische Reichweite eines O-Lkws. Je mehr Streckenanteile ein O-Lkw elektrisch zurücklegen kann, desto mehr Dieselkraftstoff lässt sich einsparen.

Unter den aktuellen Bedingungen im ELISA-Forschungsprojekt zeigt sich eine **Verteilung der Betriebsmodi** gemäß nachfolgender Abbildung 26. Zwar variieren die Anteile der Betriebsmodi entsprechend des jeweils betrachteten O-Lkws, doch zeigt sich in Summe ein recht einheitliches Bild: Der Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi, also die Summe aus Hybrid- und Elektrisch-Oberleitungsmodus, ist relativ

gering und bewegt sich in einer Spanne von 1,66 % bis 6,06 % (vor Bereinigung der Datenbasis um nicht auswertbare Daten). Im Durchschnitt – also für den fiktiven O-Lkw – beträgt der Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi 3,08 % vor, beziehungsweise 4,33 % nach Bereinigung der Datenbasis um nicht auswertbare Daten. Zusätzlich beträgt der Anteil des Elektrisch-Standardmodus durchschnittlich 6,04 % vor, beziehungsweise 8,50 % nach Bereinigung der Datenbasis um nicht auswertbare Daten. Für den Realbetrieb lassen sich Dieselmotoreinsparungen in einer ähnlichen Größenordnung feststellen – im nachfolgenden Unterkapitel 4.4 wird hierzu weiter ausgeführt.

Festzuhalten bleibt: Steigt der Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi, nimmt gleichzeitig der Anteil des Elektrisch-Standardmodus aufgrund des Ladens des elektrischen Energiespeichers in den Oberleitungs-Betriebsmodi zu. Je höher der Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi, desto höher also auch der Anteil des Elektrisch-Standardmodus. Je höher der Anteil dieser Betriebsmodi, desto geringer der Anteil des dieserverbrauchsintensiven Hybrid-Standardmodus. Wie sich dieser Zusammenhang auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen konkret auswirken wird, wird im nachfolgenden Kapitel 4.4 vertiefend untersucht.

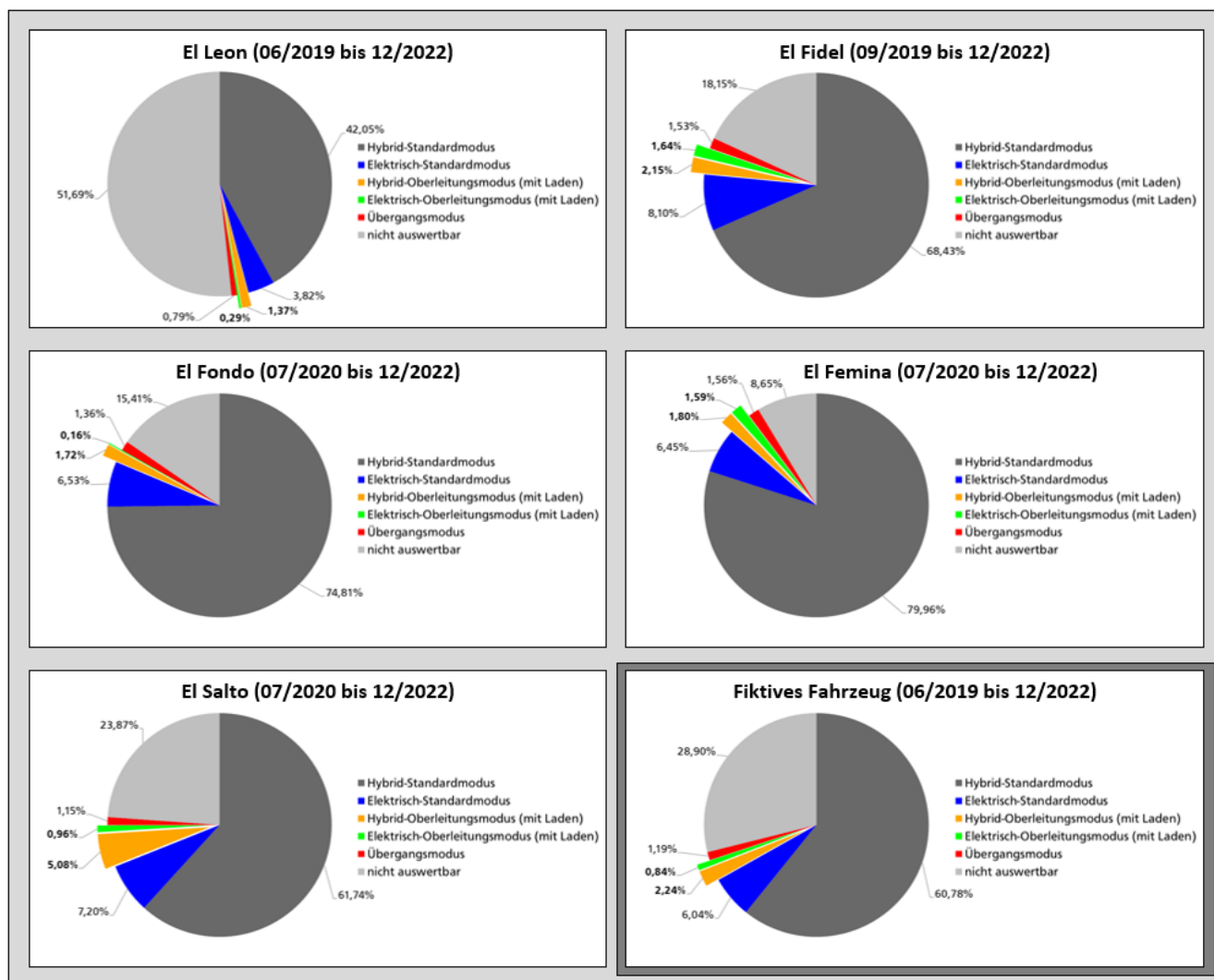


Abbildung 26: Betriebsmodiverteilung der im ELISA-Forschungsprojekt eingesetzten O-Lkw (Quelle: Eigene Darstellung)<sup>45</sup>

<sup>45</sup> An dieser Stelle wird erneut auf die bereits veröffentlichten Beiträge SCHÖPP U. A. (2021A), SCHÖPP U. A. (2021B) sowie SCHÖPP U. A. (2022) verwiesen.

---

#### 4.3.5 ZUSAMMENFASSUNG ZU CHARAKTERISTISCHEN ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTEN EINES O-LKWS

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen zur Berechnung von charakteristischen Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws kann resümiert werden:

**Entsprechend des Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws.** Das Zusammenspiel aus Verbrennungsmotor, E-Maschine, elektrischem Energiespeicher, Pantograph und Oberleitungsanlage, durch welches die Betriebsmodi eines O-Lkws charakterisiert werden, beeinflusst auch die hieraus resultierenden Energieflüsse. Grundsätzlich ist dabei festzuhalten: Ein Energiefluss lässt sich nur detektieren, wenn eine der zugehörigen Komponenten auch Aktivität aufweist. Ein Energiefluss von der Oberleitungsanlage ausgehend und via Pantographen im O-Lkw eingehend wird beispielsweise überhaupt nur dann detektierbar sein, sollte der Pantograph über eine kraftschlüssige Verbindung zum Fahrdraht der Oberleitungsanlage verfügen.

**Die Energieflüsse eines O-Lkws können datenbasiert berechnet werden.** Dies erfordert jedoch eine hinreichend diversifizierte Basis an relevanten Fahrzeugparametern. Im Verlauf der vorstehenden Untersuchungen ließen sich mit den verfügbaren Daten essenzielle Energieflusskennwerte ermitteln. Wenige Energieflüsse konnten aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage bislang nicht berechnet werden. Zwar wirkt sich dies nicht auf die Durchführbarkeit der nachfolgenden Analysen aus, doch sollten zukünftige Forschungsvorhaben versuchen, an dieser Stelle einen Lückenschluss zu vollziehen.

**Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus des O-Lkws,** und das sogar erheblich. Es hat sich gezeigt, dass sich entsprechend des Betriebsmodus teils deutlich gegensätzliche Energieverbrauchskennwerte feststellen lassen. Operiert ein O-Lkw beispielsweise im Hybrid-Standardmodus, so ist dies durch einen vergleichsweise hohen Dieselmotorkraftstoffverbrauch gekennzeichnet – im Durchschnitt werden in diesem Betriebsmodus 30,53 l/100 km Dieselmotorkraftstoff verbraucht. Operiert der O-Lkw hingegen im Elektrisch-Standardmodus, kann gänzlich ohne Dieselmotorkraftstoff gefahren werden, dafür ist dieser Betriebsmodus durch einen höheren Stromverbrauch charakterisiert.

Kann ein O-Lkw elektrische Energie aus einer Oberleitungsanlage beziehen, wirkt sich auch das merklich auf den Energieverbrauch aus: Einerseits wird der Dieselmotorkraftstoffverbrauch erheblich, teils vollständig gesenkt; andererseits kann zusätzlich elektrische Energie zur Steigerung der elektrischen Reichweite auf nachgelagerten Streckenabschnitten ohne Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage aufgenommen werden. Je nachdem, in welchem Betriebsmodus ein O-Lkw also operiert, wirkt sich dies auf den Energieverbrauch eines O-Lkws aus.

**Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine.** Ein O-Lkw kann in einem elektrischen Betriebsmodus seinen Dieselmotorkraftstoffverbrauch um 100 % reduzieren. Doch hat sich gezeigt, dass für eine Fahrt in einem elektrischen Betriebsmodus eine ausreichende Leistungsfähigkeit der E-Maschine erforderlich ist. Die aktuell verbaute E-Maschine verfügt mit 130 kW bislang allerdings über eine limitierte Leistungsfähigkeit. Die Leistung der E-Maschine genügt, um einen O-Lkw im stationären Zustand elektrisch anzutreiben – also bei weitestgehend verzögerungsfreier Fahrt mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit, und dabei auch durchaus voll beladen. Ist das Fahrtenprofil allerdings gekennzeichnet durch einen häufigen Wechsel der Leistungsanforderung an den Antriebsstrang des O-Lkws (beispielsweise im Stadtverkehr), so führt dies dazu, dass sich der Verbrennungsmotor gelegentlich zuschaltet. Schaltet sich der Verbrennungsmotor zu, fährt der O-Lkw folglich nicht mehr vollelektrisch; im Gegenteil: Der Verbrennungsmotor schaltet sich nicht nur zu, er übernimmt ab diesem Zeitpunkt sogar auch maßgeblich die Traktionsaufgabe. Soll ein O-Lkw in Zukunft zuverlässig elektrisch betrieben werden, wird es einer leistungsfähigeren E-Maschine bedürfen. An dieser

Stelle festzuhalten ist, dass die begrenzte Leistungsfähigkeit der E-Maschine bislang den Energieverbrauch eines O-Lkws maßgeblich beeinflusst, mit negativen Auswirkungen auf die elektrische Operabilität des O-Lkws.

**Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken.** Je höher dieser Anteil ist, desto mehr Dieselkraftstoff kann eingespart werden. Steht eine Oberleitungsanlage zur Nutzung zur Verfügung, wird ein O-Lkw im Hybrid- oder Elektrisch-Oberleitungsmodus operieren. Hierbei wird wenig bis gar kein Dieselkraftstoff verbraucht (3,30 l/100 km im Hybrid- und 0,00 l/100 km im Elektrisch-Oberleitungsmodus). Wird zeitgleich der elektrische Energiespeicher mit elektrischer Energie aus der Oberleitungsanlage geladen, kann diese elektrische Energie für die elektrische Traktion auf nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten eingesetzt werden – dies führt zu weiteren Einsparungen an Dieselkraftstoff.

**Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Energieverbrauch eines O-Lkws durch die Nutzung einer Oberleitungsanlage gesenkt wird.** Sämtliche der aufgestellten Forschungshypothesen zur Ermittlung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte können, unter Beachtung der vorstehenden Erläuterungen, bestätigt werden (siehe Tabelle 13).

**Tabelle 13: Forschungshypothesen zu Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

<b>Oberziel 2: Ermittlung und Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws</b>		<b>Status</b>
H2a:	Entsprechend dem Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws.	<b>Bestätigt</b>
H2b:	Die Energieflüsse eines O-Lkws können datenbasiert berechnet werden.	<b>Bestätigt</b>
H2c:	Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus des O-Lkws.	<b>Bestätigt</b>
H2d:	Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine.	<b>Bestätigt</b>
H2e:	Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken.	<b>Bestätigt</b>
H2f:	Der Energieverbrauch eines O-Lkws wird durch die Nutzung der Oberleitungsanlage gesenkt.	<b>Bestätigt</b>

#### **4.4 TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTE SOWIE TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW**

##### **4.4.1 TEILVERFAHREN ZUR BERECHNUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN SOWIE ZUR ANALYSE DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS VON O-LKW**

Der vorliegenden Dissertationsschrift wurde als Hauptziel die Analyse und Quantifizierung der Treibhausgasemissionen eines O-Lkws, basierend auf den ausgewerteten Realbetriebsdaten der fünf im ELISA-Forschungsprojekt eingesetzten O-Lkw, zugrunde gelegt. Das Erreichen dieses Ziels erfordert die erfolgreiche und abschließende Bearbeitung einiger Zwischenschritte, wie beispielsweise die Identifikation und Definition von Betriebsmodi eines O-Lkws und hierauf aufbauend die Ermittlung zugehöriger Energiefluss- sowie Energieverbrauchskennwerte. Diese Zwischenziele – das erste und zweite Oberziel dieser Arbeit – ließen sich dank umfangreicher Untersuchungen im Zuge der vorstehenden Erarbeitung erfolgreich erreichen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen nunmehr auf die Analysen zum dritten Oberziel, also auf die **Untersuchungen zu charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerten eines O-Lkws sowie zum möglichen**

---

**Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw.** Die Forschungsaktivitäten zur Untersuchung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems im Rahmen dieser Dissertationsschrift werden hiermit komplettiert.

Um charakteristische Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws zu berechnen, sowie darüber hinaus auch das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial infolge einer auch flächendeckenderen Implementierung des eHighway-Systems zu analysieren, wurde ein aus fünf Verfahrensschritten und 16 Teilaufgaben bestehendes Teilverfahren entwickelt (siehe Abbildung 27).

Dem **ersten Verfahrensschritt** liegt die *Grundlagenaufbereitung unter Einbezug bereits erarbeiteter Erkenntnisse zu Betriebsmodi, Energieflüssen sowie zum Energieverbrauch eines O-Lkws* als Aufgabenstellung zugrunde. In diesem Rahmen werden Forschungshypothesen aufgestellt sowie relevante Grundlagen – insbesondere zu gängigen Treibhausgasemissionsfaktoren für unterschiedliche Dieselmotorkraftstoffe und Strommixvarianten – zusammengetragen. Um die zu berechnenden Ergebnisse besser einordnen zu können, wird weiterhin ein konventionelles Vergleichsfahrzeug in den Untersuchungsprozess integriert.

Der **zweite Verfahrensschritt** ist der *Erarbeitung einer geeigneten Methode zur Berechnung von Treibhausgasemissionskennwerten eines O-Lkws* gewidmet. Orientiert an den Vorgaben nach DIN EN 16258 (siehe Kapitel 3.3) wird eine zielführende Berechnungsmethode aufgestellt. In diesem Zusammenhang werden die bereits im vorherigen Unterkapitel 4.3 berechneten Energieflusskennwerte eines O-Lkws mit Treibhausgasemissionsfaktoren verknüpft. Hierbei ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, die *richtigen* Energieflusskennwerte für die anzustellenden Berechnungen zu identifizieren und folglich weiterzuverwenden. Es schließt sich die Durchführung erster Testberechnungen zur Überprüfung der grundsätzlichen Reliabilität der erarbeiteten Berechnungsmethode an, um diese aufbauend zu finalisieren.

Unterschiedliche Dieselmotorkraftstoffe beziehungsweise unterschiedliche Strommixvarianten sind durch unterschiedliche Treibhausgasemissionsfaktoren charakterisiert. Ein Dieselmotorkraftstoff mit einer fünfprozentigen Beimischung von Biodiesel weist beispielweise einen höheren Treibhausgasemissionsfaktor auf, als ein Dieselmotorkraftstoff mit siebenprozentiger Beimischung an Biodiesel. Gleichermäßen verhält es sich für Strommixvarianten: Je höher der Anteil an sogenanntem *Ökostrom*, desto geringer der Treibhausgasemissionsfaktor. Um im weiteren Verlauf der Untersuchungen verschiedene Szenarien bilden und Einflussfaktoren auf die Treibhausgasemissionsbilanz eines O-Lkws untersuchen zu können, erscheint es zielführend, das Berechnungsverfahren um eine Auswahlmaske zu ergänzen. Die Integration einer Auswahlmaske soll es erlauben, die den Berechnungen zugrunde liegenden Treibhausgasemissionsfaktoren anwendungsfallsspezifisch anzupassen.

Der zweite Verfahrensschritt wird dabei grundsätzlich durch mehrere Iterationsschritte geprägt, bis die Berechnungsmethode final erarbeitet werden konnte.

Im **dritten Verfahrensschritt** erfolgt die *Anwendung der erarbeiteten Berechnungsmethode zur Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws sowie der insgesamt durch O-Lkw emittierten Treibhausgase im ELISA-Forschungsprojekt*. Die Berechnungsmethode wird dabei auf alle im ELISA-Forschungsprojekt eingesetzten O-Lkw sowie auch auf den fiktiven O-Lkw ausgerollt. Es erfolgt hierdurch einerseits die Berechnung der insgesamt im ELISA-Forschungsprojekt emittierten Treibhausgase sowie andererseits auch eine Berechnung, wie viele Treibhausgasemissionen gegenüber dem Einsatz konventioneller Lkw eingespart werden konnten.

Nachfolgender Abbildung 27 lässt sich das entwickelte Teilverfahren entnehmen. Erläuterungen zu den Verfahrensschritten vier und fünf folgen nachstehend.



Oberziel 1: Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws

Oberziel 2: Ermittlung und Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws

**Oberziel 3: Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte und Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw**

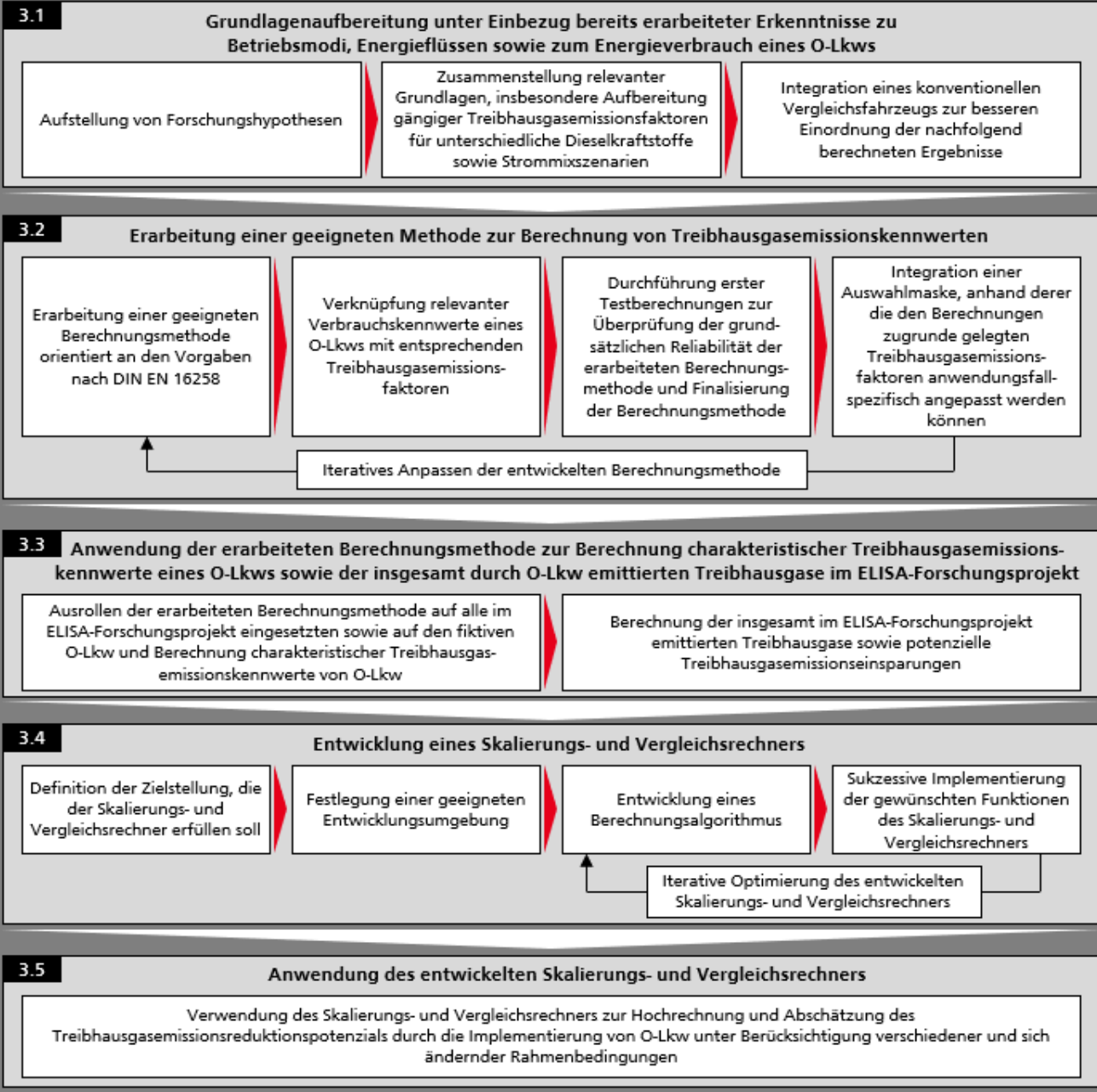


Abbildung 27: Teilverfahren zur Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte sowie zur Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw (Quelle: Eigene Darstellung)

Nun ist aus dem vorangegangenen Unterkapitel 4.3 bereits bekannt, dass sich je Betriebsmodus unterschiedliche Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte ergeben. Je nachdem, wie sich die Betriebsmodi für ein zu betrachtendes Intervall zusammensetzen, wird sich in Folge ein vollkommen unterschiedlicher Gesamt-Energieverbrauch für einen O-Lkw feststellen lassen. Je größer die Anteile der Oberleitungs-Betriebsmodi, desto höher vermutlich auch die Einsparungen an Dieseldieselkraftstoff und in

---

Folge auch an Treibhausgasemissionen. Es bedarf einer Möglichkeit, Hochrechnungen vorzunehmen, und dabei die zugrunde liegenden Rahmenbedingungen vollumfänglich zu verändern. Um dem gerecht zu werden, fokussiert der **vierte Verfahrensschritt** die Entwicklung eines *Skalierungs- und Vergleichsrechners*. Hierfür wird zunächst die Zielstellung definiert, die der Vergleichsrechner erfüllen soll. Aufbauend wird festgelegt, in welche Entwicklungsumgebung der Skalierungs- und Vergleichsrechner eingebettet werden soll. Infolge der Durchführung mehrerer Iterationsschritte wird weiterhin ein Berechnungsalgorithmus entwickelt und hierdurch sukzessive die Funktionsfähigkeit des Skalierungs- und Vergleichsrechners realisiert.

Im **fünften und abschließenden Verfahrensschritt** erfolgt schlussendlich die *Anwendung des entwickelten Skalierungs- und Vergleichsrechners* für Hochrechnungen und Abschätzungen des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials durch die Implementierung von O-Lkw unter Berücksichtigung verschiedener und sich ändernder Rahmenbedingungen.

#### **4.4.2 GRUNDLAGENAUFBEREITUNG UND VORÜBERLEGUNGEN ZUR ANALYSE VON TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN EINES O-LKWS**

Auch für die Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte sowie zur Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw empfiehlt es sich, zunächst zu prüfende und Struktur gebende Forschungshypothesen aufzustellen.

##### **FORSCHUNGSHYPOTHESEN**

Wie vorstehend bereits an verschiedenen Stellen ausgeführt, ist das Emittieren von Treibhausgasemissionen unter anderem eine Folge des Verbrennungsprozesses fossiler Kraftstoffe. Im Straßengüterverkehr ist dieser Verbrennungsprozess bislang sogar der Hauptemittent von Treibhausgasen. Sollte ein Antriebskonzept auf der Verwendung elektrischer Energie basieren, können auch hieraus Treibhausgasemissionen resultieren (FGSV Verlag 2018b, S. 7-12; Schreiner 2017, S. 44). Generell konnte bereits eruiert werden, dass die freiwerdenden **Treibhausgasemissionen eines Fahrzeugs** in einem **proportionalen Verhältnis zum Energieverbrauch eines Fahrzeugs** stehen (Mitschke & Wallentowitz 2014, S. 180). In den vorangegangenen Ausführungen dieser Dissertationsschrift wurde bereits dargelegt, dass sich entsprechend des Betriebsmodus eines O-Lkws teils vollkommen gegensätzliche Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte feststellen lassen (siehe insbesondere Tabelle 12, S. 91). Entsprechend des Energieverbrauchs – bei einem O-Lkw also die Kombination aus Dieselmotorkraftstoff- und Stromverbrauch – wird sich schlussendlich demnach die Treibhausgasemissionsbilanz eines O-Lkws zusammensetzen. Es erscheint folglich zielführend, zunächst die Forschungshypothese zu untersuchen, inwiefern eine Abhängigkeit zwischen den emittierten Treibhausgasen und den Betriebsmodi eines O-Lkws besteht:

**Forschungshypothese H3a: Die durch einen O-Lkw emittierten Treibhausgase sind abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws.**

Im Zusammenhang mit der Grundlagenaufbereitung zur Quantifizierung verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen – siehe Kapitel 3 – wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Betrachtung der Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen hinsichtlich der Bereitstellung von elektrischer Energie Spielraum für Fehlinterpretationen lässt. Es wurde dargelegt, dass elektrisch angetriebene Fahrzeuge lokal zwar durchaus frei von Treibhausgasemissionen sind, jedoch besonderes Augenmerk auf die Bereitstellung der elektrischen Energie gelegt werden muss. Werden für die Erzeugung elektrischer Energie beispielsweise Kohlekraftwerke eingesetzt, so zeigt sich eine beachtliche Menge an Treibhausgasemissionen, die dem Betrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zuzurechnen ist. Wird das Fahrzeug hingegen auf Basis regenerativer Energien angetrieben, so lassen sich durchaus erhebliche Einsparungen an Treibhaus-

gasemissionen realisieren (Posset u. a. 2014, S. 287-288; FGSV Verlag 2018b, S. 10; Schreiner 2017, S. 44-45). Die Zusammensetzung der bereitgestellten elektrischen Energie wird auch als sogenannter *Strommix* bezeichnet. In Deutschland sind die Emissionsfaktoren für die Erzeugung elektrischer Energie seit geraumer Zeit rückläufig. Dies begründet sich in einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix – der Anteil an der sogenannten *Kohleverstromung* nimmt ab (Icha u. a. 2022, S. 8). An dieser Stelle fraglich bleibt, welche Strommixvariante nun sinnigerweise für die anzustellenden Untersuchungen herangezogen werden sollte. Es ist darüber hinaus zu klären, wie sich die den Berechnungen zugrunde gelegte Strommixvariante auf die zu ermittelnden Treibhausgasemissionen eines O-Lkws und dabei auf die möglichen Einsparpotenziale auswirkt. Es gilt zu klären:

**Forschungshypothese H3b: Der Strommix beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an emittierten Treibhausgasen von O-Lkw.**

Im Rahmen der Untersuchungen zu den charakteristischen Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws wurde bereits dargelegt, dass eine Abhängigkeit zwischen dem Energieverbrauch eines O-Lkws und dem Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Streckenabschnitten besteht. Je höher der Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi einer zu analysierenden Fahrt beziehungsweise eines zu untersuchenden Zeit-/Entfernungsintervalls ist, desto größere Anteile hiervon kann der O-Lkw elektrisch zurücklegen. Je mehr elektrisch gefahren werden kann, desto weniger Dieselkraftstoff wird verbraucht. Je weniger Dieselkraftstoff verbraucht wird, desto geringer sollte die Treibhausgasemissionsbilanz eines O-Lkws sein – vorausgesetzt, die durch die Oberleitungsanlage bereitgestellte elektrische Energie basiert auf einem entsprechenden Strommix. So oder so ist anzunehmen, dass eine Abhängigkeit besteht zwischen dem Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitte im Vergleich zu den nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten einer Fahrt und der Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch einen O-Lkw. So ist zu prüfen:

**Forschungshypothese H3c: Der Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitte im Vergleich zu den nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten einer Fahrt beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen von O Lkw.**

Abschließend soll zusammenfassend geprüft werden, ob, und wenn ja, inwieweit der Einsatz von O-Lkw messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr erlaubt. Es soll folglich die Forschungshypothese untersucht werden:

**Forschungshypothese H3d: Der Einsatz von O-Lkw erlaubt messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr.**

## **AUFBEREITUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONSFAKTOREN FÜR UNTERSCHIEDLICHE DIESELKRAFTSTOFFE SOWIE STROMMIXVARIANTEN**

**O-Lkw emittieren aufgrund ihres bislang hybrid ausgelegten Antriebsstrangs Treibhausgase auf zwei verschiedenen Wegen:** Einerseits entstehen Treibhausgasemissionen durch die Verwendung des Verbrennungsmotors, andererseits sollten auch potenziell anfallende Treibhausgasemissionen infolge der Verwendung elektrischer Energie Berücksichtigung finden.

Verschiedene Energieträger sind durch **verschiedene Treibhausgasemissionsfaktoren** charakterisiert. Der Treibhausgasemissionsfaktor von Dieselkraftstoff wird vor allem durch den **Anteil des beigemischten Biokraftstoffs** bestimmt (FGSV Verlag 2018b, S. 19; Hilgers 2016a, S. 4). Ein höherer Beimischungsanteil resultiert in einem geringeren Treibhausgasemissionsfaktor (DIN EN 16258, S. 27). Der **Emissionsfaktor von elektrischer Energie** wird determiniert durch die Art und die Anteile der zur

---

Bereitstellung der elektrischen Energie aufgewendeten Energieträger. Basiert der Bereitstellungsprozess auf einer Kohleverstromung, wird sich für einen solchen Strommix ein höherer Treibhausgasemissionsfaktor registrieren lassen. Basiert ein Strommix hingegen zu großen Teilen auf der Verwendung regenerativer Energien – auch als *Ökostrom* bezeichnet – resultiert dies in einem deutlich geringeren Treibhausgasemissionsfaktor (Posset u. a. 2014, S. 287-288; FGSV Verlag 2018b, S. 10; Schreiner 2017, S. 44-45). Die Zusammensetzung eines Strommixes ist dabei grundsätzlich abhängig von landesspezifischen Rahmenbedingungen. Nach QUASCHNING (2020) entstehen in Deutschland bei der Erzeugung elektrischer Energie derzeit beispielsweise Treibhausgasemissionen in Höhe von durchschnittlich etwas mehr als 0,5 kg/kWh. Würde statt des durchschnittlichen deutschen Strommixes jedoch ein Strommix ausschließlich basierend auf Ökostrom betrachtet werden, so seien die hieraus resultierenden Treibhausgasemissionen nahe Null (Quaschning 2020, S. 87-88). Außerdem unterliegt die Zusammensetzung des Strommixes Schwankungen. So sind die Emissionsfaktoren für die Erzeugung elektrischer Energie in Deutschland seit 1990 rückläufig. Dies hat Gründe: Die „Ursache für den Rückgang der spezifischen Emissionen in 2020 sind der gestiegene Anteil der Erneuerbaren Energien im Strommix, der gesunkene Anteil der Stromerzeugung aus Kohlen sowie der gestiegene Anteil der Stromerzeugung aus Erdgas, welches im Vergleich zu den Kohlen einen niedrigeren Emissionsfaktor aufweist. Der Trend wird zudem durch die Corona Pandemie und die damit eingehende Reduktion der Stromnachfrage verstärkt.“ (Icha u. a. 2022, S. 8)

Je nachdem welcher Dieselkraftstoff beziehungsweise welche Strommixvariante für die Berechnungen von Treibhausgasemissionen herangezogen wird, werden sich unterschiedliche Ergebnisse feststellen lassen. Es ist also besonderes Augenmerk darauf zu legen, die **korrekten Treibhausgasemissionsfaktoren** für die Berechnungen zu berücksichtigen. Nach DIN EN 16258 wird in diesem Zusammenhang für die Berechnung der Treibhausgasemissionen eines Lkws hinsichtlich der verwendeten elektrischen Energie beispielsweise vorgegeben, dass hierfür im Idealfall der Treibhausgasemissionsfaktor für den *tatsächlich* verwendeten Strommix heranzuziehen ist (DIN EN 16258, S. 29). Im ELISA-Forschungsprojekt lassen sich hierzu die folgenden Rahmenbedingungen vorfinden: Sämtliche O-Lkw werden mit Dieselkraftstoff versorgt, der über einen siebenprozentigen Biodieselanteil verfügt. Die Oberleitungsanlage wird zu 100 % mit Ökostrom versorgt (zugehörige Treibhausgasemissionsfaktoren werden in nachstehender Tabelle 14 fettgedruckt hervorgehoben).

Werden die ermittelten Treibhausgasemissionsfaktoren im Nachfolgenden mit den charakteristischen Energieverbrauchskennwerten eines O-Lkws verrechnet, lassen sich Rückschlüsse auf die **charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws** ziehen. An dieser Stelle ist es jedoch von besonderer Wichtigkeit, **eine „Schönrechnung“ des O-Lkw-Betriebs zu vermeiden**. Experten werden vermutlich einwenden, dass die Versorgung eines O-Lkws mit 100 % Ökostrom durch die Oberleitungsanlage zwar zunächst eine hervorragende Treibhausgasemissionsbilanz des O-Lkws zur Folge haben wird; doch würde ein solches Vorgehen zu einer Kannibalisierung des gesamtheitlich betrachteten Strommarkts führen. Dies hat folgenden Hintergrund: Es steht gegenwärtig nur eine beschränkte Menge an Ökostrom im Strommarkt zur Verfügung. Wird diese beschränkte Menge explizit einem Verbraucher zugewiesen, mag sich zwar dieser Verbraucher durch gute Treibhausgasemissionskennwerte auszeichnen, doch fehlt diese Menge wiederum an anderer Stelle im Strommarkt und muss durch einen entsprechend schlechteren Strommix ausgeglichen werden. Gesamtheitlich betrachtet sollte aus diesem Grund also stets der durchschnittliche Strommix für etwaige Berechnungen herangezogen werden – auch dann, wenn die Oberleitungsanlage dem O-Lkw grundsätzlich zu 100 % Ökostrom zur Verfügung stellt. Diesen Aspekt gilt es in den nachfolgend durchzuführenden Berechnungen zu berücksichtigen.

Nachfolgende Tabelle 14 fasst die zusammengetragenen Emissionsfaktoren für verschiedene Dieselkraftstoffe und (deutsche) Strommixvarianten zusammen.

**Tabelle 14: Emissionsfaktoren für Dieseldieselkraftstoff und Strommixszenarien**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Dieseldieselkraftstoff*	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> e/l]		Strommix	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> e/kWh]	
	Well-to-Wheel	Tank-to-Wheel		Well-to-Wheel	Tank-to-Wheel
Dieseldieselkraftstoff (0% Biodieseldieselanteil)	3,24	2,67	Deutschland, 2021, inkl. Vorkette**	0,485	0,000
Dieseldieselkraftstoff (1% Biodieseldieselanteil)	3,23	2,64	Deutschland, 2030, inkl. Vorkette***	0,474	0,000
Dieseldieselkraftstoff (2% Biodieseldieselanteil)	3,21	2,62	Deutschland, 2040, inkl. Vorkette***	0,251	0,000
Dieseldieselkraftstoff (3% Biodieseldieselanteil)	3,20	2,59	Deutschland, 2050, inkl. Vorkette***	0,139	0,000
Dieseldieselkraftstoff (4% Biodieseldieselanteil)	3,19	2,56	<b>100% Ökostrom****</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Dieseldieselkraftstoff (5% Biodieseldieselanteil)	3,17	2,54	<b>Fett = Rahmenbedingungen im ELISA-Forschungsprojekt</b>		
Dieseldieselkraftstoff (6% Biodieseldieselanteil)	3,16	2,51	* (Europäisches Komitee für Normung & Deutsches Institut für Normung e. V. 2013)		
<b>Dieseldieselkraftstoff (7% Biodieseldieselanteil)</b>	<b>3,15</b>	<b>2,48</b>	** (Icha u. a. 2022)		
Dieseldieselkraftstoff (8% Biodieseldieselanteil)	3,13	2,46	*** (Allekotte u. a. 2020)		
Dieseldieselkraftstoff (9% Biodieseldieselanteil)	3,12	2,43	**** (ENTEGA Plus GmbH, Darmstadt 2020)		
Dieseldieselkraftstoff (10% Biodieseldieselanteil)	3,11	2,40			
Dieseldieselkraftstoff (15% Biodieseldieselanteil)	3,04	2,27			
Dieseldieselkraftstoff (20% Biodieseldieselanteil)	2,98	2,14			
Dieseldieselkraftstoff (50% Biodieseldieselanteil)	2,58	1,34			
Dieseldieselkraftstoff (85% Biodieseldieselanteil)	2,12	0,40			
Dieseldieselkraftstoff (100% Biodieseldieselanteil)	1,92	0,00			

#### INTEGRATION EINES KONVENTIONELLEN VERGLEICHFAHRZEUGS

Um die zu berechnenden Treibhausgasemissionskennwerte sowie insgesamt emittierten Treibhausgase durch O-Lkw im ELISA-Forschungsprojekt nachvollziehbar interpretieren zu können, wird es eines Vergleichs bedürfen. Es ist folglich ein angemessener *Vergleichsfall* zu definieren. Hierbei ist sorgfältig und bedacht vorzugehen: Je nachdem, wie ein solcher Vergleichsfall definiert wird, werden sich schlussendlich höhere oder geringere Einsparungen feststellen lassen (Hilgers 2016a, S. 40-41). Es erscheint zielführend, den **Status quo im Straßengüterverkehr als Vergleichsfall** zu definieren. Dadurch, dass im Straßengüterverkehr gegenwärtig fast ausschließlich dieseldieselbetriebene Fahrzeuge im Einsatz sind (Allekotte u. a. 2020, S. 44; Boltze 2020), soll als Vergleich also ein konventioneller Dieseldiesel-Lkw herangezogen werden.

Neben der **Wahl des Vergleichsfahrzeugs** ist es zusätzlich ratsam, sich auch mit dem Anwendungsfall zu beschäftigen, anhand welchem ein Vergleich angefertigt werden soll. HILGERS (2016A) hat sich in einem ähnlichen Zusammenhang, nämlich den potenziellen Energieverbrauchseinsparungen von Hybrid-Fahrzeugen, bereits mit einer ähnlichen Thematik befasst und warnt auf Basis seiner Erfahrungen entsprechend: „Ein geeignet gewähltes Einsatzprofil lässt sehr hohe Einsparungen zu: Können zufällig sämtliche Bremsungen mit dem Elektromotor durchgeführt werden und erfolgen keine längeren Konstantfahrten, so sind sehr hohe prozentuale Verbrauchseinsparungen zu erzielen. Fährt das Fahrzeug aber eine Strecke, die der Hybridtechnik nicht entgegenkommt, so sind die realen Einsparungen gering.“ (Hilgers 2016a, S. 40-41)

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, erscheint es sinnig, den **Vergleich auf Basis des im ELISA-Forschungsprojekt ausgewerteten Realbetriebs** anzufertigen. Zwar konnte im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekt kein *reales* konventionelles Vergleichsfahrzeug im Realbetrieb eingesetzt werden, doch kann an dieser Stelle auf **literaturbasierte Standardwerte** zurückgegriffen werden. BLECHSCHMIDT U. A. (2022, S. 116) geben an, dass ein konventioneller 40t-Dieseldiesel-Lkw-Sattelzug über einen durchschnittlichen Dieseldieselverbrauchswert von 33 l/100 km verfügt. Den Ausführungen von BREUER UND KOPP (2016, S. 62) lässt sich der gleiche Wert entnehmen. HILGERS (2016C, S. 4) zufolge bietet es sich an,



---

einen Durchschnittsverbrauch von 34 l/100 km für einen konventionellen Diesel-Lkw heranzuziehen. Es lässt sich diesen Angaben nicht immer zweifelsfrei entnehmen, ob es sich dabei um Verbrauchswerte für einen vollbeladenen oder leeren 40t-Lkw-Sattelzug handelt. Es ist aber anzunehmen, dass es sich bei diesen (in der Literatur) genannten Verbrauchswerten ebenfalls um Durchschnittswerte handelt. Da im Rahmen dieser Dissertationsschrift eine „Schönrechnung“ der Treibhausgasemissionseinsparungen von O-Lkw vermieden werden soll, wird **für einen konventionellen Vergleichs-Lkw ein Durchschnittsverbrauch von 31,4 l/100 km** angenommen. In verschiedenen Rücksprachen mit an dem ELISA-Forschungsprojekt beteiligten Transportunternehmen war es möglich, diesen Wert anhand des Wissens dieser Branchenexperten zusätzlich als durchaus zutreffenden Wert zu validieren.

Als Vergleichsfall wird nun also ein konventioneller Diesel-Lkw herangezogen, dem als Fahrprofil dieselbe Transportdistanz zugrunde gelegt wird, die durch den fiktiven O-Lkw zurückgelegt wurde. Durchschnittlich verbraucht der konventionelle Diesel-Lkw dabei 31,4 l/100 km an Dieselkraftstoff.

#### 4.4.3 METHODE ZUR BERECHNUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN EINES O-LKWS

Zur **Berechnung von Treibhausgasemissionskennwerten eines O-Lkws** wurde eine Methode entwickelt, die sich an den Vorgaben gemäß DIN EN 16258 orientiert (grundlegende Erläuterungen zum Vorgehen nach DIN EN 16258 siehe Kapitel 3.3).

Zunächst werden anhand von **Messungen durch die Datenlogger**, die in den O-Lkw verbaut wurden, Realdaten zum O-Lkw-Betrieb erhoben. Die erhobenen Daten werden anschließend in Betriebsmodi unterteilt – es wurde vorstehend hierzu bereits detailliert ausgeführt. In Summe entspricht dieses Vorgehen dem ersten Schritt nach DIN EN 16258 (*Schritt 1: Sofern erforderlich, Zerlegung der zu bilanzierenden Transportdienstleistungen in Teilstrecken*).

Hierauf aufbauend werden die **je Betriebsmodus resultierenden charakteristischen Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte berechnet** – auch diese Aufgabe konnte bereits erledigt werden, die vorstehenden (Unter-)Kapitel führten hierzu entsprechend aus. Um nun Kenntnisse auf die je Betriebsmodus geltenden Treibhausgasemissionskennwerte zu erhalten, bedarf es einer Verrechnung der Energieverbrauchskennwerte mit zugehörigen Treibhausgasemissionsfaktoren, die im vorstehenden Unterkapitel 4.4.2 bereits zusammengetragen wurden. In Summe entspricht dies dem zweiten Schritt des nach DIN EN 16258 empfohlenen Vorgehens (*Schritt 2: Berechnung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen für jede identifizierte Teilstrecke*). Die Verrechnung von Energieverbrauchswert mit zugehörigem Treibhausgasemissionskennwert erfolgt dabei entsprechend des folgenden Ablaufs:

1. Auswahl des Dieselkraftstofftyps sowie der Strommixvariante, die für die Berechnungen herangezogen werden sollen.
2. Multiplikation aus den entsprechenden Energieverbrauchskennwerten des zu analysierenden Betriebsmodus mit den vorausgewählten Treibhausgasemissionsfaktoren.

Zum besseren Verständnis soll eine **Beispielrechnung** durchgeführt werden: Berechnet werden soll der charakteristische Treibhausgasemissionsfaktor für den Hybrid-Standardmodus für den fiktiven O-Lkw über den gesamten Datenerfassungszeitraum. Zunächst wird der Dieselkraftstofftyp gewählt. Der fiktive O-Lkw wird mit Dieselkraftstoff betankt, dessen Biodieselanteil 7 % beträgt. Der Treibhausgasemissionsfaktor hierfür beträgt nach Tabelle 14 (S. 104) folglich 3,15 kg CO<sub>2</sub>e/l (Well-to-Wheel). Aus Tabelle 12 (S. 91) ist bekannt, dass der durchschnittliche Dieselkraftstoffverbrauch im Hybrid-Standardmodus 30,53 l/100 km beträgt. Die Multiplikation dieser Werte unter Beachtung der korrekten Umrechnung von kg in g sowie von 100 km in km führt im Ergebnis zu einem Treibhausgasemissionskennwert von 961,64 g CO<sub>2</sub>e/km.

Jedoch verbraucht ein O-Lkw im Hybrid-Standardmodus nicht nur Dieselmotorkraftstoff, sondern zusätzlich auch elektrische Energie. Dieser Verbrauch an elektrischer Energie muss bei der Berechnung des charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerts für diesen Betriebsmodus, beziehungsweise generell für die Berechnung von charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerten differenziert nach Betriebsmodi, logischerweise ebenfalls Berücksichtigung finden. Doch stellt die Ermittlung des *korrekten* Verbrauchs an elektrischer Energie hinsichtlich der **Berechnung der Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws tatsächlich eine größere Herausforderung** dar, als vermeintlich anzunehmen sein sollte. Es sollte angenommen werden, dass der berechnete Stromverbrauchskennwert auf Basis der E-Maschine ( $EM_{\text{Stromverbrauch}}$ ) zur Bilanzierung heranzuziehen ist. Dieses Vorgehen brächte allerdings tatsächlich fehlerhafte Ergebnisse hervor. Statt den Stromverbrauch auf Basis der E-Maschine zu ermitteln, muss zunächst vielmehr betrachtet werden, auf welchen Wegen ein O-Lkw elektrische Energie beziehen kann: Ein O-Lkw kann elektrische Energie beziehen

- erstens über die Oberleitungsanlage,
- zweitens durch Rekuperation und
- drittens durch Leistungsüberschüsse des Verbrennungsmotors.
- *Zukünftige O-Lkw werden darüber hinaus gegebenenfalls zusätzlich elektrische Energie durch eine Plug-in-Ladefunktion beziehen können; derzeit fehlt es allerdings noch an einer solchen Möglichkeit.*

Wird der Verbrennungsmotor eingesetzt um Leistungsüberschüsse zu erzeugen, so wird hierdurch Dieselmotorkraftstoff verbraucht. Die dem O-Lkw zur Verfügung gestellte elektrische Energie stammt also nicht aus einem Stromnetz, sondern wurde fahrzeugintern unter Einsatz des Dieselmotorkraftstoffs erzeugt. Dieser **Anteil an elektrischer Energie wurde folglich bereits an anderer Stelle bilanziert**, nämlich im Zusammenhang mit dem Dieselmotorkraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors. Ähnlich verhält es sich mit elektrischer Energie, die infolge von Rekuperationsprozessen gewonnen wurde. Dieser Anteil an elektrischer Energie erfordert sogar keinerlei Energieeinsatz und ist somit gar nicht hinsichtlich emittierter Treibhausgase zu bilanzieren. Die einzige Menge an elektrischer Energie, die bislang keine Berücksichtigung hinsichtlich einer Treibhausgasemissionsbilanzierung fand, ist diese, die dem O-Lkw *extern durch die Oberleitungsanlage* zur Verfügung gestellt wird (und zukünftig zusätzlich durch das Plug-in-Laden). Daraus lässt sich ableiten, dass ein Teil der schlussendlich durch die E-Maschine verwendeten elektrischen Energie also bereits hinsichtlich der Treibhausgasemissionen bilanziert wurde.

**Um eine Doppelbilanzierung zu vermeiden, darf folglich lediglich die Menge an elektrischer Energie Berücksichtigung finden, die dem O-Lkw von extern hinzugeführt wird.**

Die **weiteren Schritte zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen** orientieren sich dann an dem **Verursacherprinzip**. Das heißt konkret: Die Treibhausgase infolge der Aufwendung von elektrischer Energie werden zu diesem Zeitpunkt als *emittiert* betrachtet, sobald diese von extern dem O-Lkw zur Verfügung gestellt wurden – gegenwärtig also ausschließlich in den Oberleitungs-Betriebsmodi. Zwar wird die in den Oberleitungs-Betriebsmodi aus der Oberleitungsanlage bezogene elektrische Energie nicht zwangsläufig direkt zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich aufgewendet – man denke an dieser Stelle an die zusätzlich in den elektrischen Energiespeicher geladene Energie für eine Aufwendung zu einem späteren Zeitpunkt, wenn keine Oberleitungsanlage zur Energieversorgung zur Verfügung steht – doch lässt sich aufgrund der aktuell zur Verfügung stehenden Datenbasis im Nachhinein nicht mehr eindeutig zurückverfolgen, aus welcher Quelle die zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt aufgewendete elektrische Energie ursprünglich bereitgestellt wurde. Es wäre zum tatsächlichen Verbrauchszeitpunkt also unklar, ob die dann aufgewendete elektrische Energie bereits an anderer Stelle bilanziert wurde, oder eben nicht. Durch die Berücksichtigung des Verursacherprinzips wird demnach sichergestellt, dass schlussendlich sämtliche anfallenden Treibhausgasemissionen im Bilanzierungsverfahren Berücksichtigung finden und das ohne, dass hierbei eine Doppelbilanzierung erfolgt.

Sollen darüber hinaus nicht nur charakteristische Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws, sondern zusätzlich auch die **insgesamt emittierten Treibhausgase** berechnet werden, müssen die vorangestellten charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws mit der zurückgelegten Transportdistanz im zu untersuchenden Betrachtungsintervall verknüpft werden. Dies entspricht dem dritten Schritt gemäß des Vorgehens nach DIN EN 16258 (*Schritt 3: Addition der Einzelergebnisse von jeder Teilstrecke zu einem Gesamtergebnis*).

Im Ergebnis stehen nun also einerseits charakteristische Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws zur Verfügung, die insbesondere für die Anfertigung von Hochrechnungen oder die Aufstellung von zukünftigen Einsatzszenarien Verwendung finden können. Andererseits lassen sich die insgesamt im ELISA-Forschungsprojekt emittierten und eingesparten Treibhausgase infolge des O-Lkw-Betriebs ermitteln. Die nachfolgenden Abschnitte der Dissertationsschrift führen hierzu weiter aus.

#### 4.4.4 CHARAKTERISTISCHE TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTE EINES O-LKWS

Die vorstehend erarbeiteten Erkenntnisse erlauben nunmehr die **Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws**. Die Berechnungsergebnisse können der nachfolgenden Tabelle 15 zusammenfassend entnommen werden.

**Tabelle 15: Charakteristische Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für den fiktiven O-Lkw nach Betriebsmodi)

Betriebsmodus des O-Lkws	Diesel- verbrauch	Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	Treibhausgas- emissionen (Well-to-Wheel)	Treibhausgas- emissionen (Tank-to-Wheel)	
	[l/100km]	[kWh/100km]	[g CO <sub>2</sub> e/km]	[g CO <sub>2</sub> e/km]	
Hybrid-Standardmodus	30,53	0,00	961,64*	961,64**	757,10*
Elektrisch-Standardmodus	0,00	0,00	0,00*	0,00**	0,00*
Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)	3,30	125,88	103,92*	714,44**	81,81*
Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	3,30	102,63	103,92*	601,66**	81,81*
Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)	0,00	138,07	0,00*	669,65**	0,00*
Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	0,00	111,49	0,00*	540,73**	0,00*
Übergangsmodus	0,13	0,00	4,07*	4,07**	3,20*
Konventioneller Diesel-Lkw (zum Vergleich)	31,40***	0,00	989,10*	989,10**	778,72*

\* berechnet mit „Dieselkraftstoff (7% Biodieselanteil)“ und „100% Ökostrom“

\*\* berechnet mit „Dieselkraftstoff (7% Biodieselanteil)“ und Strommix „Deutschland, 2021, inkl. Vorkette“

\*\*\* Annahme

Die dargestellten Werte sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration der O-Lkw.

Zur Berechnung der charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerte wurden für die **Treibhausgasemissionsfaktoren** die im ELISA-Forschungsprojekt vorherrschenden Rahmenbedingungen berücksichtigt: Als Dieselkraftstoff wird ein solcher verwendet, der über einen siebenprozentigen Biodieselanteil verfügt. Bezüglich des verwendeten Strommixes soll dem vorstehend bereits erläuterten Sachverhalt Rechnung getragen und keine Kannibalisierung des Strommarktes vorgenommen werden, indem einerseits der beste (100 % Ökostrom) und andererseits der aktuell schlechteste anzunehmende Strommix (Strommix von Deutschland im Referenzjahr 2021, inklusive Vorkette) in die Analysen inkludiert werden. Zur besseren Einordnung wurde ferner auch der charakteristische Treibhausgasemissionskennwert für den konventionellen Diesel-Lkw ermittelt.

Den Erwartungen entsprechend zeigt sich im Ergebnis, dass die **charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerte** stark vom jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws abhängen. Der höchste Treibhausgasemissionskennwert lässt sich feststellen, wenn ein O-Lkw im Hybrid-Standardmodus operiert. In diesem Modus werden durchschnittlich 961,64 g CO<sub>2</sub>e/km emittiert (Well-to-Wheel). Diese Treibhausgasemissionen resultieren alleinig aus dem Betrieb des Verbrennungsmotors. Im Elektrisch-Standard-

modus werden durch den O-Lkw keine Treibhausgase emittiert: Die Treibhausgase, die durch die Bereitstellung von elektrischer Energie durch den elektrischen Energiespeicher bei einer Well-to-Wheel-Betrachtung theoretisch zu bilanzieren wären, werden an anderer Stelle erfasst (siehe hierzu auch Ausführungen in Kapitel 4.4.3).

Bezüglich der Oberleitungs-Betriebsmodi zeigt sich sehr deutlich der **Einfluss verschiedener Strommixvarianten**. Wird den Berechnungen ein Strommix zugrunde gelegt, der zu 100 % auf Ökostrom basiert, so führt dies im Elektrisch-Oberleitungsmodus zu keinerlei Treibhausgasemissionen. Im Hybrid-Oberleitungsmodus fallen lediglich Treibhausgasemissionen durch das Mitlaufen des Verbrennungsmotors in Höhe von durchschnittlich 103,92 g CO<sub>2</sub>e/km an (Well-to-Wheel). Wird statt eines Strommixes, der sich zu 100 % aus Ökostrom zusammensetzt, der durchschnittliche Strommix von Deutschland aus dem Jahr 2021 inklusive Berücksichtigung von Vorkettenprozessen verwendet, so resultiert dies zum Vergleich in durchschnittlichen Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) von

- 540,73 g CO<sub>2</sub>e/km statt 0,00 g CO<sub>2</sub>e/km im Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden),
- 601,66 g CO<sub>2</sub>e/km statt 103,92 g CO<sub>2</sub>e/km im Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden),
- 669,65 g CO<sub>2</sub>e/km statt 0,00 g CO<sub>2</sub>e/km im Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden) oder
- 714,44 g CO<sub>2</sub>e/km statt 103,92 g CO<sub>2</sub>e/km im Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden).

**Der Einfluss des Strommixes lässt sich an dieser Stelle deutlich erkennen: Je höher der Anteil an Ökostrom im zur Verfügung stehenden Strommix, desto bessere Treibhausgasemissionskennwerte lassen sich schlussendlich auch für den O-Lkw realisieren. \***

*\*Dieser Zusammenhang ist übrigens übertragbar auf sämtliche elektrisch angetriebene Fahrzeuge, Maschinen oder ähnliches.*

Ohne Vergleich lassen sich die vorstehend dargelegten Treibhausgasemissionskennwerte eines O-Lkws nur schwer interpretieren. Zur besseren Nachvollziehbarkeit soll daher vergleichend kurz auf den **Treibhausgasemissionskennwert eines konventionellen Diesel-Lkws** eingegangen werden. Ein konventioneller Diesel-Lkw mit einem mittleren Dieselmotorkraftstoffverbrauch in Höhe von 31,4 l/100 km emittiert durchschnittlich 989,10 g CO<sub>2</sub>e/km (Well-to-Wheel). Ein O-Lkw emittiert also in jedem Betriebsmodus weniger Treibhausgase als ein konventioneller Diesel-Lkw. Wie hoch das tatsächliche Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw schlussendlich sein wird, wird durch die **Betriebsmodiverteilung** im zugrunde liegenden Betrachtungsintervall determiniert. Im Nachfolgenden wird hierzu weiter ausgeführt. Zunächst soll der Fokus jedoch auf die insgesamt durch O-Lkw emittierten und eingesparten Treibhausgase im ELISA-Forschungsprojekt gerichtet werden.

#### **4.4.5 TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND -EINSPARUNGEN IM ELISA-FORSCHUNGSPROJEKT**

Zur Untersuchung der **insgesamt durch O-Lkw emittierten und eingesparten Treibhausgase im ELISA-Forschungsprojekt** können 643.096 Kilometer, zurückgelegt durch O-Lkw im Realbetrieb, ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung der im ELISA-Forschungsprojekt vorherrschenden Rahmenbedingungen fuhr der fiktive O-Lkw hiervon knapp 550.000 Kilometer im Hybrid-Standardmodus und etwa 55.000 Kilometer im Elektrisch-Standardmodus. Auf etwa 28.000 Kilometern bestand eine Verbindung des Pantographen zur Oberleitungsanlage (entspricht einem Anteil von etwa 4,33 %). In Summe wurden durch den fiktiven O-Lkw knapp 170.000 Liter an Dieselmotorkraftstoff verbraucht. Zusätzlich wurden rund 36.000 Kilowattstunden elektrische Energie aus der Oberleitungsanlage bezogen. Hieraus folgt:

**Im ELISA-Forschungsprojekt wurden in Summe, je nach Strommix, circa 531 bis 548 Tonnen CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel) emittiert (auf Basis von 643.096 auswertbaren Kilometern).**

Auch diese Ergebnisse sind ohne entsprechenden Vergleich nur schwer nachzuvollziehen. So soll auch hierfür erneut der **konventionelle Diesel-Lkw** in die Analysen miteinbezogen werden. Dem fiktiven

O-Lkw war es im Vergleich zum konventionellen Diesel-Lkw möglich, rund 33.000 Liter Dieselkraftstoff einzusparen (entspricht einer Einsparung von ~17 %). Bezüglich der Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) lässt sich durch den Betrieb von O-Lkw im ELISA-Forschungsprojekt eine Ersparnis von – je nach Strommix – rund 88 bis 105 Tonnen CO<sub>2e</sub> feststellen (entspricht einer Einsparung von ~14 bis 17 %).

Die berechneten Ergebnisse zu den insgesamt durch O-Lkw emittierten und eingesparten Treibhausgasen im ELISA-Forschungsprojekt lassen sich im Detail der nachfolgenden Tabelle 16 entnehmen.

**Tabelle 16: Durch O-Lkw emittierte und eingesparte Treibhausgase im ELISA-Forschungsprojekt**

(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für alle O-Lkw zusammengefasst. Datenbasis: Juni 2019 bis Dezember 2022)

Betriebsmodus des O-Lkws	Zurück- gelegte Strecke	Diesel- verbrauch	Elektr. Energie- aufnahme aus externer Quelle	Treibhausgas- emissionen (Well-to-Wheel)		Treibhausgas- emissionen (Tank-to-Wheel)
	[km]	[l]	[kWh]	[kg CO <sub>2e</sub> ]	[kg CO <sub>2e</sub> ]	[kg CO <sub>2e</sub> ]
Hybrid-Standardmodus	549.745	167.828	0	528.656*	528.656**	416.212*
Elektrisch-Standardmodus	54.674	0	0	0*	0**	0*
Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)	20.252	668	25.493	2.105*	14.469**	1.657*
Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	0	0	0	0*	0**	0*
Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)	7.615	0	10.514	0*	5.099**	0*
Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	0	0	0	0*	0**	0*
Übergangsmodus	10.810	14	0	44*	44**	35*
Gesamt (O-Lkw)	643.096	168.510	36.007	530.805*	548.268**	417.904*
Konventioneller Diesel-Lkw (zum Vergleich)	643.096	201.932	0	636.086*	636.086**	500.792*
<b>Einsparungen im ELISA-Projekt</b>	//	<b>-33.422</b>	<b>+36.007</b>	<b>-105.281*</b>	<b>-87.818**</b>	<b>-82.888*</b>

\* berechnet mit „Dieselkraftstoff (7% Biodieselanteil)“ und „100% Ökostrom“

\*\* berechnet mit „Dieselkraftstoff (7% Biodieselanteil)“ und Strommix „Deutschland, 2021, inkl. Vorkette“

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf den Rahmenbedingungen im ELISA-Projekt. Die dargestellten Ergebnisse stellen nicht das gesamte Einsparpotenzial der eHighway-Technologie dar.

Es ist wichtig, an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass die **berechneten Treibhausgasemissionen und -einsparungen auf den Rahmenbedingungen im ELISA-Forschungsprojekt basieren**. Die besonders limitierenden Faktoren stellen hierbei die technische Konfiguration der aktuell eingesetzten O-Lkw-Generation sowie der mögliche Anteil an Oberleitungs-Betriebsmodi dar. Die Ergebnisse sind dabei (noch) nicht repräsentativ für O-Lkw, die in einem zukünftig sinnvoll ausgelegten Netz an Oberleitungsanlagen operieren. Doch wird bereits an dieser Stelle deutlich, dass der Einsatz von O-Lkw zu deutlichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen führen kann – selbst unter Berücksichtigung eines noch recht geringen Anteils an durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierte Strecke von weniger als fünf Prozent gemessen an der insgesamt zurückgelegten Strecke. Dem insgesamt möglichen Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen durch O-Lkw in einem zukünftig sinnvoll ausgelegten Netz an Oberleitungsanlagen soll nun im folgenden Abschnitt nachgegangen werden.

#### 4.4.6 ENTWICKLUNG EINES SKALIERUNGS- UND VERGLEICHSRECHNERS

Konnten vorstehend bereits wertvolle Erkenntnisse zum Energieverbrauch sowie zu emittierten und eingesparten Treibhausgasen von O-Lkw erarbeitet werden, basieren diese Erkenntnisse bislang auf den limitierten Rahmenbedingungen im ELISA-Forschungsprojekt. Sie erlauben somit noch keinen belastbaren Rückschluss auf die Zukunftsfähigkeit des O-Lkws beziehungsweise des eHighway-Systems als Ganzes in einem strategisch sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen. Ob das **eHighway-System eine vielversprechende Zukunftsperspektive** haben wird, wird schlussendlich aber sicherlich genau hiervon abhängen – nämlich ob die strategisch sinnvolle Implementierung des eHighway-Systems signifikante Einsparungen an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr wird ermöglichen können. Um das Zukunftspotenzial von O-Lkw zu ermitteln, wird es weiterer Analysen bedürfen unter



---

der Berücksichtigung sich verändernder Rahmenbedingungen, wie beispielsweise eines zunehmenden Anteils an Streckenabschnitten, die mit einer Oberleitungsanlage elektrifiziert wurden. Dieser Aufgabe soll im Folgenden nachgegangen werden.

#### **VORÜBERLEGUNGEN ZUM ENTWICKLUNGSBEDARF EINES SKALIERUNGS- UND VERGLEICHSRECHNERS**

Es ließen sich für die noch ausstehenden Analysen sicherlich weitere praktische und ausgedehntere Felderproben unter realen Einsatzbedingungen durchführen. Doch muss an dieser Stelle kritisch hinterfragt werden, bis zu welchem Grad eine Erweiterung solcher praktischen Erprobungen zu einem noch zu rechtfertigenden Mehrwert an Ergebnissen führt, oder diese nicht anderweitig kosten- und aufwandsoptimiert substituiert werden können. Unter anderem SCHRAMM U. A. (2018, S. 2) weisen beispielsweise darauf hin (im Kontext von Kraftfahrzeugentwicklungen), dass mit zunehmendem Erprobungsbedarf in der Entwicklungsphase eines neuen Produkts – im vorliegenden Fall also das eHighway-System – das Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht außer Acht gelassen werden sollte. So sei nach umfangreichen Erprobungsphasen im Realbetrieb für die weiteren Untersuchungen zum dann noch ausstehenden Erkenntnisgewinn gegebenenfalls auch die Simulation oder die Modellbildung in Betracht zu ziehen. Zusätzliche Erprobungen, die durch Kosten und Aufwand geprägt sein können, ließen sich hierdurch vermeiden. Ferner sei durch die **theoretische Modellbildung** auch eine Parametervariation und das Ändern von Rahmenbedingungen deutlich einfacher zu realisieren, als sich dies im realen Feldversuch umsetzen ließe (Schramm u. a. 2018, S. 2-3). Wird die Verwendung von Simulationen oder Modellen in Betracht gezogen, ist besondere Sorgfalt auf die Entwicklung der Simulation beziehungsweise des Modells zu legen. Ein solches Instrument wird nämlich nur dann zuverlässige Ergebnisse hervorbringen, wenn dieses die Realität möglichst exakt wiedergeben kann (Schramm u. a. 2018, S. 3). SCHORN (2006) führt hierzu aus, dass eine hohe Komplexität zwar eine möglichst exakte Wiedergabe der tatsächlichen Wirklichkeit erlaube, diese aber auch zu einer komplizierteren Modellbildung führe. Ein weniger komplexes Modell hingegen sei einfacher zu konstruieren, resultiere aber auch in einer eingeschränkteren Belastbarkeit der Ergebnisse. Letztlich entscheide die Aussagegüte, die durch Anwendung des Modells gewährleistet werden soll, über den erforderlichen Grad an Komplexität (Schorn 2006, S. 28). Es sollte an dieser Stelle also tatsächlich kritisch hinterfragt werden, inwieweit die bis dato vorliegenden Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems auf Basis des ELISA-Forschungsprojekts nicht gegebenenfalls bereits genügen, um hierauf aufbauend ein Modell zu konstruieren, dessen Anwendung es erlaubt, möglichst zutreffende und belastbare Zukunftsprognosen zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw zu erarbeiten. Kosten und Aufwand durch komplexe praktische Erprobungen ließen sich hierdurch – wie auch die Theorien von SCHORN (2006) und SCHRAMM U. A. (2018) belegen – unter Umständen vermeiden, ohne dabei auf den noch ausstehenden und benötigten Erkenntnisgewinn zur Entscheidung für oder gegen das eHighway-System verzichten zu müssen. Dieser Aufgabenstellung soll im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen nachgegangen werden: Es soll einerseits durch die **Entwicklung des Skalierungs- und Vergleichsrechners „ERSparnis“** (*Ermittlung von spezifischen Verbrauchsparametern für Electric Road Systems nutzende Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Pilotbetrieb "ELISA" mit oberleitungsgebundenen Lastkraftwagen*) versucht werden, ein Instrument zu erarbeiten, dessen Verwendung es erlaubt, Rückschlüsse auf die Zukunftsfähigkeit von O-Lkw unter sich verändernden Rahmenbedingungen zu ziehen. Andererseits soll diskutiert werden, inwiefern „ERSparnis“ es erlaubt, die Notwendigkeit potenziell weiterer praktischer Felderproben zu egalisieren.

Nun darf an dieser Stelle aufbauend hinterfragt werden, warum es überhaupt eines solchen Modellrechners bedarf und aus welchem Grund die bislang erarbeiteten Ergebnisse auf Basis des ELISA-Forschungsprojekts nicht einfach skaliert werden können. Die Frage ist durchaus berechtigt, die Antwort verbirgt sich in der nur **schwer vorhersagbaren Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws**

---

**unter sich ändernden Rahmenbedingungen.** Dabei ist genau auf diese Zusammensetzung besonderes Augenmerk zu legen: Es ist vor allem die Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws, die einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch und hieraus resultierend auf die Treibhausgasemissionen nimmt. Ändert sich die Zusammensetzung der Betriebsmodi, ändert sich der Energieverbrauch. Ändert sich der Energieverbrauch, ändert sich die Treibhausgasemissionsbilanz. Nun sollte angenommen werden, dass sich die Betriebsmodi eines O-Lkws recht simpel skalieren lassen sollten. Doch sind es genau diese, die sich aufgrund ihrer Abhängigkeit von vielfältigen Einflussfaktoren nicht ohne Weiteres extrapolieren lassen: Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws sind (1) die Rekuperation, (2) die verfügbare Länge und der Ausnutzungsgrad einer durch eine Oberleitungsanlage elektrifizierte Strecke, (3) die während der angebügelten Fahrt in den elektrischen Energiespeicher geladene elektrische Energie sowie (4) der Standort der Oberleitungsanlage. Es bedarf eines geeigneten Ansatzes, um die Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws zuverlässig prognostizieren zu können.

### **ZIELSTELLUNG VON „ERSPARNIS“ UND FESTLEGUNG EINER GEEIGNETEN ENTWICKLUNGSUMGEBUNG**

„ERSparnis“ liegt als **Zielstellung** zugrunde, möglichst zuverlässige und belastbare Ergebnisse zum Energieverbrauch sowie zu den emittierten und eingesparten Treibhausgasen von O-Lkw unter sich ändernden Rahmenbedingungen berechnen zu können. Ferner soll es möglich sein, das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw zu ermitteln. Hierfür wird es eines Vergleichs zu anderweitigen Antriebsoptionen bedürfen. Werden die bereits erarbeiteten Ergebnisse reflektiert, muss „ERSparnis“ in der Lage sein, die nachfolgenden **Mindestanforderungen** erfüllen zu können:

- Es muss den Benutzenden ermöglicht werden, aus verschiedenen Dieselkraftstoffen und Strommixvarianten zu wählen.
- Es muss den Benutzenden ermöglicht werden, das zu berechnende Tourenprofil individuell auszugestalten. Hierfür sollte es möglich sein,
  - a) die Länge der zu berechnenden Relation beliebig zu bestimmen;
  - b) die Länge des Streckenabschnitts, der mit einer Oberleitungsanlage elektrifiziert wurde, beliebig zu verändern;
  - c) den Standort des mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts frei zu verschieben;
  - d) eine Vorgabe zu treffen, ob der elektrische Energiespeicher bei Abfahrt über elektrische Reichweite verfügt.
- Es muss ein Berechnungsalgorithmus entwickelt und implementiert werden können, der die Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws unter sich ändernden Rahmenbedingungen (zumindest näherungsweise) korrekt nachbilden kann.
- Es muss mindestens eine Skalierung der Ergebnisse für die aktuelle O-Lkw-Generation und ein Vergleich dieser Ergebnisse zu einem konventionellen Diesel-Lkw möglich sein.

Über diese Mindestanforderungen hinaus ist anzustreben, dass „ERSparnis“ **adaptierbar beziehungsweise erweiterungsfähig** ist. So erscheint es zielführend, dass zum einen auch neuere Generationen eines O-Lkws sowie zum anderen gegebenenfalls auch gänzlich anderweitige Antriebstechnologien eingepflegt werden können sollten. Um die dargelegten Anforderungen an „ERSparnis“ erfüllen zu können, ließen sich grundsätzlich verschiedene Entwicklungsumgebungen andenken. Aufgrund der Verwendung im Rahmen der Erarbeitung der im Vorstehenden bereits erläuterten Ergebnisse, der intuitiven Benutzeroberfläche sowie der weiten Verbreitung wurde sich dazu entschieden, „ERSparnis“ auf Basis des Tabellenkalkulationsprogramms **MS Excel** (Microsoft Corporation 2019a) und einer integrierten **makrobasierten VBA-Programmierung** zu entwerfen.

## EINFÜHRUNG IN DEN STRUKTURELLEN AUFBAU VON „ERSPARNIS“

Zur Realisierung der definierten Mindestanforderungen setzt sich der Skalierungs- und Vergleichsrechner „ERSparnis“ im Wesentlichen aus drei Hauptbestandteilen zusammen:

- Verschiedene Eingabemasken zum Einpflegen von Eingangsparametern,
- Benutzeroberfläche zur Anwendung von „ERSparnis“,
- Arbeitsblätter zur eigentlichen Durchführung der Berechnungen.

Die **Eingabemasken zum Einpflegen von Eingangsparametern** sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt dafür vorgesehen, einerseits verschiedene Dieselmotortypen sowie verschiedene Strommixvarianten samt ihrer Treibhausgasemissionsfaktoren einzugeben. Darüber hinaus verfügt „ERSparnis“ über eine Eingabemaske zur Einspielung verschiedener Fahrzeugtypen. Derzeit kann „ERSparnis“ bis zu fünf verschiedene Fahrzeugtypen implementieren, die Anzahl ist jedoch erweiterbar. Durch die Eingabe der Fahrzeugdaten wird „ERSparnis“ kalibriert – je höher die Qualität der eingepflegten Fahrzeugdaten, desto genauere Ergebnisse wird „ERSparnis“ in Folge hervorbringen. Zur Anwendung von „ERSparnis“ dient die **Benutzeroberfläche**. Auf dieser wird die Möglichkeit gegeben, zunächst ein Basis- sowie ein Vergleichsfahrzeug auszuwählen. Ferner sind der Dieselmotortyp sowie die Strommixvariante auszuwählen, die den Berechnungen zugrunde gelegt werden sollen. Die Auswahlmöglichkeiten werden durch ein Drop-Down-Menü vorgegeben. Es stehen diejenigen Möglichkeiten zur Auswahl, die über die Eingabemasken an entsprechender Stelle im Vorhinein eingepflegt wurden. Den Benutzenden wird nach Auswahl der Grundeingangsdaten eine Übersicht der ausgewählten Eingangsparameter präsentiert. Der Übersicht können einerseits allgemeine Informationen zu den technischen Konfigurationen der Fahrzeuge und andererseits spezifische Energieverbrauchskennwerte differenziert nach Betriebsmodi entnommen werden. Auch werden die Treibhausgasemissionsfaktoren für den gewählten Dieselmotortyp und die gewählte Strommixvariante dargestellt (siehe Abbildung 28).

The screenshot shows the 'Benutzeroberfläche' (User Interface) of the 'ERSparnis' tool. It is divided into several sections:

- Input Parameters (Grundeingangsdaten):** A table where users select vehicle type, fuel type, and powertrain.
 

Grundeingangsdaten zum Fahrzeug, Dieselmotortyp und Strommix	Bedienungsanweisungen
Basis-Fahrzeugtyp: Diesel (450-0-0)	Bitte wählen Sie den Fahrzeugtyp, der für die Berechnung verwendet werden soll.
Vergleichs-Fahrzeugtyp: HEV+PAN_Konfiguration_1 (450-130-18,5)	Bitte wählen Sie den Fahrzeugtyp, der für den Vergleich verwendet werden soll.
Dieselmotortyp: Dieselmotortyp mit 7% Biodiesel	Bitte wählen Sie den Dieselmotortyp, der für die Berechnung verwendet werden soll.
Strommix: Strom-THG-Emissionsfaktor 2021, mit Vorkette	Bitte wählen Sie den Strommix, der für die Berechnung verwendet werden soll.
- Overview (Datenblatt):** A summary of the selected parameters for both the 'Basisfahrzeug' and 'Vergleichsfahrzeug'.
 

Allgemeine Informationen zu den technischen Konfigurationen der Fahrzeuge	Basisfahrzeug	Vergleichsfahrzeug
Fahrzeugtyp	Diesel (450-0-0)	HEV+PAN_Konfiguration_1 (450-130-18,5)
Antriebstechnologie	Diesel	HEV+PAN
Hersteller	Scania	Scania
Fabrikat	Diesel01	R450 A4x2NB R17N
Gewichtsklasse	40t	40t
Achskonfiguration	4x2	4x2
Leistung des Verbrennungsmotors	450,00 PS	450,00 PS
Leistung des Verbrennungsmotors	331,00 kW	331,00 kW
Leistung der E-Maschine	0,00 kW	130,00 kW
Brutto-Kapazität des Energiespeichers	0,00 kWh	18,50 kWh
Von der Brutto-Kapazität des Energiespeichers	0,00 %	65,00 %
Netto-Kapazität des Energiespeichers	0,00 kWh	12,03 kWh
Plug-in-Möglichkeit	//	nein
- Calculation Results (Berechnungstool "ERSparnis"):** Shows specific consumption parameters and THG emissions.
 

Treibhausgas-Emissionsfaktor Dieselmotortyp		
Dieselmotortyp mit 7% Biodiesel	Tank-to-Wheel	2,48 kg CO2e/l
Dieselmotortyp mit 7% Biodiesel	Well-to-Wheel	3,15 kg CO2e/l

Treibhausgas-Emissionsfaktor Strommix		
Strom-THG-Emissionsfaktor 2021, mit Vorkette	Tank-to-Wheel	0,00 kg CO2e/kWh
Strom-THG-Emissionsfaktor 2021, mit Vorkette	Well-to-Wheel	0,49 kg CO2e/kWh
- Operational Data (Allgemeine Informationen zu den betrieblichen Kennwerten des Basisfahrzeugs):** A table showing consumption and emissions for various operating modes.
 

# Betriebsmodus	Individuelle Bezeichnung des Betriebsmodus	Dieselmotortyp	Zuführung elekt	Stromverbrauch	Ladung des elekt	THG-Emissionen	THG-Emissionen	THG-Emissionen
		l/100km	kWh/100km	kWh/100km	kWh/100km	kg CO2e/100km	kg CO2e/km	g CO2e/km
//	//							
Betriebsmodus oERS_1	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
Betriebsmodus oERS_2	Dieselmotortyp	31,40	0,00	0,00	0,00	98,91	0,989	989,10
Betriebsmodus oERS_3	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
Betriebsmodus oERS_4	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
Betriebsmodus mERS_1_mL	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
Betriebsmodus mERS_2_mL	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
Betriebsmodus mERS_1_oL	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
Betriebsmodus mERS_2_oL	nicht besetzt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Abbildung 28: Ausschnitt Benutzeroberfläche „ERSparnis“ (Auswahl Grundeingangsdaten) (Quelle: Eigene Darstellung)

Nachfolgend erhalten die Benutzenden die Möglichkeit, das **zu berechnende Tourenprofil** frei zu erstellen. Zunächst ist die Gesamtlänge der zu berechnenden Etappe einzugeben. Durch eine Eingabe im Feld „Entfernung Startpunkt der Etappe bis Erreichen ERS“ wird der Startpunkt der Oberleitungsanlage in der zu berechnenden Etappe definiert. Durch diese Eingabe lässt sich die Position der Oberleitungsanlage beliebig verschieben. Nachfolgend wird die Länge der Oberleitungsanlage durch Eingabe des gewünschten Werts im vorgesehenen Feld für „Auf der Etappe verfügbare Länge des ERS“ festgelegt. Abschließend erhalten die Benutzenden die Möglichkeit, auch den Ladestand des elektrischen Energiespeichers bei Abfahrt des Fahrzeugs einzugeben.<sup>46</sup> Über den Button „Start-Etappe berechnen“ wird durch „ERSparnis“ im Folgenden ein Berechnungsalgorithmus (Erläuterungen hierzu nachfolgend) entsprechend des zusammengestellten Anwendungsfalls durchlaufen. Abbildung 29 zeigt die Eingabemaske zur Erstellung des Tourenprofils in „ERSparnis“ auf.

Erstellung des Tourenprofils			
Bitte wählen Sie die Eigenschaften der Etappe, die berechnet werden soll			
Länge der zu berechnenden Etappe	km	50,00	Bitte geben Sie die Länge der zu berechnenden Etappe ein. Tragen Sie einen Wert größer 0 ein.
Entfernung Startpunkt der Etappe bis Erreichen des ERS	km	15,00	Tragen Sie einen Wert zwischen 0 und 50 Kilometern ein.
Auf der Etappe verfügbare Länge des ERS	km	5,00	Geben Sie einen Wert zwischen 0 und 35 Kilometer ein.
State of Charge des elektr. Energiespeichers Vergleichs-Fzg. bei Abfahrt	%	0,00	Geben Sie einen Wert zwischen 0 und 100 Prozent ein.

Hinweise:

**Abbildung 29: Ausschnitt Benutzeroberfläche „ERSparnis“ (Erstellung Tourenprofil)**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Wurde die Start-Etappe berechnet, können über das Anwählen des Buttons „Weitere Etappe hinzufügen“ (erscheint nach Berechnung der Start-Etappe) weitere Etappen ergänzt werden. Die vorherigen Ergebnisse werden dabei nicht überschrieben, sondern um die hinzukommenden Ergebnisse ergänzt. Hierdurch kann **sukzessive ein individualisiertes Tourenprofil zusammengestellt** werden. Ferner lassen sich hierdurch auch Einzelabschnitte einer Etappe separat hervorheben, wie beispielsweise ausschließlich die Fahrt mit Nutzung der Oberleitungsanlage. Im Nachgang schließt sich die Darstellung der Berechnungsergebnisse an. Hierbei werden die wesentlichen Kennzahlen einerseits grafisch, andererseits auch numerisch präsentiert.<sup>47</sup>

Das Kernelement von „ERSparnis“ stellt (sicherlich) die zuverlässige Realisierung eines **Berechnungsalgorithmus** dar, welcher dazu befähigt, die Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws auch unter sich ändernden Rahmenbedingungen nachbilden zu können. Hierzu wurden zwei **Arbeitsblätter zum Durchlaufen der Berechnungen** – je ein Arbeitsblatt für das ausgewählte Basisbeziehungswise das ausgewählte Vergleichsfahrzeug – im Hintergrund vorgesehen. Aufgrund der hohen Relevanz des Berechnungsalgorithmus für die Qualität und die Aussagegüte des Outputs von „ERSparnis“ soll dieser im Nachfolgenden nochmals gesondert betrachtet werden.

#### ENTWICKLUNG EINES BERECHNUNGALGORITHMUS FÜR „ERSPARNIS“

Die in den vorstehenden Kapiteln erarbeiteten Ergebnisse basieren auf den durch die Datenlogger erfassten Fahrzeugdaten des Realbetriebs im ELISA-Forschungsprojekt. Hierdurch ist sichergestellt, dass alle möglichen Einflussfaktoren zunächst erfasst werden und im Zuge der Auswertung auch Berücksichtigung finden. Sobald nun aber eine Skalierung vorgenommen werden soll, ist zwar bekannt, dass

<sup>46</sup> Es wird statt dem Begriff „Oberleitungsanlage“ in „ERSparnis“ der Begriff „ERS“ verwendet, um in Zukunft auch eine Übertragbarkeit auf anderweitige ERS-nutzende Fahrzeugtypen zu gewährleisten.

<sup>47</sup> Die Benutzeroberfläche und Ergebnisübersicht von „ERSparnis“ wurde grundsätzlich so ausgelegt, dass sie durch vorherige Festlegung der Druckbereiche im Format DIN A4 (Querformat) unter Wahrung der Lesbarkeit ausgedruckt und beispielsweise als Management Summary verwendet werden kann.

---

sich die **Betriebsmodizusammensetzung** ändern wird; es ist aber nicht bekannt, auf welche Art und Weise. So ist beispielsweise nicht ohne Weiteres nachvollziehbar, wann

- die Leistungselektronik beziehungsweise das Energiemanagement des O-Lkws oder die Fahrenden selbst beschließen, beispielsweise einen der Zwangs-Betriebsmodi zu aktivieren;
- ein O-Lkw im Übergangsmodus operieren wird;
- der Verbrennungsmotor beginnt, den elektrischen Antrieb zu unterstützen;
- der Verbrennungsmotor im Elektrisch-Oberleitungsmodus hinzugeschaltet wird, um die Traktion sicherzustellen oder Nebenaggregate anzutreiben.

Doch wirken sich all diese **Einflüsse auf die Zusammensetzung der Betriebsmodi eines O-Lkws** aus. Um eine Extrapolation der Ergebnisse zu ermöglichen, bedarf es eines sorgfältig entwickelten Algorithmus. Der Algorithmus muss eine möglichst exakte Abbildung des realen Betriebs auch unter sich verändernden Rahmenbedingungen ermöglichen und dabei die aufgezeigten Einflüsse möglichst exakt berücksichtigen können.

Zu Beginn des Entwurfs eines Berechnungsalgorithmus‘ stellt sich die Frage, ob ohne die Kenntnis der potenziell möglichen Einflüsse auf die Betriebsmodizusammensetzung es überhaupt möglich erscheint, einen entsprechend **zuverlässigen Algorithmus zu entwickeln**. Die eindeutige Antwort hierauf lautet: Ja, es ist möglich, denn es lassen sich die umfangreich gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse im ELISA-Forschungsprojekt erfolgreich anwenden. Verdeutlicht werden soll dies zunächst an den **Oberleitungs-Betriebsmodi**: Es ist zwar nicht bekannt, wann ein O-Lkw im Elektrisch- und wann ein O-Lkw im Hybrid-Oberleitungsmodus operiert. Doch lässt sich auf Basis der ausgewerteten Fahrzeugdaten die allgemeine Verteilung der Oberleitungs-Betriebsmodi ermitteln, mit dem Ergebnis: Ein O-Lkw nutzte bisher bei Verwendung der Oberleitungsanlage zu 27,33 % den Elektrisch-Oberleitungsmodus und zu 72,67 % den Hybrid-Oberleitungsmodus. Nutzt ein O-Lkw über die Distanz von einem Kilometer die Oberleitungsanlage zum Energiebezug, so darf basierend auf der historischen Verteilung begründet angenommen werden, dass hiervon rund 273 Meter im Elektrisch- und rund 727 im Hybrid-Oberleitungsmodus zurückgelegt werden. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich diese Verteilung bei einer zunehmenden Länge eines Streckenabschnitts, der mit einer Oberleitungsanlage elektrifiziert wurde, ändert. Nutzt ein O-Lkw über eine hypothetische Strecke von 15 km die Oberleitungsanlage zum Energiebezug, würde dies folglich zu einer Aufteilung von etwa 4,10 km im Elektrisch-Oberleitungsmodus und von etwa 10,90 km im Hybrid-Oberleitungsmodus führen.

Jedoch dürfen an dieser Stelle die Überlegungen zum Oberleitungsbetrieb eines O-Lkws noch nicht enden. Die Erfahrungen im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts haben gezeigt, dass tatsächlich nicht die gesamte gebaute Länge eines elektrifizierten Streckenabschnitts durch einen O-Lkw zum Energiebezug genutzt werden kann. Zum einen konnte eine kurze **Verluststrecke zu Beginn der Oberleitungsfahrt** festgestellt werden: Es bedarf einer kurzen Übergangszeit, bis der Pantograph gehoben und eine stabile Verbindung zwischen Pantographen und Fahrdrabt der Oberleitungsanlage hergestellt werden konnte. Basierend auf den gesammelten Erfahrungen konnte analysiert werden, dass diese Verluststrecke in etwa 200 Meter beträgt.

Ferner ist nicht davon auszugehen, dass der Pantograph eines O-Lkws im Oberleitungsbetrieb über eine durchgängige Verbindung zum Fahrdrabt verfügt. Überhol- oder Ausweichmanöver erfordern beispielsweise einen Fahrstreifenwechsel. Darüber hinaus wurde im ELISA-Forschungsprojekt beobachtet, dass auch anderweitige **Gründe zum Abbügeln des Pantographen** führen können, zum Beispiel Fahrbahnunebenheiten, die den Anpressdruck des Pantographen an den Fahrdrabt kurzzeitig zu stark erhöhen, so dass die Sensorik aus Sicherheitsgründen entscheidet, den Pantographen einzufahren. Unter den gegenwärtigen Bedingungen – je Fahrtrichtung sind fünf Kilometer durch eine Oberleitungsanlage



---

elektrifiziert – konnte festgestellt werden, dass von diesen fünf Kilometern etwa 70 % durch den O-Lkw schlussendlich genutzt werden. Dies muss im Berechnungsalgorithmus berücksichtigt werden. Darüber hinaus darf angenommen werden, dass der **prozentuale Ausnutzungsgrad einer Oberleitungsanlage** mit zunehmender Länge des elektrifizierten Streckenabschnitts steigt. „ERSparnis“ berücksichtigt hierfür die nachfolgenden Ausnutzungsgrade:

- 0 Kilometer < Länge elektrifizierter Streckenabschnitt  $\leq$  5 Kilometer: 70% Ausnutzung
- 5 Kilometer < Länge elektrifizierter Streckenabschnitt  $\leq$  10 Kilometer: 80% Ausnutzung
- 10 Kilometer < Länge elektrifizierter Streckenabschnitt  $\leq$  30 Kilometer: 90% Ausnutzung
- Länge elektrifizierter Streckenabschnitt > 30 Kilometer: 95% Ausnutzung

Sobald der O-Lkw über **keine Verbindung mehr zum Fahrdracht der Oberleitungsanlage** verfügt – es wird also nicht mehr in den Oberleitungs-Betriebsmodi operiert – ist der Berechnungsalgorithmus so ausgelegt, zunächst die im elektrischen Energiespeicher vorhandene elektrische Energie aufzubauchen, bis die Verbindung vom Pantographen zum Fahrdracht wiederhergestellt werden konnte. Ist der elektrische Energiespeicher vollständig entladen, wird die verbleibende Strecke bis zum erneuten Anbügeln des Pantographen als nicht-elektrifizierter Streckenabschnitt betrachtet – weitere Erläuterungen, wie sich die Betriebsmodi auf einem solchen nicht-elektrifizierten Streckenabschnitt zusammensetzen, folgen im weiteren Verlauf des Kapitels.

Nun ist ferner bekannt, dass in den Oberleitungs-Betriebsmodi der **elektrische Energiespeicher geladen** wird und sich die Laderate in Abhängigkeit des Betriebsmodus unterscheidet. So wird im Elektrisch-Oberleitungsmodus der elektrische Energiespeicher mit durchschnittlich 26,58 kWh/100 km und im Hybrid-Oberleitungsmodus mit durchschnittlich 23,25 kWh/100 km geladen. Erreicht der elektrische Energiespeicher die Grenze seiner maximal möglichen Speicherkapazität, reduziert sich ab diesem Zeitpunkt die insgesamt durch den O-Lkw aus der Oberleitungsanlage aufgenommene Energiemenge um die Laderate des elektrischen Energiespeichers – siehe hierzu erneut Kapitel 4.2.4, in welchem dazu entsprechend ausgeführt wurde. Die während der Oberleitungsfahrt geladene elektrische Energie kann dann im weiteren Fahrtverlauf zur Traktion im Elektrisch-Standardmodus verwendet werden. Dies ist durch den Berechnungsalgorithmus zu berücksichtigen. Doch lässt sich genau dieser Sachverhalt nicht vorhersagen: Es bleibt eine unbekannt Variable, wann genau und in welchem Umfang durch den O-Lkw selbst oder durch die Fahrenden auf die im elektrischen Energiespeicher verfügbare elektrische Energie zurückgegriffen wird. Doch ist es möglich, an dieser Stelle **im Algorithmus eine Nebenbedingung** zu integrieren, die zumindest näherungsweise korrekte Ergebnisse hervorbringen wird: Ist der Ladestand des elektrischen Energiespeichers größer Null, so soll diese Energiemenge zunächst immer aufgebraucht werden. Erst sobald diese Energiemenge aufgebraucht wurde, wird für die dann noch zurückzulegende Distanz auf die ermittelte historische Betriebsmodiverteilung zurückgegriffen. Hierdurch entsteht zwar eine potenzielle Abweichung vom Realbetrieb – theoretisch erscheint es natürlich möglich, dass die im elektrischen Energiespeicher vorhandene elektrische Energie nur zu Teilen, gegebenenfalls aber auch gar nicht genutzt wird – aus logischen Gesichtspunkten erscheint die definierte Nebenbedingung aber dennoch vertretbar. Das Vorgehen führt dazu, dass stets die maximal mögliche elektrische Reichweite unter den gewählten Rahmenbedingungen in den Ergebnissen Berücksichtigung findet und jegliches Potenzial des O-Lkws zur Einsparung an Treibhausgasemissionen ermittelt wird. Zwar kann der Realbetrieb hiervon moderat abweichen, doch erlaubt das Vorgehen schlussendlich Aussagen zum in der Tat bestmöglichen Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial infolge der Verwendung von O-Lkw.

Als weiterer Baustein muss nun die **Fahrt eines O-Lkws ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage** noch etwas genauer betrachtet werden. Auch hierfür lässt sich eine **Verteilung der Betriebsmodi auf Basis der historischen Daten** berechnen. Jedoch ist aufgrund des vorstehend beschriebenen Verfahrens im

---

Umgang mit der Aufwendung der elektrischen Energie im elektrischen Energiespeicher Sorgfalt zu wahren. Würde nun eine Verteilung ohne weitere Überlegungen auf Basis der historischen Daten berechnet werden, ergäbe sich eine Betriebsmodiverteilung für Fahrtabschnitte ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage von 8,89 % im Elektrisch-Standardmodus, 89,35 % im Hybrid-Standardmodus und 1,76 % im Übergangsmodus. Es ist bekannt, dass ein O-Lkw aus bislang drei Quellen elektrische Energie beziehen kann: aus der Oberleitungsanlage, durch Rekuperation sowie durch Leistungsüberschüsse des Verbrennungsmotors. Durch vorstehende Nebenbedingung, die im Algorithmus von „ERSparnis“ vorgesehen wird, ist vorgegeben, dass ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage zunächst immer die elektrische Energiemenge im elektrischen Energiespeicher aufzubreuchen ist. Sobald dies erfolgt ist, soll auf die historisch ermittelte Betriebsmodiverteilung zurückgegriffen werden. Ohne erneute Nutzung einer Oberleitungsanlage kann der elektrische Energiespeicher aber logischerweise ausschließlich durch die internen O-Lkw-Prozesse (Rekuperation und Leistungsüberschüsse des Verbrennungsmotors) nachgeladen werden. In dem Anteil von 8,89 % im Elektrisch-Standardmodus ist nun aber auch diese elektrische Energiemenge enthalten, die im Vorhinein über die Oberleitungsanlage aufgenommen wurde. Diese muss also zunächst herausgerechnet werden. Dies lässt sich entsprechend des folgenden Vorgehens ermöglichen: Der fiktive O-Lkw fuhr im Betrachtungszeitraum 20.252 km im Hybrid-Oberleitungsmodus und lud dabei durchschnittlich 0,2325 kWh/km elektrische Energie in den elektrischen Energiespeicher. Dies resultiert in eine insgesamt geladene Energiemenge infolge der Nutzung der Oberleitungsanlage in diesem Betriebsmodus von in Summe 4.705,59 kWh. Die gleiche Rechnung lässt sich für den Elektrisch-Oberleitungsmodus anstellen mit dem Ergebnis, dass 2.024,07 kWh geladen wurden. Insgesamt wurde der elektrische Energiespeicher also mit 6.729,66 kWh infolge der Nutzung der Oberleitungsanlage geladen. Soll der O-Lkw im Elektrisch-Standardmodus operieren, werden hierfür durchschnittlich 0,7998 kWh/km aus dem elektrischen Energiespeicher bezogen. Es ergibt sich durch Division von 6.729,66 kWh durch 0,7998 kWh/km eine Reichweite im Elektrisch-Standardmodus von 8.414,18 km, die durch den Energiebezug aus der Oberleitungsanlage ermöglicht wurde. Weiterhin ist bekannt, dass der fiktive O-Lkw im gesamten Betrachtungszeitraum 54.574 km im Elektrisch-Standardmodus zurücklegte. Lediglich 8.414 km hiervon wurden in Folge also durch den Energiebezug der Oberleitungsfahrten realisiert, die restlichen 46.260 km im Elektrisch-Standardmodus wurden ermöglicht infolge von Rekuperation des O-Lkws beziehungsweise infolge der Leistungsüberschüsse des Verbrennungsmotors. Erfolgt die Eliminierung der elektrischen Reichweite, die durch die aufgenommene elektrische Energie während der Oberleitungsfahrten ermöglicht wurde, ergibt sich eine Betriebsmodiverteilung für die Fahrt des O-Lkws ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage von 7,62 % im Elektrisch-Standardmodus, von 90,60 % im Hybrid-Standardmodus sowie von 1,78 % im Übergangsmodus. Der entwickelte Berechnungsalgorithmus lässt sich dem Anhang (S. A30) entnehmen.

#### FUNKTIONSWEISE VON „ERSPARNIS“

Die Funktionsweise, und dabei insbesondere das beschriebene **Grundprinzip des entwickelten Berechnungsalgorithmus**, soll zur besseren Nachvollziehbarkeit nochmals an einem Beispiel verdeutlicht werden. Es soll ein Vergleich zwischen einem konventionellen Diesel-Lkw zum aktuell eingesetzten O-Lkw berechnet werden. Als Dieselkraftstoff kommt ein solcher zum Einsatz, der über einen siebenprozentigen Anteil an Biodiesel verfügt. Die Oberleitungsanlage wird mit einem Strommix der Variante „Deutschland, 2021, inkl. Vorkette“ versorgt. Als Tourenprofil wird eine zu berechnende Etappe mit einer Gesamtlänge von 50 Kilometern betrachtet. Hiervon sind fünf Kilometer durch eine Oberleitungsanlage elektrifiziert. Der Beginn des elektrifizierten Streckenabschnitts wird durch die Fahrzeuge 15 Kilometer nach Start im Betriebshof erreicht. Der elektrische Energiespeicher des O-Lkws ist bei Abfahrt vollständig entladen.

---

„ERSparnis“ unterteilt die zu berechnende Etappe zunächst in drei einzeln zu betrachtende Fahrabschnitte: Die Fahrt vom Betriebshof bis hin zum Beginn des elektrifizierten Streckenabschnitts, die Fahrt auf dem elektrifizierten Streckenabschnitt sowie die Fahrt vom Ende des elektrifizierten Streckenabschnitts bis zum Erreichen des vorgesehenen Zielorts.

Zuerst soll das **Fahrprofil des O-Lkws** detailliert betrachtet werden. Da der elektrische Energiespeicher bei Abfahrt vollständig entladen ist, wird der Betrieb des O-Lkws auf den 15 Kilometern im **ersten Fahrabschnitt** durch die bekannte Betriebsmodiverteilung für Fahrten ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage charakterisiert. Dies resultiert in einer Verteilung von jeweils gerundet 13,59 Kilometer im Hybrid-Standardmodus (entspricht 90,60 %), 1,14 Kilometer im Elektrisch-Standardmodus (entspricht 7,62 %) sowie 0,27 Kilometer im Übergangsmodus (entspricht 1,78 %).

Erreicht der O-Lkw den **zweiten Fahrabschnitt** – dieser ist durch eine Oberleitungsanlage elektrifiziert – werden die ersten 200 Meter des in Summe fünf Kilometer langen Fahrabschnitts als Verluststrecke betrachtet, bis durch den Pantographen eine kraftschlüssige Verbindung zum Fahrtdraht der Oberleitungsanlage hergestellt werden konnte. Für diese 200 Meter kommt zunächst erneut die Betriebsmodiverteilung für Fahrten ohne Nutzung einer Oberleitungsanlage zum Tragen. Dies resultiert in etwa 181 Metern im Hybrid-Standardmodus, etwa 15 Metern im Elektrisch-Standardmodus und knapp vier Metern im Übergangsmodus. Da die gesamte gebaute Länge des elektrifizierten Streckenabschnitts fünf Kilometer beträgt, sieht der entwickelte Berechnungsalgorithmus einen Ausnutzungsgrad der verfügbaren elektrifizierten Strecke von 70 % vor. Abzüglich der 200 Meter Verluststrecke resultiert dies also in einer Verteilung von 0,92 Kilometern im Elektrisch-Oberleitungsmodus und 2,44 Kilometern im Hybrid-Oberleitungsmodus. Nun verbleiben weitere 1,44 Kilometer im zweiten Fahrabschnitt, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Diese Distanz – resultierend beispielsweise aus Überholungen, Ausweichmanövern, sicherheits- oder technikbedingten Abbüglern – wird erneut als nicht-elektrifizierter Streckenabschnitt betrachtet. Nun war es dem O-Lkw jedoch im Vorhinein möglich, durch die Fahrt in den Oberleitungsbetriebsmodi den elektrischen Energiespeicher zu laden. Es wird zunächst also auf diese elektrische Energie zurückgegriffen und verbraucht. Die aufgenommene Energie entspricht einer elektrischen Reichweite von 1,02 Kilometer. Für die dann noch immer verbleibenden 0,42 Kilometer im zweiten Fahrabschnitt erfolgt nun die Betriebsmodiverteilung für nicht-elektrifizierte Streckenabschnitte: Etwa 0,03 Kilometer werden nochmal im Elektrisch-Standardmodus, etwa 0,38 Kilometer im Hybrid-Standardmodus und etwa 7 Meter im Übergangsmodus zurückgelegt. In Summe ergibt sich für den zweiten Fahrabschnitt somit also eine Betriebsmodizusammensetzung von rund 1,07 Kilometer im Elektrisch-Standardmodus, rund 0,56 Kilometer im Hybrid-Standardmodus, rund 0,01 Kilometer im Übergangsmodus, rund 0,92 Kilometer im Elektrisch-Oberleitungsmodus sowie rund 2,44 Kilometer im Hybrid-Oberleitungsmodus.

Bis zum Erreichen des vorgesehenen Zielorts verbleiben im **dritten Fahrabschnitt** noch 30 Kilometer. Die im vorherigen Fahrabschnitt über die Oberleitungsanlage in den elektrischen Energiespeicher geladene Energie wurde bereits vollständig aufgebraucht. Für die verbleibenden 30 Kilometer ergibt sich entsprechend eine Betriebsmodiverteilung von 2,29 Kilometer im Elektrisch-Standardmodus, 27,18 Kilometer im Hybrid-Standardmodus sowie 0,53 Kilometer im Übergangsmodus.

Wird der Fokus nun auf den **konventionellen Diesel-Lkw** gerichtet, zeigt sich für diesen ein simpleres Betriebsmodiprofil: Ein konventioneller Diesel-Lkw verfügt über lediglich einen Betriebsmodus – den dieselbasierten Betriebsmodus. Die **gesamte Distanz** von 50 Kilometern wird durch den konventionellen Diesel-Lkw folglich unter Verwendung dieses Betriebsmodus zurückgelegt.

Nachdem die Betriebsmodizusammensetzung berechnet wurde, lassen sich infolge der **Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen** für das Basis- sowie das Vergleichsfahrzeug ermitteln. Für die zugrunde gelegte Etappe würde ein konventioneller Diesel-Lkw 15,70 Liter Dieselkraftstoff

benötigen. Dabei würden rund 50 Kilogramm CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel) emittiert werden. Ein O-Lkw würde für die gleiche Etappe lediglich 12,70 Liter Dieselmotorkraftstoff verbrauchen. Zusätzlich würden jedoch 4,34 Kilowattstunden an elektrischer Energie über die Oberleitungsanlage bezogen werden. Dies resultiert schlussendlich in emittierten Treibhausgasen in Höhe von rund 42 Kilogramm CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel). Für das erstellte Szenario entspricht dies einer Einsparung an Treibhausgasemissionen eines O-Lkws im Vergleich zu einem konventionellen Diesel-Lkw in Höhe von 7,34 Kilogramm CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel). Diese Einsparung entspricht einer Reduktion von etwa 14,86 %.

Nachfolgende Abbildung 30 zeigt die Ergebnisübersicht, wie sie den Benutzenden von „ERSparnis“ präsentiert wird, für das vorstehend berechnete Szenario nochmals grafisch auf.

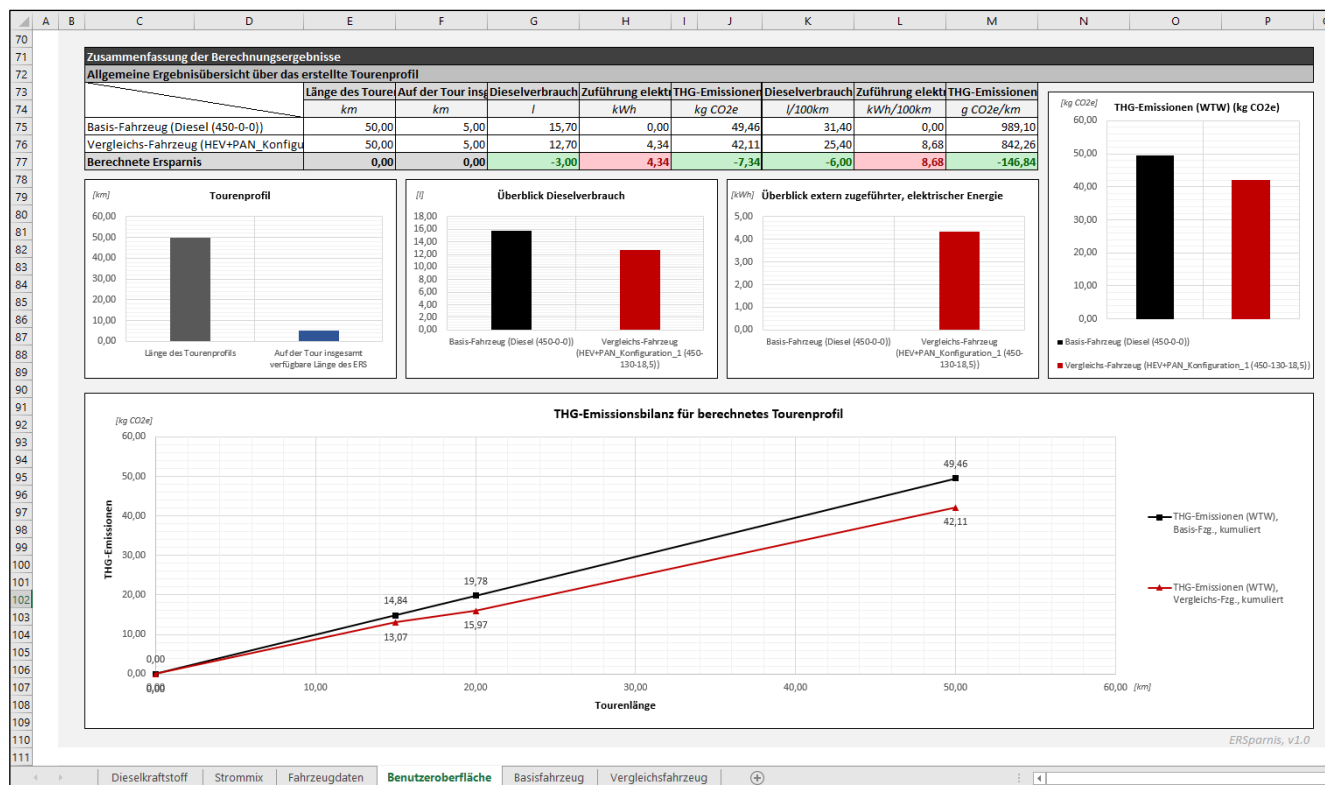


Abbildung 30: Ausschnitt Benutzeroberfläche „ERSparnis“ (Grafische Ergebnisdarstellung)  
(Quelle: Eigene Darstellung)

## ÜBERTRAGBARKEIT VON „ERSPARNIS“ AUF ANDERWEITIGE FAHRZEUGTYPEN UND ANTRIEBSTECHNOLOGIEN

Da der Betrieb eines O-Lkws die Antriebsoptionen *Verbrennungsfahrzeug*, *Elektrofahrzeug*, *Oberleitungsfahrzeug* (beziehungsweise grundsätzlich *sämtliche elektrisch angetriebenen Fahrzeuge mit dynamischer Energieversorgung*) und *Hybridfahrzeug* vereint, sollte der für „ERSparnis“ entwickelte Berechnungsalgorithmus grundsätzlich auf eine Vielzahl verschiedener Fahrzeugtypen unterschiedlichster Antriebstechnologien übertragbar sein. So wurde in Kapitel 2.2.6 beispielsweise bereits erläutert, dass in Zukunft auch technisch anders konfigurierte O-Lkw im Zuge des ELISA-Forschungsprojekts eingesetzt werden. Diese O-Lkw werden unter anderem mit einer Plug-in-Ladefunktion ausgestattet sein, ferner sollen auch vollelektrische O-Lkw den Testbetrieb aufnehmen. **„ERSparnis“ wurde so konfiguriert, dass es möglich sein sollte, die weiteren O-Lkw-Generationen ohne merklichen Adaptierungsaufwand zu implementieren.**

Inwiefern Fahrzeuge anderweitiger Antriebstechnologien – beispielsweise Wasserstofffahrzeuge – tatsächlich implementiert werden können, wurde bislang nicht getestet (da außerhalb des gesetzten Forschungsrahmens). Eine Implementierung sollte grundsätzlich möglich sein, wird voraussichtlich aber

---

mit moderatem Anpassungsaufwand verbunden sein. Ebenfalls darf angenommen werden, dass „ERSparnis“ auch für Berechnungen im Straßenpersonenverkehr eingesetzt werden kann.

#### 4.4.7 TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW

Die vorstehenden Darlegungen haben bereits umfassend zu den allgemeinen Treibhausgasemissionskennwerten eines O-Lkws, den im ELISA-Forschungsprojekt insgesamt emittierten sowie eingesparten Treibhausgasen sowie auch zu etwaigen Einflussfaktoren auf die Treibhausgasemissionen von O-Lkw ausgeführt. Bislang noch nicht weiter betrachtet wurde das **Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial, welches sich in Folge der Implementierung von O-Lkw in einem zukünftig strategisch sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen** realisieren ließe. Dieser Aufgabe soll nun nachgegangen werden. Als essenzielles Ergebnis vorweggenommen werden kann:

**O-Lkw können Einsparungen an Treibhausgasemissionen in Höhe von bis zu 100 % ermöglichen.**

Soll ein O-Lkw bis zu 100 % an Treibhausgasemissionseinsparungen ermöglichen, bedarf es hierfür der **Erfüllung einiger Voraussetzungen**. Zunächst ist es die E-Maschine des O-Lkws, die über eine ausreichende Leistungsfähigkeit verfügen muss, um die Traktionsaufgabe zu jeder Zeit alleinig übernehmen zu können. Ferner bedarf es eines elektrischen Energiespeichers, dessen Kapazität dem Einsatzprofil des O-Lkws in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Streckenabschnitte mit Oberleitungsanlagen angepasst wurde. Je besser das Netz an mit Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitten ausgebaut ist, desto geringer kann die Kapazität des elektrischen Energiespeichers ausgelegt werden. Soll der O-Lkw treibhausgasemissionsfrei operieren, bedarf es einer Versorgung der Oberleitungsanlage(n) ausschließlich mit Ökostrom. Die O-Lkw-Generation, die den Forschungsaktivitäten dieser Dissertationsschrift zugrunde liegt, verfügt über keine Plug-in-Ladefunktion. Die Distanz eines O-Lkws von seinem Startpunkt bis zum Erreichen des elektrifizierten Streckenabschnitts muss aus diesem Grund – sollte die noch vorhandene elektrische Restreichweite im elektrischen Energiespeicher von einer vorherigen Fahrt nicht genügen, um den vorgesehenen elektrifizierten Streckenabschnitt zu erreichen – vor allem auf Basis des Verbrennungsmotors zurückgelegt werden. Die hierdurch entstehenden Treibhausgasemissionen ließen sich vermeiden, sollte eine entsprechende Plug-in-Ladefunktion zur Verfügung stehen und durch Verwendung dieser ebenfalls Ökostrom geladen werden können. Lassen sich die vorstehend angeführten Voraussetzungen umsetzen, ist es möglich, dass O-Lkw ihre Transportaufgaben entsprechend ohne das Emittieren von Treibhausgasen realisieren können.

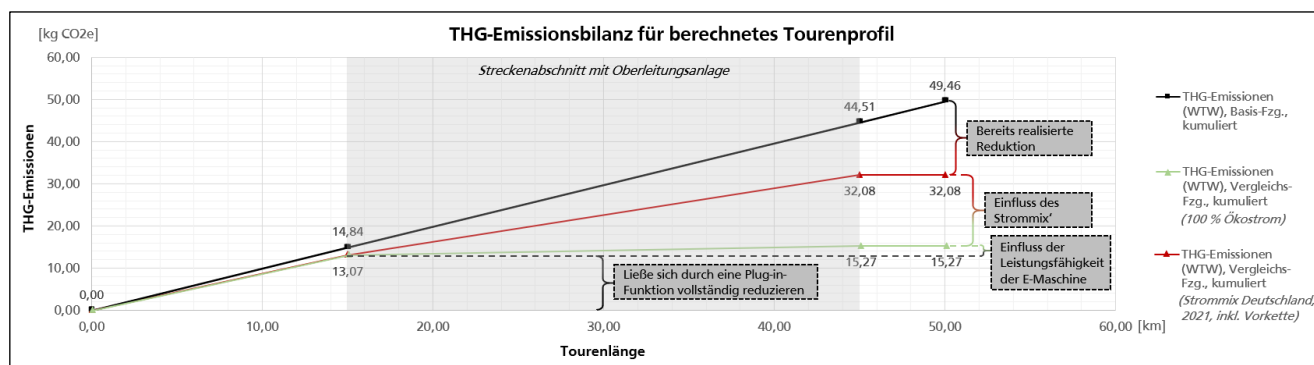
Der nachfolgenden Abbildung 31 lässt sich der vorstehend umrissene Sachverhalt am **Beispiel eines hypothetischen Zukunftsszenarios** auch nochmals grafisch entnehmen. In der Abbildung zu erkennen ist eine zurückzulegende Etappe mit einer Länge von 50 Kilometern. Auf der Etappe steht ein 30 Kilometer langer Streckenabschnitt zur Verfügung, der durch eine Oberleitungsanlage elektrifiziert ist. Dieser Streckenabschnitt wird 15 Kilometer nach Start der Etappe erreicht. Vom Ende des elektrifizierten Streckenabschnitts bis Erreichen des angestrebten Zielorts verbleiben fünf weitere Kilometer.

Zunächst zu erkennen ist der **Einfluss der fehlenden Plug-in-Ladefunktion**. Da eine solche nicht vorhanden ist und der elektrische Energiespeicher bei Abfahrt entsprechend vollständig entladen ist, absolviert der O-Lkw diesen ersten Fahrtabschnitt bis zum Erreichen des elektrifizierten Streckenabschnitts maßgeblich auf Basis des Verbrennungsmotors. Dies resultiert in Folge in Treibhausgasemissionen für diesen Streckenabschnitt in Höhe von 13,07 kg CO<sub>2e</sub> (Well-to-Wheel). Ein konventioneller Diesel-Lkw würde beim Zurücklegen dieser ersten 15 Kilometer in etwa 14,84 kg CO<sub>2e</sub> emittieren (Well-to-Wheel). So lässt sich für diesen Streckenabschnitt zwar bereits eine erste moderate Einsparung an Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 12 % feststellen, doch könnten durch eine Plug-in-Ladefunktion sämtliche emittierten Treibhausgase neutralisiert werden.



Im zweiten Fahrtabschnitt steht nun eine Oberleitungsanlage zum Energiebezug zur Verfügung. An dieser Stelle wird erneut der **große Hebel des zur Verfügung stehenden Strommixes** deutlich. Ein konventioneller Diesel-Lkw würde auf diesen 30 Kilometern in etwa  $44,51 - 14,84 = 29,67$  kg CO<sub>2</sub>e emittieren (Well-to-Wheel). Ein O-Lkw hingegen weist eine Treibhausgasemissionsbilanz von lediglich  $32,08 - 13,07 = 19,01$  kg CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel) bei einem zugrunde liegenden Strommix der Variante „Deutschland, 2021, inkl. Vorkette“ beziehungsweise von sogar bloß  $15,27 - 13,07 = 2,20$  kg CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel) bei Versorgung der Oberleitungsanlage mit ausschließlich Ökostrom auf. Dies entspricht einer Einsparung auf diesem zweiten Streckenabschnitt von circa 36 bis 93 %. An dieser Stelle darf durchaus hinterfragt werden, aus welchem Grund die Versorgung der Oberleitungsanlage mit ausschließlich Ökostrom zu keiner Einsparung von 100 % führt. Zurückzuführen ist die geringe Menge an Treibhausgasen in Höhe von 2,20 kg CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel), selbst wenn die Oberleitungsanlage mit 100% Ökostrom versorgt wird, zum einen auf die Verluststrecke zu Beginn des elektrifizierten Streckenabschnitts, zum anderen auf das temporäre Mitlaufen des Verbrennungsmotors im Hybrid-Oberleitungsmodus infolge der ungenügenden Leistungsfähigkeit der E-Maschine. Würde die Verluststrecke zu Beginn der Oberleitungsfahrt elektrisch zurückgelegt werden können, ließen sich die dabei anfallenden Treibhausgasemissionen vermeiden. Verfügte der O-Lkw ferner über eine ausreichend leistungsstarke E-Maschine, könnten das Mitlaufen des Verbrennungsmotors unterbunden und somit auch die hierbei anfallenden Treibhausgasemissionen vermieden werden.

Schlussendlich soll der letzte Fahrtabschnitt betrachtet werden. Dadurch, dass der elektrische Energiespeicher während der Oberleitungsfahrt ausreichend geladen werden konnte, kann der O-Lkw die verbleibenden fünf Kilometer vom Ende des elektrifizierten Streckenabschnitts bis Erreichen des vorgesehenen Zielorts elektrisch zurücklegen. Hierbei entstehen keine weiteren Emissionen. Ein konventioneller Diesel-Lkw würde auf diesen fünf Kilometern hingegen weitere  $49,46 - 44,51 = 4,95$  kg CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel) emittieren. Die Einsparung des O-Lkws auf diesem dritten Fahrtabschnitt beträgt entsprechend 100 %.



**Abbildung 31: Visualisierung des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw in einem hypothetischen Zukunftsszenario** (Quelle: Eigene Darstellung)

Zusammenfassend zeigt sich das folgende Bild: Ein konventioneller Diesel-Lkw würde auf der betrachteten Etappe rund 50 kg CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel) emittieren, ein O-Lkw – je nach Strommix – hingegen lediglich 15,27 bis 32,08 kg CO<sub>2</sub>e (Well-to-Wheel). Dies entspricht einer Einsparung von etwa 35 % bis 70 %. Könnte der O-Lkw infolge einer Plug-in-Ladung des elektrischen Energiespeichers vor Abfahrt mit 100 % Ökostrom auch die Fahrt bis zum Erreichen des elektrifizierten Streckenabschnitts elektrisch zurücklegen und wäre die Leistungsfähigkeit der E-Maschine ausreichend für eine alleinige Traktion des O-Lkws, ließe sich eine Einsparung an Treibhausgasemissionen von 100 % gegenüber einem konventionellen Diesel-Lkw realisieren. Zu ergänzen ist an dieser Stelle, dass **bei einer Plug-in-Ladung jedoch auch Treibhausgasemissionen anfallen können**, sollte kein Strommix basierend auf 100 % Ökostrom Anwendung finden. In einem solchen Fall dürfen die hierbei anfallenden Treibhausgas-

---

emissionen nicht außer Acht gelassen werden. Sollte ferner ein solches Netz an Oberleitungsanlagen zur Verfügung stehen, dass die aufgenommene elektrische Energie via Oberleitungsbetrieb während einer vorangegangenen Fahrt genügt, um vom Ende einer elektrifizierten Strecke zum Zielort der Etappe und wieder zurück zu einem elektrifizierten Streckenabschnitt zu gelangen, könnte gegebenenfalls sogar auch auf eine Plug-in-Ladefunktion verzichtet werden. Zudem muss ein zukünftiges Netz an Oberleitungsanlagen nicht als ein großes und zusammenhängendes Netz realisiert werden. Es ist ebenfalls denkbar, eine Vielzahl kürzerer elektrifizierter Streckenabschnitte mit dazwischenliegenden nicht elektrifizierten Streckenabschnitten zu etablieren, auf welchen die zuvor geladene elektrische Energie aufgewendet werden kann. Dies reduziert nicht nur den Aufwand für die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur und senkt dabei aus wirtschaftlicher Perspektive die Kosten, sondern verringert zusätzlich auch die durch den Bau der Oberleitungsanlagen anfallenden Treibhausgasemissionen, die im Rahmen eines Life Cycle Assessments in aufbauenden Forschungsvorhaben umfassend ermittelt werden könnten.

#### **4.4.8 ZUSAMMENFASSUNG ZU TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN SOWIE ZUM TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW**

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung von Treibhausgasemissionskennwerten sowie der Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw kann resümiert werden:

**Die durch einen O-Lkw emittierten Treibhausgase sind abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws.** Operiert ein O-Lkw in einem Betriebsmodus basierend auf dem Verbrennungsmotor, führt dies zu höheren Treibhausgasemissionen. Kann der O-Lkw stattdessen in einem elektrischen Betriebsmodus operieren, führt dies zu geringeren Treibhausgasemissionen des O-Lkws.

**Der Strommix beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an emittierten Treibhausgasen von O-Lkw.** Mit zunehmendem Anteil von erneuerbaren Energien im Strommix verbessert sich der zugehörige Treibhausgasemissionsfaktor des Strommixes. Je besser der Treibhausgasemissionsfaktor des Strommixes ist, desto höhere Treibhausgasemissionseinsparungen lassen sich durch den Betrieb eines O-Lkws realisieren. Kann zu 100 % auf Ökostrom zurückgegriffen werden, ist sogar ein treibhausgasemissionsfreier Transport durch einen O-Lkw möglich.

**Der Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitte im Vergleich zu den nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten einer Fahrt beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen von O-Lkw.** Je mehr durch Oberleitungsanlagen elektrifizierte Streckenabschnitte ein O-Lkw im Verhältnis zu seiner Gesamtfahrtstrecke nutzen kann, desto höher ist der Anteil der Oberleitungs-Betriebsmodi. Je höher der Anteil von Oberleitungs-Betriebsmodi ist, desto mehr elektrische Energie kann in den elektrischen Energiespeicher geladen werden, die sich wiederum für das vollelektrische Fahren auf einem nicht-elektrifizierten Streckenabschnitt verwenden lässt. Je mehr Streckenabschnitte ein O-Lkw vollelektrisch fahren kann, desto weniger Treibhausgase werden emittiert. Dennoch ist kein durchgehendes Netz an Oberleitungsanlagen notwendig, da sich die elektrische Energie im elektrischen Energiespeicher strategisch klug einsetzen lässt.

**Der Einsatz von O-Lkw kann Einsparungen an Treibhausgasemissionen in Höhe von 100 % ermöglichen.** Voraussetzung hierfür ist, dass der O-Lkw in einem sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen operiert, die externe elektrische Energieversorgung zu 100 % mit Ökostrom erfolgt und der O-Lkw über eine ausreichend leistungsfähige E-Maschine sowie einen sinnvoll dimensionierten elektrischen Energiespeicher verfügt. Soll auch die Distanz vom Startpunkt einer Fahrt bis zum Erreichen eines mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts vollelektrisch zurückgelegt werden, stellt zusätzlich eine Plug-in-Ladefunktion eine sinnvolle Ergänzung der technischen Konfiguration des O-Lkws dar. Mit einem Oberleitungsanteil von weniger als fünf Prozent (Bedingungen, die derzeit im ELISA-Forschungsprojekt vorliegen), kann ein O-Lkw bereits zwischen 14 % und 17 % an

Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) einsparen. Ein entsprechender Ausbau von Oberleitungsanlagen, so dass der Anteil der elektrifizierten Strecken an der Gesamtfahrstrecke steigt, führt zu entsprechenden Verbesserungen.

**Es lässt sich zusammenfassend festhalten**, dass sämtliche der aufgestellten Forschungshypothesen zur Berechnung von charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerten sowie zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial durch O-Lkw bestätigt werden können (siehe Tabelle 17).

**Tabelle 17: Forschungshypothesen zu Treibhausgasemissionskennwerten sowie zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw** (Quelle: Eigene Darstellung)

<b>Oberziel 3: Berechnung von Treibhausgasemissionskennwerten und des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw</b>		<b>Status</b>
H3a:	Die durch einen O-Lkw emittierten Treibhausgase sind abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws.	<b>Bestätigt</b>
H3b:	Der Strommix beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an emittierten Treibhausgasen von O-Lkw.	<b>Bestätigt</b>
H3c:	Der Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitte im Vergleich zu den nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten einer Fahrt beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen von O Lkw.	<b>Bestätigt</b>
H3d:	Der Einsatz von O-Lkw erlaubt messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr.	<b>Bestätigt</b>

#### 4.5 ZWISCHENFAZIT

Das vorliegende Kapitel war der Analyse des Hauptziels der Dissertationsschrift – die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen eines O-Lkws – gewidmet. Den Forschungsaktivitäten lagen dabei drei übergeordnete Oberziele zugrunde: Erstens galt es die sogenannten Betriebsmodi eines O-Lkws zu verstehen und datenbasiert identifizieren zu können; zweitens sollte hierauf aufbauend der Energieverbrauch von O-Lkw ermittelt werden; drittens galt es, fundierte Kenntnisse zu charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerten eines O-Lkws sowie zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw in Abhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen zu erarbeiten. Den Untersuchungen wurde dazu mit der Entwicklung des „3-Ebenen-Modell[s] zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems“ zunächst ein detailliertes Quantifizierungsverfahren vorangestellt. Das 3-Ebenen-Modell – bestehend aus Oberzielen, Verfahrensschritten und Teilaufgaben – ermöglichte schlussendlich ein strukturiertes Vorgehen zur Erarbeitung der angestrebten Ergebnisse, zu denen im Folgenden kurz resümiert wird.

#### BETRIEBSMODI EINES O-LKWS

O-Lkw operieren in verschiedenen Betriebsmodi. Unterschieden werden sollten drei hybride Betriebsmodi, drei elektrische Betriebsmodi sowie ein Übergangsmodus, der infolge des Wechsels zwischen zwei Betriebsmodi auftreten kann. Die Betriebsmodi sind Resultat des Zusammenspiels aus Verbrennungsmotor, E-Maschine, elektrischer Energiespeicher, Pantograph sowie Oberleitungsanlage. Die Betriebsmodi können datenbasiert eindeutig voneinander abgegrenzt und identifiziert werden und somit den Betrieb eines O-Lkws lückenlos auf Basis erhobener Fahrzeugdaten beschreiben.

#### ENERGIEVERBRAUCH EINES O-LKWS

Entsprechend des Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws und hieraus resultierend auch betriebsmodusabhängige Energieverbrauchskennwerte. Grundsätzlich ist es möglich, dass ein O-Lkw gänzlich ohne Dieselkraftstoffverbrauch operieren kann – dies ist bei Fahrt in sämtlichen

---

elektrischen Betriebsmodi der Fall. Erforderlich hierfür ist jedoch eine ausreichend leistungsstarke E-Maschine, über die die aktuelle O-Lkw-Generation (noch) nicht verfügt. Kann ein O-Lkw elektrische Energie aus einer Oberleitungsanlage beziehen, lassen sich merkliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch feststellen: Einerseits wird der Dieselmotorkraftstoffverbrauch erheblich, teils vollständig gesenkt; andererseits kann zusätzlich elektrische Energie zur Steigerung der elektrischen Reichweite auf nachgelagerten Streckenabschnitten ohne Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage aufgenommen werden. Der gesamte Energieverbrauch eines O-Lkws über ein zu betrachtendes Intervall ist dabei schlussendlich abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken. Je höher dieser Anteil ist, desto mehr Dieselmotorkraftstoff kann eingespart werden. Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Energieverbrauch eines O-Lkws durch die Nutzung einer Oberleitungsanlage gesenkt wird.

### **TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW**

Die Höhe der Treibhausgasemissionen ist generell proportional zur Höhe des Energieverbrauchs eines Fahrzeugs. So verwundert es nicht, dass auch die Treibhausgasemissionen eines O-Lkws in einer direkten Abhängigkeit zu den Betriebsmodi des selbigen stehen. Operiert ein O-Lkw in einem Betriebsmodus basierend auf dem Verbrennungsmotor, führt dies zu höheren Treibhausgasemissionen. Kann der O-Lkw stattdessen in einem elektrischen Betriebsmodus operieren, führt dies zu geringeren Treibhausgasemissionen des O-Lkws. Der zugrundeliegende Strommix nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der schlussendlich emittierten Treibhausgase. Je höher der Anteil von erneuerbaren Energien im Strommix ist, desto bessere Treibhausgasemissionsfaktoren weist dieser vor. Kann sogar zu 100 % auf Ökostrom zurückgegriffen werden, ist auch ein treibhausgasemissionsfreier Transport durch einen O-Lkw möglich. Ferner bedarf es eines angemessen ausgebauten Netzes an Streckenabschnitten, die mit einer Oberleitungsanlage elektrifiziert wurden, um messbare Einsparungen an Treibhausgasemissionen zu ermöglichen. Mit einem Oberleitungsanteil von weniger als fünf Prozent (Bedingungen, die derzeit im ELISA-Forschungsprojekt vorliegen), kann ein O-Lkw bereits zwischen 14 % und 17 % an Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) einsparen. Ein entsprechender Ausbau von Oberleitungsanlagen, so dass der Anteil der elektrifizierten Strecken an der Gesamtfahrstrecke steigt, führt zu entsprechenden Verbesserungen.

Der Einsatz von O-Lkw kann schlussendlich Einsparungen an Treibhausgasemissionen gegenüber dem Einsatz von konventionellen Diesel-Lkw in Höhe von bis zu 100 % ermöglichen. Voraussetzung hierfür ist, dass der O-Lkw in einem sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen operiert, die externe elektrische Energieversorgung zu 100 % mit Ökostrom erfolgt und der O-Lkw über eine ausreichend leistungsfähige E-Maschine sowie einen sinnvoll dimensionierten elektrischen Energiespeicher verfügt. Zusätzlich bedarf es einer Plug-in-Ladefunktion, so dass auch die Distanz vom Startpunkt einer Fahrt bis zum Erreichen eines mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts vollelektrisch zurückgelegt werden kann.

**Insgesamt zeigen die erarbeiteten Ergebnisse, dass O-Lkw durchaus dazu beitragen können, die Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr merklich zu reduzieren. Unter Wahrung der vorstehend genannten Voraussetzungen lassen sich sogar Treibhausgasemissionseinsparungen in Höhe von bis zu 100 % realisieren.**

---

## 5. EXKURS: BETRACHTUNGEN ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS

---

Die vorstehenden Untersuchungen haben klar aufgezeigt, dass es für den wirksamen Einsatz von O-Lkw eines größeren Kernnetzes an Oberleitungsanlagen bedarf. Ein solcher Ausbau kann auf Seiten der Gesellschaft sowohl positiv, neutral als auch negativ aufgenommen werden. Sollte sich jedoch eine breite gesellschaftliche Ablehnung feststellen lassen, kann dies zu merklichen Herausforderungen bei der Implementierung des eHighway-Systems führen. Wird es nicht gelingen, den Ausbau eines Netzes an Oberleitungsanlagen und die gesellschaftliche Akzeptanz in Einklang zu bringen, wird der oberleitungsgebundene Straßengüterverkehr mangels ausreichender Netzdichte nicht zum Erreichen der nationalen Klimaschutzziele beitragen können.

Auch wenn der eigentliche Fokus dieser Dissertationsschrift auf der Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems liegt, darf zumindest eine erste allgemeine Beleuchtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems in Form eines Exkurses nicht fehlen. Dieser Aufgabe wird im Folgenden nachgegangen. Hierfür werden zunächst relevante fachliche und methodische Grundlagen für die durchzuführende Akzeptanzuntersuchung zusammengetragen. Aufbauend wird eine standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet.

### 5.1 GRANULARITÄTSANSPRUCH AN DIE ERGEBNISSE UND VORGEHEN

#### GRANULARITÄTSANSPRUCH AN DIE ERGEBNISSE

Die Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems stellen als Exkurs eine Ergänzung zu dem Hauptziel dieser Dissertationsschrift dar. Der Anspruch an die Ergebnisqualität ist entsprechend gekennzeichnet von einem vorwiegend allgemeinen und ergänzenden Charakter, weniger von einem ähnlich detailreichen Granularitätsanspruch, wie dieser an die Ergebnisse zum Hauptteil der Dissertationsschrift gestellt wurde. Die Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems sollen dabei vor allem dazu dienen, die Quantifizierungsergebnisse zu den Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems zielführend einordnen zu können. Es wird nicht der Anspruch erhoben, eine vollumfängliche Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems durchzuführen.

Der vergleichsweise geringere Granularitätsanspruch an die Ergebnisse zur Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems ergibt sich nicht zuletzt ebenfalls in Folge der durch das ELISA-Forschungsprojekt vorgegebenen Rahmenbedingungen und vorhandenen Ressourcen. Weiterhin erschwerte die grassierende Corona-Pandemie die Datenerhebung und ließ einige grundsätzlich denkbare Erhebungsmethoden durch langanhaltende Kontaktbeschränkungen und Gesundheitsvorkehrungen von Grund auf nicht zu.

#### VORGEHEN

Zur Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems wird eine standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen vorbereitet, durchgeführt und analysiert. Ausgerichtet am definierten Granularitätsanspruchs an die Ergebnisse werden hierfür zunächst fachliche und methodische Grundlagen aufbereitet. Aufbauend wird der eigentlichen Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems mit einem aus fünf Arbeitsschritten bestehenden Verfahren nachgegangen – orientiert an den bereits vorgestellten allgemeinen Arbeitsschritten von Forschungsvorhaben im Verkehrsbereich (siehe Kapitel 3.4):

Zunächst erfolgen im Rahmen einer *Grundlagenkonzipierung* die Definition und Abgrenzung des sogenannten *Akzeptanzsubjekts*, *Akzeptanzobjekts* sowie *Akzeptanzkontexts*. Weiterhin wird der Begriff „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ operationalisiert.



---

Der zweite Schritt ist der *Erhebungsvorbereitung* gewidmet. Dabei wird die Durchführung der standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen adressiert. Die zur Durchführung der Befragung heranzuziehende Befragungssoftware wird festgelegt, der Fragebogen wird konstruiert und Pretests zur Sicherstellung der Qualität des Fragebogens werden durchgeführt.

Es folgen die *Erhebungsorganisation und Erhebungsdurchführung*. Hierbei wird fixiert, in welchem Zeitraum die Befragung durchgeführt werden soll. Weiterhin ist eine Strategie zu erarbeiten, die es erlauben wird, vor allem die *relevanten* Akzeptanzsubjekte mit der Befragung zu erreichen. Es schließt sich die eigentliche Durchführung der Befragung an, ergänzt durch eine simultan stattfindende kontinuierliche Kontrolle der eingehenden Fragebogenrückläufer.

Aufbauend richtet sich der Fokus auf die *Datenaufbereitung*. Es wird festgelegt, anhand welcher Software die erhobenen Daten ausgewertet werden sollen. Ferner werden die mithilfe der verwendeten Befragungssoftware erhobenen Daten exportiert, in einen Rohdatensatz zur Weiterverarbeitung transferiert sowie veredelt. Anschließend erfolgt die Deskription der Befragungsergebnisse.

Im letzten Schritt werden die aufbereiteten *Daten entsprechend der definierten Zielstellung analysiert*.

## 5.2 FACHLICHE UND METHODISCHE GRUNDLAGENAUFBEREITUNG

### 5.2.1 EINFÜHRUNG IN DIE AKZEPTANZFORSCHUNG

Handlungen und Veränderungen im Verkehrssektor können von Betroffenen sowohl positiv, neutral, als auch negativ wahrgenommen werden. Die baulichen und kapazitätssteigernden Maßnahmen an den Flughäfen in Frankfurt am Main oder München, das Bauvorhaben im Zusammenhang mit Stuttgart 21 oder auch die Bahntrassierung zwischen Karlsruhe und Basel sind lediglich wenige Beispiele, welche sich in diesem Zusammenhang exemplarisch nennen lassen (BMVI 2014, S. 5). Diese Projekte als Anhaltspunkt nehmend, zeigt sich, von welcher Relevanz die Untersuchung der Akzeptanz eines geplanten oder auch bereits realisierten Vorhabens auf Seiten der Öffentlichkeit ist. So auch ATTESLANDER U. A. (2008), welche sich bezüglich der Bedeutung von Akzeptanzuntersuchungen wie folgt äußern: „Keine Partei wird ohne politische Meinungsumfragen in den Wahlkampf ziehen, kein Parlament erlässt wichtige Gesetze, ohne vorher die Einstellung der Bürger durch Umfragen zu erkunden.“ (Atteslander u. a. 2008, S. 3) Auch ARNOLD & KLEE (2016, S. 1) raten dazu – im Kontext von Produktinnovationen – die Akzeptanz kontinuierlich und nachhaltig zu evaluieren. Ferner warnen sie davor, dass der Erfolg eines grundsätzlich marktreif-entwickelten Produkts auch ausbleiben kann, sollte das Produkt auf Seiten der Nachfragenden auf eine mangelnde Akzeptanz, gar Ablehnung stoßen (Arnold & Klee 2016, S. 1). Es steht außer Frage, dass es auch im Kontext des eHighway-Systems einer Auseinandersetzung mit Fragen der Akzeptanz bedarf. Im Fokus stehen soll im Rahmen dieser Dissertationsschrift dabei vor allem die allgemeine *gesellschaftliche* Akzeptanz zum eHighway-System. Um dieser Aufgabe angemessen nachgehen zu können, bedarf es zunächst der Klärung einiger zentraler Grundlagen.

#### BEGRIFFSVERSTÄNDNIS

Zunächst bedarf es einer Darlegung des Verständnisses des im Rahmen dieser Dissertationsschrift verwendeten **Begriffs „Gesellschaft“**. Es muss abgegrenzt werden, welche Personengruppen hierbei zu inkludieren beziehungsweise welche Personengruppen von den Betrachtungen gegebenenfalls auszuschließen sind. Das Verständnis für den Begriff „Gesellschaft“ wird dabei aus den Darlegungen gemäß den *Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse* (FGSV Verlag 2018a) sowie dem *Handbuch für eine gute Bürgerbeteiligung* (BMVI 2014) abgeleitet und lässt sich sehr zutreffend mit der Definition nach Duden beschreiben als „Gesamtheit der Menschen, die zusammen unter bestimmten politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnissen leben“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023c, o. S.).

---

Ferner wird der **Begriff „Akzeptanz“** nach Duden definiert als die „Bereitschaft, etwas zu akzeptieren“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023a, o. S.). „*Etwas akzeptieren*“ wird nach Duden zudem definiert als etwas „annehmen, hinnehmen, billigen; anerkennen; mit jemandem oder etwas einverstanden sein“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023b, o. S.).

Der **Akzeptanzbegriff** findet grundsätzlich eine vielfältige Verwendung (Arnold & Klee 2016, S. 9; Schäfer & Keppler 2013, S. 7; Lucke 1995, S. 9-11 & S. 33). Im Rahmen dieser Dissertationschrift wird er verstanden als die Akzeptanz einer (Produkt-)Innovation durch eine Person. Das Verständnis des Begriffs „**Innovation**“ folgt dabei der Auslegung nach ROGERS (1983):

*“An innovation is an idea, practice, or object that is perceived as new by an individual or other unit of adoption. It matters little, so far as human behavior is concerned, whether or not an idea is "objectively" new as measured by the lapse of time since its first use or discovery. The perceived newness of the idea for the individual determines his or her reaction to it. If the idea seems new to the individual, it is an innovation.”* (Rogers 1983, S. 11)

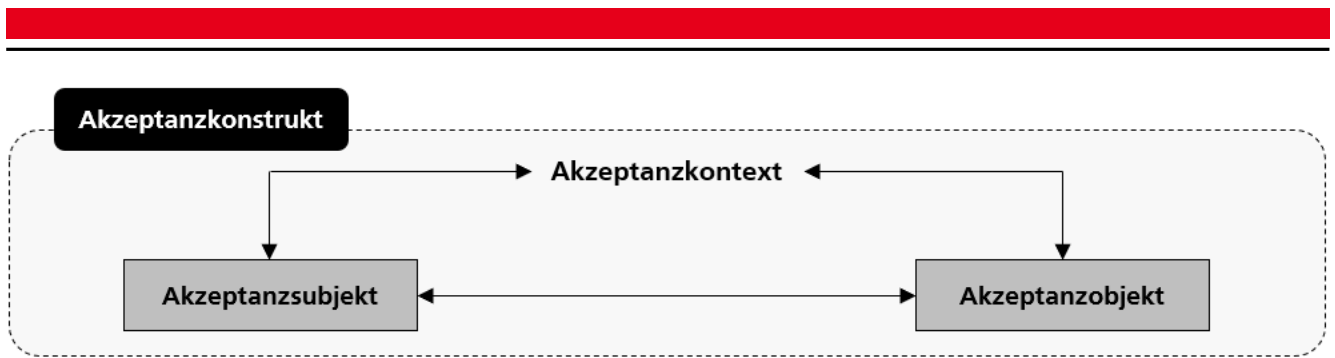
Eine Innovation ist zunächst also etwas Neues, beziehungsweise etwas, das durch eine Person als *neu* empfunden wird (Rogers 1983, S. 11). Im Rahmen dieser Dissertationschrift stellt die Innovation das eHighway-System dar. Es soll analysiert werden, ob Personen das eHighway-System „annehmen, hinnehmen, billigen; anerkennen; mit [...] einverstanden [...]“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023b, o. S.) sind, es also *akzeptieren*. Eine Person muss hierfür eine Entscheidung über Annahme oder Ablehnung treffen, sie wird aus diesem Grund auch als ein **Entscheidungsträger** bezeichnet. Um die Entscheidung eines Entscheidungsträgers für oder gegen eine Innovation besser nachvollziehen zu können, ist der Entscheidungsprozess grundsätzlich als Ganzes zu betrachten. In der Literatur wird hierfür als zentrale Grundlage das Zusammenspiel von einem sogenannten *Akzeptanzsubjekt* und einem sogenannten *Akzeptanzobjekt* angeführt, die sich in einem sogenannten *Akzeptanzkontext* befinden (Schäfer & Keppler 2013, S. 16; Lucke 1995, S. 88-90).

Ein **Akzeptanzsubjekt** ist gleichzusetzen mit dem Entscheidungsträger.<sup>48</sup> Akzeptanzsubjekte „können Einzelpersonen sein, aber auch Gruppen oder Kollektivakteure bis hin zur Gesellschaft“ (Schäfer & Keppler 2013, S. 17). Das Akzeptanzsubjekt muss eine Entscheidung bezüglich eines **Akzeptanzobjekts** – bezogen auf die vorliegende Dissertationschrift also einer Innovation, konkret das eHighway-System – treffen. Das Akzeptanzsubjekt entwickelt hierfür eine Einstellung gegenüber dem Akzeptanzobjekt. Die entwickelte Einstellung kann sich in weiterer Folge in einem konkreten Handeln bemerkbar machen. Die Entscheidung des Akzeptanzsubjekts wird dabei beeinflusst durch den **Akzeptanzkontext**, in dem sich Akzeptanzsubjekt und Akzeptanzobjekt befinden. Der Akzeptanzkontext entspricht den Rahmenbedingungen und dem Umfeld, zu denen, beziehungsweise in dem ein Akzeptanzsubjekt eine Entscheidung für oder gegen das Akzeptanzobjekt trifft. Eine Veränderung des Akzeptanzkontexts kann eine Veränderung der Entscheidung des Akzeptanzsubjekts zur Folge haben. Verändern sich das Akzeptanzobjekt oder auch das Akzeptanzsubjekt, verhält es sich vice versa. Eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext liegt vor (Schäfer & Keppler 2013, S. 17-23; Lucke 1995, S. 88-91). Es lässt sich zunächst also konstatieren: „Akzeptanz bedeutet [...], dass jemand (bzw. ein näher zu definierendes Akzeptanzsubjekt) etwas (das Akzeptanzobjekt) innerhalb der jeweiligen Rahmen- oder Ausgangsbedingungen (Akzeptanzkontext) akzeptiert oder annimmt.“ (Schäfer & Keppler 2013, S. 16)

Nachfolgende Abbildung 32 zeigt das Zusammenspiel von Akzeptanzsubjekt und Akzeptanzobjekt in einem entsprechenden Akzeptanzkontext nochmals grafisch auf.

---

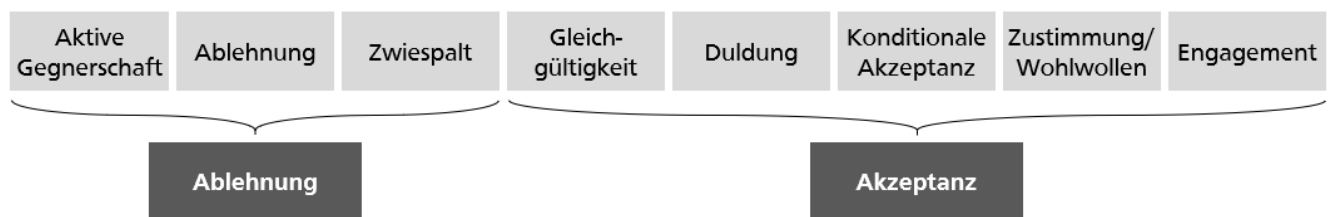
<sup>48</sup> Die Begriffe „Akzeptanzsubjekt“ und „Entscheidungsträger“ sowie „Akzeptanzobjekt“ und „Innovation“ werden im Folgenden synonym verwendet.



**Abbildung 32: Zusammenspiel von Akzeptanzsubjekt und Akzeptanzobjekt im Akzeptanzkontext**  
 (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an LUCKE (1995, S. 89) und SCHÄFER & KEPPLER (2013, S. 17))

### AKZEPTANZFORMEN ALS MAß DER INTENSITÄT VON AKZEPTANZ

Das Maß der *Akzeptanz* beziehungsweise *Ablehnung* eines Akzeptanzobjekts durch ein Akzeptanzsubjekt kann verschiedene Intensitäten annehmen, auch bekannt unter dem Begriff „**Akzeptanzformen**“. So kann die Zustimmung beziehungsweise Ablehnung durch ein Akzeptanzsubjekt unterschiedlich stark ausgeprägt sein. SAUER U. A. (2005, S. I-2 - I-3) differenzieren hierbei zum Beispiel eine achtstufige Skala. Die ersten drei Stufen – *aktive Gegnerschaft*, *Ablehnung*, *Zwiespalt* – werden dabei grundsätzlich als Ablehnung interpretiert. Die restlichen fünf Stufen – *Gleichgültigkeit*, *Duldung*, *konditionale Akzeptanz*, *Zustimmung/Wohlwollen*, *Engagement* – werden als Zustimmung, also als Akzeptanz, gewertet (siehe Abbildung 33). Hierbei gilt: Je niedriger die Stufe, desto stärker die Ablehnung; je höher die Stufe, desto höher die Akzeptanz (Sauer u. a. 2005, S. I-2 - I-3; Schäfer & Keppler 2013, S. 23-24).



**Abbildung 33: Formen der Akzeptanz**  
 (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SAUER U. A. (2005, S. I-2 - I-3) und SCHÄFER & KEPPLER (2013, S. 24))

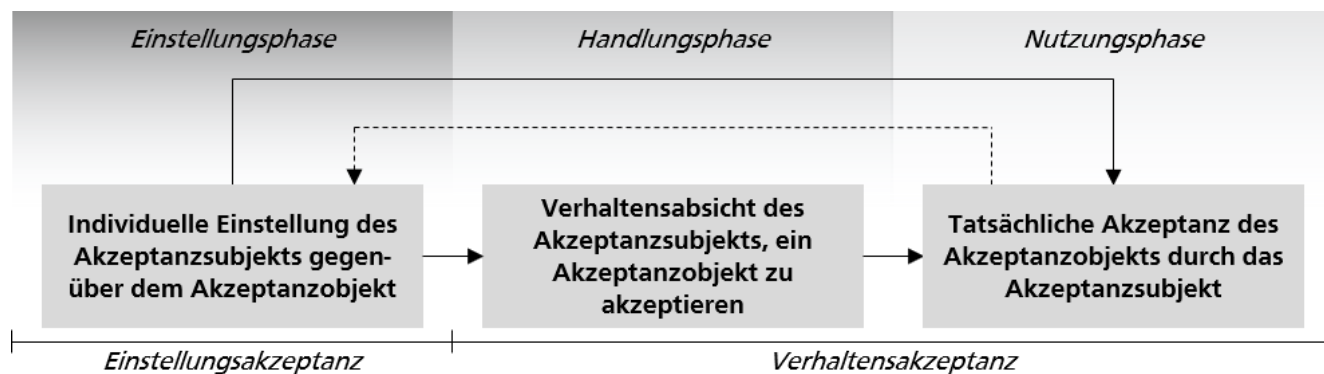
### 5.2.2 AKZEPTANZTHEORIEN UND WESENTLICHE EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AKZEPTANZ

Aufgrund ihrer Bedeutung verwundert es nicht, dass sich bereits einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vertiefend mit der Akzeptanzforschung beschäftigt haben. So existieren verschiedene Ansätze, die die Entscheidung eines Akzeptanzsubjekts über Akzeptanz oder Ablehnung eines Akzeptanzobjekts in **Akzeptanztheorien** zu ergründen versuchen. Bekannte Theorien, die im Kontext der Akzeptanzforschung regelmäßig Verwendung finden, sind dabei zum Beispiel

- die *Theory of Reasoned Action* (Ajzen 1985),
- das *Technology Acceptance Model* (Davis 1985),
- die *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (Venkatesh u. a. 2003) oder
- die *Diffusionstheorie/der Innovations-Entscheidungsprozess* (Rogers 1983).

Zahlreiche Akzeptanztheorien (im Folgenden auch als *Akzeptanzmodelle* bezeichnet) basieren dabei auf einem ähnlichen **Grundkonzept**. Sie gehen davon aus, dass sich der Akzeptanzbildungsprozess eines Akzeptanzsubjekts in die drei Phasen *Einstellungsphase*, *Handlungsphase* und *Nutzungsphase* untergliedern lässt. In diesem Zusammenhang erfolgt ferner eine Differenzierung zwischen der sogenannten *Einstellungs-* und der sogenannten *Verhaltensakzeptanz* (Arnold & Klee 2016, S. 9; Schäfer & Keppler 2013, S. 11).

Die *Einstellungsphase* eines Akzeptanzsubjekts wird geprägt durch die **Einstellungsakzeptanz**. Diese ist der eigentlichen Handlung des Akzeptanzsubjekts vorangestellt und lässt sich beschreiben als eine Verhaltensabsicht, nicht aber als das tatsächliche Agieren und Durchführen einer Handlung selbst (Schäfer & Keppler 2013, S. 12). Aufgrund ihrer *Latenz* lässt sich die Einstellungsakzeptanz nicht unmittelbar erkennen, sondern lediglich durch geeignete Methoden erheben (Lucke 1995, S. 82). Der Einstellungsphase folgt die *Handlungs-* und aufbauend die *Nutzungsphase*. In diesen Phasen zeigt sich nun die **Verhaltensakzeptanz** von Bedeutung. Sie ist zu verstehen als die aktive Handlung des Akzeptanzsubjekts, das Akzeptanzobjekt anzunehmen (oder abzulehnen). Im Gegensatz zur Einstellungsakzeptanz ist die Verhaltensakzeptanz aufgrund ihrer aktiven Komponente auch durch Außenstehende beobachtbar (Arnold & Klee 2016, S. 10; Schäfer & Keppler 2013, S. 12; Lucke 1995, S. 82). Es folgt die tatsächliche Akzeptanz (oder auch Ablehnung) des Akzeptanzobjekts durch das Akzeptanzsubjekt. Ferner lässt sich ein *Rückkopplungsprozess* identifizieren: Bisherige Erfahrungen eines Akzeptanzsubjekts mit vorherigen Akzeptanzobjekten gleicher oder ähnlicher Art können sich auf die individuelle Einstellung eines Akzeptanzsubjekts gegenüber zukünftigen Akzeptanzobjekten auswirken (Venkatesh u. a. 2003, S. 427). Abbildung 34 zeigt das beschriebene **Grundkonzept** nochmals grafisch auf.



**Abbildung 34: Grundkonzept von Akzeptanzmodellen**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an VENKATESH U. A. (2003, S. 427), ARNOLD & KLEE (2016, S. 9-10), SCHÄFER & KEPPLER (2013, S. 11-12) und LUCKE (1995, S. 82))

Aufgrund der Relevanz für die weiteren Ausführungen in dieser Dissertationsschrift soll im Folgenden vertiefend auf die *Diffusionstheorie* und hierbei auf den *Innovations-Entscheidungsprozess* eingegangen werden. Weiterführende Erläuterungen zur *Theory of Reasoned Action*, zum *Technology Acceptance Model* sowie zur *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* können dem Anhang entnommen werden.

### DIFFUSIONSTHEORIE NACH ROGERS (1983): DER INNOVATIONS-ENTSCHEIDUNGSPROZESS

Die **Diffusionstheorie** nach ROGERS (1983) erklärt, wie sich eine Innovation (=Akzeptanzobjekt) am Markt (=Teil des Akzeptanzkontexts) verbreitet und von Personen (=Akzeptanzsubjekt) angenommen, also akzeptiert, oder abgelehnt wird. In diesem Zusammenhang wurde von ROGERS (1983) der sogenannte **Innovations-Entscheidungsprozess** eingeführt. Der Innovations-Entscheidungsprozess ist in die fünf Phasen *Wissen*, *Überzeugung*, *Entscheidung*, *Implementierung* und *Bestätigung* untergliedert.

Akzeptanzsubjekte verfügen über bestimmte, grundlegende **Vorbedingungen** wie Erfahrungswerte, durchlebte (gegebenenfalls problembehaftete) Situationen oder beispielsweise auch Wünsche oder konkrete Vorstellungen. Ferner kann das soziale Umfeld (=Teil des Akzeptanzkontexts) die Handlungen des Akzeptanzsubjekts beeinflussen. Wird eine Innovation, also ein Akzeptanzobjekt, am Markt platziert, durchläuft ein Akzeptanzsubjekt zunächst die sogenannte **Wissensphase**. In dieser ersten Phase eignet sich das Akzeptanzsubjekt bis zu einem gewissen Grad Wissen und Kenntnisse zu dem Akzeptanzobjekt an. Inwiefern und inwieweit sich ein Akzeptanzsubjekt dabei Wissen aneignet, wird vor allem beeinflusst durch:

- sozioökonomische Eigenschaften (z. B. Alter, Geschlecht oder Bildungshintergrund),
- grundlegende Persönlichkeitsmerkmale, (z. B. Begeisterungsfähigkeit, Neugierde, Offenheit),
- das jeweilige Kommunikationsverhalten (z. B. Affinität zu sozialen Medien).

In der zweiten Phase, die **Überzeugungsphase**, setzt sich ein Akzeptanzsubjekt intensiver mit dem Akzeptanzobjekt auseinander und prüft, inwiefern das Akzeptanzobjekt

- einen Mehrwert gegenüber dem Status quo erlaubt (relativer Vorteil),
- mit den eigenen Werten vereinbar ist (Kompatibilität),
- getestet werden kann (Prüfbarkeit),
- den Mehrwert auch nach außen hin erkennen lässt (Beobachtbarkeit) und
- möglichst reibungslos angewendet und verstanden werden kann (Komplexität).

Basierend auf diesen Erkenntnissen entscheidet das Akzeptanzsubjekt in der dritten Phase, der **Entscheidungsphase**, ob das Akzeptanzobjekt akzeptiert oder abgelehnt wird (auch als *Adoption* und *Ablehnung* bezeichnet). Entscheidet sich ein Akzeptanzsubjekt dazu ein Akzeptanzobjekt zu akzeptieren, schließt sich in weiterer Folge die **Phase der Implementierung** an – also die aktive Verwendung des Akzeptanzobjekts. Unabhängig der Entscheidung über Adoption oder Ablehnung des Akzeptanzobjekts erfolgt in der letzten Phase eine **Bestätigungsüberprüfung** durch das Akzeptanzsubjekt. Das Akzeptanzsubjekt prüft, ob die richtige Entscheidung über Adoption oder Ablehnung getroffen wurde. Gegebenenfalls erfolgt eine Änderung der zuvor getroffenen Entscheidung (Arnold & Klee 2016, S. 10-13; Rogers 1983, S. 15-16 & S. 20-22 & S. 163-191).

Die Entscheidungsfindung eines Akzeptanzsubjekts ist dabei externen Einflüssen ausgesetzt (=Akzeptanzkontext). Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die sogenannten **Kommunikationskanäle**. Ein Kommunikationskanal zeigt dabei auf, wie eine Information von einem Akzeptanzsubjekt A zu einem Akzeptanzsubjekt B übertragen (oder auch nicht übertragen) wird. ROGERS (1983, S. 17-18) spricht sich dafür aus, dass der Informationsaustausch zwischen Akzeptanzsubjekten, die bereits über Erfahrungswerte mit dem Akzeptanzobjekt verfügen, und solchen Akzeptanzsubjekten, denen solche Erfahrungswerte bislang fehlen, einer der zentralen Erfolgsfaktoren für die erfolgreiche Verbreitung eines Akzeptanzobjekts sei. Dieser Austausch könne über Erfolg oder Misserfolg eines Akzeptanzobjekts entscheiden. Je besser dieser Austausch funktioniere, desto besser werde sich ein Akzeptanzobjekt am Markt etablieren. ROGERS (1983, S. 17-18) geht an dieser Stelle noch weiter und erläutert, dass ein Akzeptanzsubjekt seine Entscheidung für oder gegen ein Akzeptanzobjekt häufig nicht auf Basis wissenschaftlicher Studien, sondern vielmehr auf Basis der ihm zugetragenen Informationen anderer Akzeptanzsubjekte treffe. ROGERS (1983, S. 18) misst der Informationsweitergabe von Akzeptanzsubjekt zu Akzeptanzsubjekt im Allgemeinen eine hohe Bedeutung zu.

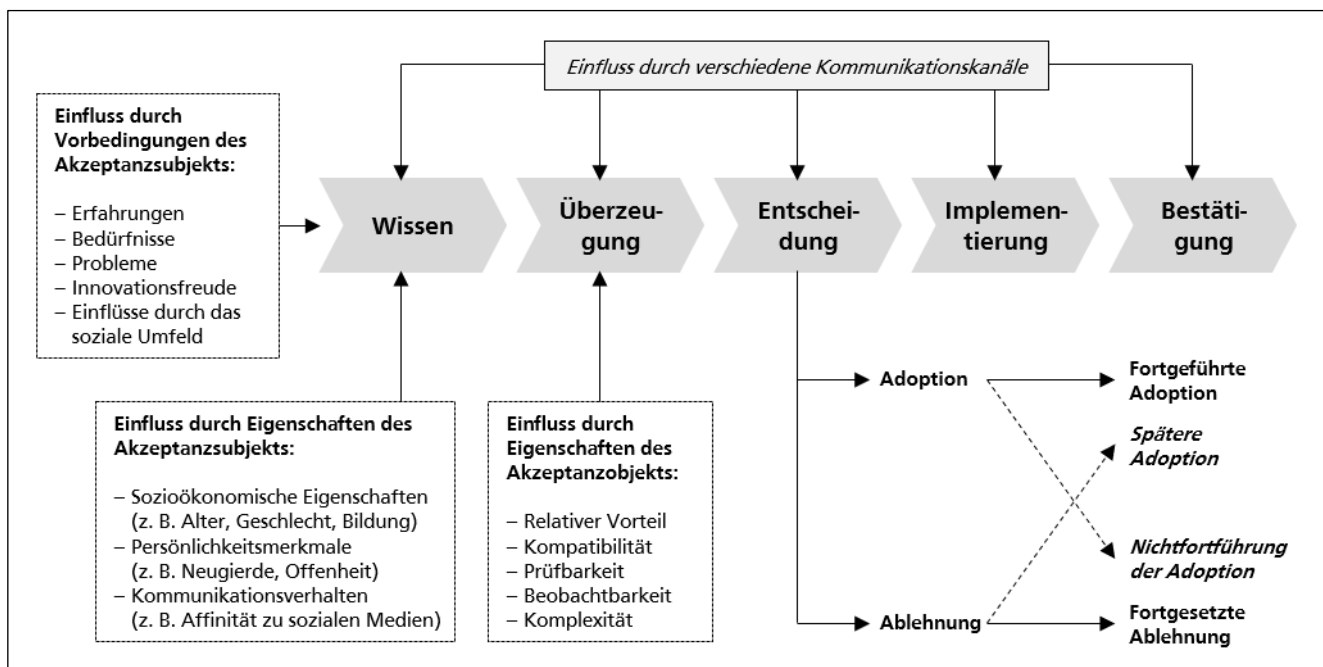
Hinsichtlich ihrer Neigung, ein Akzeptanzobjekt anzunehmen, lassen sich nach ROGERS (1983) **Akzeptanzsubjekte in verschiedene Stereotypen** einteilen. Dabei entscheidend ist die Innovations- und Risikobereitschaft eines Akzeptanzsubjekts, gemessen an der Zeitdauer die es bedarf, bis ein Akzeptanzsubjekt ein auf dem Markt platziertes Akzeptanzobjekt annimmt. In diesem Zusammenhang sind die Stereotypen „*Innovators*“/„*Pioneers*“, „*Early Adopters*“, „*Early Majority*“, „*Late Majority*“ sowie „*Laggards*“ geläufig<sup>49</sup>. Dieser Untergliederung liegt die Annahme zugrunde, dass zunächst lediglich wenige, aber innovationsfreudige Akzeptanzsubjekte – die **Pioniere** – ein Akzeptanzobjekt akzeptieren (Rogers 1983, S. 22-23; Arnold & Klee 2016, S. 12-13). An dieser Stelle wird die Bedeutung des Informationsaustauschs besonders deutlich, denn Pioniere „haben typischerweise weitreichende soziale Kontakte und sind weiträumig vernetzt.“ (Arnold & Klee 2016, S. 13) Über ihre Kommunikationskanäle werden schließlich

<sup>49</sup> „*Innovators*“/„*Pioneers*“ im Folgenden: Pioniere; „*Early Adopters*“ im Folgenden: Frühe Adoptoren; „*Early Majority*“ im Folgenden: Frühe Mehrheit; „*Late Majority*“ im Folgenden: Späte Mehrheit; „*Laggards*“ im Folgenden: Nachzügler.



weitere Akzeptanzsubjekte erschlossen – die sogenannten **frühen Adoptoren**. Akzeptanzsubjekte, die diesem Stereotyp zugeordnet werden, zeichnen sich ebenfalls durch eine gute soziale Vernetzung aus. Ferner charakterisiert sie meist eine Art Vorbildfunktion und sie dienen nicht selten als Benchmark für andere Akzeptanzsubjekte. In der Literatur findet hierfür gelegentlich auch der Begriff „*Meinungsführer*“ Verwendung. Ist die Anzahl an Akzeptanzsubjekten, die den Pionieren zugeordnet werden, verhältnismäßig gering, so ist die Anzahl an Akzeptanzsubjekten, die den frühen Adoptoren zugeordnet wird, bereits ein Vielfaches hiervon. Über die Kommunikationskanäle der frühen Adoptoren werden in Folge wiederum weitere Akzeptanzsubjekte erschlossen: Es schließen sich Akzeptanzsubjekte aus der Gruppe der **frühen Mehrheit** an, gefolgt von den sich zögerlich verhaltenden und häufig eher auf Grund von sozialem Druck geleiteten Akzeptanzsubjekten der **späten Mehrheit**. Die Akzeptanzsubjekte der frühen und späten Mehrheit repräsentieren dabei den größten Anteil an Akzeptanzsubjekten im Innovations-Entscheidungsprozess. Wenige **Nachzügler** bedürfen aufgrund ihres allgemeinen Misstrauens gegenüber Innovationen einer deutlich längeren Zeitspanne, bis ein Akzeptanzobjekt angenommen wird (Rogers 1983, S. 22-23; Arnold & Klee 2016, S. 10-13).

Abbildung 35 zeigt den Innovations-Entscheidungsprozess nach ROGERS (1983) grafisch auf.



**Abbildung 35: Innovations-Entscheidungsprozess nach ROGERS (1983)**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an ROGERS (1983, S. 165) und ARNOLD & KLEE (2016, S. 11))

### 5.2.3 GRUNDLAGEN ZUR UNTERSUCHUNG VON AKZEPTANZ IM VERKEHRSBEREICH

Anhand der in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 dargelegten Grundlagen können wesentliche Zusammenhänge im Kontext der Akzeptanzforschung erklärt werden. Die zusammengetragenen Grundlagen zeigen jedoch nicht auf, wie die tatsächliche Akzeptanz eines Akzeptanzsubjekts gegenüber einem Akzeptanzobjekt in einem entsprechenden Akzeptanzkontext letztendlich auch erhoben werden kann. Dieser Aufgabenstellung soll im vorliegenden Abschnitt nachgegangen werden.

#### OPERATIONALISIERUNG

Unabhängig der Möglichkeiten, auf welche Art und Weise eine Akzeptanzermessung schlussendlich erfolgen kann, bedarf es im Vorhinein einer Klärung des für die Akzeptanzforschung so wichtigen Begriffs der **Operationalisierung**.

---

Die Akzeptanz eines Akzeptanzsubjekts gegenüber eines Akzeptanzobjekts lässt sich in der Regel nicht direkt beobachten und somit auch nicht direkt messen. Unter Sozialforschenden würde die zu untersuchende Akzeptanz auch als sogenannte **latente Variable** bezeichnet werden (Döring 2022a, S. 478). „Eine Variable beschreibt [dabei zunächst] ein Merkmal oder eine Eigenschaft von Merkmalsträgern wie Personen, Gegenständen, Organisationen, etc.“ (Mayer 2013, S. 74). „Latent“ wird, beispielsweise nach Duden, definiert als „vorhanden, aber (noch) nicht in Erscheinung tretend; nicht unmittelbar sichtbar oder zu erfassen“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023d, o. S.). Um latente Variablen zu untersuchen, bedarf es sogenannter **manifeste Variablen**. Nach Duden wird der Begriff „manifest“ als „eindeutig als etwas Bestimmtes zu erkennen, offenkundig“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023e, o. S.) definiert. Manifeste Variablen sind also, im Gegensatz zu latenten Variablen, direkt beobachtbar (Döring 2022a, S. 478). Eine manifeste Variable wäre beispielsweise die Frage nach der Haarfarbe.

In der Regel wird es nicht genügen, eine latente Variable durch Prüfung lediglich *einer* passenden manifesten Variablen zu untersuchen. Um eine latente Variable angemessenen analysieren zu können, werden meist verschiedene manifeste Variablen definiert und evaluiert, um auf Basis dieser Untersuchungsergebnisse indirekt auf die latente Variable zu schließen. Es werden also *mehrere* manifeste Variablen *einer* latenten Variablen zugeordnet. Dieser Zuordnungsprozess wird als **Operationalisierung** bezeichnet (Döring 2022c, S. 229-230; Döring 2022a, S. 478). Die Operationalisierung ist als essenzielles theoretisches Konstrukt – quasi der strukturgebende, rote Faden – den weiteren Bearbeitungsschritten von Akzeptanzuntersuchungen stets voranzustellen (Mayer 2013, S. 58).

## ERHEBUNGSMETHODEN

Wurde die Operationalisierung vorgenommen, werden den Akzeptanzforschenden in der Literatur **verschiedene Methoden** zur Verfügung gestellt, anhand derer dem eigentlichen Forschungsvorhaben nachgegangen werden kann. Welche Methode(n) schlussendlich Verwendung findet, hängt von der jeweiligen Zielstellung ab: Es ist erforderlich, eine (beziehungsweise gegebenenfalls auch mehrere) für die Fragestellung geeignete Erhebungsmethode(n) aus den zur Verfügung stehenden Erhebungsmethoden zu identifizieren. Dabei ist zu beachten, dass nicht zwangsläufig *die* perfekte Erhebungsmethode existieren muss; jede Methode weist unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, die es gegebenenfalls im Vorhinein abzuwägen gilt (FGSV Verlag 2012, Blatt 6; Mayer 2013, S. 35). Gegebenenfalls kann es sich dabei als zielführend erweisen, verschiedene Erhebungsmethoden miteinander zu kombinieren (Mayer 2013, S. 26-27). Grundlegend unterschieden werden *quantitative* und *qualitative* Erhebungsmethoden (Döring 2022b, S. 15).

Die **quantitative Forschung** basiert auf dem sogenannten *kritischen Rationalismus*. Dem kritischen Rationalismus liegt die Annahme zugrunde, dass das menschliche Handeln nach erkennbaren Gesetzmäßigkeiten, beziehungsweise kausalen Zusammenhängen erfolgt (Mayer 2013, S. 17; Döring 2022b, S. 15). Um Annahmen solcher Art nachzuweisen, werden Vermutungen aufgestellt – auch als *Hypothesen* bezeichnet. Die Überprüfung von Hypothesen wird dabei kein eindeutiges Ergebnis hervorbringen, wie dies beispielsweise bei einer Beweisführung in den Naturwissenschaften der Fall wäre. Vielmehr basiert der kritische Rationalismus auf der Analyse von Wahrscheinlichkeiten. Wird eine Hypothese geprüft, so zeigt sich im Ergebnis, dass diese Hypothese wahrscheinlich zutreffend, oder wahrscheinlich nicht-zutreffend sein wird. MAYER (2013, S. 17) führt hierzu das Beispiel von „Wenn-dann-“ und „Je-desto-Beziehungen“ an und zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen dem Alter eines Menschen und einer zunehmenden grauen Haarfarbe auf: Je älter ein Mensch, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass dieser graue Haare hat. Aber nicht alle Menschen vorangeschrittenen Alters müssen zwangsläufig über graue Haare verfügen.

---

Hypothesen verfolgen dabei das Falsifizierungsprinzip, sie müssen also widerlegbar sein. Eine einmalige Widerlegung einer Hypothese, die im Vorhinein als „bewahrheitet“ angenommen wurde, führt allerdings nicht direkt dazu, dass diese Hypothese ihren Status von „bewahrheitet“ verliert und dieser in „widerlegt“ verändert werden muss. Die Hypothese gilt ab diesem Moment allerdings als weniger bewährt (Mayer 2013, S. 17-21). Im Umkehrschluss folgt: „Je öfter eine Hypothese dem Falsifikationsversuch ausgesetzt und nicht widerlegt wird, desto bewährter ist sie.“ (Mayer 2013, S. 21) Die quantitative Forschung setzt zum Kenntniserwerb also auf eine hohe Anzahl an Wiederholungen einer Hypothesenprüfung unter Einbezug einer hohen Anzahl an Akzeptanzsubjekten. Es erfolgt quasi eine standardisierte Messung. Es werden numerische Daten erhoben, die sich analytisch auswerten lassen (Döring 2022b, S. 15-16; Döring 2022e, S. 186). Eine typische Methode in der quantitativen Forschung stellt beispielsweise die mündlich oder schriftlich durchgeführte *standardisierte Befragung mittels Fragebogen* dar (Mayer 2013, S. 29; Döring 2022b, S. 15).

**Qualitative Forschung** ist von Grund auf offener ausgestaltet als die quantitative Forschung. Sie erfasst das Akzeptanzsubjekt in seiner gewöhnlichen Lebensumgebung ohne dabei zu sehr zu standardisieren. Qualitative Forschung birgt aber die Gefahr, aufgrund mangelnder Konkretisierung das eigentliche Erhebungsziel zu verfehlen. Die qualitative Forschung erfordert deshalb eine angemessene Definition der zu erreichenden Zielstellung. Im Gegensatz zum Messcharakter, der einer quantitativen Forschung zugrunde liegt, erfolgt die Auswertung qualitativ erhobener, nicht-numerischer Daten weiterhin vor allem auf interpretativer Ebene. Die Daten in der qualitativen Forschung werden dabei meist in wenigen, dafür aber sehr detailreichen Gesprächen zusammengetragen. Die umfassende Auswertung der Aussagen unter Berücksichtigung einer gesamtheitlichen Interpretation lässt schlussendlich den gesicherten Erkenntniserwerb zu. Als eine typische Methode der qualitativen Forschung zählt beispielsweise das *qualitative Interview* (FGSV Verlag 2012, Blatt 71; Döring 2022b, S. 16; Döring 2022e, S. 186).

Für die Akzeptanzuntersuchung im Rahmen dieser Dissertationsschrift wird – aufgrund der Vorgabe gemäß des Aufgabenpakets im ELISA-Forschungsprojekt – auf eine **standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen** zurückgegriffen. Im Folgenden wird aus diesem Grund exponiert die *standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen* als Erhebungsmethode der quantitativen Forschung adressiert. Für Details zu weiteren Untersuchungsmethoden im Bereich der Akzeptanzforschung, wie beispielsweise *Beobachtungen oder Experimente*, wird an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (zum Beispiel auf ATTESLANDER U. A. (2008) oder auf DÖRING (2022A)).

#### **DIE STANDARDISIERTE BEFRAGUNG MITTELS ONLINE-FRAGEBOGEN ALS METHODE DER QUANTITATIVEN FORSCHUNG**

Die **standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen** zählt zu einer häufig eingesetzten Erhebungsmethode in der quantitativen Akzeptanzforschung (Döring 2022a, S. 393). Anhand dieser Erhebungsmethode erfolgt „die zielgerichtete, systematische und regelgeleitete Generierung und Erfassung von [...] Selbstausskünften von Befragungspersonen zu ausgewählten Aspekten ihres Erlebens und Verhaltens in schriftlicher Form.“ (Döring 2022a, S. 393) *Standardisiert* bedeutet, dass sich der Fragebogen annähernd komplett aus sogenannten *geschlossenen Fragen* (siehe nachfolgend) mit *vorgegebenen Antwortmöglichkeiten* zusammensetzt. Aus diesem Grund ist dieser besonders geeignet, durch das Akzeptanzsubjekt eigenständig und ohne Unterstützung eines Interviewers ausgefüllt zu werden. Der Begriff „*Online-Fragebogen*“ gibt dabei den Verbreitungsweg des Fragebogens zu erkennen. Im Gegensatz zu einem sogenannten Paper-Pencil-Fragebogen, der dem Akzeptanzsubjekt physisch zur Verfügung gestellt, handschriftlich per Stift ausgefüllt, physisch zurückgegeben oder -geschickt wird und anschließend digital ausgelesen werden muss, erfolgt das Ausfüllen eines Online-Fragebogens direkt digital über ein entsprechendes Endgerät (zum Beispiel Computer oder Smartphone). Der Online-Fragebogen wird da-

---

bei über das Internet zur Verfügung gestellt, kann aber über herkömmliche Kommunikationskanäle (postalisch, telefonisch, et cetera) beworben werden (Döring 2022a, S. 394-395 & S. 399). Soll eine standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen durchgeführt werden, so sind unter anderem die **Arbeitsschritte Vorbereitung** (inklusive *Operationalisierung, Stichprobenbildung* und *Fragebogenkonstruktion*), *Pretest, Durchführung, Datenaufbereitung, Datenanalyse* und *Datenauswertung* zu durchlaufen (Mayer 2013, S. 58). Wird bei Anwendung dieser Methode der Anspruch erhoben, nicht nur willkürliche, sondern auch verwertbare Ergebnisse hervorzubringen, muss die Ausarbeitung der standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen besonderen Anforderungen genügen. Solche Anforderungen tangieren beispielsweise die *Stichprobenbildung*, die *Fragebogenkonstruktion* sowie die *Durchführung der eigentlichen Befragung*.

#### STICHPROBENBILDUNG

In den meisten Fällen ist es nicht möglich, sämtliche Akzeptanzsubjekte einer Grundgesamtheit zu befragen. Es wird lediglich eine **Stichprobe n**, die Teil der **Grundgesamtheit N** ist, befragt. Auf Basis der erhaltenen Ergebnisse werden Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit gezogen (Mayer 2013, S. 59-60; Hollenberg 2016, S. 24-25). Die Stichprobe muss dabei dem Anspruch nach **Repräsentativität** möglichst gut gerecht werden können. Hierfür stehen verschiedene Auswahlverfahren zur Bildung der Stichprobe zur Verfügung. Geläufige **Auswahlverfahren** sind beispielsweise die *reine Zufallsauswahl*, die *geschichtete Zufallsauswahl*, die *Klumpenauswahl* oder das *Quota-Verfahren* (Mayer 2013, S. 60-61). Auch finden sogenannte *Gelegenheitsstichproben* häufig Anwendung. **Gelegenheitsstichproben** basieren weitestgehend auf einer willkürlichen Auswahl und inkludieren vor allem solche Akzeptanzsubjekte, „die gerade zur Verfügung stehen oder leicht zugänglich sind“ (Döring 2022d, S. 307). Aufgrund der willkürlichen Auswahl zählen Gelegenheitsstichproben jedoch auch zu solchen Stichproben, die dem Anspruch nach Repräsentativität am wenigsten gerecht werden können (Döring 2022d, S. 307-308).

Im Zusammenhang mit repräsentativen Stichproben *muss* der Begriff der **Zentralität** beleuchtet werden. Unter Zentralität wird der Grad der Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts vom Akzeptanzobjekt im jeweiligen Akzeptanzkontext verstanden. Je höher die Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts, desto belastbarer können Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit gezogen werden (Atteslander u. a. 2008, S. 61 & S. 112). Der Grad der Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts ist dabei allerdings keine konstante Größe. Es ist durchaus möglich, dass ein Akzeptanzsubjekt zu zwei völlig verschiedenen Bewertungen gelangen kann, sobald sich der Akzeptanzkontext verändert. ATTESLANDER U. A. (2008, S. 61-62) führen als Beispiel einen chirurgischen Eingriff an: Ist das Akzeptanzsubjekt von einem solchen nicht betroffen, wird das Akzeptanzsubjekt andere Antworten verlauten lassen, als wenn ein solcher Eingriff bei dem Akzeptanzsubjekt jedoch selbst unmittelbar bevorstünde. Der Akzeptanzkontext beeinflusst also die Zentralität des Akzeptanzsubjekts. Die Zentralität bestimmt wiederum das Antwortverhalten des Akzeptanzsubjekts. Aufgrund der Bedeutung und der späteren Verwertbarkeit der Ergebnisse sollte der Prüfung der Zentralität des Akzeptanzsubjekts in Befragungen sämtlicher Art gewissenhaft nachgegangen werden (Atteslander u. a. 2008, S. 113).

#### MESSUNG QUANTITATIV ERHOBENER DATEN

Es wurde bereits dargelegt, dass es zur Untersuchung latenter Variablen der Messung manifester Variablen bedarf. Für diese Messung finden in der Regel vier verschiedene Arten von Skalen Verwendung: Die *Nominal-*, die *Ordinal-*, die *Intervall-* sowie die *Verhältnisskala* (Hollenberg 2016, S. 19-20).

Eine **Nominalskala** erlaubt lediglich Aussagen über *ja* oder *nein* beziehungsweise *gleich* oder *ungleich*. DÖRING (2022c, S. 240) führt als typisches Beispiel für die Verwendung einer Nominalskala die Frage nach dem Pkw-Besitz auf. Als Antworten kommen in Frage, dass eine befragte Person über ein Fahrzeug

---

verfügt oder entsprechend nicht. Außer zu erfahren, dass die befragte Person einen Pkw besitzt, erlaubt die Antwort allerdings keine größeren Interpretationsmöglichkeiten.

Eine **Ordinalskala** hingegen ermöglicht bereits zusätzlich die Bildung einer einfachen Rangfolge. Als mögliches Beispiel lassen sich Hierarchiestufen in einem Unternehmen anführen (Sachbearbeitende, Teamleitende, Abteilungsleitende, Bereichsleitende...).

Eine **Intervallskala** ähnelt einer Ordinalskala, jedoch mit dem Unterschied, dass die Antwortmöglichkeiten jeweils den gleichen Abstand zueinander aufweisen (beispielsweise die Celsius-Temperaturskala: Der Temperaturunterschied von 15 zu 20 Grad Celsius entspricht dem gleichen Temperaturunterschied wie von 22 zu 27 Grad Celsius) (Döring 2022c, S. 241-242 & S. 246).

**Verhältnisskalen** können ebenfalls als Intervallskala verstanden werden, jedoch mit dem zusätzlichen Charakteristikum, dass diese über einen absoluten Nullpunkt verfügen. DÖRING (2022c, S. 258) nennt hierfür als Beispiel die „Fehlerzahl einer Person im Diktat [...]“.

Die meisten Skalen bei Befragungen verfügen ferner über **fünf bis sieben Antwortmöglichkeiten**. Ob eine gerade oder ungerade Anzahl an Antwortmöglichkeiten genutzt wird, ist letztlich nicht vorgegeben – beides hat Vor- aber auch Nachteile. So wird bei einer ungeraden Anzahl die mittlere Antwortmöglichkeit häufig als sogenannte Fluchtkategorie bezeichnet (Mayer 2013, S. 83; Hollenberg 2016, S. 14-15): „Befragte flüchten sich in diese Kategorie [...] entweder aus Unsicherheit oder um eine tatsächlich vorhandene, aber sozial inopportune Haltung zu verbergen. Ist jedoch zu befürchten, die Befragten können oder wollen sich nicht entscheiden, so wählt man eine ungerade Anzahl von Antwortvorgaben, um Antwortverweigerungen oder gar Abbrüche zu vermeiden.“ (Mayer 2013, S. 83)

#### ANFORDERUNGEN AN DEN FRAGEBOGEN

„Die Konstruktion eines vollstandardisierten Fragebogens ist ein aufwendiger Prozess, wenn ein Instrument entstehen soll, das wissenschaftlichen **Gütekriterien** der Objektivität, Reliabilität und Validität genügt [...]“ (Döring 2022a, S. 401). So verwundert es nicht, dass sich in der Literatur zahlreiche Empfehlungen zur **Fragebogenkonstruktion** auffinden lassen. Angeraten wird beispielsweise die Verwendung einfacher und klarer Formulierungen. Fachbegriffen sollten einfache Worte vorgezogen werden. Mehrdeutigkeiten in der Fragestellung sind zu vermeiden, indem in jeder Frage lediglich nach *einem* Aspekt gefragt wird. Weiterhin ist sicherzustellen, dass die Fragestellungen durch die Akzeptanzsubjekte korrekt interpretiert werden. Hierfür ist darauf zu achten, die Fragestellungen so kurz wie möglich zu formulieren und auf einen komplexeren Satzbau zu verzichten (Mayer 2013, S. 80; Hollenberg 2016, S. 13-14).

Fragen können grundsätzlich *offen*, *halboffen* und *geschlossen* gestellt werden. **Offene Fragetypen** geben keine Antwortvorgaben vor, sondern ermöglichen dem Akzeptanzsubjekt größtmögliche Flexibilität. **Halboffene Fragestellungen** sehen sowohl vorgegebene Antwortmöglichkeiten vor, als auch die Möglichkeit, dass diese durch das Akzeptanzsubjekt weiter konkretisiert werden (beispielsweise durch die Möglichkeit einen Text zu ergänzen). **Geschlossene Fragen** erlauben lediglich die Auswahl aus vorgegebenen Antwortmöglichkeiten. Hierbei zu beachten ist einerseits, dass die Anzahl an Antwortmöglichkeiten das Akzeptanzsubjekt nicht überfordert und andererseits, dass die vorgegebenen Antwortmöglichkeiten eindeutig sind und sich gegenseitig ausschließen. Sind zu einer Frage mehrere Antworten zulässig, wird dies als Möglichkeit der **Mehrfachnennung** bezeichnet. Ist eine Mehrfachnennung zur Beantwortung der Frage erlaubt oder sogar gewünscht, so ist ein entsprechender Hinweis in der Fragestellung aufzunehmen (Mayer 2013, S. 91-93; Hollenberg 2016, S. 12; Atteslander u. a. 2008, S. 136). Geschlossene Fragen bieten den Vorteil, dass sie verhältnismäßig leicht statistisch ausgewertet werden können. Sie bergen beispielsweise aber auch die Gefahr, dass die präsentierten Antwortkategorien nicht



---

erschöpfend sind oder das vorhandene Gedankengut des Akzeptanzsubjekts nicht vollumfänglich erfassen können. Offene Fragen erlauben dem Akzeptanzsubjekt hier deutlich größeren Freiraum, wenngleich die Güte der gegebenen Antwort von der Bereitschaft und der Ausdrucksqualität des Akzeptanzsubjekts abhängen kann. Halboffene Fragen sollen die Vorteile von offen und geschlossenen Fragen unter gleichzeitiger Egalisierung der Nachteile beider Fragetypen vereinen (Hollenberg 2016, S. 12).

Auch die sogenannte **Dramaturgie eines Fragebogens**, also der Aufbau des Fragebogens und die Reihenfolge der Fragen, kann sich auf das Antwortverhalten eines Akzeptanzsubjekts auswirken. Als Beispiel anzuführen ist der sogenannte Halo-Effekt. Der **Halo-Effekt** beschreibt die Beeinflussung der Beantwortung nachfolgender Fragen aufgrund zuvor beantworteter Fragen. Das Akzeptanzsubjekt verknüpft unter Umständen nachfolgende mit zuvor gestellten Fragen und setzt diese in einen Zusammenhang. Hierdurch ist möglich, dass Antworten auf nachfolgende Fragen so getroffen werden, dass diese mit den vorherigen Antworten möglichst gut harmonieren (Mayer 2013, S. 95).

Grundsätzlich empfiehlt es sich, zu Beginn eines Fragebogens simple Einstiegsfragen zu platzieren. Im Folgenden ist darauf zu achten, dass thematisch zusammenhängende Fragen möglichst gebündelt werden. Allgemein sollte dabei das Prinzip „Vom Allgemeinen zum Speziellen“ verfolgt werden. Erfolgt ein Themenwechsel im Fragebogen, können Überleitungsfragen dem Akzeptanzsubjekt die Orientierung erleichtern. Erreicht das Akzeptanzsubjekt das Ende des Fragebogens, sollte ein Dank für die Teilnahme an der Umfrage ausgesprochen werden. Auch sollte die Möglichkeit eingeräumt werden, über ein Textfeld Anmerkungen zur Befragung zu hinterlassen (Mayer 2013, S. 95-98; Hollenberg 2016, S. 21-22). **Demografische Fragen** dienen dazu, die Akzeptanzsubjekte im Nachgang in Gruppen aufteilen zu können. Die Anzahl an demografischen Fragen sollte allerdings, sofern möglich, gering sein (Hollenberg 2016, S. 11).

#### DURCHFÜHRUNG DER BEFRAGUNG

Vor der Durchführung der Befragung sollte der entworfene Fragebogen durch einen **Pretest** geprüft werden. Der Pretest stellt unter anderem sicher, dass der Fragebogen möglichst vollständig ist, um die definierte Zielstellung zu erreichen. Zusätzlich wird geprüft, dass die erarbeiteten Fragen und Antwortmöglichkeiten durch das Akzeptanzsubjekt eindeutig verstanden werden können. Erweist es sich nach Durchführung des Pretests als notwendig, den Fragebogen umfassend zu überarbeiten, kann sich eine erneute Durchführung eines Pretests als zielführend darstellen (Mayer 2013, S. 99; Hollenberg 2016, S. 24; Döring 2022a, S. 399).

Die eigentliche **Online-Befragung** zeichnet sich in Folge insbesondere durch ihre Kosten- und Zeitvorteile aus. Für die Durchführung von Online-Befragungen kann dabei auf etablierte Anbieter von Befragungsservern zurückgegriffen werden, wie beispielsweise *Unipark.com* (2022) (Döring 2022a, S. 409). Der **Erfolg von Online-Befragungen** unterliegt dabei der Berücksichtigung einiger Kriterien. Aus gestalterischer Perspektive ist es ratsam, ein übersichtliches und gut lesbares Seitenlayout zu wählen, das auf sämtlichen Endgeräten korrekt angezeigt wird. Hierbei ist auf eine einheitliche Schriftart zu achten, ebenso wie auf eine sinnvolle inhaltliche Strukturierung. Dem Akzeptanzsubjekt sollte darüber hinaus ein Fortschrittsbalken angezeigt werden. Zusätzlich sollte zu Beginn der Befragung ein kurzes Anschreiben platziert werden, das das Akzeptanzsubjekt über die wesentlichen Informationen zur Befragung in Kenntnis setzt. Aufmachung und Qualität der ersten Seite können dabei sogar entscheidend sein, ob sich ein Akzeptanzsubjekt die Zeit zur Beantwortung des Fragebogens nimmt, oder gegebenenfalls doch von einer Teilnahme absehen wird. Als besonders herausfordernd bei Online-Befragungen zeigen sich jedoch die Erreichbarkeit insbesondere älterer Akzeptanzsubjekte, eine mangelnde Zentralität der Teilnehmenden oder beispielsweise auch eine hohe Anzahl an Befragungsabbrüchen. Dies kann sich unter Umständen auf die Repräsentativität der Ergebnisse auswirken (Mayer 2013, S. 104-105; Hollenberg 2016, S.

---

8-9 & S. 21). Um die Anzahl an Befragungsabbrüchen aufgrund von Ermüdung und abnehmender Motivation des Akzeptanzsubjekts zu reduzieren, sollte eine Online-Befragung die Zeitdauer von 15 Minuten nicht überschreiten (Döring 2022a, S. 410).

## 5.3 GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS

### 5.3.1 GRUNDLAGENKONZIPIERUNG

#### DEFINITION VON AKZEPTANZSUBJEKT, AKZEPTANZOBJEKT UND AKZEPTANZKONTEXT

Zur Gewährleistung einer zielführenden Untersuchung sind – basierend auf den vorstehend zusammengetragenen fachlichen und methodischen Grundlagen – zunächst das Akzeptanzsubjekt, das Akzeptanzobjekt sowie der Akzeptanzkontext zu definieren und abzugrenzen.

Das **Akzeptanzobjekt** wurde im Rahmen der fachlichen und methodischen Grundlagenaufbereitung (siehe Kapitel 5.2.1) bereits definiert: Das zu untersuchende Akzeptanzobjekt, das dem Forschungsvorhaben dieser Dissertationsschrift zugrunde liegt, stellt das **eHighway-Systems als Ganzes** dar.

**Akzeptanzsubjekte** „können Einzelpersonen sein, aber auch Gruppen oder Kollektivakteure bis hin zur Gesellschaft“ (Schäfer & Keppler 2013, S. 17). Die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertationsschrift adressieren als Akzeptanzsubjekt die (deutsche) **Gesellschaft im Allgemeinen**. Zur Erinnerung: Das Begriffsverständnis für „Gesellschaft“ wurde mithilfe des Dudens definiert als „Gesamtheit der Menschen, die zusammen unter bestimmten politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnissen leben“ (Bibliographisches Institut GmbH 2023c, o. S.). Das uneingeschränkte Inkludieren sämtlicher Personen einer Gesellschaft in die Untersuchungen hat zunächst zum Hintergrund, dass grundsätzlich mannigfaltige Berührungspunkte zwischen Mensch und eHighway-System möglich sind: Sei es durch

- das eigenständige Befahren eines mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts mit dem privaten Pkw,
- Sichtkontakt auf eine Oberleitungsanlage aus dem Wohnzimmerfenster,
- einen beruflichen Bezug,
- ein potenziell mögliches Unfallereignis zwischen Pkw und O-Lkw auf einem elektrifizierten Streckenabschnitt oder im nachgelagerten Netz oder sei es beispielsweise auch schlichtweg durch
- das Vernehmen von Informationen infolge von Pressemeldungen.

Werden keine weiteren Eingrenzungen hinsichtlich der für die Untersuchungen zu berücksichtigenden Personen einer Gesellschaft vorgenommen, wird im Folgenden hierfür auch der Begriff „**allgemeine Gesellschaft**“ verwendet.

Hinsichtlich des **Akzeptanzkontexts** sind folgende Hinweise zu beachten: Grundsätzlich ist bereits bekannt, dass die Akzeptanz eines Akzeptanzsubjekts gegenüber des Akzeptanzobjekts in einem sich ändernden Akzeptanzkontext Änderungen unterliegt. Als Akzeptanzkontext ist im Rahmen dieser Dissertationsschrift zunächst ganz allgemein räumlich die Bundesrepublik Deutschland und zeitlich die Zeitspanne von Januar bis Juli 2022 festzuhalten<sup>50</sup>. Dennoch bedarf es weiterer Konkretisierungen:

Als ein erster Aspekt muss bezüglich des Akzeptanzkontexts, in dem sich Akzeptanzsubjekt und -objekt befinden, die **Betroffenheit** des Akzeptanzsubjekts vom Akzeptanzobjekt adressiert werden. Verändert sich die Betroffenheit, kann sich dies auf die Entscheidung des Akzeptanzsubjekts hinsichtlich Akzeptanz oder Ablehnung des Akzeptanzobjekts auswirken (Atteslander u. a. 2008, S. 61-62). Die Betroffenheit des Akzeptanzsubjekts wird maßgeblich mitbeeinflusst von dem Akzeptanzkontext, in dem sich das Akzeptanzsubjekt befindet. Bezüglich des eHighway-Systems als Akzeptanzobjekt ist zu berücksichtigen,

---

<sup>50</sup> Entspricht zeitgleich dem Zeitraum der Erhebung. Die nachfolgenden Erläuterungen führen hierzu weiter aus.

---

dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Deutschland lediglich drei eHighway-Teststrecken existieren. Der Teil der Gesellschaft, der aktuell in irgendeiner Form vom eHighway-System betroffen ist – sich also in einem *belastbaren Akzeptanzkontext* befindet – ist folglich entsprechend deutlich limitiert. Es werden sich jedoch insbesondere die Ergebnisse dieser Personengruppe dazu eignen, um Rückschlüsse auf die *tatsächliche Akzeptanz des eHighway-Systems* abzuleiten. Es erscheint also zielführend, sich statt der Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der *ungefilterten allgemeinen Gesellschaft* vielmehr mit der Akzeptanz auf Seiten der **vom eHighway-System betroffenen Gesellschaft** zu beschäftigen.

Auf Basis der erarbeiteten fachlichen und methodischen Grundlagen in Kapitel 5.2.1 wird deutlich, dass der Gedankengang hinsichtlich der Beschreibung des Akzeptanzkontexts an dieser Stelle allerdings noch nicht zu beenden ist. Es ist vorher nochmals der Innovations-Entscheidungsprozess nach ROGERS (1983) zu betrachten. Aus diesem geht hervor, dass das **Wissen eines Akzeptanzsubjekts über das Akzeptanzobjekt** die Entscheidung über Akzeptanz oder Ablehnung erheblich beeinflussen kann (siehe hierzu auch Kapitel 5.2.2): Ein Akzeptanzsubjekt eignet sich zunächst Wissen über ein Akzeptanzobjekt an. Inwieweit dies geschieht, wird erheblich durch die Art und Anzahl von Kommunikationskanälen beeinflusst. Durch diese Kanäle werden verschiedenste Informationen an das Akzeptanzsubjekt herangetragen. Über welche Kommunikationskanäle ein Akzeptanzsubjekt dabei verfügt, wird beeinflusst durch den Akzeptanzkontext, in dem sich das Akzeptanzsubjekt befindet. Als Resultat des gebildeten Wissens entscheidet das Akzeptanzsubjekt schlussendlich über Akzeptanz oder Ablehnung des Akzeptanzobjekts. Zusammenfassend gilt: Je mehr Wissen sich ein Akzeptanzsubjekt zu einem Akzeptanzobjekt aneignet, desto fundierter kann eine Entscheidung über Akzeptanz oder Ablehnung getroffen werden. Sollen zielführende Ergebnisse hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems erarbeitet werden, erweist es sich somit in der Konsequenz als zielführend, die Akzeptanzuntersuchungen vor allem unter gezielter Berücksichtigung **der vom eHighway-System betroffenen und über das eHighway-System informierten Gesellschaft** durchzuführen. Hieraus lässt sich die Anforderung an den Fragebogen ableiten, geeignete Fragen vorzusehen, die bei Aufbereitung und Auswertung der Daten entsprechende Rückschlüsse zulassen werden. Im Vorhinein ist jedoch die Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ vorzunehmen.

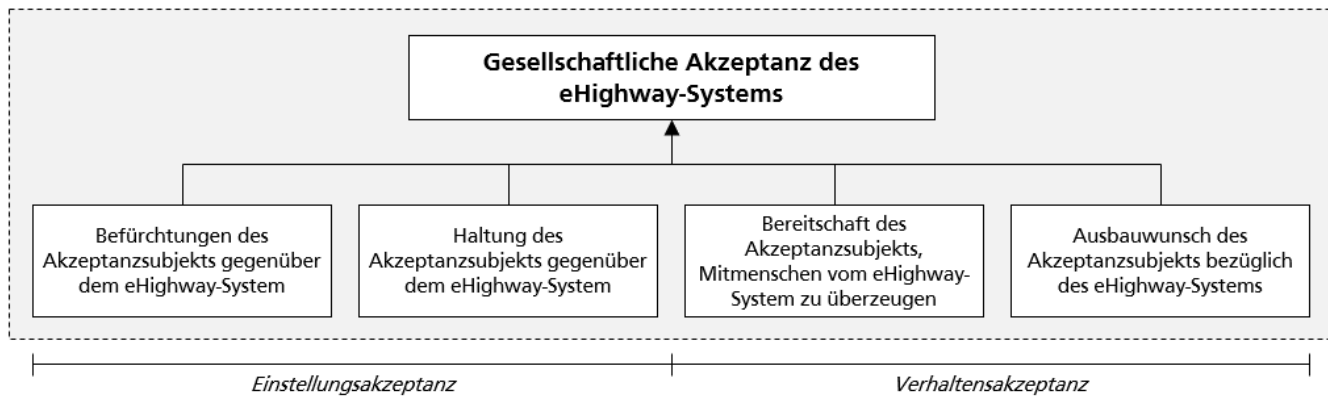
#### **OPERATIONALISIERUNG DES BEGRIFFS „GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ DES EHIGHWAY-SYSTEMS“**

Die Untersuchung der zunächst grundsätzlich latenten Variablen „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ erfordert eine zielführende **Operationalisierung** des gleichlautenden Begriffs. Zur Operationalisierung wird sich der **vier Untersuchungsbereiche**

- *Befürchtungen des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System,*
- *Haltung des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System,*
- *Ausbauwunsch des Akzeptanzsubjekts bezüglich des eHighway-Systems sowie*
- *Bereitschaft des Akzeptanzsubjekts, Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen*

bedient. Die ersten beiden Untersuchungsbereiche dienen dabei insbesondere der Untersuchung der Einstellungsakzeptanz des Akzeptanzsubjekts. Der dritte und vierte Untersuchungsbereich sind vorrangig der Analyse der Verhaltensakzeptanz gewidmet. Entsprechend des Zusammenspiels dieser vier durch geeignete Fragestellungen messbaren Variablen wird anschließend auf die übergeordnete gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems geschlossen.

Abbildung 36 fasst die vorgenommene Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ nochmals grafisch zusammen.



**Abbildung 36: Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

### 5.3.2 ERHEBUNGSVORBEREITUNG

Im Rahmen der Erhebungsvorbereitung ist zunächst festzulegen, welche **Befragungssoftware** zur Durchführung der standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen herangezogen werden soll. Aufbauend ist der **Fragebogen zu konstruieren** und mithilfe eines **Pretests** hinsichtlich seiner Qualität zu überprüfen.

#### FESTLEGUNG DER ZU VERWENDENDEN BEFRAGUNGS SOFTWARE

Als Befragungssoftware für die durchzuführende Befragung wird sich an dem **Online-Befragungstool „Unipark“** (Unipark.com 2022) bedient. „Unipark“ ist eine kostenpflichtige, aber verhältnismäßig leicht zu bedienende Befragungssoftware, die den Nutzenden vielfältige Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Die Befragungssoftware ist explizit für die Verwendung von Studierenden und wissenschaftlich Mitarbeitenden vorgesehen und erlaubt neben der Fragebogenerstellung und anschließenden Befragungsdurchführung theoretisch auch die Auswertung der Umfragedaten. Die erhobenen Daten lassen sich aber ebenfalls unkompliziert in zahlreichen Dateiformaten aus der Befragungssoftware exportieren. Neben einer angenehm vorzunehmenden Erstellung eines Fragebogens zeichnet sich die Befragungssoftware zusätzlich durch eine umfassende Auswahl vielfältiger Fragetypen, der unkomplizierten Darstellung des Fragebogens auf verschiedenen Endgeräten (sogenanntes *responsives Design*) sowie auch durch individuell anpassbare Layoutmöglichkeiten des Fragebogens aus (beispielsweise Berücksichtigung von Projektlogos). Die Umfragesoftware ist dabei rein webbasiert – es bedarf keiner Installation von Software auf einem Endgerät (Unipark.com 2022, o. S.).

#### FRAGEBOGENKONSTRUKTION

Zur **Entwicklung des Fragebogens** wird auf die im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse zurückgegriffen. Durch den fachlichen Austausch mit weiteren eHighway-Forschenden in Deutschland (Stichwort „Arbeitsgruppe Akzeptanz“<sup>51</sup>) konnten weitere Inspirationen für die inhaltliche Ausgestaltung des Fragebogens mitgenommen und berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden dem ELISA-Projektkonsortium gelegentlich Anfragen von Bürgern und Presse zum voranschreitenden Projektverlauf gestellt. Auf Basis dieser Anfragen lassen sich weitere Aspekte ableiten, die für eine Berücksichtigung im Fragebogen von Interesse sein könnten. Schlussendlich wurde ein Fragebogen entwickelt, der sich aus sieben Abschnitten zusammensetzt:

<sup>51</sup> Die „Arbeitsgruppe Akzeptanz“ ist ein Zusammenschluss von eHighway-Forschenden in Deutschland. Neben dem Forschungsprojekt ELISA gibt es eine Vielzahl weiterer Forschungsprojekte, die sich mit der Evaluation des oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs beschäftigen – im Anhang (S. A8) wird hierzu entsprechend ausgeführt. Die projektübergreifenden Arbeitsgruppen dienen dem fachlichen und methodischen Austausch der Forschenden.

- 
- Teil 1: Allgemeines
  - Teil 2: Klimaschutz im Allgemeinen
  - Teil 3: Klimaschutz im Verkehrssektor
  - Teil 4: Zukünftige Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr
  - Teil 5: Oberleitungsgebundener Straßengüterverkehr
  - Teil 6: Das eHighway-System im gesellschaftlichen Kontext
  - Teil 7: Anmerkungen

Dem entwickelten Fragebogen liegt hinsichtlich der **Dramaturgie** der Leitgedanke „Vom Allgemeinen zum Speziellen“ zugrunde. Teil 1 ist hierfür zu Beginn demografischen Fragen gewidmet. Die Fragen nach dem Geschlecht, dem Alter sowie dem Bildungsabschluss sollen es ermöglichen, bei Bedarf homogene Personengruppen zur Auswertung der Daten bilden zu können. Teil 2 dient dazu, zunächst allgemein die Einschätzung der Befragungsteilnehmenden hinsichtlich der Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen in Erfahrung zu bringen. Im dritten Teil wird die Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen konkret im Verkehrssektor näher beleuchtet und sukzessive allgemein auf den Straßengüterverkehr übergeleitet, bevor dieser in Teil 4 konkretisiert wird. Die Teile 5 und 6 stellen den Kern des Fragebogens dar und beschäftigen sich vertiefend mit dem eHighway-System. In diesen beiden Abschnitten wurden auch entsprechende Fragen gemäß der Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ verortet. Im siebten Teil erhalten die Befragungsteilnehmenden die Möglichkeit, abschließende Anmerkungen zum Fragebogen zu platzieren. Der Aufbau des Fragebogens soll dabei unter anderem dazu beitragen, einen möglichen Halo-Effekt bei den Befragungsteilnehmenden zu vermeiden. Um eine hohe Quote an abbrechenden Befragungsteilnehmenden zu verhindern, wurden weiterhin vorrangig geschlossene beziehungsweise halboffene und damit einfach zu beantwortende Fragen im Fragebogen inkludiert. Sofern Mehrfachnennungen zulässig sind, wird durch entsprechende Anmerkung darauf hingewiesen. Zur Messung der Daten finden sowohl Nominal-, Ordinal-, Intervall- als auch Verhältnisskalen Anwendung. Ferner wurden für die Ausgestaltung des Fragebogens die zusammengetragenen Anforderungen an einen solchen und die empfohlenen Gestaltungshinweise berücksichtigt (siehe Kapitel 5.2.3).

Im Zusammenhang der Definition und Abgrenzung von Akzeptanzsubjekt, Akzeptanzobjekt und Akzeptanzkontext wurde abgeleitet, dass es einer besonderen Berücksichtigung der **Betroffenheit des Akzeptanzsubjekts** vom beziehungsweise des **Kenntnisstands des Akzeptanzsubjekts zum eHighway-System** bedarf. Die Überprüfung der Betroffenheit beziehungsweise des Kenntnisstands eines Akzeptanzsubjekts erfolgt entsprechend des in nachfolgender Abbildung 37 erarbeiteten Konzepts. Die Berücksichtigung von Fragen zum Wohnort beziehungsweise der Befahrungshäufigkeit des ELISA-Teststreckenabschnitts werden es erlauben, Rückschlüsse auf die Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts vom eHighway-System ziehen zu können; die Berücksichtigung von Fragen zum allgemeinen Kenntnisstand zum eHighway-System einerseits und zur ELISA-eHighway-Teststrecke auf der BAB 5 andererseits werden es ermöglichen, Schlussfolgerungen hinsichtlich des Kenntnisstands des Akzeptanzsubjekts zum eHighway-System ableiten zu können. Insbesondere die Daten dieser Personengruppe der Gesellschaft, also die *vom eHighway-System betroffene und über das eHighway-System informierte Gesellschaft*, werden sich dafür eignen, belastbare Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit erarbeiten zu können. Die Umsetzung des in Abbildung 37 aufgezeigten Konzepts im Fragebogen wird es erlauben, die mittels der durchzuführenden Befragung erhobenen Daten angemessen zu filtern.



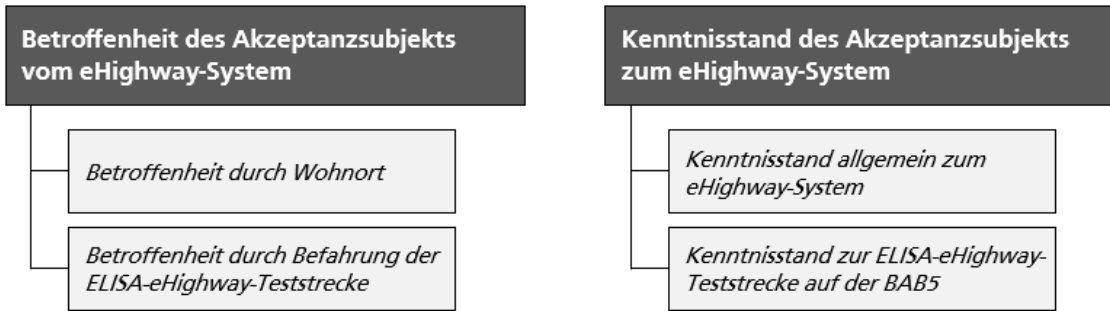


Abbildung 37: Konzept zur Überprüfung der Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts vom beziehungsweise Kenntnisstand zum eHighway-System (Quelle: Eigene Darstellung)

Die grundlegende inhaltliche Ausgestaltung des Fragebogens wurde zunächst unter Verwendung von **MS Word** (Microsoft Corporation 2019b) durchgeführt, der vorentworfene Fragebogen anschließend in die **Befragungssoftware „Unipark“** (Unipark.com 2022) übertragen.

### PRETEST DES ENTWICKELTEN FRAGEBOGENS

Um die Qualität des entwickelten Fragebogens weiter zu verbessern, bedarf es der Durchführung mindestens eines Pretests (beispielsweise nach MAYER (2013, S. 99), HOLLENBERG (2016, S. 24) oder DÖRING (2022a, S. 399)). Diesen Empfehlungen Folge leistend, wurden zur Überprüfung der Qualität des entwickelten Fragebogens **zwei Pretests** durchgeführt.

Der grundlegend entwickelte Fragebogen wurde zunächst vom 19. November 2021 bis 03. Dezember 2021 im Team der wissenschaftlich Forschenden des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt ausgelegt. Dieser **erste Pretest** hatte zum Ziel, den allgemeinen Aufbau des Fragebogens und die Verständlichkeit der inkludierten Fragen zu testen. Neun Personen nahmen an diesem Pretest teil. Ergänzend wurde ein **weiterer Pretest** in der Zeit vom 08. Dezember 2021 bis zum 22. Dezember 2021 durchgeführt. Der entwickelte Fragebogen wurde hierfür einem ausgewählten Expertengremium, bestehend aus Forscherinnen und Forschern im deutschsprachigen eHighway-Umfeld (Teilnehmende des sogenannten „Workshop der Vernetzung der Oberleitungsforschenden“, Teilnehmende der „Arbeitsgruppe Akzeptanz“ sowie Beteiligte des ELISA-Projekt-konsortiums) vorgelegt. Insgesamt konnten hierbei weitere 26 Fragebogenrückläufer gesammelt werden.

### FAZIT ZUM PRETEST

Die folgenden Änderungen (Auszug) wurden entsprechend der **Rückmeldungen aus den Pretests** in den entwickelten Online-Fragebogen eingearbeitet:

- Der Einleitungstext zur Befragung wurde auf das Wesentliche verkürzt, um das Risiko eines frühen Teilnahmeabbruchs zu reduzieren.
- Die im Fragebogen gelisteten Fragen wurden nummeriert.
- Die Reihenfolge der Antwortmöglichkeiten zu Frage 4.1 wurde geändert und folgt nun dem Technologiereifegrad (beginnend mit dem höchsten Technologiereifegrad).
- Die Fragestellung von Frage 5.2 wurde um den räumlichen Bezug „in Hessen“ ergänzt.
- Die Frage 5.5 („Sind Sie schon einmal über eine der anderen eHighway-Teststrecken in Deutschland gefahren?“) wurde zusätzlich aufgenommen.
- Die Frage bezüglich vorhandener Befürchtungen zum eHighway-System wurde geteilt. Es wird nun nicht mehr direkt nach konkreten Befürchtungen mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten gefragt, sondern zunächst mit Frage 5.6 allgemein in Erfahrung gebracht, ob grundsätzlich überhaupt Befürchtungen bestehen (mit den Antwortoptionen „ja“, „nein“, „weiß nicht“). Nur im Fall, dass die Befragten diese Frage mit „ja“ oder „weiß nicht“ beantworten, wird mit Filterfrage

---

5.7 tiefergehend eruiert, um welche Befürchtungen es sich dabei konkret handelt. Durch den zweigeteilten Aufbau soll vermieden werden, dass Befragte durch ungünstig und zu früh platzierte Antwortmöglichkeiten in ihrem Antwortverhalten beeinflusst werden. Antworten die Befragten, dass sie keine Befürchtungen bezüglich des eHighway-Systems haben, bleibt das konkrete Nachfragen nach potenziellen Befürchtungen mit Frage 5.7 verborgen und die Befragung wird unmittelbar mit Frage 5.8 fortgesetzt.

- Es wurden Pflichtfragen definiert, damit der Fragebogen nicht ohne Weiteres durchgeklickt werden kann.

Der final entwickelte Fragebogen lässt sich dem Anhang (S. A36) entnehmen.

### 5.3.3 ERHEBUNGSORGANISATION UND ERHEBUNGSDURCHFÜHRUNG

Mit Abschluss der vorbereitenden Tätigkeiten ist der Fokus nunmehr auf die Erhebungsorganisation sowie die Erhebungsdurchführung zu richten. In diesem Zusammenhang sind der Befragungszeitraum festzulegen sowie eine Streuungsstrategie zu erarbeiten. Hierauf aufbauend ist die eigentliche Erhebung durch Verbreiten des Fragebogens entsprechend der ausgearbeiteten Streuungsstrategie durchzuführen.

#### FESTLEGUNG DES BEFRAGUNGSZEITRAUMS UND ERARBEITUNG EINER STREUUNGSSTRATEGIE

Der **Festlegung des Befragungszeitraums** lag die Zielstellung zugrunde, dass dieser grundsätzlich eine möglichst hohe Anzahl an auswertbaren Fragebogenrückläufern zulassen soll. Der frühestmögliche Beginn der Erhebung ergibt sich aus der Finalisierung der vorbereitenden Tätigkeiten zur Befragung. Entsprechend des Einarbeitens der erhaltenen Rückmeldungen zum entwickelten Fragebogen infolge der Pretests und der abschließenden Sicherstellung der korrekten Widergabe des Fragebogens via „Unipark“, zeichnete sich als frühestmöglicher Startzeitpunkt Mitte Januar 2022 ab. Orientiert an der ursprünglichen Laufzeit des ELISA-Forschungsprojektes bis zum Ende des Jahres 2022 und unter Berücksichtigung eines angemessenen Zeitraums für die Auswertung und Verarbeitung der erhobenen Daten erschien das Abschließen der Datenerhebung bis etwa Mitte/Ende Juli 2022 als zielführend. Es wurde schlussendlich der **Befragungszeitraum vom 26. Januar 2022 bis zum 31. Juli 2022** festgelegt.

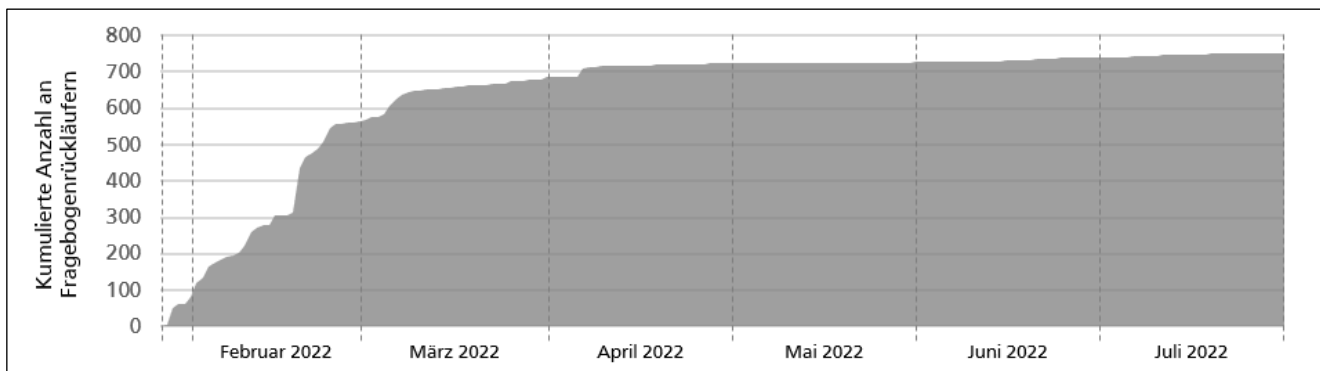
Neben der Festlegung des Befragungszeitraums ist von zusätzlicher Relevanz, einerseits welche und andererseits auf welche Art und Weise die für die Erhebung relevanten Akzeptanzsubjekte erreicht werden können. Im Wesentlichen wird sich hierbei entsprechend der zur Verfügung stehenden Ressourcen im ELISA-Forschungsprojekt und dem definierten Granularitätsanspruch an die Ergebnisse einer **Gelegenheitsstichprobe** bedient. Um das Maß an Willkürlichkeit infolge der Anwendung einer Gelegenheitsstichprobe dennoch möglichst zu minimieren, bedarf es einer **geeigneten Streuungsstrategie**. Die Betroffenheit der mit der Befragung zu erreichenden Akzeptanzsubjekte ist hierfür erneut zu fokussieren. Diesbezüglich wurde im Vorstehenden definiert, dass sich der Grad der Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts im vorliegenden Betrachtungsfall anhand des Wohnorts beziehungsweise der Befahrungshäufigkeit des ELISA-Teststreckenabschnitts ergibt. Vor diesem Hintergrund sollte die Streuung der Befragung in Konsequenz also vorrangig im unmittelbaren Umfeld des ELISA-Teststreckenabschnitts erfolgen. Um eine gezielte Streuung im Umfeld des ELISA-Teststreckenabschnitts zu ermöglichen, erweist sich das Bewerben der Umfrage in regionalen Medien von besonderer Relevanz. Um dabei verschiedene Personengruppen unterschiedlichen Alters zu erreichen, zeigt sich ebenfalls das Streuen über verschiedene Medien als zielführend. So soll versucht werden, die Umfrage in diversen lokalen und gegebenenfalls regionalen

- Printmedien (zum Beispiel Tageszeitungen),
- Radiosendern
- Online-Kanälen (zum Beispiel Facebook, Instagram, Twitter, einschlägige Internetauftritte)

zu platzieren. Ergänzend soll die Befragung über den Internetauftritt des ELISA-Forschungsprojekt sowie den Internetauftritt des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt zugänglich gemacht werden.

## DURCHFÜHRUNG DER ERHEBUNG

Der im Vorhinein festgelegte Befragungszeitraum wurde eingehalten – der online über „Unipark“ bereitgestellte Fragebogen konnte in der Zeit vom **26. Januar 2022 bis zum 31. Juli 2022** abgerufen werden. Es war dabei möglich, die Befragung unter Verwendung verschiedener Medien gemäß der im Vorhinein erarbeiteten **Streuungsstrategie** zu bewerben. Hierbei war es ebenfalls möglich, die Befragung bereits in den ersten vier Wochen des festgelegten Befragungszeitraums derart erfolgreich zu platzieren, dass bereits frühzeitig eine Anzahl von mehr als 500 auswertbaren Fragebogenrückläufern gewonnen werden konnte. Ein umfangreiches Nachjustieren der Streuung war damit nicht erforderlich. Über den gesamten Befragungszeitraum wurden **in Summe 752 auswertbare Fragebögen** gesammelt. Der genaue zeitliche Verlauf der eingegangenen und auswertbaren Fragebögen lässt sich nachfolgender Abbildung 38 entnehmen.



**Abbildung 38: Visualisierung der an der Befragung teilgenommenen Personen im zeitlichen Verlauf**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Bezüglich der Streuungsstrategie sind exemplarisch die folgenden Platzierungserfolge hervorzuheben<sup>52</sup>:

- Platzierung der Umfrage sowohl in der Print-Ausgabe des „Darmstädter Echo“ (Ausgabe vom 10. Februar 2022, Nr. 34, 78. Jahrgang, Seite 13) als auch im Online-Angebot der „Echo-Verlage“<sup>53</sup>;
- Platzierung der Umfrage durch den Radiosender „Hit Radio FFH“ anhand eines Beitrags im Radio-Mittagsprogramm am 18. Februar 2022 sowie durch den Internetauftritt des Radiosenders<sup>54</sup>;
- Platzierung der Umfrage durch den Radiosender „You FM“ anhand eines Interviews zwischen dem Moderator Jonny Lingner und dem Autor der vorliegenden Dissertationsschrift im Radio-Abendprogramm am 22. Februar 2022<sup>55</sup>;
- Platzierung der Umfrage über den offiziellen Facebook-<sup>56</sup>, Instagram-<sup>57</sup> und Twitter-Kanal der *Technischen Universität Darmstadt*<sup>58</sup>;
- Platzierung der Umfrage über den Newsletter der Online-Plattform „electrive.net“<sup>59</sup>;
- Platzierung der Umfrage über den Internetauftritt des *ELISA-Forschungsprojekts*<sup>60</sup>;

<sup>52</sup> Dem Anhang (S. A32) lässt sich eine Auswahl verschiedener dieser Teilnahmeaufrufe zur eHighway-Akzeptanzbefragung entnehmen.

<sup>53</sup> [www.echo-online.de](http://www.echo-online.de).

<sup>54</sup> [www.ffh.de](http://www.ffh.de).

<sup>55</sup> [www.you-fm.de](http://www.you-fm.de).

<sup>56</sup> [www.facebook.com/tudarmstadt](https://www.facebook.com/tudarmstadt).

<sup>57</sup> [www.instagram.com/tudarmstadt](https://www.instagram.com/tudarmstadt).

<sup>58</sup> [www.twitter.com/tudarmstadt](https://www.twitter.com/tudarmstadt).

<sup>59</sup> [www.electrive.net](http://www.electrive.net).

<sup>60</sup> [www.ehighway.hessen.de](http://www.ehighway.hessen.de) (Homepage wurde im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts umgezogen zu [www.autobahn.de/ehighway](http://www.autobahn.de/ehighway)).

- 
- Platzierung der Umfrage über den Internetauftritt des *Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik*<sup>61</sup>, der *Institute für Verkehr*<sup>62</sup> sowie des *Fachbereichs Bau- und Umweltingenieurwissenschaften*<sup>63</sup> der *Technischen Universität Darmstadt*.

#### 5.3.4 DATENAUFBEREITUNG

Mit Abschluss der Erhebungsdurchführung ist der Fokus nunmehr auf die Aufbereitung der erhobenen Daten zu richten. Hierfür wird zunächst festgelegt, welche Software zur Datenauswertung herangezogen werden soll. Anschließend erfolgt der Export der erhobenen Rohdaten um hierauf aufbauend der eigentlichen Auswertung der Daten nachgehen zu können.

#### FESTLEGUNG DER DATENAUSWERTUNGSSOFTWARE, DATENEXPORT ZUR ERSTELLUNG EINES ROHDATENSATZES UND VEREDELUNG DER ROHDATEN

Zur Auswertung der erhobenen Daten ließe sich in Theorie auf die in der Befragungssoftware „Unipark“ (Unipark.com 2022) inkludierte Datenauswertungssoftware zurückgreifen. Erste Auswertungen unter Verwendung dieses Softwarebausteins von „Unipark“ haben jedoch gezeigt, dass die angebotenen Möglichkeiten zur Datenauswertung limitiert sind und sich ein Export der erhobenen Daten zur Verwendung anderweitiger Datenauswertungssoftware als zielführender erweist. Daher soll zur Auswertung der erhobenen Daten erneut auf das Tabellenkalkulationsprogramm **MS Excel** (Microsoft Corporation 2019a) zurückgegriffen werden. Es wird hierfür ein Datenexport aus „Unipark“ in entsprechendem Dateiformat vorgenommen. Ergänzend wird ein sogenanntes Codebuch durch „Unipark“ zur Verfügung gestellt, anhand dessen eine unkomplizierte Decodierung der erhobenen Daten vorgenommen werden kann.

Infolge des **Exportierens der erhobenen Daten** sowie des Codebuchs wird zunächst ein unverfälschter Rohdatensatz erstellt. Dieser unbearbeitete Rohdatensatz mit den Originaldaten ist nicht zur Bearbeitung, sondern zum Archivieren und sofern notwendig für spätere Duplizierungen vorgesehen. Zur Bearbeitung und Auswertung der Daten wird aus dem Rohdatensatz durch eine solche Duplizierung eine „Arbeitsdatei“ generiert. Diese dient fortan der Durchführung der notwendigen Arbeitsschritte zur Datenanalyse. Die Arbeitsdatei wird zunächst **gemäß den Angaben im Codebuch decodiert** und anschließend **um irrelevante Informationen bereinigt** (wie beispielsweise der durch die Befragungsteilnehmenden verwendete Internetbrowser, mit dem der Online-Fragebogen geöffnet wurde oder der Gerätetyp, mit dem die Befragung beantwortet wurde). Im Ergebnis steht eine veredelte Arbeitsdatei zur Verfügung, die zur Auswertung der erhobenen Daten herangezogen werden kann.

#### HINWEISE ZUR STICHPROBENBILDUNG

In den vorstehenden Ausführungen wurde darauf hingewiesen, dass hinsichtlich der erhobenen Daten besonderes Augenmerk auf die jeweilige Betroffenheit der an der Befragung teilgenommenen Personen zu legen ist. Unterschieden wurden hierfür bislang die Personengruppen

1. „allgemeine Gesellschaft“,
2. „vom eHighway-System betroffene Gesellschaft“ sowie
3. „vom eHighway-System betroffene und über das eHighway-System informierte Gesellschaft“.

Die „allgemeine Gesellschaft“ wird im Folgenden auch als **Stichprobe n<sub>1</sub>** bezeichnet. Bezüglich dieser Stichprobe sind keine weiteren Besonderheiten zu berücksichtigen. Die „vom eHighway-System betroffene Gesellschaft“ wird im Folgenden auch als **Stichprobe n<sub>2</sub>** bezeichnet. Diese Personengruppe

---

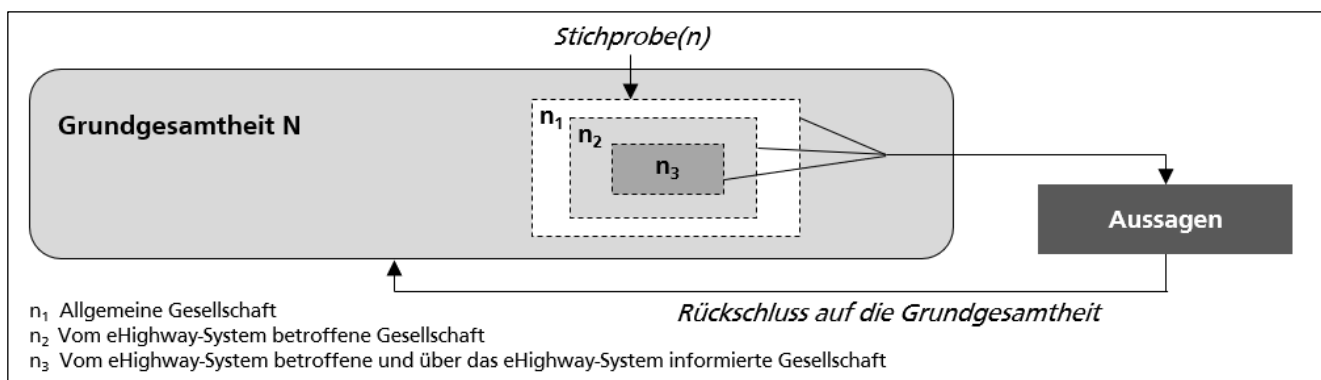
<sup>61</sup> [www.verkehr.tu-darmstadt.de/vv](http://www.verkehr.tu-darmstadt.de/vv).

<sup>62</sup> [www.verkehr.tu-darmstadt.de](http://www.verkehr.tu-darmstadt.de).

<sup>63</sup> [www.bauing.tu-darmstadt.de](http://www.bauing.tu-darmstadt.de).

der Stichprobe  $n_2$  stellt eine Teilmenge der Stichprobe  $n_1$  dar. Um die Stichprobe  $n_2$  zu bilden, wurden im Fragebogen entsprechend des in Kapitel 5.3.2 aufgestellten Konzepts (siehe Abbildung 37, S. 140) Fragen zum Wohnort sowie zur Befahrungshäufigkeit der ELISA-eHighway-Teststrecke berücksichtigt. Es wurde festgelegt, dass eine Person dann als *vom eHighway-System betroffen* gilt, wenn diese zum einen wohnhaft in Hessen ist und zum anderen die Frage nach der Befahrungshäufigkeit des ELISA-eHighway-Teststreckenabschnitts mit mindestens „weniger als 1 Mal pro Woche“ beantwortet hat. Die „vom eHighway-System betroffene und über das eHighway-System informierte Gesellschaft“ wird im Folgenden auch als **Stichprobe  $n_3$**  bezeichnet. Diese Stichprobe baut auf der bereits gebildeten Stichprobe  $n_2$  auf. Die Besonderheiten, die für die Stichprobe  $n_2$  definiert wurden, sind für die Bildung der Stichprobe  $n_3$  gleichermaßen anzuwenden. Darüber hinaus erfolgt eine zusätzliche Prüfung des Kenntnisstands des Akzeptanzsubjekts hinsichtlich des eHighway-Systems im Allgemeinen, beziehungsweise der ELISA-eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn BAB 5 im Speziellen. Sollen Akzeptanzsubjekte der Stichprobe  $n_3$  zugeordnet werden, müssen diese sowohl hinsichtlich des Kenntnisstands zum eHighway-System im Allgemeinen sowie zur ELISA-eHighway-Teststrecke im Speziellen angeben, dass sie sich *mindestens* „weder gut informiert, noch schlecht informiert“ fühlen.

Wie vorstehend dargelegt, eignen sich **insbesondere die Ergebnisse der Stichprobe  $n_3$**  für die Ableitung von Rückschlüssen auf die Grundgesamtheit  $N$  (siehe Kapitel 5.3.1 und 5.3.2). Auf diese Ergebnisse wird entsprechend besonderes Augenmerk zu legen sein. Auf die Stichprobe  $n_2$  wird im Folgenden aufgrund eines nicht zu erwartenden Mehrwerts nicht weiter eingegangen. Ergänzend zeigt Abbildung 39 das aufgestellte Konzept zur Bildung der Stichproben nochmals grafisch auf.



**Abbildung 39: Visualisierung der Stichprobenbildung zur tiefergehenden Analyse der Befragungsergebnisse**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

## DESKRIPTION DER BEFRAGUNGSERGEBNISSE

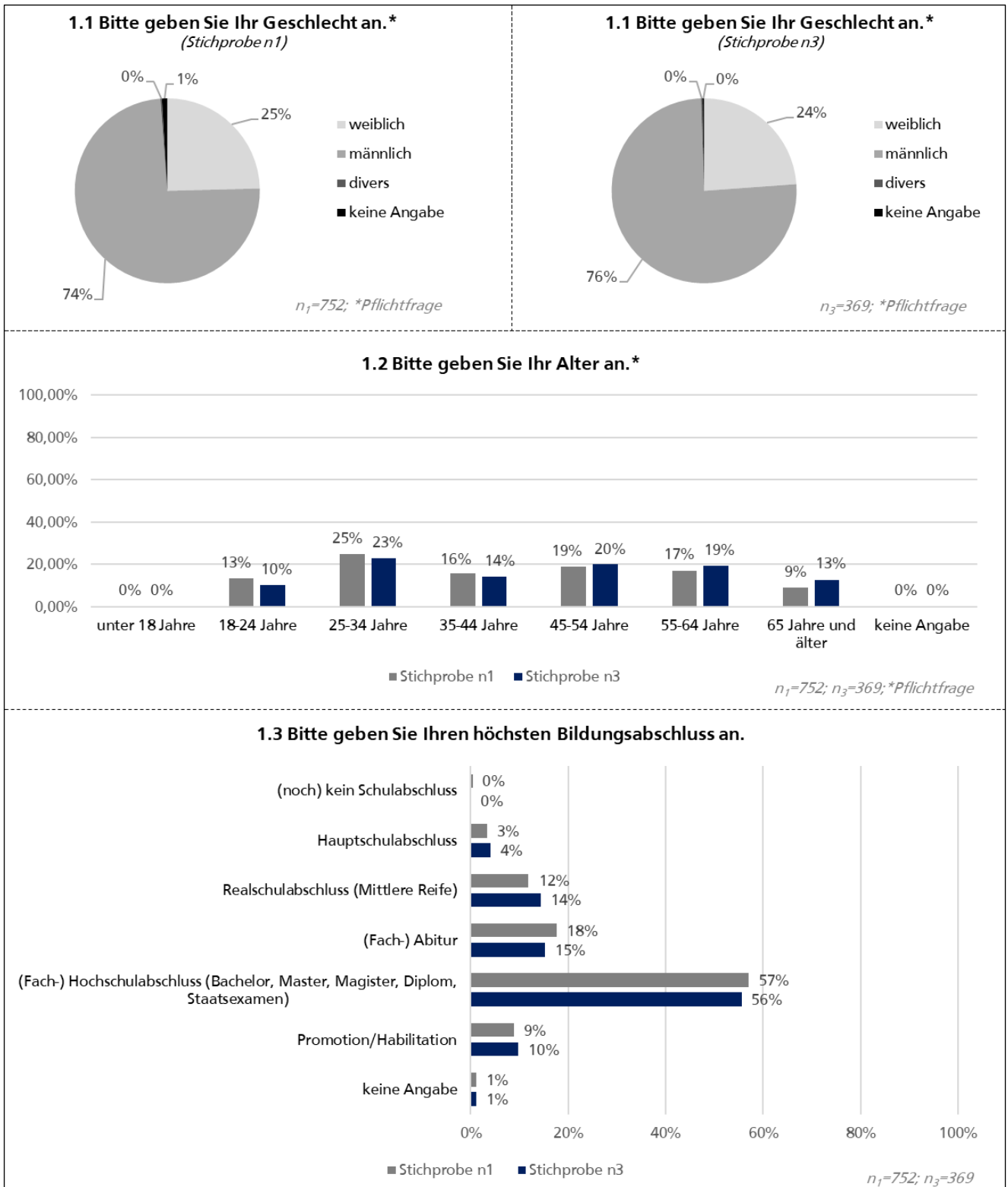
Im Rahmen der Erhebungsdurchführung war es möglich, in Summe  $n_1=752$  auswertbare Fragebögen zu gewinnen. 369 dieser 752 auswertbaren Fragebögen lassen sich dabei solchen Personen zuordnen, die sowohl vom eHighway-System betroffen, als auch über dieses informiert sind ( $n_3=369$ ). Zu Beginn der Analysen der erhobenen Daten erfolgt eine allgemeine Deskription der Befragungsergebnisse. Es erfolgt hierbei zeitgleich eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Stichproben  $n_1$  sowie  $n_3$ .

### TEIL 1: DEMOGRAFISCHE ANGABEN

Hinsichtlich der Demografie der Akzeptanzsubjekte wurde im Fragebogen erstens nach dem Geschlecht, zweitens nach dem Alter, drittens nach dem höchsten Bildungsabschluss und viertens nach dem Wohnort gefragt. Im Ergebnis zeigen sich für die Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  kaum Unterschiede: Jeweils etwa drei Viertel der Befragten sind männlichen, ein Viertel weiblichen **Geschlechts** (Abbildung 40, oben). Das männliche Geschlecht ist damit merklich überrepräsentiert. Der Anteil an teilgenommenen Personen diversen Geschlechts beträgt für beide Stichproben ( $n_1$  und  $n_3$ )  $<1\%$ . Hinsichtlich des **Alters** lässt sich

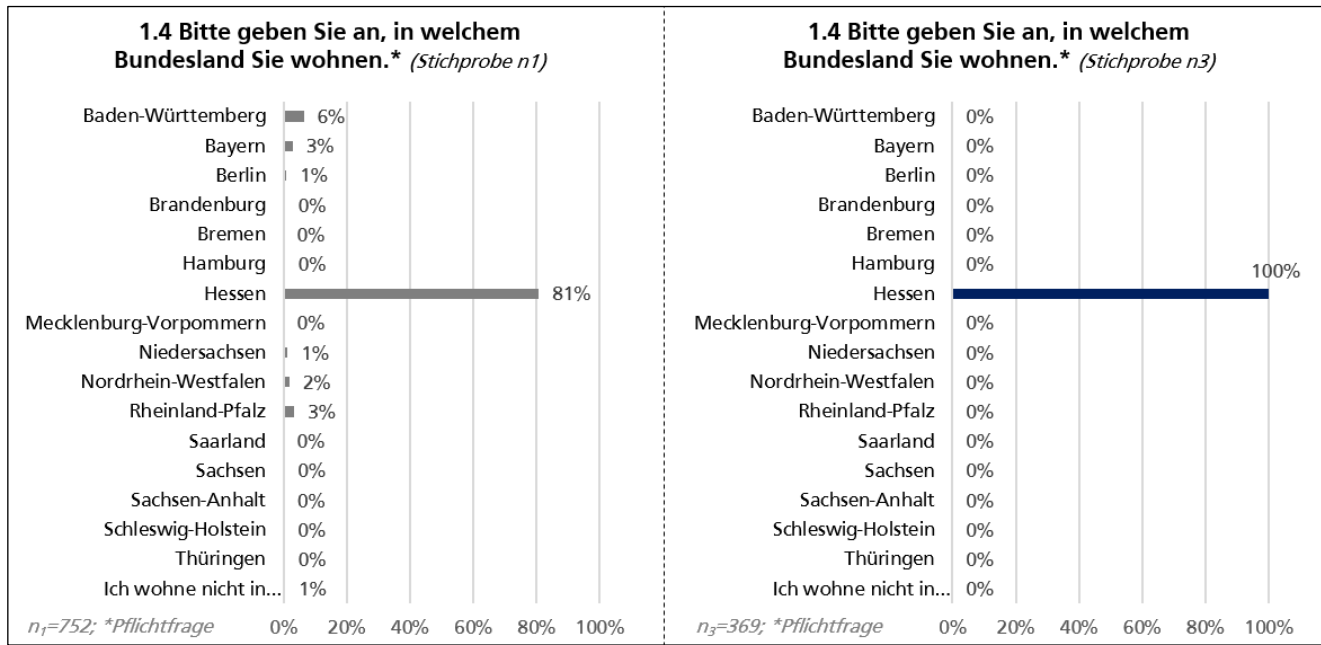


für beide Stichproben ( $n_1$  und  $n_3$ ) eine weitestgehend ausgewogene Verteilung feststellen mit moderater Überrepräsentierung des Intervalls der 25 bis 34-Jährigen beziehungsweise Unterrepräsentierung der mindestens 65- beziehungsweise der 18-24-Jährigen (Abbildung 40, Mitte). Werden die Ergebnisse zum **höchsten Bildungsabschluss** betrachtet, ist für beide Stichproben ( $n_1$  und  $n_3$ ) auffällig, dass rund zwei Drittel der Befragten über mindestens einen Hochschulabschluss verfügen (Abbildung 40, unten).



**Abbildung 40: Demografische Merkmale der Stichproben**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Hinsichtlich des **Wohnorts** lassen sich Auffälligkeiten feststellen: Bereits die ungefilterte Stichprobe  $n_1$  weist einen Anteil von in Hessen wohnenden Akzeptanzsubjekten von knapp 81 % auf. Dieser hohe Anteil an Befragten, die in Hessen wohnen, lässt sich auf die gezielt regionale Streuungsstrategie zurückführen. Darüber hinaus geben etwa 6 % der Befragten an, in Baden-Württemberg zu wohnen. Jeweils etwa 3 % der Befragten haben ihren Wohnsitz in Bayern beziehungsweise Rheinland-Pfalz (siehe Abbildung 41, links). Entsprechend der vorgenommenen Filterung der erhobenen Daten haben sämtliche Personen der Stichprobe  $n_3$  ihren Wohnsitz in Hessen (siehe Abbildung 41, rechts).



**Abbildung 41: Wohnort der Befragten**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

## TEIL 2: KLIMASCHUTZ IM ALLGEMEINEN

Der zweite Teil des entwickelten Fragebogens adressiert Fragen zum **Klimaschutz im Allgemeinen**. Der Fragebogenkonstruktion liegt dabei der Gedankengang zugrunde, anhand von Frage 2.1 erste Eindrücke zur Einstellungs- und anhand von Frage 2.2 zur Verhaltensakzeptanz zu gewinnen (siehe Abbildung 42). Erneut zeigen sich für die Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  weitestgehend vergleichbare Ergebnisse.

Unter Berücksichtigung der Fragen 2.1 a) und 2.1 b) kann sowohl für die Stichprobe  $n_1$  als auch für die Stichprobe  $n_3$  festgehalten werden, dass ein großer Teil der Befragten (>90 %) Klimaschutz einerseits als ein ernstzunehmendes Problem und es andererseits als notwendig erachtet, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Hinsichtlich des zeitlichen Drucks, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, stimmen rund drei Viertel der Befragten beider Stichproben der Aussage voll und ganz beziehungsweise eher zu, dass bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen ist (Frage 2.1 c)). Anzumerken an dieser Stelle ist, dass Personen der Stichprobe  $n_3$  eher dazu neigen, die Fragen 2.1 a) bis c) mit „stimme voll und ganz zu“ statt mit „stimme eher zu“ zu bewerten. Durch Betrachtung der Fragen 2.1 d) sowie 2.1 e) lässt sich deutlich erkennen, dass nach Auffassung der Befragten die Realisierung von Klimaschutz keine alleinige Aufgabe der Regierung darstelle, sondern sich vielmehr nur durch ein gemeinschaftliches Handeln in der Gesellschaft umsetzen ließe. Rund 85 % der Befragten sprechen sich ferner dafür aus, dass ihnen selbst Klimaschutz wichtig sei (Frage 2.1 f)). Knapp ein Drittel der Befragten gibt an, sich selbst bereits aktiv für Klimaschutz zu engagieren (Frage 2.1 g)). Auch hinsichtlich der Fragen 2.1 f) und g) lässt sich eine ähnliche Verschiebung des Antwortverhaltens zwischen den Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  feststellen, wie dies bezüglich der Fragen 2.1 a) bis c) vorstehend bereits identifiziert wurde. Frage 2.2 konkretisiert das Engagement der Befragten hinsichtlich bereits erfolgter Aktivitäten bezüglich eines selbst geleisteten

Klimaschutzbeitrags. Der nachfolgenden Abbildung 42 können die jeweiligen Ergebnisse nochmal im Detail entnommen werden.

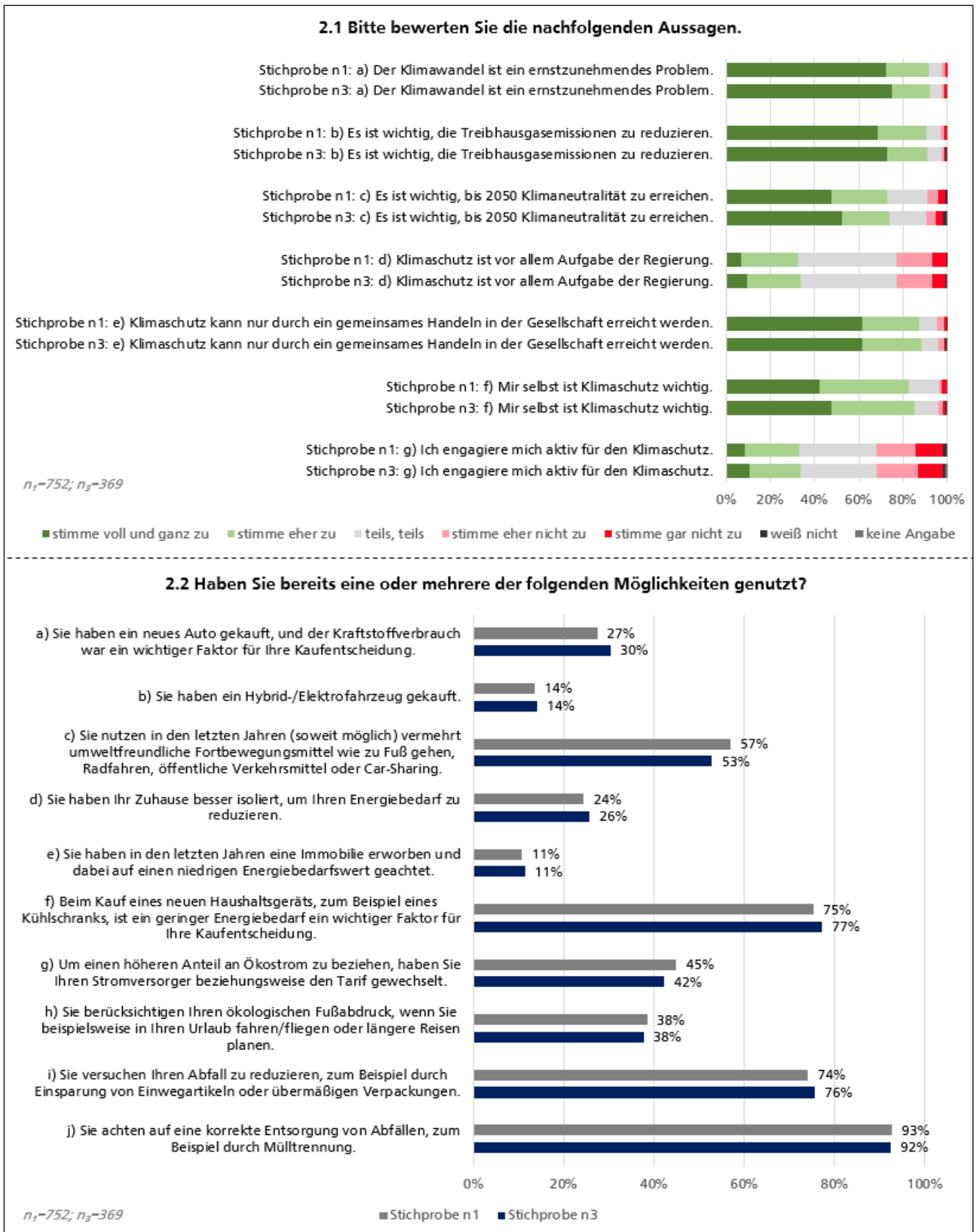


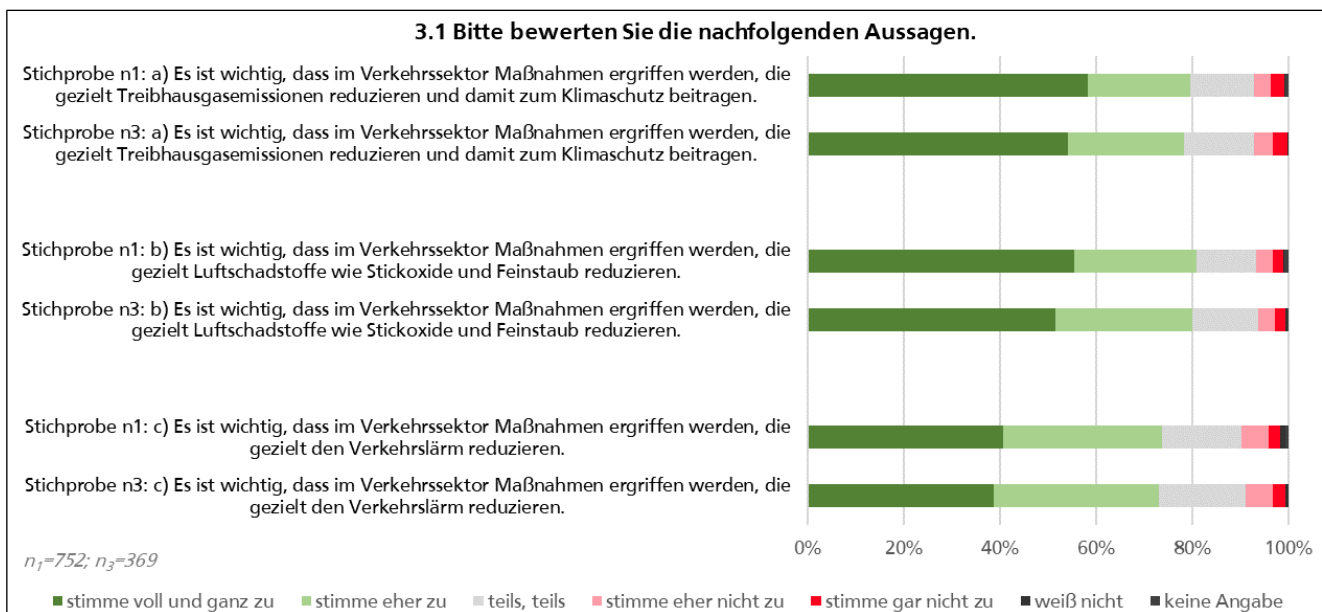
Abbildung 42: Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz der Befragten zum Klimaschutz im Allgemeinen (Quelle: Eigene Darstellung)

### TEIL 3: KLIMASCHUTZ IM VERKEHR

Als nächster Aspekt soll der Fokus der Deskription der Befragungsergebnisse auf eine Untersuchung der Einstellung der Befragten hinsichtlich des **Klimaschutz einerseits im Verkehrssektor im Allgemeinen** und andererseits aufbauend auf den **Klimaschutz gezielt im Straßengüterverkehr** gerichtet werden.

Bezüglich der Stichprobe  $n_1$  ist festzuhalten: Bezüglich der **Notwendigkeit von Klimaschutz im Verkehrssektor allgemein** zeigt sich, dass großer Konsens vorzuliegen scheint, dass sowohl Treibhausgasemissionen als auch Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub hinsichtlich einer zu realisierenden Reduzierung von besonderer Relevanz sind – rund 80 % der Befragten stimmen den Aussagen voll und ganz beziehungsweise eher zu, dass hierfür entsprechende Maßnahmen zu ergreifen seien. Auch die Reduktion von Verkehrslärm wird als Herausforderung wahrgenommen; gleichwohl die Notwendigkeit zur Reduktion von Verkehrslärm von minimal nachrangiger Bedeutung zu sein scheint als die von Treibhausgasemissionen beziehungsweise Luftschadstoffen, Stickoxiden und Feinstäuben (siehe Abbildung 43, jeweils obere Graphen).

Hinsichtlich der Stichprobe  $n_3$  lassen sich im Vergleich sehr ähnliche Ergebnisse wiedererkennen. Doch lässt sich identifizieren, dass ein etwas geringerer Anteil an Personen die Aussagen 3.1 a) bis c) mit der Antwortoption „stimme voll und ganz zu“ bewertet haben. Generell lässt sich für die Stichprobe  $n_3$  ein minimal negativeres Antwortverhalten für die Aussagen zu Frage 3.1 feststellen (siehe Abbildung 43, jeweils untere Graphen).

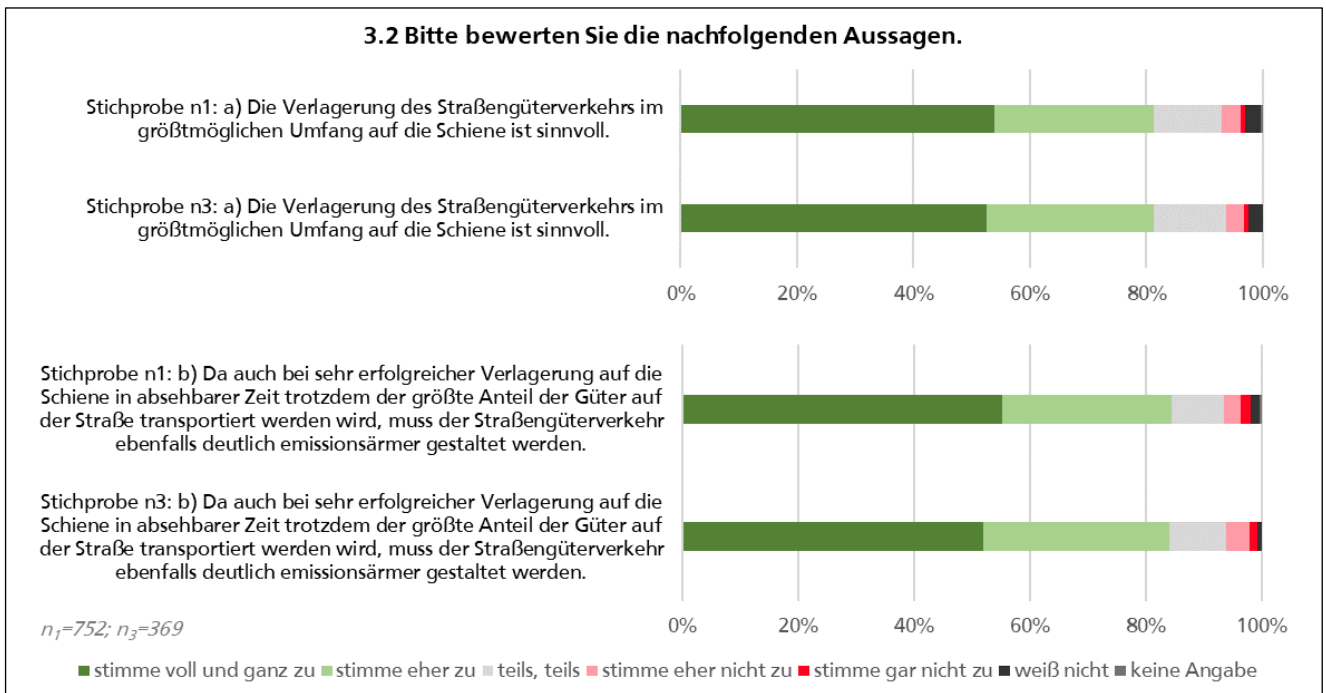


**Abbildung 43: Befragungsergebnisse zur Notwendigkeit von Klimaschutz im Verkehrssektor**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Wird der Fokus sukzessive gezielter auf den **Straßengüterverkehr** gerichtet, lassen sich folgende Erkenntnisse eruieren:

Im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts wurde das ELISA-Projektkonsortium häufiger mit dem Aspekt konfrontiert, dass es statt der Implementierung eines eHighway-Systems sinniger sei, die **Güter stattdessen auf die Schiene zu verlagern**. Hieran angelehnt ist das Fragenkonstrukt zu den Fragen 3.2 a) und b) entstanden (siehe Abbildung 44). Anhand von Frage 3.2 a) wird zunächst hinterfragt, inwieweit die Befragten eine Verlagerung des Straßengüterverkehrs im größtmöglichen Umfang auf die Schiene als sinnvoll erachten. Frage 3.2 b) zielt darauf ab, inwieweit die Befragten – trotz einer unterstellten, erfolgreichen Verlagerung von Gütern auf die Schiene – dennoch auch eine Transformation des Straßengüterverkehrs hin zu mehr Klimafreundlichkeit als sinnvoll erachten.

Erneut lassen sich für die Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  weitestgehend vergleichbare Ergebnisse feststellen. Jeweils gut 80 % der Befragten stimmen der Aussage voll und ganz beziehungsweise eher zu, dass eine Verlagerung des Straßengüterverkehrs im größtmöglichen Umfang auf die Schiene sinnvoll sei. Trotz einer sehr erfolgreichen Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf die Schiene erachten die Befragten – etwa 85 % – dennoch auch die Transformation des Straßengüterverkehrs hin zu einem emissionsarmen Straßengüterverkehr als sinnvoll und notwendig (siehe Abbildung 44). Auch hierbei zeigt sich die Besonderheit, dass Personen der Stichprobe  $n_3$  seltener dazu neigen, die Antwortoption „stimme voll und ganz zu“ zu wählen.



**Abbildung 44: Befragungsergebnisse zur Notwendigkeit von Klimaschutz im Straßengüterverkehr**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

#### TEIL 4: ZUKÜNFTIGE ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM STRAßENGÜTERVERKEHR

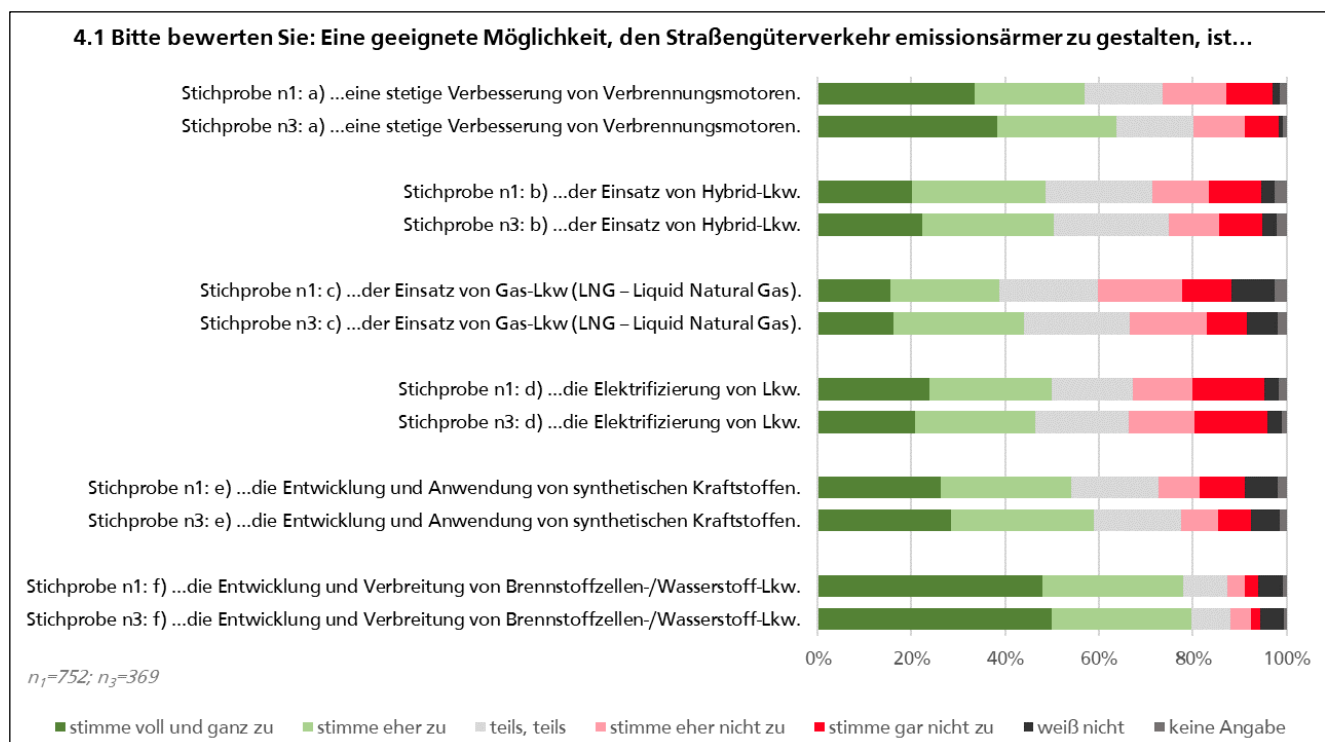
Mithilfe von Frage 4.1 soll geklärt werden, welchen (zukünftigen) **Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr** durch die Befragten am meisten Potenzial beigemessen wird, erfolgreich zu einer Reduktion an Treibhausgasemissionen beizutragen. An dieser Stelle zeigen sich etwas deutlichere Abweichungen im Antwortverhalten der Stichproben  $n_1$  und  $n_3$ .

Hinsichtlich der Stichprobe  $n_1$  ist festzuhalten: Die Befragten erachten vor allem die Entwicklung und Verbreitung von Brennstoffzellen-/Wasserstoff-Lkw sowie eine stetige Verbesserung von Verbrennungsmotoren als zielführende Handlungsansätze, den Straßengüterverkehr emissionsärmer zu gestalten. So sprechen sich knapp 80 % der Befragten dafür aus, dass Brennstoffzellen-/Wasserstoff-Lkw eine geeignete Möglichkeit darstellen (Summe der Antwortoptionen „stimme voll und ganz zu“ sowie „stimme eher zu“). Etwas mehr als die Hälfte der Befragten sieht die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren als zielführend. Einen ähnlichen Zuspruch – gut 50 % – äußern die Befragten hinsichtlich der Entwicklung und Anwendung von synthetischen Kraftstoffen. Eine Elektrifizierung von Lkw, in welcher Rubrik auch das eHighway-System zu verorten ist, folgt mit einem Zuspruch von etwa der Hälfte der Befragten auf dem vierten Rang, gefolgt von dem Einsatz von Hybrid-Lkw (knapp 50 %) und dem Einsatz von Gas-Lkw (knapp 40 %).



Hinsichtlich der Stichprobe  $n_3$  lassen sich zunächst zwar weitestgehend ähnliche Ergebnisse feststellen, jedoch mit einem merklichen Unterschied: Personen der Stichprobe  $n_3$  bewerten sämtliche Antwortoptionen grundsätzlich positiver (Summe der Antwortoptionen „stimme voll und ganz zu“ sowie „stimme eher zu“) als Personen der Stichprobe  $n_1$ , mit Ausnahme der Handlungsoption „Elektrifizierung von Lkw“: Stimmen 50 % der Personen aus der Stichprobe  $n_1$  der Aussage voll und ganz oder zumindest eher zu, dass die Elektrifizierung von Lkw eine geeignete Möglichkeit darstelle, den Straßengüterverkehr emissionsärmer zu gestalten, beträgt dieser Anteil in der Stichprobe  $n_3$  lediglich 46 %.

Unabhängig der Stichprobe findet der Handlungsansatz, Gas-Lkw einzusetzen, am wenigstens Zuspruch. Nachfolgender Abbildung 45 lässt sich eine grafische Zusammenfassung der dargelegten Ergebnisse entnehmen.

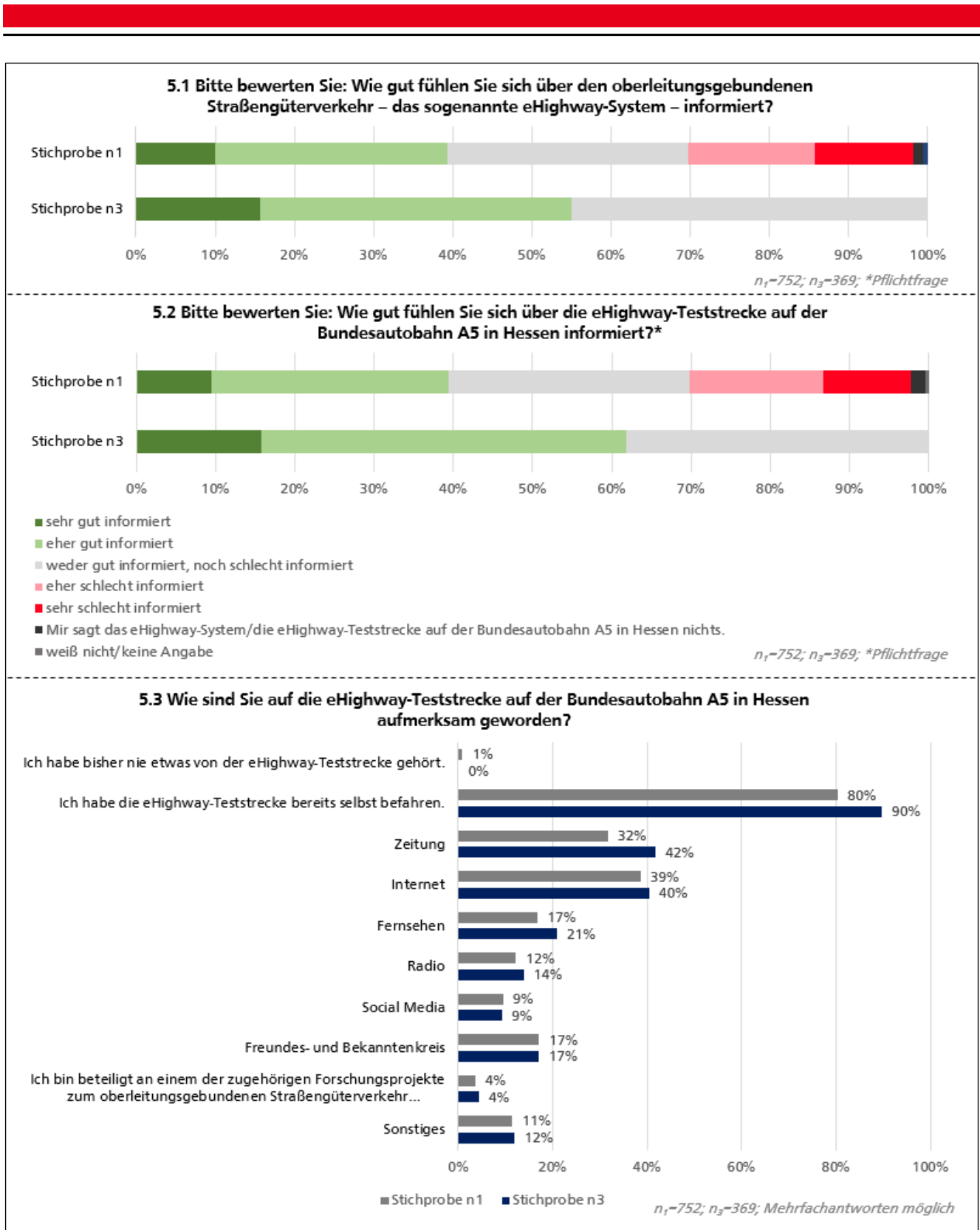


**Abbildung 45: Befragungsergebnisse zur Einschätzung des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials zukünftiger Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr (Quelle: Eigene Darstellung)**

## TEIL 5: OBERLEITUNGSGEBUNDENER STRAßENGÜTERVERKEHR – DAS EHIGHWAY-SYSTEM IM FOKUS

Auf Basis der vorstehenden Ergebnisse soll nun besonderes Augenmerk auf die **Akzeptanz des eHighway-Systems** gelegt werden. Als erster Anhaltspunkt wird untersucht, inwiefern sich die Befragten über das eHighway-System im Allgemeinen (Frage 5.1), sowie über die ELISA-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 im Speziellen (Frage 5.2) informiert fühlen. In Ergänzung wurden die Befragungsteilnehmenden konsultiert, wie sie auf die ELISA-eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 aufmerksam geworden sind (Frage 5.3).

Nachfolgender Abbildung 46 lassen sich die im Zusammenhang mit den Fragen 5.1, 5.2 und 5.3 generierten Ergebnisse entnehmen. Weiterführende Erläuterungen zu den Ergebnissen erfolgen im Nachgang der Abbildung.



**Abbildung 46: Informationsstand der Befragten zum eHighway-System sowie zur ELISA-eHighway-Teststrecke und Art der Informationsgewinnung über eHighway-System/Teststrecke (Quelle: Eigene Darstellung)**

Werden die Fragen 5.1 und 5.2 betrachtet, so ist hinsichtlich der Stichprobe n<sub>1</sub> festzustellen, dass sich für beide Fragen ein nahezu identisches Ergebnis zeigt: Jeweils etwas mehr als ein Drittel der Befragten gibt an, sich eher gut bis sehr gut über das eHighway-System beziehungsweise die ELISA-Teststrecke informiert zu fühlen. Ein weiteres Drittel gibt an, sich weder gut, noch schlecht informiert zu fühlen. Das letzte Drittel wiederum gibt an, sich eher schlecht oder sogar sehr schlecht informiert zu fühlen.

---

Da die Fragen 5.1 und 5.2 genutzt werden, um die Stichprobe  $n_3$  zu bilden, zeigen sich an dieser Stelle im Vergleich zu den Ergebnissen der ungefilterten Stichprobe  $n_1$  merkbare Abweichungen. Um der Stichprobe  $n_3$  zugeordnet zu werden, müssen – wie vorstehend bereits erläutert – die Befragten die Fragen 5.1 und 5.2 mit mindestens der Antwortoption „weder gut informiert, noch schlecht informiert“ (oder besser) beantwortet haben. Hinsichtlich der Stichprobe  $n_3$  zeigt sich somit, dass sich etwa 16 % der Befragten sehr gut, etwa 39 % eher gut sowie etwa 45 % weder gut, noch schlecht über das eHighway-System informiert fühlen (siehe Abbildung 46, Frage 5.1, unterer Graph). Bezüglich der Einschätzung, wie gut sich die Befragten der Stichprobe  $n_3$  hinsichtlich der ELISA-eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 informiert fühlen, geben erneut etwa 16 % der Befragten an, sich sehr gut über die ELISA-eHighway-Teststrecke informiert zu fühlen. 46 % äußern, sich eher gut und 38 % sich weder gut, noch schlecht informiert zu fühlen (siehe Abbildung 46, Frage 5.2, unterer Graph).

In Ergänzung wurden die Befragungsteilnehmenden konsultiert, wie sie auf die **ELISA-eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 aufmerksam** geworden sind (Frage 5.3). Es zeigen sich im Vergleich der beiden Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  bei Auswertung der Ergebnisse sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Für die Stichprobe  $n_1$  zeigt sich zunächst, dass die meisten der Befragten (etwa 80 %) durch eigene Befahrung des elektrifizierten Streckenabschnitts auf die Teststrecke aufmerksam wurden. Ferner zeigen sich Häufungen bei den Antwortoptionen Internet und Zeitung. Über das Fernsehen, das Radio oder Social Media haben verhältnismäßig wenige Befragte über die ELISA-eHighway-Teststrecke erfahren. Auch der Freundes- und Bekanntenkreis trug zu weniger als 20 % dazu bei, dass die Befragten auf die eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 aufmerksam wurden. Hinsichtlich der Stichprobe  $n_3$  zeigt sich vor allem ein höherer Anteil an Personen, die den relevanten Streckenabschnitt auf der BAB 5 bereits selbst befahren haben (90 %). Ebenfalls auffällig ist der deutlich höhere Anteil an Personen, die durch eine Zeitung auf die ELISA-eHighway-Teststrecke aufmerksam wurden (siehe vorstehende Abbildung 46).

Neben dem Informationsstand zum eHighway-System im Allgemeinen beziehungsweise zur ELISA-eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 im Speziellen, erlaubt die Auswertung von Frage 5.4 zusätzlich Rückschlüsse auf die **Befahrungshäufigkeit der ELISA-eHighway-Teststrecke** durch die Befragten.

Die Mehrheit der Befragten in Stichprobe  $n_1$  – rund 58 % – gibt an, den ELISA-eHighway-Teststreckenabschnitt durchschnittlich weniger als einmal pro Woche zu befahren. Rund 13 % befahren den Streckenabschnitt ein- bis zweimal pro Woche, etwa 8 % der Befragten drei- bis zehnmal pro Woche und circa 1 % der Befragten sogar häufiger als zehnmal pro Woche. In Summe geben also rund 80 % der Befragten an, den ELISA-eHighway-Streckenabschnitt der Bundesautobahn A5 regelmäßig zu befahren. Etwa 9 % der Befragten geben an, den hessischen eHighway-Teststreckenabschnitt noch nie befahren zu haben. Hinsichtlich Stichprobe  $n_3$  geben 69 % an, den entsprechenden Streckenabschnitt weniger als einmal pro Woche, 18 % ein- bis zweimal pro Woche, 11 % drei- bis zehnmal pro Woche und 1 % mehr als zehnmal pro Woche zu befahren (siehe Abbildung 47, oben).

Mit Frage 5.5 wurde ergänzend eruiert, ob die Befragten über Erfahrungen hinsichtlich der **Befahrung einer der anderen beiden deutschen eHighway-Teststrecken** in Schleswig-Holstein beziehungsweise Baden-Württemberg verfügen. Es zeigen sich für die Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  annähernd gleiche Ergebnisse. Rund vier Fünftel der Befragten geben an, eine dieser beiden eHighway-Teststrecken bislang (noch) nicht befahren zu haben. 14 % ( $n_1$ ) beziehungsweise 15 % ( $n_3$ ) der Befragten geben an, bereits mindestens einmal über die eHighway-Teststrecke in Schleswig-Holstein, gut 3 % ( $n_1$ ) beziehungsweise 2 % ( $n_3$ ) über die eHighway-Teststrecke in Baden-Württemberg gefahren zu sein (Mehrfachantworten waren zulässig). Nachfolgender Abbildung 47 können die genauen Ergebnisse zu den Fragen 5.4 und 5.5 nochmals grafisch entnommen werden.

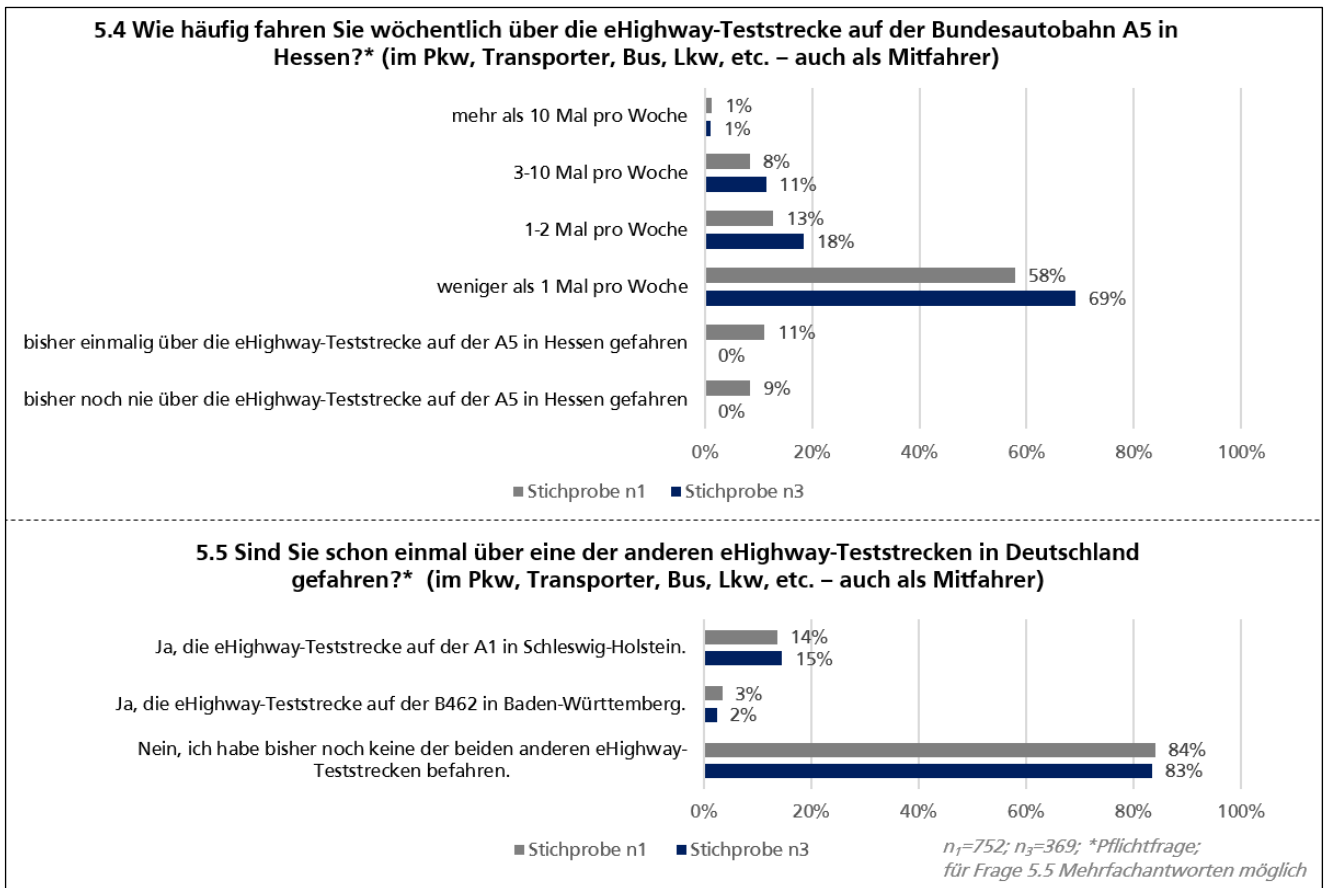


Abbildung 47: Befragungsergebnisse zur Befahrungshäufigkeit der eHighway-Teststrecken (Quelle: Eigene Darstellung)

Der konstruierte Fragebogen fokussiert im Folgenden die Untersuchung, ob auf Seiten der Befragten **Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System** vorliegen (Frage 5.6), und wenn ja, um **welche Befürchtungen** es sich dabei handelt (Frage 5.7). Dem Online-Fragebogen wurde an dieser Stelle, wie vorstehend bereits erwähnt, eine Filterfunktion implementiert. Die Ergebnisse zu Frage 5.6 lassen sich Abbildung 48 entnehmen.

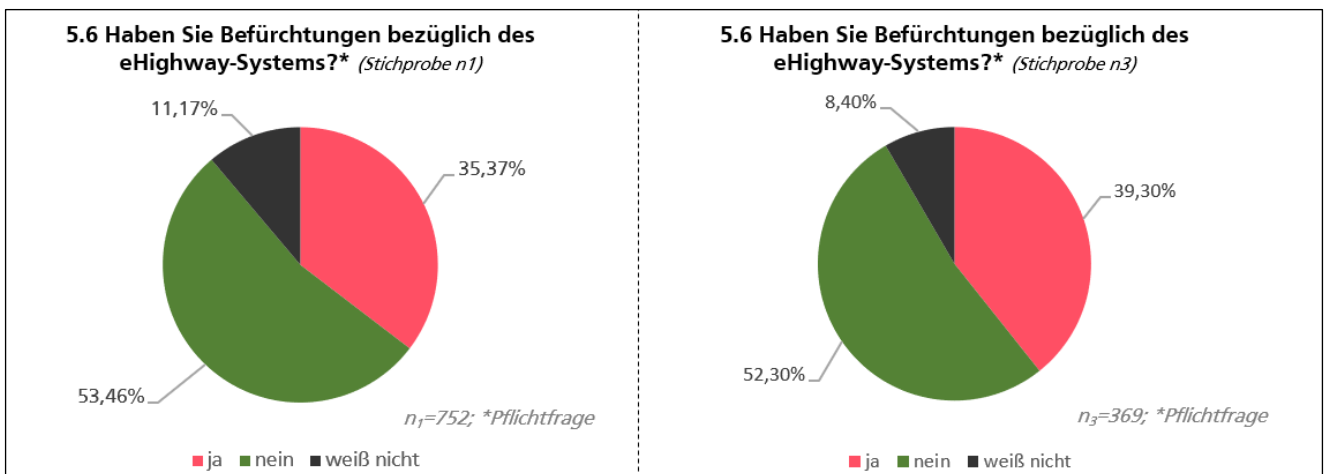
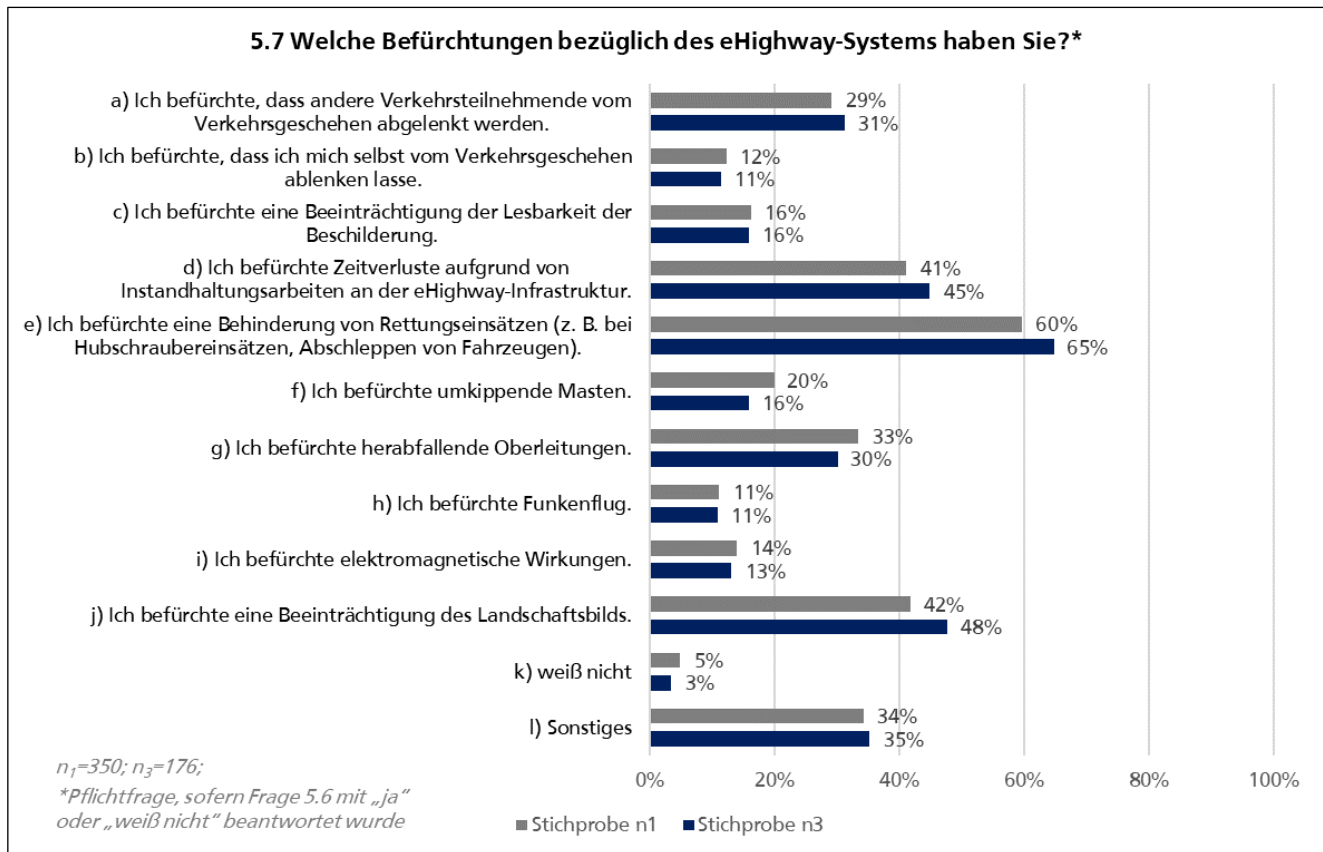


Abbildung 48: Befragungsergebnisse hinsichtlich vorliegender Befürchtungen bezüglich des eHighway-Systems (Quelle: Eigene Darstellung)

Der in Abbildung 48 links dargestellte Graph umfasst dabei die Ergebnisse für die Stichprobe n<sub>1</sub>, der rechts dargestellte Graph entsprechend für die Stichprobe n<sub>3</sub>. Für beide Stichproben lässt sich grundsätzlich das gleiche Antwortverhalten feststellen: Etwas mehr als die Hälfte der Befragten äußert,

keinerlei **Befürchtungen** bezüglich des eHighway-Systems zu haben. Etwas mehr als ein Drittel der Befragten spricht sich jedoch dafür aus, dass Befürchtungen vorliegen. Rund ein Zehntel der Befragten ist sich unschlüssig. Im Vergleich der Ergebnisse für die beiden Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  zeigt sich, dass die vom eHighway-System betroffene und über das eHighway-System informierte Gesellschaft ( $n_3$ ) über einen höheren Anteil an Personen verfügt, die Befürchtungen bezüglich des eHighway-Systems haben.

350 Personen der Stichprobe  $n_1$  und 176 Personen der Stichprobe  $n_3$  haben die vorstehende Frage 5.6 mit „ja“ beziehungsweise „weiß nicht“ beantwortet. Für diese Anzahl an Personen eröffnet sich aufbauend jeweils die Möglichkeit, die **Hintergründe ihrer Befürchtungen** anhand von Frage 5.7 weiter zu konkretisieren (siehe Abbildung 49).



**Abbildung 49: Befragungsergebnisse hinsichtlich der Hintergründe zu den Befürchtungen bezüglich des eHighway-Systems** (Quelle: Eigene Darstellung)

60 % der befragten Personen aus Stichprobe  $n_1$  geben an, dass Sie sich vor einer Behinderung von Rettungseinsätzen fürchten. Ebenso wird eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes von 42 % befürchtet, dicht gefolgt von befürchteten Zeitverlusten infolge von Instandhaltungsarbeiten an der eHighway-Infrastruktur mit 41 %. Herabfallende Oberleitungen werden von 33 % der Befragten befürchtet. Eine Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmenden vom Verkehrsgeschehen durch das eHighway-System befürchten 29 % der Befragten aus der Stichprobe  $n_1$ .

Für die Stichprobe  $n_3$  lassen sich zwar keine grundlegend abweichenden Ergebnisse feststellen, es zeigt sich dennoch unter anderem, dass eine Behinderung von Rettungseinsätzen prozentual von einem höheren Anteil der Befragten befürchtet wird. Aus der Personengruppe der vom eHighway-System betroffenen und über das eHighway-System informierten Gesellschaft befürchten rund 65 % eine solche Behinderung. Eine ähnliche Verschiebung lässt sich hinsichtlich einer Beeinträchtigung des Landschaftsbilds ausmachen: Fürchten aus der Stichprobe  $n_1$  in Summe rund 42 % eine solche Beeinträchtigung, zeigt sich für die Stichprobe  $n_3$  ein Anteil von 48 %. Auch potenziell auftretende Zeitverluste infolge des



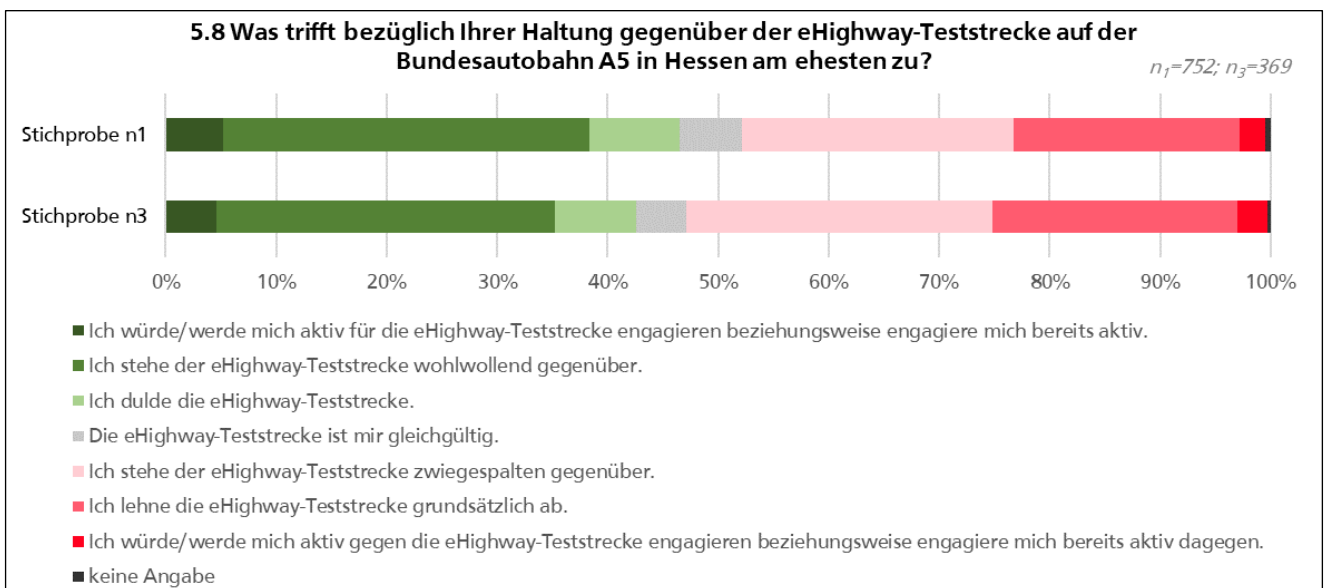
eHighway-Systems werden durch die Befragten der Stichprobe  $n_3$  häufiger als ein Befürchtungsgrund angegeben (45 % in  $n_3$  im Vergleich zu 41 % in  $n_1$ ), gleichermaßen wie die Befürchtung einer Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmenden (31 % in  $n_3$  im Vergleich zu 29 % in  $n_1$ ). Herabfallende Oberleitungen befürchten Personen der Stichprobe  $n_3$  jedoch weniger als Personen der Stichprobe  $n_1$  (30 % in  $n_3$  im Vergleich zu 33 % in  $n_1$ ). Inwiefern anderweitige als die vorstehend genannten und erläuterten Befürchtungen vorliegen, kann ergänzend vorstehender Abbildung 49 entnommen werden.

Die Befragten wurden ferner hinsichtlich ihrer **Haltung gegenüber der ELISA-eHighway-Teststrecke** auf der Bundesautobahn A5 in Hessen konsultiert. Es zeigen sich dabei leicht unterschiedliche Ergebnisse im Vergleich der Stichproben  $n_1$  und  $n_3$ .

Hinsichtlich der Stichprobe  $n_1$  ist zunächst festzuhalten, dass keine eindeutige Tendenz vorzuliegen scheint. Etwa die Hälfte der Befragten spricht sich (eher) positiv gegenüber der ELISA-eHighway-Teststrecke aus, die andere Hälfte negativ.

Hinsichtlich der Stichprobe  $n_3$  zeigt sich eine moderate Tendenz zu einem höheren Anteil an negativ konnotierten Antwortoptionen. Etwa 43 % wählen eine Antwortoption mit positiver Bewertung (zum Vergleich: In Stichprobe  $n_1$  beträgt der Anteil rund 47 %). Etwa 53 % der Befragten in Stichprobe  $n_3$  geben an, der eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 negativ gegenüberzustehen. In Stichprobe  $n_1$  beträgt dieser Anteil 47 %. Mit zunehmender Betroffenheit und höherem Informationsstand zum eHighway-System im Allgemeinen sowie zur ELISA-eHighway-Teststrecke im Speziellen scheint sich die Haltung der Akzeptanzsubjekte also zu verschlechtern.

Nachfolgender Abbildung 50 können die Ergebnisse nochmal im Detail entnommen werden. Der obere Graph zeigt dabei die Ergebnisse für die Stichprobe  $n_1$ , der untere Graph für die Stichprobe  $n_3$ .



**Abbildung 50: Befragungsergebnisse hinsichtlich der Haltung der Befragten gegenüber der ELISA-eHighway-Teststrecke** (Quelle: Eigene Darstellung)

## TEIL 6: DAS eHIGHWAY-SYSTEM IM GESELLSCHAFTLICHEN KONTEXT

Bezogen sich die vorstehenden Fragen im fünften Teil des Online-Fragebogens vorwiegend auf die Untersuchung der Einstellungsakzeptanz der Befragten, fokussieren die im sechsten Teil des Online-Fragebogens platzierten Fragen vorrangig die Untersuchung der Verhaltensakzeptanz. Diesbezüglich wird mit Frage 6.1 zunächst in Erfahrung gebracht, welches **Meinungsbild zum eHighway-System** die Befragten im Gespräch mit ihren Mitmenschen wahrnehmen (siehe Abbildung 51).

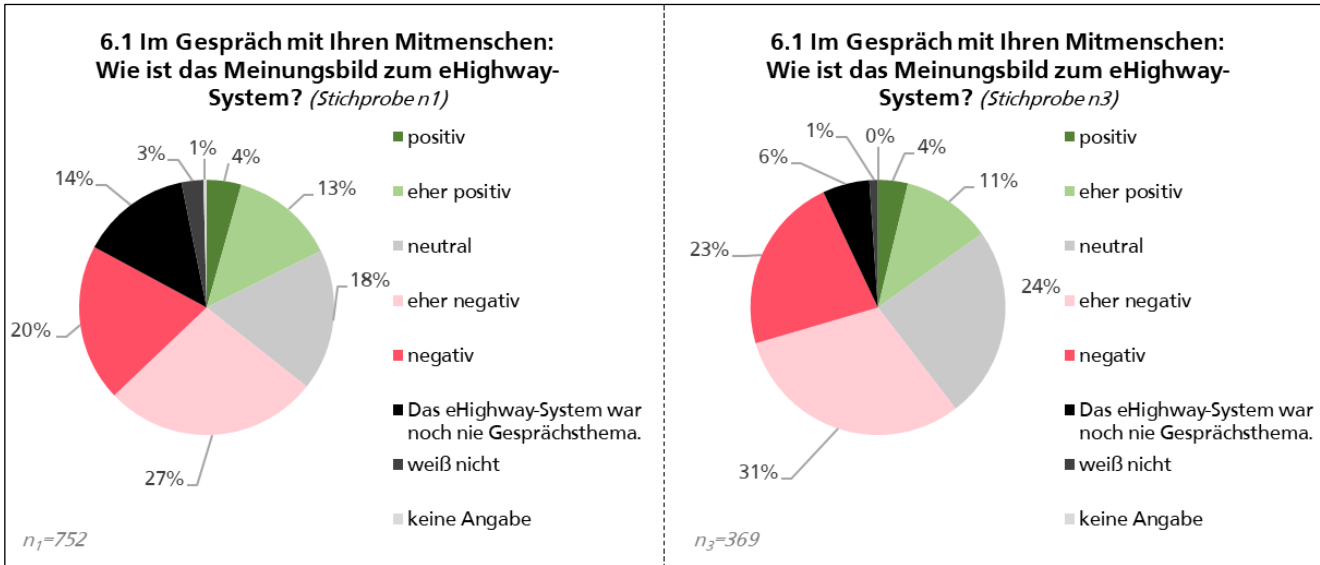


Abbildung 51: Befragungsergebnisse hinsichtlich des wahrgenommenen Meinungsbildes einer befragten Person im Gespräch mit Mitmenschen (Quelle: Eigene Darstellung)

Sowohl für die Stichprobe  $n_1$  als auch für die Stichprobe  $n_3$  lässt sich ein Anteil von 4 % an Personen feststellen, die angeben, bislang ein positives **Meinungsbild zum eHighway-System im Gespräch mit ihren Mitmenschen** wahrgenommen zu haben. 13 % der Stichprobe  $n_1$  und 11 % der Stichprobe  $n_3$  geben an, ein eher positives Meinungsbild wahrzunehmen. Ein neutrales Meinungsbild nehmen in Stichprobe  $n_1$  18 % der Befragten wahr, in Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil 24 %. Ein eher negatives Meinungsbild nehmen 27 % der Befragten aus Stichprobe  $n_1$  und 31 % der Stichprobe  $n_3$  wahr, ein negatives Bild 20 % in Stichprobe  $n_1$  beziehungsweise 23 % in Stichprobe  $n_3$ . Bei 14 % der Befragten der Stichprobe  $n_1$  war das eHighway-System bislang noch nie Gesprächsthema; in Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil 6 %. In Summe zeigt sich, dass in Stichprobe  $n_1$  addiert 47 % ein bislang (eher) negatives Meinungsbild im Gespräch mit ihren Mitmenschen wahrnehmen, in Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil 54 % (siehe vorstehende Abbildung 51).

Anhand von Frage 6.2 (siehe Abbildung 52) wird untersucht, **inwieweit die Befragten dazu bereit sind, andere Personen in einem Gespräch vom eHighway-System zu überzeugen** – sich also aktiv für das eHighway-System zu engagieren.

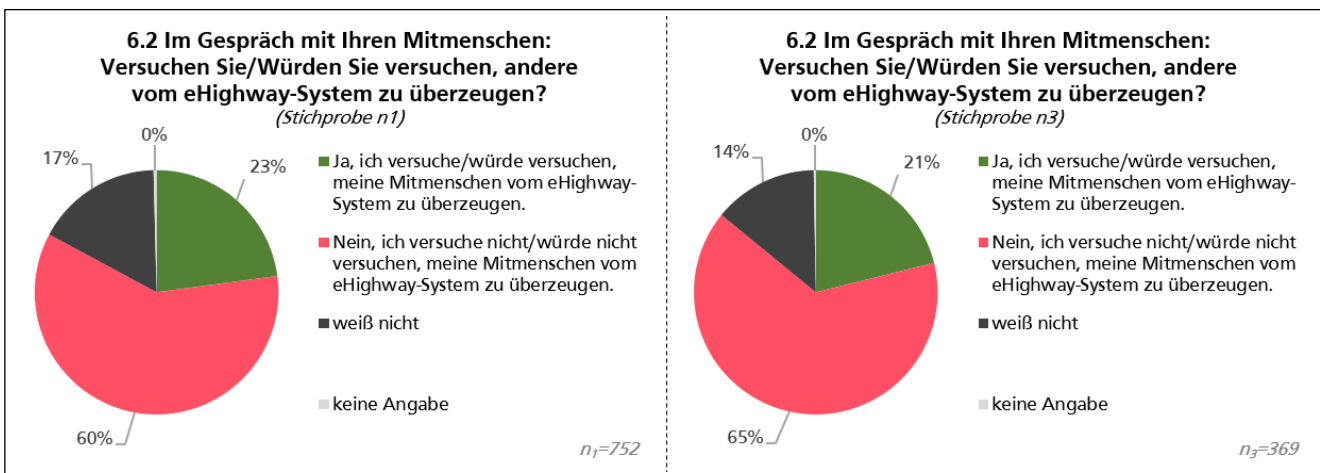
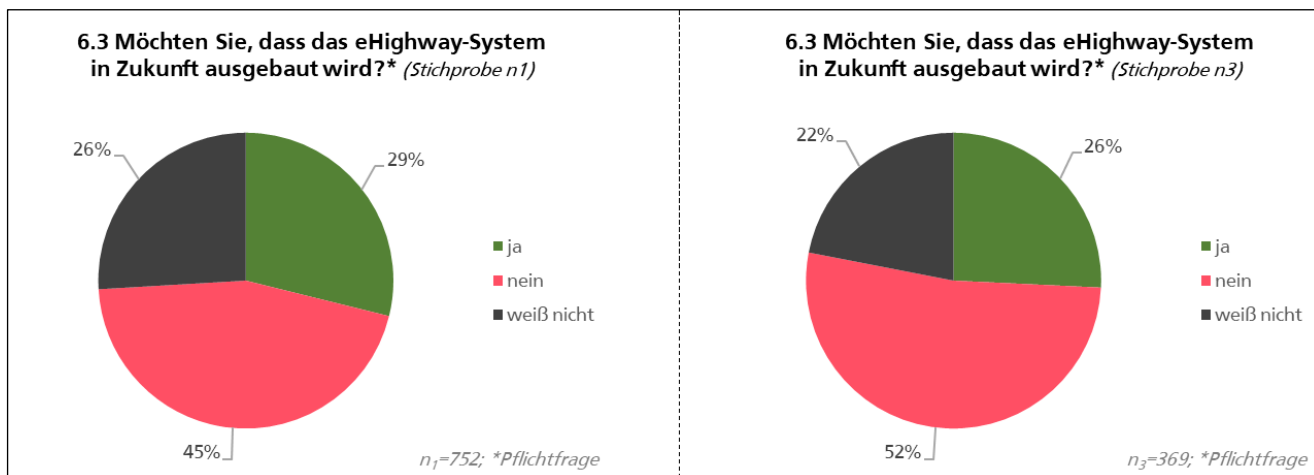


Abbildung 52: Befragungsergebnisse hinsichtlich der Bereitschaft einer befragten Person, andere Personen vom eHighway-System zu überzeugen (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Ergebnisse zur Frage 6.2 betrachtend, zeigt sich für die Stichprobe  $n_1$ , dass 60 % der Befragten nicht versuchen würden, ihre Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen; 23 % hingegen würden Überzeugungsversuche unternehmen. 17 % der befragten Personen sind sich unentschieden. In der gefilterten Stichprobe  $n_3$  sprechen sich 65 % der befragten Personen dafür aus, dass sie keine Versuche anstellen würden, ihre Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen. Demgegenüber steht ein Anteil von etwa 21 % an befragten Personen, die Überzeugungsversuche nicht ausschließen. 14 % der befragten Personen antworteten mit „weiß nicht“ (siehe Abbildung 52, links Stichprobe  $n_1$ , rechts Stichprobe  $n_3$ ).

Frage 6.3 tangiert die Untersuchung, inwiefern die Befragten einen **Ausbau des eHighway-Systems in Zukunft** begrüßen würden. Hinsichtlich der Stichprobe  $n_1$  zeigt sich, dass 45 % der Befragten einen zukünftigen Ausbau des eHighway-Systems derzeit ablehnen. 29 % der Befragten hingegen unterstützen einen zukünftigen Ausbau des eHighway-Systems. 26 % der Befragten sind sich bezüglich der Frage unentschieden und antworten mit „weiß nicht“. Für die Stichprobe  $n_3$  ist festzustellen, dass ein Anteil von 52 % der befragten Personen einen Ausbau des eHighway-Systems zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht unterstützt. Der Anteil an befragten Personen, die einem Ausbau positiv gegenüberstehen, beträgt etwa 26 %. Etwas mehr als ein Fünftel der befragten Personen in Stichprobe  $n_3$  beantwortet die Frage nach einem Ausbau des eHighway-Systems mit „weiß nicht“.

Nachfolgender Abbildung 53 lassen sich die Ergebnisse für Frage 6.3 nochmals grafisch aufbereitet entnehmen (links für die Stichprobe  $n_1$ , rechts für die Stichprobe  $n_3$ ).



**Abbildung 53: Befragungsergebnisse hinsichtlich des Ausbauwunschs des eHighway-Systems in Zukunft**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

#### TEIL 7: ANMERKUNGEN

Im siebten und letzten Teil der Befragung war es den Befragten möglich, Anmerkungen, Lob oder Kritik zur Befragung zu äußern. Zusätzlich wurde in diesem Teil der Befragung eruiert, ob sich die Befragten **weitere Informationen zum eHighway-System** wünschen.

Im Vergleich der beiden Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  lässt sich erneut ein leicht voneinander abweichendes Antwortbild erkennen. 43 % der befragten Personen in Stichprobe  $n_1$  geben an, dass sie sich keine weiteren Informationen zum eHighway-System wünschen. Demgegenüber steht ein Anteil von 51 % an befragten Personen in der Stichprobe  $n_3$ . 43 % der befragten Personen in Stichprobe  $n_1$  wünschen sich hingegen weitere Informationen. In Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil acht Prozentpunkte weniger (35 %). Jeweils 13 % der befragten Personen geben an, dass es ihnen egal sei, ob sie weitere Informationen erhalten oder nicht (siehe Abbildung 54, links Stichprobe  $n_1$ , rechts Stichprobe  $n_3$ ).

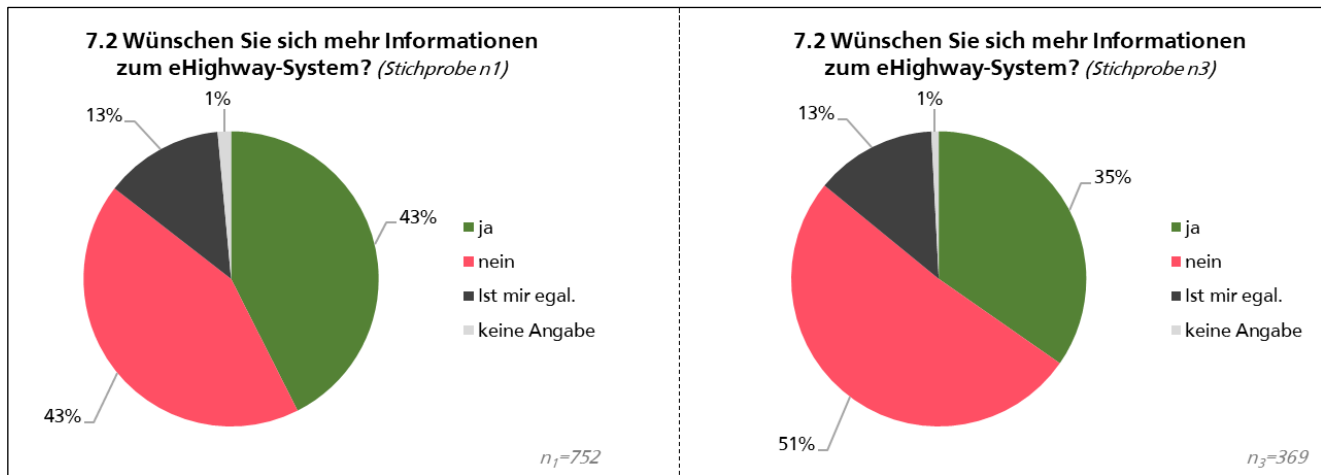


Abbildung 54: Befragungsergebnisse hinsichtlich des Wunschs der befragten Personen nach weiteren Informationen zum eHighway-System (Quelle: Eigene Darstellung)

### 5.3.5 DATENANALYSE UND ERGEBNISSE

Mit Abschluss der allgemeinen Deskription und grober Erstanalyse sollen die Befragungsergebnisse im Folgenden nun aufbauend entsprechend der definierten Zielstellung tiefergehend untersucht werden.

#### DEMOGRAFISCHE MERKMALE DER STICHPROBEN $n_1$ UND $n_3$

Zunächst ist auffällig, dass sich die beiden Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  hinsichtlich ihrer **demografischen Merkmale** nicht merklich voneinander unterscheiden – es wurde diesbezüglich im Vorstehenden bereits entsprechend ausgeführt.

#### PRÜFUNG DER BETROFFENHEIT UND DES INFORMATIONSSTANDS ZUM eHIGHWAY-SYSTEM BEZIEHUNGSWEISE ZUR ELISA-eHIGHWAY-TESTSTRECKE AUF DER BUNDESAUTOBAHN A5 DER STICHPROBEN $n_1$ UND $n_3$

Die Prüfung der **Betroffenheit der befragten Personen** erfolgt anhand der Fragen 1.4 (Wohnort) und 5.4 (Befahrungshäufigkeit des Streckenabschnitts auf der BAB 5, auf dem die ELISA-eHighway-Oberleitungsanlage errichtet wurde).

Für die Stichprobe  $n_1$  zeigt sich, dass 81 % der befragten Personen angeben, ihren Wohnsitz in Hessen zu haben. Ferner ist festzustellen, dass 80 % der befragten Personen angeben, den ELISA-eHighway-Teststreckenabschnitt regelmäßig zu befahren. Für die Stichprobe  $n_3$  ergibt sich entsprechend der im Vorhinein angewandten Filterkriterien die höchstmögliche Betroffenheit: 100 % der befragten Personen in Stichprobe  $n_3$  haben ihren Wohnsitz in Hessen und 100 % der befragten Personen befahren den ELISA-eHighway-Teststreckenabschnitt regelmäßig.

Die **Prüfung des Informationsstands** zum eHighway-System beziehungsweise zur ELISA-eHighway-Teststrecke erfolgt anhand der Fragen 5.1 und 5.2.

Für die Stichprobe  $n_1$  wird deutlich, dass sich jeweils nur etwa 40 % der befragten Personen eher gut bis sehr gut über das eHighway-System beziehungsweise die ELISA-Teststrecke informiert fühlen. Weitere etwa 30 % geben an, sich zumindest weder gut, noch schlecht informiert zu fühlen. Der subjektiv empfundene Informationsstand ist damit noch deutlich verbesserungsfähig. Die Stichprobe  $n_1$  lässt sich dabei aufgrund des hohen Anteils an sich schlecht informierten Personen nicht als eine Personengruppe umschreiben, die über einen (subjektiv empfundenen) hohen Informationsstand zum eHighway-System beziehungsweise zur ELISA-eHighway-Teststrecke verfügt. Entsprechend der Filterkriterien zur Bildung der Stichprobe  $n_3$  ergibt sich für diese Stichprobe ein deutlich höherer Informationsstand.

---

Zusammenfassend lässt sich manifestieren, dass in der Stichprobe  $n_1$  eine hohe Betroffenheit der befragten Personen vorliegt. Dieser hohe Grad ist dabei, trotz Wahl einer Gelegenheitsstichprobe, sicherlich auf die ausgearbeitete Streuungsstrategie mit regionalem Schwerpunkt zurückzuführen. Der Informationsstand zum eHighway-System beziehungsweise der ELISA-eHighway-Teststrecke ist jedoch ausbaufähig. Personen der Stichprobe  $n_3$  verfügen hingegen sowohl über eine hohe Betroffenheit, als auch über einen (subjektiv empfundenen) hohen Informationsstand.

#### PRÜFUNG DER EINSTELLUNG DER BEFRAGTEN PERSONEN IN DEN STICHPROBEN $n_1$ UND $n_3$ ZUM KLIMASCHUTZ IM ALLGEMEINEN, IM VERKEHRSEKTOR SOWIE IM STRAßENGÜTERVERKEHR

Bevor der Analyse der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems nachgegangen wird, soll im Vorhinein eine Untersuchung der **Einstellung der befragten Personen in den Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  zum Klimaschutz im Allgemeinen, zum Klimaschutz im Verkehrssektor sowie zum Klimaschutz im Straßengüterverkehr** durchgeführt werden. Dieser Untersuchung dienen vor allem die Fragen 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 sowie 4.1.

Es wird ganz klar ersichtlich, dass **Klimaschutz im Allgemeinen** sowohl von den Personen in der ungefilterten Stichprobe  $n_1$ , als auch von den Personen in der betroffenen und informierten Stichprobe  $n_3$  als ein ernstzunehmendes Problem erachtet wird. In beiden Stichproben ist der Anteil an Personen, die die Aussage „Der Klimawandel ist ein ernstzunehmendes Problem.“ mit den Antwortoptionen „stimme voll und ganz zu“ oder „stimme eher zu“ gewählt haben, größer als 90 %. Gestützt wird dies durch Betrachtung der Bewertung der Aussage „Es ist wichtig, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren“, die ebenfalls in beiden Stichproben auf eine Zustimmung von 91 % kommt. Klimaschutz wird dabei nicht als alleinige Aufgabe der Regierung gewertet, sondern vielmehr als eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. So verwundert es nicht, dass sich in beiden Stichproben auch jeweils mehr als 80 % der befragten Personen dazu äußern, dass ihnen selbst Klimaschutz wichtig sei. Bei Betrachtung der ausgewerteten Ergebnisse ist auffallend, dass Personen der Stichprobe  $n_3$  die Notwendigkeit für Klimaschutz als ein noch etwas ernstzunehmenderes Problem erachten, als die Personen in der ungefilterten Stichprobe  $n_1$ . So lässt sich eine Verschiebung in der Häufigkeit der Antwortoptionen von „stimme eher zu“ hin zu „stimme voll und ganz zu“ erkennen (siehe Frage 2.1, Abbildung 42, S. 147).

Es ist also festzuhalten, dass Klimaschutz im Allgemeinen als ein ernstzunehmendes Problem erachtet wird. Betroffene und informierte Personen (Stichprobe  $n_3$ ) weisen diesbezüglich eine noch etwas stärker ausgeprägte Tendenz zur Notwendigkeit von Klimaschutz auf, als Personen der Stichprobe  $n_1$ .

Hinsichtlich der Notwendigkeit von **Klimaschutz im Verkehrssektor** lässt sich ein ähnliches, aber dennoch gedrehtes Antwortverhalten zwischen den beiden Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  erkennen. Zunächst zeigt sich in beiden Stichproben eine große Zustimmung (zwischen 73 und 81 %) <sup>64</sup>, dass Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub sowie der Verkehrslärm zu reduzieren seien. Hierbei festzustellen ist jedoch, dass ein größerer Anteil an befragten Personen in der Stichprobe  $n_1$  dazu neigt, die entsprechenden Aussagen mit „stimme voll und ganz zu“ zu bewerten, als dies in der Stichprobe  $n_3$  festzustellen ist. In der Stichprobe  $n_3$  wird die Antwortoption „stimme voll und ganz zu“ seltener gewählt, dafür kommt es zu einem größeren Anteil an befragten Personen, die die entsprechenden Aussagen mit „stimme eher zu“ beantwortet haben, als vergleichsweise in der Stichprobe  $n_1$ . Die ungefilterte Stichprobe  $n_1$  scheint folglich eine höhere Notwendigkeit darin zu sehen, Klimaschutzmaßnahmen auch im Verkehrssektor zu realisieren. Eine Reduktion von Verkehrslärm wird durch beide Stichproben dabei im Übrigen als etwas weniger relevant bewertet, als eine Reduktion von Treibhausgasemissionen beziehungsweise von Luftschadstoffen wie Stickoxide und Feinstaub (siehe Frage 3.1, Abbildung 43, S. 148).

---

<sup>64</sup> Addition der Anteile der Antwortoptionen „stimme voll und ganz zu“ und „stimme eher zu“.



---

Wird der Fokus nunmehr auf den **Klimaschutz im Straßengüterverkehr** gerichtet, so ist auffällig, dass unabhängig der Stichprobe eine größtmögliche Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf die Schiene als sinnvoll erachtet wird. Jeweils über 80 % der befragten Personen in den Stichproben  $n_1$  und  $n_3$  stimmen dieser Aussage voll und ganz beziehungsweise eher zu. In der Stichprobe  $n_1$  ist dabei der Anteil an befragten Personen, die die Antwortoption „stimme voll und ganz zu“ wählten, minimal höher (54 %) als in der Stichprobe  $n_3$  (53 %). Ferner scheint ein Bewusstsein dafür vorzuliegen, dass jedoch nicht alle Güter auf die Schiene verlagert werden können und die Güterverkehre, die nach wie vor über die Straße realisiert werden müssen, ebenfalls emissionsärmer auszugestalten sein werden. Interessant erweist sich dabei, dass erneut ein höherer Anteil an befragten Personen der Stichprobe  $n_1$  festzustellen ist, der die zugehörige Aussage mit „stimme voll und ganz zu“ bewertet (55 %). Für die vom eHighway-System betroffene und über das eHighway-System informierte Stichprobe  $n_3$  lässt sich diesbezüglich lediglich ein Anteil von 52 % identifizieren (siehe Frage 3.2, Abbildung 44, S. 149).

Als **Handlungsansätze, um den Straßengüterverkehr emissionsärmer** durchführen zu können (Frage 4.1), werden von den befragten Personen dabei aktuell vor allem Wasserstoff-Lkw (78 % Zustimmung in Stichprobe  $n_1$ ; 80 % Zustimmung in der Stichprobe  $n_3$ ) und die Optimierung von Verbrennungsmotoren (57 % Zustimmung in der Stichprobe  $n_1$ ; 64 % Zustimmung in der Stichprobe  $n_3$ ) favorisiert. Eine Elektrifizierung von Lkw halten in der Stichprobe  $n_1$  50 % der befragten Personen für eine geeignete Möglichkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr. In der Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil 46 %. Allgemein auffällig hinsichtlich Frage 4.1 ist ferner der vergleichsweise höhere Anteil einerseits an Befragten, die sich für die Antwortoption „weiß nicht“, sowie andererseits an Befragten, die sich für die vermeintliche Fluchtkategorie „teils, teils“ entschieden haben. Es erscheint möglich, dass einigen Befragten die Beantwortung dieser Frage aufgrund fehlenden Wissens schwergefallen sein könnte. Diese These lässt sich stützen mit der Erkenntnis, dass der Anteil an Personen, die die Antwortoption „weiß nicht“ wählten, in der Stichprobe  $n_1$  höher ist als in der gefilterten und zumindest hinsichtlich des eHighway-Systems (subjektiv) informierten Stichprobe  $n_3$ . Es lässt sich die Vermutung aufstellen, dass Personen, die sich über das eHighway-System informiert fühlen, sich grundsätzlich bereits mit alternativen Antriebstechnologien für den Straßengüterverkehr beschäftigt haben und somit über ein gewisses Basiswissen über alternative Antriebstechnologien verfügen könnten. Spannend zeigt sich vor allem aber auch, dass die vom eHighway-System betroffene und über das eHighway-System informierte Stichprobe  $n_3$  eine Elektrifizierung von Lkw als Möglichkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr schlechter bewertet, als die ungefilterte Stichprobe  $n_1$  (siehe Frage 4.1, Abbildung 45, S. 150).

Als **Zwischenresümee** lässt sich bereits an dieser Stelle infolge der ersten ausgewerteten Daten festhalten, dass der Klimawandel als ein ernstzunehmendes Problem erachtet wird. Dass Treibhausgasemissionen gesenkt werden müssen, bewerten über 90 % der Befragten als notwendig. Klimaschutz wird dabei nicht als Aufgabe der Regierung, sondern als gesamtgesellschaftliche Aufgabe verstanden. Es liegt ein Bewusstsein dafür vor, dass nicht alle Güter auf die Schiene verlagert werden können und die Güterverkehre, die nach wie vor über die Straße realisiert werden müssen, ebenfalls emissionsärmer gestaltet werden müssen. Als Handlungsansätze für den Straßengüterverkehr werden dabei von den Befragten unabhängig der Stichprobe aktuell vor allem Wasserstoff-Lkw, die Optimierung von Verbrennungsmotoren beziehungsweise der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen favorisiert. Personen der vom eHighway-System betroffenen und über das eHighway-System informierten Stichprobe  $n_3$  erachten den Klimawandel grundsätzlich etwas stärker als ernstzunehmendes Problem (siehe Fragen 2.1 a) bis c)). Auch stimmt ein etwas höherer Anteil an Personen der Stichprobe  $n_3$  der Aussage, dass ihnen selbst Klimaschutz wichtig sei, voll und ganz oder eher zu (Frage 2.1 e)). Im Kontrast zeigt sich jedoch, dass Klimaschutzmaßnahmen im Verkehrssektor durch Personen der Stichprobe  $n_3$  etwas weniger positiv als von Personen der ungefilterten Stichprobe  $n_1$  bewertet werden.

Entsprechend der vorgenommenen Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ – siehe hierzu auch Kapitel 5.3.1 (S. 137) – sind zur Analyse der Akzeptanz vor allem die Fragen 5.6, 5.7, 5.8, 6.2 sowie 6.3 heranzuziehen. Diese Fragen adressieren

- die Befürchtungen des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System,
- die Haltung des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System,
- die Bereitschaft des Akzeptanzsubjekts, andere vom eHighway-System zu überzeugen sowie
- den Ausbauwunsch des Akzeptanzsubjekts bezüglich des eHighway-Systems.

Hinsichtlich der **Befürchtungen eines Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System** zeigt sich zunächst, dass sich unabhängig der Stichprobe jeweils etwas mehr als die Hälfte der befragten Personen dafür ausspricht, keine Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System zu haben. In der ungefilterten Stichprobe  $n_1$  sprechen sich dennoch gut 35 % der befragten Personen dafür aus, Befürchtungen zu haben. In der vom eHighway-System betroffenen und über das eHighway-System informierten Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil sogar rund 39 % und damit vier Prozentpunkte mehr. Auf die verschiedenen Befürchtungsarten wurde im Vorstehenden bereits detaillierter eingegangen. Interessant erscheint an dieser Stelle der Zusammenhang, dass mit zunehmender Betroffenheit vom eHighway-System und mit zunehmendem (subjektiven) Informationsstand die Befürchtungen ebenfalls zuzunehmen scheinen. Befürchtungen hinsichtlich einer Beeinträchtigung

- von Rettungseinsätzen,
- des Landschaftsbilds,
- durch Zeitverluste infolge von Instandhaltungsarbeiten an der eHighway-Infrastruktur oder auch
- durch eine befürchtete Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmenden

sind bei Personen in der Stichprobe  $n_3$  (teils deutlich) stärker ausgeprägt, als bei Personen in der Stichprobe  $n_1$ . Die Hintergründe hierfür wurden im Rahmen der durchgeführten Befragung nicht weiter eruiert, sollten jedoch Gegenstand aufbauender Forschungsaktivitäten sein.

Bezüglich der Befürchtungen des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System ist an dieser Stelle festzuhalten, dass lediglich **knapp die Hälfte der befragten Personen keine Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System** verspüren. Mit zunehmender Betroffenheit und zunehmenden Informationsstand zum eHighway-System lässt sich ein zunehmender Anteil an Personen identifizieren, die Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System hegen.

Um die **Haltung eines Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System** zu untersuchen, wurde eine Skala angelehnt an die in Kapitel 5.2.1 eingeführten Akzeptanzformen nach SAUER U. A. (2005) verwendet. Statt der nach SAUER U. A. (2005) vorgeschlagenen achtstufigen Skala wurde die Akzeptanzform „Konditionale Akzeptanz“ jedoch nicht als eigenständige Antwortoption aufgenommen. Stattdessen wurde eine siebenstufige Skala, bestehend aus den Antwortoptionen „Engagement“, „Wohllwollen“, „Duldung“, „Gleichgültigkeit“, „Zwiespalt“, „Ablehnung“ und „aktive Gegnerschaft“ gewählt. *Engagement*, *Wohllwollen* und *Duldung* werden dabei als Akzeptanz gewertet; *Zwiespalt*, *Ablehnung* und *aktive Gegnerschaft* als Ablehnung. Die Antwortoption *Gleichgültigkeit* entspricht einer neutralen Position. Unter Berücksichtigung dieser Skala zeigt sich, dass in der vom eHighway-System betroffenen und über das eHighway-System informierten Stichprobe  $n_3$  ein geringeres Maß an Akzeptanz vorliegt, als dies in der ungefilterten Stichprobe  $n_1$  der Fall ist. Akzeptieren in der Stichprobe  $n_1$  in Summe 47 % der befragten Personen die ELISA-eHighway-Teststrecke, so beträgt dieser Anteil in der Stichprobe  $n_3$  lediglich 43 % (siehe Frage 5.8, Abbildung 50, S. 155).

---

Es lässt sich hieraus die Schlussfolgerung ableiten, dass sich mit zunehmender Betroffenheit vom eHighway-System, gepaart mit einem (subjektiv empfundenen) höheren Informationsstand einer Person über das eHighway-System und zur ELISA-eHighway-Teststrecke, die Haltung eines Akzeptanzsubjekts gegenüber der eHighway-Teststrecke verschlechtert.

Ein ähnliches Antwortbild zeigt sich für die Frage, inwiefern ein Akzeptanzsubjekt dazu bereit ist, **anderweitige Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen** (Frage 6.2). Die hieraus abzuleitende Verhaltensakzeptanz zeigt: Die Mehrheit der befragten Personen ist nicht dazu bereit, andere Personen vom eHighway-System zu überzeugen. In der Stichprobe  $n_1$  sprechen sich 60 % dafür aus, hierfür nicht bereit zu sein. In der Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil sogar 65 %. Mit zunehmender Betroffenheit und zunehmendem (subjektiven) Informationsstand zum eHighway-System zeigt sich also eine abnehmende Bereitschaft und eine sich verschlechternde Verhaltensakzeptanz. So verwundert es nicht, dass sich auch für Frage 6.3 vergleichbare Ergebnisse feststellen lassen. In Stichprobe  $n_1$  lehnen 45 % den weiteren Ausbau des eHighway-Systems ab. In der gegenwärtig vom eHighway-System betroffenen und über das eHighway-System (subjektiv) informierten Stichprobe  $n_3$  beträgt dieser Anteil sieben Prozentpunkte mehr (52 %). So muss auch diesbezüglich festgehalten werden, dass mit zunehmender Betroffenheit, gepaart mit einem (subjektiv empfundenen) höheren Informationsstand einer Person über das eHighway-System und zur ELISA-eHighway-Teststrecke, ein Ausbau des eHighway-Systems kritischer betrachtet wird.

#### **FESTIGUNG DER ERARBEITETEN ERGEBNISSE IN EINEM EXPERTENWORKSHOP**

Die erarbeiteten Ergebnisse konnten im Rahmen eines Expertenworkshops im Zuge einer Konferenz zum ELISA-Forschungsprojekt am 14. März 2023 in Darmstadt präsentiert, diskutiert und dabei weiter gefestigt werden.

#### **5.4 ZWISCHENFAZIT**

Das vorliegende Kapitel war – ergänzend zum primären Ziel der Dissertationsschrift – ersten Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems in Form eines Exkurses gewidmet. Den Forschungsaktivitäten lag dabei das Ziel zugrunde, die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems unter Zuhilfenahme einer standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen mit einem moderaten Ressourcenaufwand abzuschätzen.

Hierfür wurden zunächst die wichtigsten methodischen und fachlichen Grundlagen im Kontext der Akzeptanzforschung zusammengetragen. Aufbauend wurden Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext definiert sowie der Begriff „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ operationalisiert. Im weiteren Verlauf wurde der Online-Fragebogen konstruiert und in diesem Zusammenhang auch identifiziert, inwiefern eine hohe Betroffenheit der zu befragenden Personen vom eHighway-System gewährleistet werden kann. Der Online-Fragebogen wurde im Rahmen der Durchführung zweier Pretests geprüft und entsprechend der hieraus gewonnenen Erkenntnisse überarbeitet. Die eigentliche Erhebung wurde im Zeitraum vom 26. Januar 2022 bis zum 31. Juli 2022 durchgeführt. Zur Datenerhebung wurde sich entsprechend des Granularitätsanspruchs an die Ergebnisse sowie der verfügbaren Ressourcen im ELISA-Forschungsprojekt an einer Gelegenheitssichtprobe bedient. In Summe war es möglich, 752 auswertbare Fragebögen zu sammeln.

Etwa drei Viertel der an der Befragung teilgenommenen Personen sind männlichen, etwa ein Viertel weiblichen Geschlechts. Hinsichtlich der Altersstruktur lässt sich eine weitestgehend ausgewogene Zusammensetzung erkennen. Bezüglich des Bildungsabschlusses zeigt sich ein hoher Anteil an Personen mit mindestens einem Hochschulabschluss (rund zwei Drittel). Über 80 % der teilgenommenen Personen wohnen in Hessen. Ferner befahren rund 80 % der befragten Personen den ELISA-eHighway-Test-

---

streckenabschnitt regelmäßig. Über das eHighway-System beziehungsweise die ELISA-eHighway-Teststrecke fühlen sich lediglich knapp 40 % der befragten Personen sehr gut oder zumindest eher gut informiert.

Basierend auf den durchgeführten Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems kann festgehalten werden: Das eHighway-System findet bei einem großen Teil der Gesellschaft bislang keine nachhaltige Akzeptanz. Zwar lassen die befragten Personen durchaus verlauten, dass sie den Klimawandel für ein ernstzunehmendes Problem erachten (>90 %) und das Treibhausgasemissionen zu reduzieren seien (>90 %). Auch sind sie der Auffassung, dass zwar möglichst viele Güter auf die Schiene verlagert werden sollten (ca. 80 %), aber dennoch auch der Straßengüterverkehr in Zukunft emissionsärmer zu realisieren sei (ca. 85 %). Statt einer Elektrifizierung von Lkw favorisieren die befragten Personen jedoch vielmehr den Einsatz von Brennstoffzellen-/Wasserstoff-Lkw (mit knapp 80 % Zuspruch) beziehungsweise eine stetige Verbesserung von Verbrennungsmotoren oder die Entwicklung und Anwendung von synthetischen Kraftstoffen (mit einem Anteil von jeweils etwas mehr als die Hälfte der befragten Personen).

Bezüglich des eHighway-Systems zeigt sich, dass etwa ein Drittel der befragten Personen Befürchtungen gegenüber dem System hegen. Vor allem eine Beeinträchtigung von Rettungseinsätzen wird befürchtet, gefolgt von Befürchtungen hinsichtlich einer Beeinträchtigung des Landschaftsbilds oder Zeitverlusten aufgrund von Instandhaltungsarbeiten an der eHighway-Infrastruktur. So zeigt etwa die Hälfte der befragten Personen eine negative Haltung gegenüber dem eHighway-System. Um neben der Einstellungsakzeptanz auch Rückschlüsse auf die Verhaltensakzeptanz der befragten Personen ziehen zu können, wurde einerseits nach ihrer Bereitschaft gefragt, andere Mitmenschen in einem Gespräch vom eHighway-System zu überzeugen beziehungsweise andererseits, inwiefern ein zukünftiger Ausbau des eHighway-Systems unterstützt werden würde. Knapp zwei Drittel der befragten Personen lehnt es ab, einen Versuch zu unternehmen, andere Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen. Etwa die Hälfte der befragten Personen spricht sich weiterhin dafür aus, dass das eHighway-System nicht weiter ausgebaut werden soll.

Im Rahmen der Analysen hat sich vor allem als interessant herausgestellt, dass sich mit zunehmender Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts vom eHighway-System und zusätzlich mit einem zunehmenden Informationsstand zum eHighway-System beziehungsweise zur ELISA-eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5, die Akzeptanz eines Akzeptanzsubjekts zu verschlechtern scheint. Um dies vertiefend zu untersuchen, wurde aus den erhobenen Daten eine entsprechend vom eHighway-System unmittelbar betroffene sowie über das eHighway-System/die ELISA-eHighway-Teststrecke (subjektiv) informierte Stichprobe herausgefiltert. Es hat sich dabei herausgestellt, dass Personen der „betroffenen und informierten Gesellschaft“ das eHighway-System in allen Belangen negativer bewerten.

**Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist festzuhalten, dass das eHighway-System von einem nicht unerheblichen Teil der Gesellschaft nicht akzeptiert wird:**

- Über ein Drittel der befragten Personen hegt Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System.
- Knapp die Hälfte der befragten Personen nimmt eine negative Haltung gegenüber dem eHighway-System ein.
- Fast zwei Drittel der befragten Personen sind nicht dazu bereit, ihre Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen.
- Rund die Hälfte der befragten Personen spricht sich dafür aus, dass sie nicht wünschen, dass das eHighway-System in Zukunft weiter ausgebaut wird.

## 6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Kapitel 6 dient der Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse. Diese werden einerseits in den aktuellen Stand des Wissens eingeordnet, andererseits entsprechend der Zielstellung der Dissertationsschrift interpretiert. Abschließend werden Handlungsempfehlungen aufgestellt, deren Umsetzung zu einer Steigerung der Zukunftsfähigkeit des eHighway-Systems beitragen wird.

### 6.1 EINFÜHRUNG IN DIE DISKUSSION DER ERGEBNISSE

**Die Ergebnisse der Dissertationsschrift zeigen klar auf:** Das eHighway-System kann merklich zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr beitragen (siehe Kapitel 4). Es steht im Einklang mit den politisch gesetzten Klimaschutzziele (siehe Kapitel 2.1.4). Neben diesem wichtigen Ergebnis führen die Analysen der Dissertationsschrift jedoch auch zu der Erkenntnis, dass das eHighway-System gegenwärtig von einem nicht unerheblichen Teil der Gesellschaft nicht akzeptiert wird (siehe Kapitel 5). Werden erneut die verheerenden Auswirkungen infolge der Erderwärmung fokussiert<sup>65</sup> und hierbei berücksichtigt, dass von diesen Konsequenzen etliche Menschen bereits persönlich betroffen sind beziehungsweise in naher, mittlerer und ferner Zukunft betroffen sein werden (Quaschnig 2020, S. 47-49), sollte jedoch eigentlich angenommen werden, dass das eHighway-System als nachweislich wirksamer Lösungsansatz auf eine breite gesellschaftliche Akzeptanz stoßen dürfte. Auch wurde im Rahmen der durchgeführten Akzeptanzbefragung in der Gesellschaft zum eHighway-System ersichtlich, dass ein umfassendes Bewusstsein dafür vorliegt, Lösungsansätze zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr zügig und wirksam implementieren zu müssen.

**Dennoch spricht sich rund die Hälfte der durch die standardisierte Befragung mittels Online-Fragebogen konsultierten Personen zum aktuellen Zeitpunkt und zum aktuellen Stand der Informiertheit gegen einen weiteren Ausbau des eHighway-Systems aus.**

Es eröffnet sich ein **Spannungsfeld**, das weiterer Untersuchungen und einer kritischen Reflexion der im Rahmen der Dissertationsschrift erarbeiteten Ergebnisse bedarf. Zur Ergründung dieses Spannungsfeldes dient die nachfolgende sowie die Diskussion strukturierende Leitfrage:

Leitfrage  
Diskussion

**Warum wird das eHighway-System trotz nachgewiesenem Potenzial zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr und damit als funktionierender Handlungsansatz zum Erreichen der Klimaschutzziele seitens der sich über die Notwendigkeit des Klimaschutzes bewussten Gesellschaft nicht umfassender akzeptiert?**

Der Fokus der Diskussion wird dabei zunächst auf eine **Überprüfung der Belastbarkeit der erarbeiteten Ergebnisse** gerichtet. Eine geringe Belastbarkeit der Ergebnisse könnte sich dabei als ein möglicher Erklärungsansatz für das vorliegende Spannungsfeld herausstellen.

Neben der Überprüfung der Belastbarkeit der Ergebnisse soll zusätzlich die **aktuell vorherrschende Diskrepanz aus nachgewiesenem Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial und ausbaufähiger gesellschaftlicher Akzeptanz des eHighway-Systems gesondert betrachtet** und der dabei existierende Missstand zu ergründen versucht werden. Hierauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen aufgestellt, deren Umsetzung einerseits zu einer Steigerung der Zukunftsfähigkeit des eHighway-Systems wird führen können. Andererseits werden die Handlungsempfehlungen dazu dienen, den Forschungsansatz zur Evaluation des eHighway-Systems fortwährend zu optimieren.

<sup>65</sup> Zur Erinnerung: Es wird beispielsweise zu stärkeren und länger anhaltenden Hitzewellen kommen, Überschwemmungen werden zunehmen, weitreichende Flächenbrände sind anzunehmen, Gletscher werden schmelzen, ein Anstieg des Meeresspiegels wird erfolgen, Ozeane werden versauern und Böden versalzen. Kurz: Die Lebensgrundlage für Mensch und Tier wird sukzessive genommen (BMZ 2023, o. S.).



---

## 6.2 BELASTBARKEIT DER ERGEBNISSE ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift werden im Kontext der eHighway-Forschung zum ersten Mal Ergebnisse zu den Betriebsmodi, zum Energieverbrauch sowie zu den Treibhausgasemissionen von O-Lkw auf Basis eines Realbetriebs mit dem dargebotenen Detailgrad veröffentlicht. Die erarbeiteten Ergebnisse können dabei nicht nur eHighway-Forschenden als essenzielle Grundlage dienen, um ihre Forschungsaktivitäten mit feingranularen Realdaten zu untermauern. So können die erarbeiteten Ergebnisse beispielsweise COLOVIC U. A. (2022), HANESCH U. A. (2022), NETZER U. A. (2022) oder SCHWERDFEGGER U. A. (2022) als wichtiger Datenlieferant von Nutzen sein, um ihre Forschungen fundiert zu kalibrieren. Die Ergebnisse können ferner dazu beitragen, auch in übergeordneten Studien (beispielsweise HACKER, BLANCK, U. A. (2020), JÖHRENS U. A. (2020) oder HACKER, JÖHRENS, U. A. (2020)) die notwendigen Daten zur korrekten Einordnung des eHighway-Systems bereitzustellen. Nichtsdestoweniger ist es erforderlich, die vorstehend erarbeiteten Ergebnisse entsprechend ihrer Belastbarkeit und ihrer potenziellen Verwertbarkeit kritisch zu hinterfragen und korrekt einzuordnen.

### FAHRZEUGDATEN UND DATENVERARBEITUNG

Zunächst soll der Fokus auf die erhobenen und verarbeiteten **Fahrzeugdaten** gerichtet werden. Die verarbeiteten Fahrzeugdaten beruhen bislang auf einer Anzahl von lediglich fünf O-Lkw, die allesamt über Prototypencharakter verfügen. Solche auf Prototypen basierenden Daten bergen immer ein hohes Risiko an Fehleranfälligkeit und Unstimmigkeiten, insbesondere aufgrund von größeren Datenverlusten. Um etwaige fehlerbehaftete Daten bestmöglich von den Analysen auszuschließen, wurde ein umfangreiches und aufwendig geprüftes Datenbereinigerungsverfahren in den Analyseprozess integriert. Dennoch lässt sich ein Restrisiko an nicht-eliminierten Fehlerdaten nicht gänzlich ausschließen. Außerdem basiert die bisherige **Datenauswertung** auf lediglich *einem* Ansatz. Trotz großer Sorgfalt ist es möglich, dass die Datenverarbeitung Optimierungspotenziale offenlässt. Es ist dabei in Betracht zu ziehen, die erarbeiteten Ergebnisse unter Entwicklung und Verwendung eines *anderweitigen* Quantifizierungsansatzes zu validieren.

Aufgrund einer unzureichenden Parametervielfalt (siehe Kapitel 4.2.4) war es bislang nicht möglich, eine **datenbasierte Identifikation der Betriebsmodi** „Hybrid-Zwangslademodus“ sowie „Elektrisch-Zwangslademodus“ vorzunehmen. Dieser Umstand ist für die Ergebnisse dieser Dissertationsschrift zwar vernachlässigbar, doch führt dieses Vorgehen vor allem zu einem aktuell höher ausgewiesenen Dieselkraftstoffverbrauch im Hybrid-Standardmodus, als sich dieser im realen Betrieb tatsächlich einstellen würde.

Die zur Verfügung gestellten Fahrzeugdaten haben es nicht erlaubt, die **Gewichtsdaten** der O-Lkw im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zu berücksichtigen. Dies könnte sich insbesondere auf die ermittelten Energieverbrauchswerte von O-Lkw auswirken. Bei den in dieser Dissertationsschrift dargestellten Ergebnissen handelt es sich um Durchschnittswerte über die sämtlich auswertbaren Kilometer der O-Lkw im ELISA-Forschungsprojekt, jedoch unabhängig des Gewichts der Zuladung. Erfahrungen im ELISA-Forschungsprojekt haben allerdings gezeigt, dass ein O-Lkw im Regelfall die Fahrt vom Betriebshof des Transportunternehmens zum Betriebshof des Kunden *mit Zuladung* zurücklegt. Zurückgekehrt wird mit einem *leeren Auflieger*. Gemittelt über den Betrachtungszeitraum darf folglich angenommen werden, dass die O-Lkw *etwa die Hälfte der ausgewerteten Distanz mit Zuladung, die andere Hälfte ohne Zuladung* zurückgelegt haben dürften. Das durchschnittlich zugrunde zulegende Gewicht des Frachtguts dürfte somit gut 13,5 Tonnen betragen.

## TECHNISCHE KONFIGURATION DER FÜR DIE ANALYSEN BETRACHTETEN O-LKW-GENERATION

Die durchgeführten Analysen und die dabei erarbeiteten **Ergebnisse sind nur zulässig für die Generation an O-Lkw, die den Analysen im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift zugrunde gelegt wurde.** Diese O-Lkw-Generation verfügt bislang über keine E-Maschine, die zuverlässig und unter *jedlichen* Bedingungen alleinig die Traktionsaufgabe des O-Lkws gewährleisten kann. Übersteigt die geforderte Leistungsanforderung aus dem Betrieb des O-Lkws die Leistungsfähigkeit der E-Maschine, schaltet sich der Verbrennungsmotor zu. Die O-Lkw-Generation, die im Rahmen dieser Dissertationsschrift analysiert wurde, eignet sich damit noch nicht für eine Produktion in größerer Stückzahl und zur umfassenden Einführung am Markt.

## TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW

Es wurden **Treibhausgasemissionseinsparungen im Verlauf des ELISA-Forschungsprojekts** durch den Einsatz von O-Lkw, statt dem Einsatz konventioneller Diesel-Lkw, von – je nach Strommix – in Summe 88 bis 105 Tonnen CO<sub>2e</sub> (Well-to-Wheel) berechnet (basierend auf 643.096 Kilometern). Vor dem Hintergrund, dass knapp 30 % der durch die O-Lkw zurückgelegten Distanz nicht ausgewertet werden konnten<sup>66</sup>, dürften die tatsächlichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen im ELISA-Feldversuch jedoch um einen ähnlichen Prozentsatz höher sein. Die tatsächlichen Treibhausgasemissionseinsparungen dürften infolge einer linearen Extrapolation, je nach Strommix, zwischen 113 bis 135 Tonnen CO<sub>2e</sub> (Well-to-Wheel) betragen. Generell wurden im ELISA-Forschungsprojekt etwa 14 bis 17 % an Treibhausgasemissionen im Vergleich zu einem konventionellen Diesel-Lkw eingespart. **Diese Einsparung ist allerdings beschränkt auf die vorherrschenden Rahmenbedingungen im ELISA-Forschungsprojekt.** So hat sich beispielsweise gezeigt, dass ein O-Lkw während einer Fahrt von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B lediglich zu einem Anteil von 4,33 % über eine Verbindung des Pantographen zur Oberleitungsanlage verfügte. Ein höherer Anteil einer Verbindung zwischen Pantographen und Oberleitungsanlage führt zu entsprechend höheren Treibhausgasemissionseinsparungen. Es steht folglich außer Frage, dass der Einsatz von O-Lkw nur in einem strategisch sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen zu entsprechenden Treibhausgasemissionseinsparungen führen können. Aufgrund des verbauten elektrischen Energiespeichers wird dabei jedoch keine durchgehende Elektrifizierung notwendig sein.

Damit das eHighway-System sein volles Potenzial entfalten kann, wird es ferner erforderlich sein, dass die dem eHighway-System **zur Verfügung gestellte elektrische Energie zu 100 % aus erneuerbaren Energien** stammt. Die Vorgaben gemäß des Klimaschutzplans 2050 (BMUB 2016), in welchem festgehalten wurde, dass elektrische Energie grundsätzlich aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden muss, sind unweigerlich zu erfüllen (BMUB 2016, S. 14-15). Im Jahr 2015 lag der Anteil von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor in Deutschland allerdings bei lediglich sechs Prozent. An dieser Stelle ist ein deutlicher Handlungsbedarf zu identifizieren. Es verwundert nicht, dass auf europäischer Ebene deshalb nachhaltige Bemühungen angestellt werden, um den Energiemix von seiner Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu lösen (Europäische Kommission 2020b, S. 10-11). Doch bedarf es hierbei einer nachdrücklich zügigen Transformation: Die Realisierung eines klimafreundlichen Straßengüterverkehrs wird nur dann gelingen können, wenn im gleichen Zuge eine entsprechend treibhausgasneutrale Energieversorgung gewährleistet werden kann. Wird die elektrische Energie nicht regenerativ hergestellt, kann dies dazu führen, dass die Elektromobilität im Vergleich zum Status quo schlussendlich sogar höhere Treibhausgasemissionen verursacht. Als Beispiel ließ sich nach SCHREINER (2017, S. 44-45) in Vergangenheit China anführen: Aufgrund eines hohen Anteils an Kohlekraftwerken, die zur Erzeugung elektrischer Energie beitrugen, war der chinesische Strommix durch verhältnismäßig

<sup>66</sup> Konkret konnten 28,90 % der insgesamt zurückgelegten Distanz der O-Lkw im ELISA-Forschungsprojekt nicht ausgewertet werden.

---

hohe Treibhausgasemissionen charakterisiert – sogar höhere Treibhausgasemissionen als solche, die bei der Verwendung fossiler Kraftstoffe in Fahrzeugen zu bilanzieren wären (Schreiner 2017, S. 44-45). Ein solches Szenario gilt es unweigerlich zu vermeiden. Festhalten lässt sich also, dass das eHighway-System technisch und operativ insoweit ausgereift ist, dass ein treibhausgasneutraler Einsatz möglich wäre. Die Politik ist nun gefragt, sämtliche Maßnahmen zu ergreifen, um eine adäquate Energieversorgung auf Basis ausschließlich regenerativ erzeugter elektrischer Energie zu garantieren.

Im Kontext der Untersuchung von Treibhausgasemissionen ist weiterhin zu beachten, dass sich die Analysen im Rahmen dieser Dissertationsschrift **auf Deutschland beschränken**. Als Eingangsdaten für die Berechnungen der Treibhausgasemissionen sowie des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw wurden entsprechend Treibhausgasemissionsfaktoren für deutsche Strommixvarianten herangezogen. Grundsätzlich sind die ermittelten Ergebnisse auch auf andere Länder übertragbar – bei deutlich abweichenden Treibhausgasemissionsfaktoren für die betrachteten Strommixvarianten sind diese im Vorhinein jedoch entsprechend der länderspezifischen Gegebenheiten anzupassen.

Die ermittelten Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen sowie zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw inkludieren ausschließlich solche Treibhausgasemissionen beziehungsweise -reduktionspotenziale, die aus dem Betrieb der O-Lkw resultieren.<sup>67</sup> Nicht berücksichtigt werden solche Treibhausgase, die infolge der Errichtung der Oberleitungsanlage(n), des Fahrzeugbaus oder der passiven Schutzeinrichtung emittiert wurden. Solche Treibhausgasemissionen können im Rahmen eines **Life Cycle Assessments** bewertet werden. Die durch diese Dissertationsschrift nun bereitgestellten Realdaten bieten eine essenzielle Grundlage für die fundierte Durchführung solcher Ökobilanzierungen.

#### **SKALIERUNGS- UND VERGLEICHSRECHNER „ERSPARNIS“**

Dass ein treibhausgasneutraler Einsatz von O-Lkw möglich ist, wurde infolge der Anwendung des entwickelten Skalierungs- und Vergleichsrechners „ERSparnis“ ermittelt. Mithilfe von „ERSparnis“ konnte nachgewiesen werden, dass Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von O-Lkw in Höhe von bis zu 100 % möglich sein können. Die Belastbarkeit der ermittelten **Ergebnisse mit „ERSparnis“** ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt allerdings noch einzuschränken. Der entwickelte Berechnungsalgorithmus für „ERSparnis“ setzt allgemein voraus, dass die Leistungsfähigkeit der E-Maschine zu jeder Zeit genügt, um den O-Lkw alleinig zuverlässig anzutreiben. Dies entspricht (bislang) – wie vorstehend erläutert – jedoch (noch) nicht den tatsächlichen Gegebenheiten. Vor allem der elektrische Betrieb des O-Lkws auf Streckenabschnitten, auf denen keine Oberleitungsanlage zur Nutzung bereitsteht, wird gegenwärtig vorteilhafter dargestellt, als dies in der Realität der Fall wäre. Sofern die Leistungsanforderung an den Antriebsstrang die Leistungsfähigkeit der E-Maschine übersteigt, schaltet sich bei elektrischer Fahrt der Verbrennungsmotor zu. Dieser Umstand wird durch „ERSparnis“ vernachlässigt. Eine Berücksichtigung des Zuschaltens des Verbrennungsmotors wäre in „ERSparnis“ für die aktuelle Generation an O-Lkw nicht möglich gewesen: Es ist nicht bekannt, wann und unter welchen Voraussetzungen die Leistungselektronik beziehungsweise das Energiemanagement des O-Lkws ein Zuschalten des Verbrennungsmotors anfordert. Dies muss zwingend vernachlässigt werden, da „ERSparnis“ ansonsten gänzlich falsche Ergebnisse hervorbringen würde. In diesem Fall müsste davon ausgegangen werden, dass der O-Lkw zu keiner Zeit elektrisch operieren könnte. Dies würde dazu führen, dass das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw deutlich unterschätzt werden würde. „ERSparnis“ wurde an dieser Stelle bereits mit Blick auf die zukünftigen O-Lkw-Generationen entwickelt, die aufgrund ihrer zu erwartenden leistungsstärkeren E-Maschine über die Problematik einer zu leistungsschwachen E-Maschine nicht mehr verfügen sollten. Die bisher mit „ERSparnis“ ermittelten Ergebnisse müssen unter Berücksichtigung der vorstehenden Einschränkung für

---

<sup>67</sup> Einschließlich der Vorkettenprozesse bezüglich der Bereitstellung von Dieseldieselkraftstoff und elektrischer Energie.

---

die im Rahmen dieser Dissertationsschrift betrachteten O-Lkw-Generation zunächst korrekt interpretiert werden. Vor allem aber für weiterentwickelte O-Lkw-Generationen, die über eine entsprechend leistungsstarke E-Maschine verfügen, wird „ERSparnis“ sehr zuverlässige Ergebnisse prognostizieren können.

Grundsätzlich zeigt sich, dass „ERSparnis“ die Berechnung und Prognose stichhaltiger Zukunftsszenarien für O-Lkw durchaus ermöglicht. Die Anwendung von „ERSparnis“ kann es im Grundsatz erlauben, auf **weitere praktische Felderproben zu verzichten**. Für „ERSparnis“ zwingend erforderlich sind jedoch qualitätsgesicherte Eingangsdaten: je höher dabei die Qualität der Eingangsdaten, desto zutreffender die Skalierungs- und Vergleichsergebnisse – so beispielsweise auch SCHRAMM U. A. (2018, S. 3). Derzeit liegen lediglich qualitätsgesicherte Eingangsdaten zum O-Lkw der ersten Generation vor. Diese O-Lkw-Generation entspricht – den vorstehenden Erläuterungen folgend – technisch noch nicht einem solchen O-Lkw, wie sich dieser für eine Serienproduktion eignen würde. Die limitierenden Komponenten wurden bereits hinreichend dargelegt. Sobald allerdings stichhaltige Realdaten auch zu solch weiterentwickelten O-Lkw-Generationen vorliegen, kann „ERSparnis“ ein pragmatisches sowie kosteneinsparendes Substitut zu weiteren praktischen Felderproben darstellen.

#### **GESAMTPOTENZIAL DES EHIGHWAY-SYSTEMS ZUR REDUKTION VON TREIBHAUSGASEMISSIONEN**

Die erarbeiteten Ergebnisse im Rahmen der Dissertationsschrift zeigen, dass ein **Markthochlauf des eHighway-Systems** in naher Zukunft möglich erscheint. Die Auswertung von 643.096 Kilometer, die durch O-Lkw zurückgelegt wurden, hat offenbart, dass O-Lkw grundsätzlich einen technischen Reifegrad erreicht haben, der eine baldige Serienproduktion ermöglichen sollte. Diesbezüglich ist es von besonderem Interesse, ebenfalls kurz das **insgesamt mögliche Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial** infolge der Implementierung des eHighway-Systems zu adressieren.

Rund 23 % der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen werden gegenwärtig durch schwere Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen verursacht (Günther & Gniffke 2022, S. 24; BMUV 2022b, o. S.; BMU 2021, S. 36; Neuhausen u. a. 2020, S. 5). Ein strategisch sinnvolles Ausrollen des eHighway-Systems zielt entsprechend auf die Reduktion eben dieser 23 % der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor ab. Würde eine komplette Umstellung des schweren Straßengüterverkehrs auf das eHighway-System erfolgen, ließen sich unter idealen Voraussetzungen in Theorie – unter Vernachlässigung von Treibhausgasemissionen, die durch die Errichtung der Oberleitungsanlagen sowie durch die Herstellung der O-Lkw anfallen – also bis zu 38 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente jährlich einsparen<sup>68</sup>. Eine komplette Umstellung des Straßengüterverkehrs auf das eHighway-System ist jedoch weder zielführend, noch in der Praxis realisierbar. Doch bereits eine Umstellung von nur wenigen Hauptverkehrsachsen dürfte bereits beachtliche Treibhausgasemissionseinsparungen ermöglichen.

Aufgrund verhältnismäßig kurzer Haltedauern von Lastkraftwagen bei Transportunternehmen – meist lediglich zwischen drei bis fünf Jahre – erfolgt ein häufiger Fahrzeugwechsel. Hierdurch lassen sich alternative Antriebstechnologien einerseits schnell und andererseits in großem Umfang am Markt etablieren. Der schwere Straßengüterverkehr zeigt sich somit als ein Markt, dessen Transformation zu zügigen Einsparungen an Treibhausgasemissionen führen kann (BMVI 2020, S. 6; Hacker, Jöhrens, u. a. 2020, S. 7). Das Ausrollen des eHighway-Systems kann folglich nicht nur zu merklichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen führen; es wird zeitgleich sogar eine *zügige* Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor erlauben.

---

<sup>68</sup> Berechnet auf Basis des Referenzjahres 2019: 164 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Verkehrssektor multipliziert mit einem 23 %-igen Anteil schwerer Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen an den gesamten Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Das berechnete und in Theorie mögliche Einsparungspotenzial ist lediglich gültig für Treibhausgasemissionen, die aus dem Fahrzeugbetrieb resultieren.

---

## DISKUSSION WEITERER EFFEKTE IM ZUSAMMENHANG MIT EINER IMPLEMENTIERUNG DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Eine Implementierung des eHighway-Systems ermöglicht in Summe nicht nur eine rasche Einsparung an Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Zusätzlich wird es hierdurch möglich, die **Abhängigkeit von zu importierenden fossilen Energieträgern** zu reduzieren. In 2019 wurden 99,1 % der in Deutschland verwendeten Mineralöle importiert (BMW 2021). Dadurch, dass das eHighway-System auf dem Konzept einer elektrischen Energieversorgung basiert, werden Deutschlands Abhängigkeiten von anderweitigen Ländern deutlich reduziert.

Ohne Zweifel wird es darüber hinaus sinnvoll sein, auch eine **Verlagerung von Gütern des Straßengüterverkehrs auf die Schiene** ambitioniert voranzutreiben. Wird an dieser Stelle jedoch erneut die historische Entwicklung der Güterverkehrsleistung des Schienengüter- sowie des Straßengüterverkehrs betrachtet (siehe Kapitel 2.1.1), muss davon ausgegangen werden, dass umfassende Verlagerungen von der Straße auf die Schiene in naher Zukunft kaum realisierbar sein werden. Alleine vor dem Hintergrund der vorteilhaften Systemeigenschaften des Straßengüterverkehrs (siehe hierzu beispielsweise Substitutions-, Güterstruktur-, Logistik- oder auch Integrationseffekt in Kapitel 2.1.2), die denen des Schienengüterverkehrs überlegen sind, wird der Straßengüterverkehr auch in Zukunft eine besondere Bedeutung beibehalten. Dass es folglich also auch klimaverträglicher Antriebsoptionen für den Straßengüterverkehr bedarf, ist die logische Konsequenz. Das eHighway-System stellt eine solche klimaverträgliche Antriebsoption dar.

Es hat sich gezeigt, dass Klimaschutz keine alleinige Aufgabe von wenigen Ausgewählten sein kann. **Klimaschutz muss vielmehr gemeinschaftlich angegangen werden: national, europäisch und global.** So hält es auch die Europäische Union, die sich selbst in einer Art Vorreiterrolle sieht. Sie möchte mit ihrem ambitionierten Handeln auf weltweiter Bühne dazu ermuntern, Gleiches zu unternehmen. Insbesondere möchte die Europäische Union mit ihrem Handeln vorweisen, dass zielgerichteter Klimaschutz auch mit einer einhergehenden prosperierenden Wirtschaft gelingen kann (Europäische Kommission 2020b, S. 3; Europäische Kommission 2018, S. 5). Sie warnt aber auch davor, dass wenn nicht rechtzeitig ausreichende Maßnahmen zum Klimaschutz ergriffen werden, es zu weltweiten Spannungen kommen wird: Es werden sich Konflikte abzeichnen mit solchen Beteiligten, denen es aus verschiedenen Gründen nicht gelingen wird, in nachhaltige und zukunftsfähige Alternativen zu investieren und somit auf veraltete Technik angewiesen zu sein (Europäische Kommission 2021, S. 1; Europäische Kommission 2018, S. 2-3). Dies gilt es auch hinsichtlich einer Entscheidung zur Implementierung des eHighway-Systems zu berücksichtigen. Allgemein kann hierzu festgehalten werden: „Angesichts der europaweit verflochtenen Güterströme ist zu berücksichtigen, dass eine ausschließlich nationale Einsetzbarkeit die Erfolgsaussichten der jeweiligen alternativen Antriebstechnologien verringern kann.“ (BMVI 2020, S. 18) Im Umkehrschluss: **Das eHighway-System muss auch auf europäischer Ebene diskutiert werden.** Die nächsten Jahre werden diesbezüglich für den nationalen, europäischen und internationalen Straßengüterverkehr richtungsweisend sein und über Erfolg oder Misserfolg des eHighway-Systems mitentscheiden (Claes & Knezevic 2022, S. 35). Die in Deutschland voranschreitenden Entwicklungen werden gemäß CLAES & KNEZEVIC (2022) erheblich dazu beitragen, ob sich das eHighway-System langfristig und in großem Umfang am Markt etablieren können. Falls ja, ist es wahrscheinlich, dass auch andere Länder das eHighway-System in ihrem Straßenverkehrsnetz integrieren werden. Ähnlich spricht sich in einem vergleichbaren Zusammenhang auch QUASCHNING (2020) aus, der Deutschland generell eine Vorreiterrolle zuspricht: „Viele andere Industrieländer schauen gebannt auf Deutschland und ob es gelingt, die vollmundig verkündete Energiewende auch problemlos umzusetzen. Wenn wir [Deutschland] dabei Erfolg haben, wird sich dieser von selbst auf den Rest der Welt übertragen.“ (Quaschnig 2020, S. 110) QUASCHNING (2020) spricht sich weiterhin dafür aus, dass langfristig vor allem diese Länder profitieren werden, „die bei der Bekämpfung des Treib-



---

hauseffekts vorangehen und damit im eigenen Land zuerst die nötigen zukunftsfähigen Technologien einsetzen.“ (Quaschning 2020, S. 66) Mit der Implementierung des eHighway-Systems lässt sich hierbei ein wichtiger Beitrag für den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg Deutschlands realisieren – ohne die Notwendigkeit der Einführung von Verboten, Restriktionen, et cetera zur Gewährleistung des Einhaltens der Klimaschutzziele.

## ZWISCHENRESÜMEE

Die Überprüfung der Belastbarkeit der Quantifizierungsergebnisse hinsichtlich der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems zeigt auf, dass sich die erarbeiteten Ergebnisse durch eine **hohe Belastbarkeit** auszeichnen.

Zwar ist zunächst festzuhalten, dass die erarbeiteten Ergebnisse auf bislang lediglich fünf O-Lkw (allesamt Prototypen und damit von Natur aus anfällig für fehleranfällige Ergebnisse) basieren. Die Erfassung von über hundert verschiedenen Fahrzeugparametern erlaubte jedoch ein umfangreiches Bild über den Betrieb der O-Lkw zu gewinnen. Ein über mehrere Jahre gereiftes Datenauswertungsverfahren ermöglichte dabei zusätzlich, etwaige Fehler über die Zeit zu minimieren und auf ein möglichst geringes Maß zu beschränken. Vor allem das umfassende Datenbereinigungsverfahren, welches in den Analyseprozess inkludiert wurde, trägt dazu bei, weitestgehend fehlerfreie Resultate hervorzubringen. Als ein besonders wirksames Instrument zur Detektion und Eliminierung von fehlerhaften Eingangsdaten, aber auch von Fehlern im Datenauswertungsverfahren, hat sich die Untergliederung des Fahrzeugbetriebs in verschiedene Betriebsmodi herausgestellt. Diese Untergliederung erlaubt nicht nur die Ableitung von Aussagen und Rückschlüssen individuell für jeden Betriebsmodus und damit auch die Skalierung von Ergebnissen; gleichzeitig konnten hierdurch ad hoc-Fehler in der Datenauswertung identifiziert und unmittelbar behoben werden. Wurde beispielsweise in einem elektrischen Betriebsmodus ein Dieserverbrauch festgestellt, war unmittelbar ersichtlich, dass entweder die Eingangsdaten oder aber das aufgesetzte Datenauswertungsverfahren fehlerhaft sein müssen (denn: elektrischer Betriebsmodus = 0 Liter Dieseldieselkraftstoffverbrauch). Fast 650.000 ausgewertete Kilometer, gefahren im Realbetrieb durch die O-Lkw im ELISA-Forschungsprojekt, gepaart mit dem über mehrere Jahre gereiften Datenauswertungsverfahren, münden schließlich in Schlussfolgerungen mit hoher und belastbarer Ergebnisqualität.

Von besonderer Relevanz zeigt sich im Ergebnis der durchgeführten Analysen, dass erhebliche Einsparpotenziale ermittelt werden konnten – und das trotz deutlich limitierender Rahmenbedingungen in Folge des Versuchscharakters im ELISA-Forschungsprojekt: Weder die technische Konfiguration der betrachteten O-Lkw-Generation entspricht dabei bereits einem solchen Stand, wie sich dieser für eine Serienproduktion eignen würde; noch entspricht die Verfügbarkeit an Oberleitungsanlagen mit lediglich fünf elektrifizierten Kilometern je Fahrtrichtung einem Ausbaugrad, wie dieser für einen sinnvollen Betrieb von O-Lkw normalerweise erforderlich wäre. Dennoch war das Resultat positiv und es konnten beachtliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen nachgewiesen werden. Mit einem elektrifizierten Anteil durch Oberleitungsanlagen von nur 4,33 % war es den im ELISA-Forschungsprojekt betriebenen O-Lkw möglich, im Durchschnitt bereits rund 14 % bis 17 % an Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) gegenüber einem konventionellen Diesel-Lkw einzusparen. Eine Skalierung dieser Realdaten auf ein potenzielles Zukunftsszenario hat gezeigt: Verfügen O-Lkw über eine adäquat ausgelegte technische Konfiguration, steht ein sinnvoll ausgebautes Netz an Oberleitungsanlagen zur Verfügung und ist eine Energieversorgung sichergestellt, die auf 100 % Ökostrom basiert, sind Treibhausgasemissionseinsparungen resultierend aus dem Betrieb der O-Lkw in Höhe von bis zu 100 % nicht auszuschließen.

---

### 6.3 BELASTBARKEIT DES EXKURSES ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Die Ergebnisse des Exkurses zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems im Rahmen dieser Dissertationsschrift sind die bisher ersten ihrer Art in dem dargebotenen Detailgrad. Keine anderweitige Studie wurde bislang veröffentlicht, die basierend auf den Ergebnissen von über 752 befragten Personen zur Akzeptanz des eHighway-Systems in der Gesellschaft berichtet. Der Mehrwert dieser Ergebnisse ist essenziell, um das eHighway-System erfolgreich am Markt zu platzieren. Dennoch basieren diese Ergebnisse bisher **lediglich auf einem Exkurs**. Die Belastbarkeit der Ergebnisse entspricht der zugrunde gelegten Zielstellung sowie dem definierten Granularitätsanspruch (siehe Kapitel 5.1). Die Belastbarkeit dieser Ergebnisse ist jedoch vor diesem Hintergrund *des von Natur aus allgemeinerem Charakter eines Exkurses* stets entsprechend einzuordnen. Die Ergebnisse zur Betrachtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems sind dabei korrekt, können durch einen entsprechend höheren Ressourceneinsatz jedoch noch feingranularer differenziert werden. Anhand der nachfolgenden Ausführungen soll deshalb kritisch reflektiert werden, in welcher Hinsicht durch zukünftige Forschungsvorhaben die Belastbarkeit der Ergebnisse zunehmend gesteigert werden kann.

#### OPERATIONALISIERUNG DES BEGRIFFS „GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ DES EHIGHWAY-SYSTEMS“

Zunächst soll die **Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“** adressiert werden. Die Operationalisierung dieses Begriffs basiert im durchgeführten Exkurs auf den vier Untersuchungsbereichen

- *Befürchtungen des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System,*
- *Haltung des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem eHighway-System,*
- *Ausbauwunsch des Akzeptanzsubjekts bezüglich des eHighway-Systems sowie*
- *Bereitschaft des Akzeptanzsubjekts, Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen.*

Es handelt sich bei diesen vier Untersuchungsbereichen um wichtige, nicht aber um die einzigen Möglichkeiten, anhand derer die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft untersucht werden kann. Demzufolge ist es möglich und auch ratsam, die Untersuchungsbereiche im Rahmen zukünftiger Forschungsaktivitäten zu erweitern.

#### DEFINITION DER BETROFFENHEIT EINES AKZEPTANZSUBJEKTS VOM EHIGHWAY-SYSTEM

Im Rahmen des Exkurses wurde festgelegt, dass ein Akzeptanzsubjekt unter anderem dann als **vom eHighway-System betroffen** gilt, sofern das jeweilige Akzeptanzsubjekt seinen Wohnort in Hessen hat. Das eHighway-System befindet sich in Südhessen. Daher darf durchaus kritisch hinterfragt werden, inwiefern bei einer Person, die beispielsweise im nordhessischen Kassel wohnt, noch von einer hohen Betroffenheit bezüglich des eHighway-Systems ausgegangen werden kann und darf. Gemäß der Zielstellung des Exkurses genügt diese Granularität aus. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten diesbezüglich jedoch eine deutlich schärfere Einschränkung vornehmen und den räumlichen Einzugsbereich merklich verkleinern. Eine Möglichkeit zur Eingrenzung besteht beispielsweise darin, eine Person nur dann als vom eHighway-System betroffen zu bewerten, wenn diese im Raum Frankfurt am Main oder Darmstadt wohnt. Es wäre möglich, im Fragebogen durch die Abfrage von Postleitzahlen statt von Bundesländern eine entsprechend „betroffene“ Stichprobe zu generieren und basierend auf dieser Stichprobe aufbauende Analysen anzustellen.

#### DATENERHEBUNG ZUR QUANTIFIZIERUNG DER GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ

Zur Erhebung der Daten wurde auf eine **Gelegenheitsstichprobe** zurückgegriffen. Gelegenheitsstichproben basieren auf einer willkürlichen Auswahl und inkludieren vor allem solche Akzeptanzsubjekte, „die gerade zur Verfügung stehen oder leicht zugänglich sind“ (Döring 2022d, S. 307) – siehe hierzu

---

auch Kapitel 5.2.3. Aufgrund der willkürlichen Auswahl zählen Gelegenheitsstichproben zu solchen Stichproben, die dem Anspruch nach Repräsentativität am wenigsten gerecht werden können (Döring 2022d, S. 307-308). Für den Exkurs im Rahmen dieser Arbeit entsprach eine Gelegenheitsstichprobe dem definierten Granularitätsanspruch. Aufbauende Forschungsvorhaben sollten jedoch auf Stichproben zurückzugreifen, die zwar aufwendiger zu erheben sind, sich aber durch ein höheres Maß an Repräsentativität auszeichnen. Auch im Rahmen dieser Dissertationsschrift wurde unter anderem angedacht, eine Haushaltbefragung – angelehnt an eine Klumpenauswahl – in Darmstadt durchzuführen. Es wurde hierfür bereits ein Flyer zum Aufruf an der Umfrage erstellt. Aufgrund nicht vorgesehener Ressourcen im ELISA-Forschungsprojekt konnte eine Verteilung des Flyers schlussendlich jedoch nicht realisiert werden. Zukünftige Forschungsaktivitäten hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems können sich an dem erstellten Flyer orientieren (siehe Anhang, S. A53). Ferner könnte beispielsweise auch eine Vor-Ort-Befragung am Tank- und Rastplatz Gräfenhausen erfolgen, um vom eHighway-System betroffene Personen unmittelbar zu erreichen. Eine solche *direkte Befragung* war im Rahmen des Forschungsvorhabens, das dieser Dissertationsschrift zugrunde liegt, aufgrund der vorherrschenden Corona-Pandemie und den damit einhergehenden Kontaktbeschränkungen nicht möglich.

Darüber hinaus bedarf es auch einer Reflektion der erarbeiteten **Strategie zur Streuung** der Befragung. Als besonders wirksame Streuungskanäle haben sich einerseits die Platzierung der Befragung im Darmstädter Echo – also in der regionalen Presse – sowie andererseits im Radio herausgestellt. An den Tagen, an denen der Teilnahmeaufruf zur Befragung im Darmstädter Echo platziert war beziehungsweise über das Radio erfolgte, ließen sich besonders hohe Teilnahmezahlen an der Befragung feststellen. Dennoch muss an dieser Stelle festgehalten werden: In der Print-Ausgabe des Darmstädter-Echos wurde zum Verweis auf die Befragung eine recht lange und manuell aufwendig einzugebende Internetadresse abgedruckt, statt des Drucks eines zur Verfügung gestellten QR-Codes. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich zahlreiche potenziell Interessierte haben hiervon abschrecken lassen. Das Abbilden des QR-Codes hätte voraussichtlich die Teilnehmendenanzahl deutlich erhöht. Sollten in Zukunft weitere Akzeptanzbefragungen in der Gesellschaft durchgeführt werden, ist auf die Streuung und das Bewerben der Befragung besonderes Augenmerk zu legen.

Dass es im Allgemeinen bei der Streuung der Befragung weiterer Aufmerksamkeit bedarf, zeigt sich unter anderem auch bei Betrachtung der **demografischen Merkmale der an der Befragung teilgenommenen Personen**: Knapp drei Viertel der befragten Personen sind männlichen Geschlechts und rund zwei Drittel der befragten Personen verfügen über mindestens einen Hochschulabschluss. Es lässt sich an dieser Stelle eine ungleiche Verteilung erkennen. Für Folgeuntersuchungen sollte angestrebt werden, diesbezüglich eine ausgewogenere Zusammensetzung der Stichprobe zu realisieren.

Wird der **entworfene Fragebogen** fokussiert, zeigt sich, dass sich dieser hinsichtlich des Aufbaus und Inhalts grundsätzlich bewährt hat. Es gab eine äußerst geringe Abbruchquote. Auch konnte basierend auf dem Feedback der befragten Personen zu Frage 7.1 (Anmerkungen) abgeleitet werden, dass der Fragebogen zu keinen Verständnisproblemen bei den befragten Personen geführt hat. Dennoch sollte für Folgebefragungen geprüft werden, ob anderweitige Fragestellungen und inhaltliche Schwerpunkte vorliegen, die dem verwendeten Fragebogen zu ergänzen sind.

Ein besonderer Aspekt, der im Zusammenhang der Belastbarkeit der Ergebnisse Berücksichtigung finden sollte, ist die **Selbsteinschätzung der Akzeptanzsubjekte hinsichtlich ihres wahrgenommenen Informationsstands zum eHighway-System im Allgemeinen, beziehungsweise zur ELISA-eHighway-Teststrecke** im Speziellen. Im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse wurde davon ausgegangen, dass eine Person dann als über das eHighway-System informiert gilt, sobald diese die zugehörigen Fragen so bewertet hat, dass sich die befragte Person mindestens *weder gut, noch schlecht* (oder besser) informiert fühlt. Allerdings lässt sich an dieser Stelle schwer einschätzen, ab wann sich eine Person als

---

sehr gut, gut, teils, schlecht oder gar sehr schlecht informiert fühlt. Ferner stellt sich die Frage, ob eine Person, die sich selbst als sehr gut oder eher gut informiert fühlt, in der Realität auch tatsächlich sehr gut beziehungsweise eher gut informiert ist. Es ist möglich, dass Personen subjektiv empfinden, über das eHighway-System beziehungsweise die ELISA-eHighway-Teststrecke sehr gut, gut, et cetera informiert zu sein, dieses subjektive Empfinden aber nicht mit objektiver Zulässigkeit und Richtigkeit übereinstimmt: „Sich gut informiert fühlen“ ist nicht gleichzusetzen mit „objektiv auch gut informiert zu sein“. Es ist also nicht auszuschließen, dass Akzeptanzsubjekte ihren Informationsstand falsch eingeschätzt haben. Es sollte hierzu in Zukunft weiter konkretisiert werden und der Informationsstand durch aufbauende Fragen objektiv „überprüft“ werden.

Die Analyse der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems hat sich im Rahmen des Forschungsvorhabens dieser Dissertationsschrift rein auf eine quantitative Analyse gestützt. Neben einer standardisierten Online-Befragung eignen sich für zukünftige Forschungsaktivitäten im Zusammenhang der Analyse der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems darüber hinaus auch **anderweitige, gegebenenfalls auch qualitative Verfahren**. So ist es unter anderem möglich, quantitative und qualitative Erhebungsmethoden miteinander zu verknüpfen und einer quantitativen Forschung zunächst eine qualitative Forschung (zum Beispiel Expertengespräche) voranzustellen, wie dies unter anderem von MAYER (2013, S. 26-27 & S. 36) vorgeschlagen wird. Qualitative Erhebungsverfahren können dabei vor allem dienlich sein, um bislang verdeckte Zusammenhänge zu ergründen (zum Beispiel, um den *tatsächlichen Informationsstand eines Akzeptanzsubjekts zum eHighway-System* zu untersuchen).

#### **DATENAUSWERTUNG ZUR QUANTIFIZIERUNG DER GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ**

Hinsichtlich der **Auswertung der erhobenen Daten** wurden bisher keine unterschiedlichen Personas gebildet. Im Fokus des Forschungsvorhabens dieser Dissertationsschrift stand zunächst die zusammenfassende Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft. Ohne Zweifel ist es jedoch möglich und sicherlich auch mit weiterem Mehrwert verbunden, im Rahmen zukünftiger Forschungen unterschiedliche Personengruppen zu beleuchten. So ließen sich Unterscheidungen nach Geschlecht, Alter, Bildungsstand et cetera ergänzen; dies sollte Gegenstand der weiteren und aufbauenden eHighway-Forschung darstellen.

#### **ZWISCHENRESÜMEE**

Die Überprüfung der **Belastbarkeit des Exkurses zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** zeigt auf, dass die Belastbarkeit der Ergebnisse der zugrunde gelegten Zielstellung sowie dem definierten Granularitätsanspruch entspricht. **Die Ergebnisse sind korrekt**, können durch einen entsprechend höheren Ressourceneinsatz in aufbauenden Forschungsvorhaben jedoch sicherlich noch feingranularer differenziert werden.

Hierbei ist festzuhalten, dass die Operationalisierung des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ mit bislang vier Untersuchungsbereichen die Möglichkeit eröffnet, weitere Untersuchungsbereiche in die Akzeptanzuntersuchung zu inkludieren. Eine feingliedrigere Operationalisierung wird es erlauben, die Ergebnisgranularität und die Belastbarkeit der Ergebnisse weiter zu schärfen.

Ferner zeigt sich, dass die Definition von „Betroffenheit eines Akzeptanzsubjekts vom eHighway-System“ geschärft werden kann. Der im Rahmen des Exkurses verwendete Ansatz umfasst einen verhältnismäßig großzügigen Einzugsbereich (Hessen). Dieser Einzugsbereich – *ab wann ein Akzeptanzsubjekt vom eHighway-System betroffen gilt* – sollte in zukünftigen Forschungsvorhaben verkleinert werden.

Von besonderer Relevanz hinsichtlich der Belastbarkeit der Ergebnisse des Exkurses zeigt sich jedoch vor allem die Selbsteinschätzung der Akzeptanzsubjekte bezüglich ihres subjektiv empfundenen

---

Informationsstands zum eHighway-System beziehungsweise zur eHighway-Teststrecke in Hessen. Der Analyseansatz im Rahmen des Exkurses berücksichtigt bislang keine objektive Überprüfung, ob der subjektiv empfundene Informationsstand eines Akzeptanzsubjekts zum eHighway-System beziehungsweise zur eHighway-Teststrecke in Hessen auch unter objektiven Gesichtspunkten tatsächlich der Realität entspricht: „Sich gut informiert fühlen“ ist nicht gleichzusetzen mit „objektiv auch gut informiert zu sein“. Es ist nicht auszuschließen, dass Akzeptanzsubjekte ihren Informationsstand zum eHighway-System/zur eHighway-Teststrecke in Hessen falsch eingeschätzt haben. Der Einfluss des Informationsstands zum eHighway-System auf die Akzeptanz eines Akzeptanzsubjekts soll aus diesem Grund im nachfolgenden Kapitel nochmals exponiert betrachtet werden.

#### 6.4 DAS TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL IM DISKURS MIT DER GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Die vorstehend durchgeführte Überprüfung zur Belastbarkeit der Ergebnisse dieser Dissertationsschrift lässt den Rückschluss zu, dass eine **Diskrepanz zwischen dem in der Gesellschaft subjektiv wahrgenommenen und dem tatsächlich vorliegenden Potenzial des eHighway-Systems zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr vorliegen könnte**. Es konnte hierzu eruiert werden, dass in der Gesellschaft zwar grundsätzlich ein Bewusstsein für die Notwendigkeit von Klimaschutz, und dabei auch von Klimaschutzmaßnahmen im Straßengüterverkehr, vorliegt: Infolge der durchgeführten Akzeptanzbefragung zum eHighway-System in der Gesellschaft hat sich herausgestellt, dass sich annähernd alle der befragten Personen dafür aussprechen, dass

- ihnen Klimaschutz wichtig sei,
- Treibhausgasemissionen gesenkt werden müssen,
- der Verkehrssektor zum Klimaschutz wird beitragen müssen sowie
- es auch für den Straßengüterverkehr adäquater Lösungsansätze bedarf.

Doch trotz dieses Bewusstseins und des nachgewiesenen Potenzials zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr, findet das **eHighway-System bei einem großen Teil der Gesellschaft gegenwärtig keine Zustimmung**. Die Gründe hierfür können grundsätzlich vielfältig sein. Zur Analyse dieser Gründe soll im Rahmen dieser Dissertationsschrift vor allem die **Diffusionstheorie nach ROGERS (1983)** herangezogen werden.

Wie in Kapitel 5.2.2 bereits erläutert wurde, spricht sich ROGERS (1983, S. 247-251) dafür aus, dass sich Akzeptanzsubjekte in fünf verschiedene Stereotypen einteilen lassen:

- *Pioniere*,
- *frühe Adoptoren*,
- *frühe Mehrheit*,
- *späte Mehrheit* sowie
- *Nachzügler*.

Dieser Untergliederung liegt die Annahme zugrunde, dass zunächst lediglich wenige, dafür aber innovationsfreudige Akzeptanzsubjekte – die *Pioniere* – ein Akzeptanzobjekt akzeptieren. Die Pioniere streuen im Anschluss ihre Erfahrungen und Informationen zum betrachteten Akzeptanzobjekt – im vorliegenden Fall also dem eHighway-System – über ihre jeweils vorhandenen Kommunikationskanäle in ihre Netzwerke. Über diesen Streuungsprozess werden wiederum weitere Personengruppen erschlossen. Von diesen Personen, die über die Pioniere von dem Akzeptanzobjekt erfahren, zeigen sich in der Regel vor allem die sogenannten frühen Adoptoren dazu bereit, ein Akzeptanzobjekt zu akzeptieren. In weiterer Folge streuen nun nicht mehr nur die Pioniere ihre Erfahrungen und Informationen zum Akzeptanzobjekt in ihre Netzwerke, sondern zusätzlich auch die bereits erschlossenen Personen der



---

frühen Adoptoren. Es wird eine Art Schneeballeffekt ausgelöst, der sukzessive durch die Gesellschaft und die verschiedenen Stereotypen diffundiert, mit dem Ergebnis einer sich nach und nach erhöhenden Anzahl an Personen, die das Akzeptanzobjekt akzeptieren (Arnold & Klee 2016, S. 10-14). ARNOLD & KLEE (2016) bezeichnen diesen Prozess, angelehnt an die Ausführungen nach ROGERS (1983), auch als sogenannte *Diffusions- und Adoptionskurve* (siehe Abbildung 55).

Jedoch ist insbesondere die Stereotypengruppe der Pioniere in ihrer Anzahl deutlich beschränkt. ROGERS (1983, S. 247) geht davon aus, dass lediglich etwa 2,5 % einer zu betrachtenden Grundgesamtheit dieser Personengruppe zuzuordnen sind. Auch die Personengruppe der frühen Adoptoren ist mit einem Anteil von circa 13,5 % noch deutlich limitiert. Das Gros der Gesellschaft wird erst bei Herantragen der Informationen und Erfahrungswerte zum Akzeptanzobjekt an die frühe Mehrheit beziehungsweise an die späte Mehrheit erreicht. Dies bedeutet in der Praxis: **Der Diffusions- und Adoptionsprozess zu einem Akzeptanzobjekt benötigt Zeit.**

Dass das eHighway-System zum gegenwärtigen Zeitpunkt bei einem nicht unerheblichen Teil der Gesellschaft auf Ablehnung stößt, könnte gemäß der Diffusionstheorie nach ROGERS (1983) mit dem Aspekt erklärt werden, dass die Streuung von Informationen und Erfahrungswerten aktuell schlichtweg noch am Beginn der Diffusions- und Adoptionskurve stehen könnte. Aufgrund seiner noch jungen Entwicklungshistorie befindet sich das eHighway-System gemäß der Diffusionstheorie nach ROGERS (1983) in einem Stadium, in dem dieses – als Innovation am Markt – vorrangig zunächst von Pionieren und gegebenenfalls ersten Personen der frühen Adoptoren akzeptiert wurde. Es lässt sich die These ableiten, dass sich die Akzeptanz des eHighway-Systems aufgrund des innovativen Charakters des eHighway-Systems bislang vorrangig also auf diese beiden Personengruppen beschränkt.

Zur Überprüfung dieser These lassen sich insbesondere die Ergebnisse der beiden im Rahmen der Akzeptanzbefragung gestellten Fragen 6.1<sup>69</sup> und 6.2<sup>70</sup> betrachten. Es kann hierzu folgender Rückschluss gezogen werden: Nur 15 % der vom eHighway-System betroffenen sowie über das eHighway-System (subjektiv) informierten Personen (Stichprobe n<sub>3</sub>) nehmen bislang ein (eher) positives Meinungsbild zum eHighway-System in der Gesellschaft wahr. 21 % der befragten Personen in der Stichprobe n<sub>3</sub> würden ihre Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen versuchen. Dieser Anteil an Personen, deren Verhaltensakzeptanz gegenüber dem eHighway-System positiv ausgeprägt ist, entspricht in etwa dem kumulierten Anteil der nach ROGERS (1983) definierten Stereotypen „Pioniere“ und „frühe Adoptoren“ (2,5 % + 13,5 % = 16 %).

Darüber hinaus ist festzuhalten, dass das eHighway-System tatsächlich auf einer verhältnismäßig jungen Entwicklungshistorie fußt. Erste Forschungsaktivitäten lassen sich auf das Forschungsprojekt ENUBA im Jahr 2010 zurückführen – siehe Kapitel 2.2.5. Das Gros der Forschungsaktivitäten findet allerdings erst ab dem Jahr 2016 seinen Ursprung (siehe Tabelle 26 im Anhang, S. A52). Die öffentlich-wahrnehmbaren Erprobungen des eHighway-Systems im frei zugänglichen Verkehrsraum begannen in 2018 mit dem Bau der zum hessischen Forschungsprojekt ELISA zugehörigen eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 (Riegelhuth u. a. 2020, S. 29).

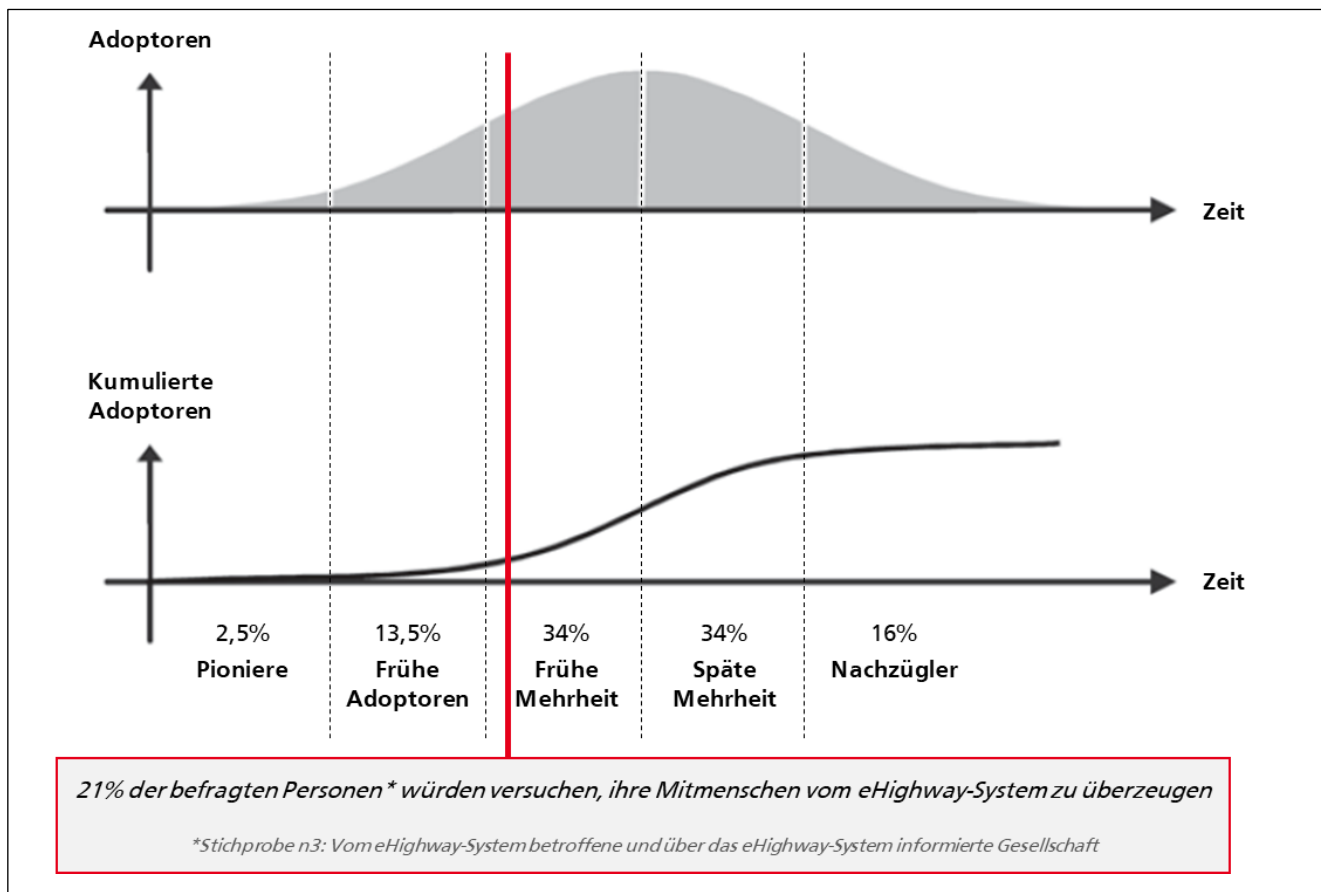
**Es erscheint möglich, dass aufgrund des verhältnismäßig noch neuen und innovativen Charakters des eHighway-Systems die Diffusion von Informationen zum eHighway-System und der hierdurch beeinflusste Adoptionsprozess weiterer Zeit bedarf.**

Nachfolgende Abbildung 55 zeigt den Diffusions- und Adoptionsprozess, adaptiert auf die angenommene Diffusion zum Highway-System, nochmals grafisch auf.

---

<sup>69</sup> Frage 6.1: Im Gespräch mit Ihren Mitmenschen: Wie ist das Meinungsbild zum eHighway-System?

<sup>70</sup> Frage 6.2: Im Gespräch mit Ihren Mitmenschen: Versuchen Sie/Würden Sie versuchen, andere vom eHighway-System zu überzeugen?



**Abbildung 55: Diffusions- und Adoptionskurve**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an ROGERS (1983, S. 247) und ARNOLD & KLEE (2016, S. 14))

Neben der benötigten Zeit, die es zum Diffundieren von Informationen und Erfahrungswerten zu einem Akzeptanzobjekt durch die Gesellschaft bedarf, sind es außerdem die **Art und Qualität der über die Kommunikationskanäle gestreuten Informationen**, die schlussendlich über Akzeptanz oder Ablehnung durch ein Akzeptanzsubjekt entscheiden.

Es ist durch die Theorie nach ROGERS (1983) bekannt, dass der Entscheidung eines Akzeptanzsubjekts über Akzeptanz oder Ablehnung eines Akzeptanzobjekts eine Wissens- sowie eine Überzeugungsphase vorangestellt sind – siehe Kapitel 5.2.2. In diesen beiden Phasen eignet sich ein Akzeptanzsubjekt Wissen über das Akzeptanzobjekt an. Ist dieser Wissensaneignungsprozess gestört, beispielsweise durch fehlende oder falsche Informationen, beeinflusst dies die Entscheidung des Akzeptanzsubjekts.

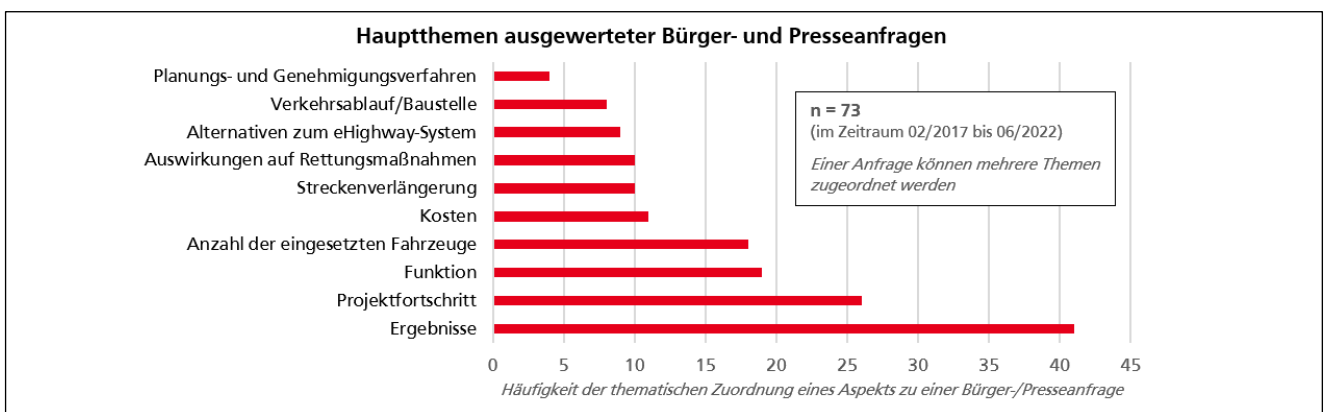
Die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung in der Gesellschaft haben diesbezüglich dargelegt, dass ein großes Bewusstsein seitens der Gesellschaft für die Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen – auch im Straßengüterverkehr – vorliegt. Das eHighway-System knüpft an diese Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen an und kann diesen nachweislich sehr gerecht werden. Unter logischen Gesichtspunkten sollte also davon ausgegangen werden dürfen, dass das eHighway-System auf eine hohe Zustimmung in der Gesellschaft stoßen sollte. Dadurch, dass das eHighway-System trotz seines nachgewiesenen Potenzials aber von einem nicht zu vernachlässigen Anteil der Gesellschaft abgelehnt wird, ist die Vermutung anzustellen, dass unter Umständen die Wissens- und Überzeugungsphase der Akzeptanzsubjekte durch fehlende oder falsche Informationen beeinträchtigt sein könnte – dass also eine Diskrepanz in der Gesellschaft vorliegen könnte zwischen dem tatsächlichen und dem wahrgenommenen Potenzial, welches das eHighway-System zu leisten vermag. Zwar wurden im konstruierten Fragebogen entsprechende Fragen berücksichtigt, die den Informationsstand der Akzeptanzsubjekte zum eHighway-System im Allgemeinen beziehungsweise zur ELISA-eHighway-Teststrecke im Speziellen in Erfahrung

bringen sollten. Doch handelt es sich bei den gestellten Fragen vor allem um eine subjektive Selbsteinschätzung der befragten Personen. Nur, weil eine befragte Person dabei angibt, sich über etwas sehr gut, gut, teils, et cetera informiert zu fühlen, muss dies unter objektiven Gesichtspunkten nicht zwangsläufig auch der Realität entsprechen. Es kann folglich nicht ausgeschlossen werden, dass „sich gut informiert fühlen“ ohne Weiteres gleichzusetzen ist mit „objektiv auch gut informiert zu sein“, wie vorstehend bereits erläutert wurde.

Infolge der Auswertung der durchgeführten Akzeptanzbefragung in der Gesellschaft zum eHighway-System liegen **keine gesicherten Erkenntnisse zum tatsächlichen Informationsstand der befragten Personen zum eHighway-System** vor. Es ist möglich, dass sich die befragten Personen zwar subjektiv über das eHighway-System sehr gut, gut, et cetera informiert fühlen, dieser Informationsstand aber nicht mit dem tatsächlich korrekten Informationsstand zum eHighway-System übereinstimmt.

**Liegen einem Akzeptanzsubjekt fehlende oder gar falsche Informationen zum Akzeptanzobjekt vor, führt dies zu einer beeinflussten Entscheidung über Annahme oder Ablehnung des Akzeptanzobjekts.** Sind einem Akzeptanzsubjekt beispielsweise die Eigenschaften des Akzeptanzobjekts nicht bekannt, wird sich nur schwer eine fundierte Entscheidung treffen lassen. Die Informationen, die ein Akzeptanzsubjekt dabei zu einem Akzeptanzobjekt erhält, sind Resultat der vorhandenen Kommunikationskanäle. Fehlt es an diesen, führt dies in weiterer Folge zu fehlenden Informationen. Fehlt es an Informationen, ist der Entscheidungsprozess gehemmt.

Dass in der Gesellschaft ein Missstand an gesicherten Informationen zu den tatsächlichen Potenzialen des eHighway-Systems vorliegen könnte, ist nicht auszuschließen. Im Verlauf des ELISA-Forschungsprojektes wurden bislang verhältnismäßig wenige Informationen zu den (Zwischen-) Ergebnissen des Testbetriebs der O-Lkw der allgemeinen Öffentlichkeit zugänglich gemacht. **Aktive Öffentlichkeitsarbeit wurde bisweilen nur in geringem Umfang praktiziert.** Informationen, die zum ELISA-Forschungsprojekt beziehungsweise zum eHighway-System veröffentlicht wurden, waren bislang vor allem vorgesehen für das nationale wie internationale Fachpublikum. Dass an dieser Stelle ein Nachholbedarf vorliegt, wird bekräftigt infolge der Auswertung der dem ELISA-Forschungsprojekt zugegangenen Bürger- und Presseanfragen. In 41 von in Summe 73 zugegangenen Anfragen wurde explizit nach aktuellen Ergebnissen zum ELISA-Forschungsprojekt gefragt (siehe Abbildung 56).



**Abbildung 56: Hauptthemen der dem ELISA-Forschungsprojekt zugegangenen Bürger- und Presseanfragen**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Daten zur Verfügung gestellt durch DIE AUTOBAHN GMBH DES BUNDES)

Die These, dass es in der Gesellschaft an gesicherten Informationen zum Potenzial des eHighway-Systems fehlen könnte, wird zusätzlich bekräftigt durch die Berichterstattung des Hessischen Rundfunks beziehungsweise der Tagesschau Ende Juli/Anfang August 2023 (Nathusius 2023; hessenschau 2023a; hessenschau 2023b). Hier wird beispielsweise berichtet, dass das eHighway-System ein Potenzial zur Einsparung von Treibhausgasemissionen in Höhe von 16 bis 21 Prozent, im Idealfall in Höhe von 22

Prozent ermöglichen könne (Nathusius 2023). Diese Aussage ist zwar insofern als korrekt einzustufen, dass es sich dabei um das Einsparpotenzial unter Berücksichtigung der limitierten Rahmenbedingungen im ELISA-Forschungsprojekt handelt. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Berichterstattung an dieser Stelle außenvor lässt, dass die im ELISA-Forschungsprojekt vorherrschenden Rahmenbedingungen alles andere als das Gesamtpotenzial des eHighway-Systems widerspiegeln. Es wird völlig außer Acht gelassen, dass das in der Berichterstattung genannte Einsparpotenzial auf einem Oberleitungsanteil von weniger als fünf Prozent basiert und ein entsprechender Ausbau von Oberleitungsanlagen zu überproportionalen Verbesserungen führt. Der Einsatz von O-Lkw kann schlussendlich sogar Einsparungen an Treibhausgasemissionen gegenüber dem Einsatz von konventionellen Diesel-Lkw in Höhe von bis zu 100 % ermöglichen (siehe Kapitel 4). Die Berichterstattung ist als unzureichend zu bewerten. Es muss an dieser Stelle festgehalten werden:

**Es diffundieren nicht nur zu wenige, es diffundieren gleichzeitig auch falsche Informationen zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems durch die Gesellschaft.**

Dass es an Informationen zum O-Lkw fehlt, zeigt nicht zuletzt beispielsweise auch ein simpler Vergleich der Anzahl an Google-Suchergebnissen einerseits zum annähernd serienreif-entwickelten O-Lkw, andererseits zum Wasserstoff-Lkw, der über einen deutlich geringeren Technologiereifegrad verfügt: Eine Google-Suchanfrage zum Begriff „Oberleitungs-Lkw“ führt zu etwa 48.300 Suchergebnissen (Google Ireland Limited 2023a, o. S.), eine Google-Suchanfrage zum Begriff „Wasserstoff-Lkw“ hingegen zu etwa 2.720.000 Suchergebnissen (Google Ireland Limited 2023b, o. S.) – dies entspricht **rund 5.500 % mehr Suchergebnisse für Wasserstoff-Lkw, als für Oberleitungs-Lkw.**<sup>71</sup>

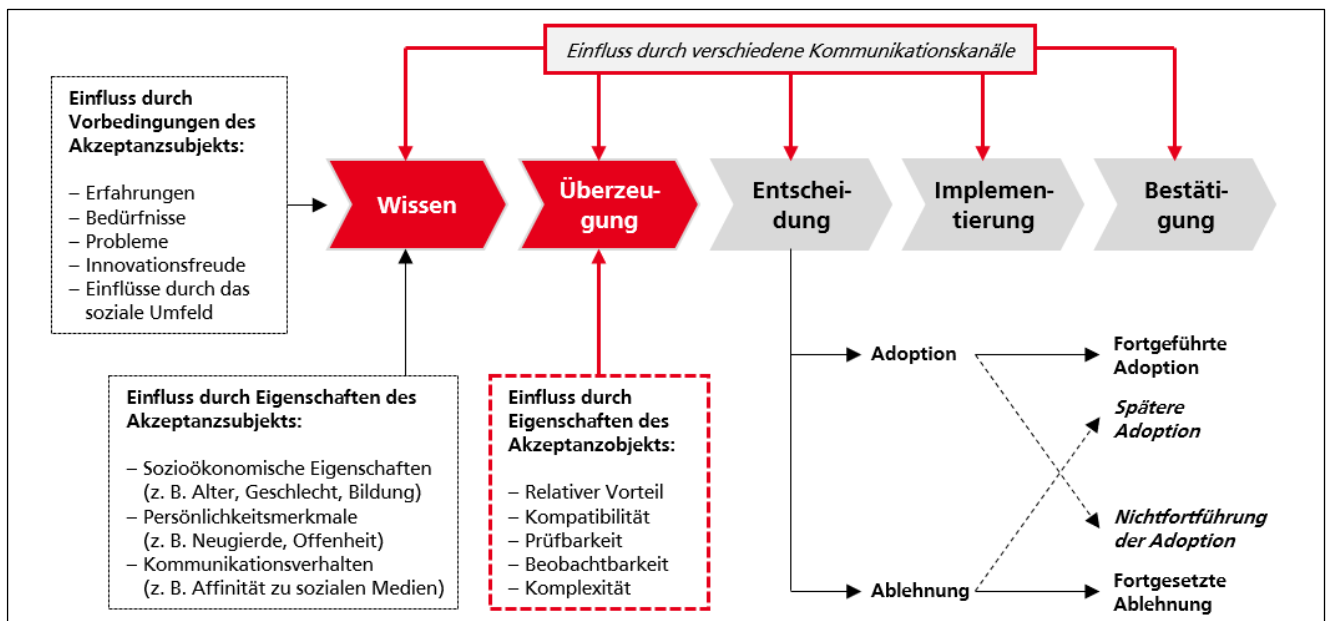
Werden die vorstehend dargestellten Aspekte in der Diffusionstheorie nach ROGERS (1983) verankert, so ist festzustellen, dass es hinsichtlich der **Verbreitung von Informationen und Erfahrungswerten zum eHighway-System Nachholbedarf** gibt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt dürften maximal die Stereotypengruppen der Pioniere und der frühen Adoptoren erschlossen sein. Die Anzahl an Kommunikationskanälen, über welche Informationen und Erfahrungswerte zum eHighway-System an die weiteren Stereotypengruppen verbreitet werden, ist damit bisweilen deutlich limitiert. Soll die gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems gesteigert werden, wird es einer Fokussierung auf die Erschließung weiterer Kommunikationskanäle bedürfen.

Eine ganz essenzielle Voraussetzung wird hierbei jedoch sein, die Verfügbarkeit von Informationen zum eHighway-System sowie zu den Ergebnissen aus den Testbetrieben in Deutschland deutlich zu erhöhen. Ohne die Eigenschaften des Akzeptanzobjekts zu kennen – oder sogar fehlerhafte Informationen vorliegen zu haben – wird sich ein Akzeptanzsubjekt von einem Akzeptanzobjekt nicht überzeugen lassen.

**Fehlende oder gar falsche Informationen beeinflussen die Entscheidung eines Akzeptanzsubjekts über Akzeptanz oder Ablehnung des eHighway-Systems erheblich.**

Um die vorstehenden Ausführungen zu verdeutlichen, soll abschließend nochmals der Innovations-Entscheidungsprozess nach ROGERS (1983) betrachtet werden: Die ersten beiden Phasen – die Wissens- sowie die Überzeugungsphase – beeinflussen die Entscheidung eines Akzeptanzsubjekts über Annahme oder Ablehnung eines Akzeptanzobjekts. Inwieweit sich ein Akzeptanzsubjekt Wissen aneignet, wird unter anderem beeinflusst durch vorhandene Kommunikationskanäle. Fehlt es an diesen Kommunikationskanälen, erreichen die für die Entscheidung notwendigen Informationen nicht das Akzeptanzsubjekt. Diffundieren sogar falsche Informationen über die Kommunikationskanäle an das Akzeptanzsubjekt, wird dies den Entscheidungsprozess erheblich beeinflussen (siehe Abbildung 57).

<sup>71</sup> Stand 14.10.2023.



**Abbildung 57: Adaptierter Innovations-Entscheidungsprozess nach ROGERS (1983)**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an ROGERS (1983, S. 165) und ARNOLD & KLEE (2016, S. 11))

## ZWISCHENRESÜMEE

Die vorstehenden Ausführungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass zum aktuellen Zeitpunkt

1. die **limitierte Anzahl an Kommunikationskanälen**, über welche Informationen zum eHighway-System an Akzeptanzsubjekte gestreut werden, sowie
2. eine **mangelnde Verfügbarkeit an wissenschaftlich fundierten Informationen** zu den tatsächlichen Eigenschaften sowie zum Potenzial des eHighway-Systems

Gründe für die bisher noch ausbaufähige Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft darstellen können. Weitere Hintergründe zur Ablehnung des eHighway-Systems bei einem nicht unerheblichen Anteil der Gesellschaft gilt es durch aufbauende Forschungsaktivitäten zu ergründen. Es darf im Ergebnis festgehalten werden, dass die bislang vergleichsweise geringe Informationsvielfalt zum eHighway-System, auf welche seitens der Öffentlichkeit zugegriffen werden kann, zu einer ablehnenden Haltung gegenüber dem eHighway-System führt. So werden sich Akzeptanzsubjekte ohne die Verfügbarkeit und Kenntnis adäquater und fundierter Informationen – und damit verbunden auch mit einem Fehlen der Kenntnis über die tatsächlichen Eigenschaften eines Akzeptanzobjekts – nicht von diesem überzeugen lassen. Trotz des nachgewiesenen Potenzials des eHighway-Systems zur Treibhausgasemissionsreduktion wird dieses solange nichts nützen, wenn nicht zeitgleich erheblich die Informationslandschaft zu diesem verbessert wird. So auch ROGERS (1983), der in einem ähnlichen Kontext zusammenfasst: „One reason why there is so much interest in the diffusion of innovations is because getting a new idea adopted, even when it has obvious advantages, is often very difficult.”<sup>72</sup> (Rogers 1983, S. 1)

## 6.5 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUR STEIGERUNG DER ZUKUNFTSFÄHIGKEIT DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Basierend auf den durchgeführten Analysen im Rahmen des Forschungsvorhabens, das dieser Dissertationsschrift zugrunde liegt, lassen sich die nachfolgenden Handlungsempfehlungen ableiten. Diese unterteilen sich – analog zum Aufbau der Arbeit – in die beiden Zielbereiche:

<sup>72</sup> Aus dem Englischen übersetzt ins Deutsche: *Ein Grund für das große Interesse an der Diffusion von Innovationen ist, dass es oft sehr schwierig ist, eine neue Idee durchzusetzen, selbst wenn sie offensichtliche Vorteile hat.*



- Handlungsempfehlungen im Zusammenhang des **Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials** des eHighway-Systems (siehe Kapitel 6.5.1) und
- Handlungsempfehlungen zur Optimierung der **Ergebnisgranularität zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** sowie zu ersten Handlungsansätzen zur **Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz** des eHighway-Systems (siehe Kapitel 6.5.2).

### 6.5.1 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUM HEBEN DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS DES EHIGHWAY-SYSTEMS

Die nachfolgenden Ausführungen adressieren speziell **Handlungsempfehlungen, deren Realisierung zum Heben des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials des eHighway-Systems beitragen** werden (siehe Tabelle 18). Die aufgestellten Handlungsempfehlungen sind dabei strukturiert in die Bereiche:

- Datenerfassung und Datenverarbeitung;
- Technische Konfiguration von O-Lkw;
- Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial durch O-Lkw;
- Skalierungs- und Vergleichsrechner „ERSparnis“;
- Übergreifende Effekte im Zusammenhang einer Implementierung des eHighway-Systems.

**Tabelle 18: Handlungsempfehlungen im Zusammenhang des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials des eHighway-Systems** (Quelle: Eigene Darstellung)

#### Handlungsempfehlungen zur Datenerfassung und Datenverarbeitung

- Es sind **weitere Testfahrzeuge** zur Vergrößerung der Datenbasis in den Feldversuch mitaufzunehmen.
- Die Verarbeitung der erhobenen Fahrzeugdaten ist durch Entwicklung und Anwendung eines **weiteren Quantifizierungsansatzes** zu manifestieren.
- Die Datenbasis ist insofern zu erweitern, dass eine datenbasierte Identifikation der Betriebsmodi **„Hybrid-Zwangslademodus“** sowie **„Elektrisch-Zwangslademodus“** vorgenommen werden kann. Hierfür sind die beiden Parameter **„Hybrid Forced Charging Mode Request“** sowie **„Electric Drive Mode Request“** in das durch die Datenlogger erhobene Datenset zu integrieren.
- Eine Analyse der **Gewichtsdaten** von O-Lkw ist in den Analyseansatz zu integrieren.

#### Handlungsempfehlung zur technischen Konfiguration von O-Lkw

- O-Lkw sind hinsichtlich ihrer technischen Konfiguration zu verbessern. Sie bedürfen einer **leistungsstarken E-Maschine**, die zu jedem Zeitpunkt einen rein-elektrischen Betrieb des O-Lkws gewährleisten kann. Hierdurch wird es möglich sein, in Zukunft auf den Einbau eines **Verbrennungsmotors zu verzichten**. Dies spart nicht nur Dieselkraftstoff und senkt die Treibhausgasemissionen, es vereinfacht zusätzlich auch die Komplexität des Antriebsstrangs des O-Lkws. Ergänzend ist eine **Plug-in-Ladefunktion** vorzusehen. In Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Oberleitungsanlagen ist ein **sinnvoll dimensionierter elektrischer Energiespeicher** zu berücksichtigen.<sup>73</sup>

#### Handlungsempfehlungen zur Realisierung von Treibhausgasemissionseinsparungen durch O-Lkw

- Soll das eHighway-System sein volles Potenzial entfalten, ist ein **strategisch sinnvolles Netz an Oberleitungsanlagen** zu errichten. Hierfür sollten die bereits vorhandenen Studien zum Markthochlauf des eHighway-Systems Berücksichtigung finden. Im gleichen Zuge ist sicherzustellen, die Technik der O-Lkw insoweit zu verbessern, wie dies im Vorstehenden bereits dargelegt wurde (Einbau leistungsstarker E-Maschine, bedarfsgerecht ausgelegter elektrischer Energiespeicher, Berücksichtigung einer Plug-in-Ladefunktion).
- Die **Energieversorgung der Oberleitungsanlagen mit 100 % Ökostrom** ist sicherzustellen. Es sind auf politischer Ebene die notwendigen Voraussetzungen hierfür zu schaffen.

<sup>73</sup> Entsprechende Weiterentwicklungen von O-Lkw sind bereits in der Erprobung (u. a. im voranschreitenden ELISA-Forschungsprojekt).

- Sollten Ergebnisse dieser Dissertationsschrift hinsichtlich der Treibhausgasemissionen von O-Lkw beziehungsweise des -reduktionspotenzials **auf andere Länder übertragen** werden, ist sicherzustellen, die zugrundeliegenden Treibhausgasemissionsfaktoren im Vorhinein anzupassen.
- Aufbauend auf den im Rahmen dieser Dissertationsschrift zur Verfügung gestellten Daten ist ein **gesamtheitliches Life Cycle Assessment** für das Gesamtsystem „eHighway“ durchzuführen.
- Eine volle Entfaltung des Potenzials des eHighway-Systems wird eine grenzüberschreitende Interoperabilität erfordern. Auf politischer Ebene sollte sich dafür eingesetzt werden, das **eHighway-System als europäisches System** zu etablieren.
- Vor dem Hintergrund des nachgewiesenen Potenzials zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr, ist das **eHighway-System am Markt zu etablieren**. Aufgrund kurzer Haltedauern von Lastkraftwagen bei Transportunternehmen wird ein zügiges Ausrollen des eHighway-Systems zu zügigen Einsparungen an Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor führen.

#### **Handlungsempfehlung zum Skalierungs- und Vergleichsrechner „ERSparnis“**

- **Weitere praktische Felderproben zum eHighway-System** sollten vor dem Hintergrund eines angemessenen Kosten-/Nutzenverhältnisses vermieden werden. Stattdessen sollte auf **Simulationen und Modellrechner** – wie beispielsweise der im Rahmen dieser Dissertationsschrift entwickelte Skalierungs- und Vergleichsrechner „ERSparnis“ – zurückgegriffen werden. Weitere praktische Felderproben sind nur dann anzustreben, sollten sich merkliche Änderungen in den technischen Rahmenbedingungen (zum Beispiel bei den eingesetzten O-Lkw) abzeichnen.

#### **Handlungsempfehlungen zu übergreifenden Effekten im Zusammenhang einer großflächigen Implementierung des eHighway-Systems**

- Vor dem Hintergrund bestehender **Abhängigkeiten von Importen fossiler Energieträger** wird empfohlen, das eHighway-System auszubauen.
- Trotz eines Ausbaus des eHighway-Systems wird nachdrücklich angeraten, ambitioniert eine **Verlagerung möglichst vieler Güter von der Straße auf die Schiene** zu realisieren.
- Zur **Realisierung von Wettbewerbsvorteilen** – Deutschland befindet sich aufgrund der umfangreichen Felderproben des eHighway-Systems in den vergangenen Jahren in einer Vorreiterrolle – wird ein **zügiges Handeln seitens der Politik** empfohlen.

### **6.5.2 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM ZUSAMMENHANG DES EXKURSES ZUR GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS**

Die nachfolgenden Ausführungen adressieren speziell **Handlungsempfehlungen im Zusammenhang des Exkurses zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems**. Die Umsetzung der abgeleiteten Handlungsempfehlungen dient

- einerseits der **Verbesserung der Ergebnisgranularität** bezüglich Analysen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems.
- Andererseits werden erste Handlungsansätze aufgestellt, die zu einer **Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** führen können (siehe Tabelle 19).

**Tabelle 19: Handlungsempfehlungen im Zusammenhang der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

#### **Handlungsempfehlung zur Verbesserung der Ergebnisgranularität**

- Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten **die Definition, ab wann ein Akzeptanzsubjekt als vom eHighway-System betroffen gilt, verschärfen**.
- Statt einer Gelegenheitsstichprobe sollte auf **repräsentativere Stichprobenmodelle** zurückgegriffen werden (beispielsweise Klumpenauswahl). Hierfür kann auf den im Anhang (S. A53) zur Verfügung gestellten Flyer zurückgegriffen werden. Ferner sollte eine Vor-Ort-Befragung in unmittelbarer Umgebung einer Oberleitungsanlage in Erwägung gezogen werden.

- **Zusätzliche Untersuchungsbereiche zur Operationalisierung** des Begriffs „Gesellschaftliche Akzeptanz des eHighway-Systems“ sind in aufbauenden Forschungsvorhaben zu inkludieren.
- Hinsichtlich der **Streuungsstrategie** ist sicherzustellen, dass teilnahmewilligen Personen eine Teilnahme an der Befragung unkompliziert ermöglicht sowie andererseits die korrekte Zielgruppe sicher erreicht wird.
- Es sollte besonderes Augenmerk darauf gerichtet werden, eine ausgewogene Verteilung hinsichtlich der **demografischen Merkmale** der an der Befragung teilnehmenden Personen zu generieren. Bei Bedarf ist angemessen nachzustreuen.
- Der im Rahmen dieser Dissertationsschrift **entworfene Fragebogen** zur quantitativen Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems kann für aufbauende Forschungsvorhaben wiederverwendet werden. Der Fragebogen ist hierfür jedoch im Vorhinein auf inhaltliche Vollständigkeit zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren sowie zu ergänzen (insbesondere sofern hinsichtlich der Operationalisierung des Akzeptanzbegriffes eine Erweiterung/Anpassung erfolgt).
- Zukünftige quantitative Untersuchungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems sollten eine objektive **Überprüfung des Informationsstands der befragten Personen** berücksichtigen. Hierbei ist sicherzustellen, dass es sich dabei nicht lediglich um eine subjektive Selbsteinschätzung des Akzeptanzsubjekts handelt, sondern dass eine tatsächliche Überprüfung des Informationsstands zum eHighway-System durch Verwendung geeigneter Fragen erfolgt.
- Für zukünftige Untersuchungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems sollte in Erwägung gezogen werden, inwieweit **qualitative Forschungsansätze** zur Analyse der Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft eine sinnvolle Ergänzung zu quantitativen Forschungsansätzen darstellen können.
- Für die Auswertung der quantitativ erhobenen Daten zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems sollte in aufbauenden Forschungsvorhaben angedacht werden, **verschiedene Personas** zu definieren. Hierdurch wird sich die Möglichkeit eröffnen, gegebenenfalls Unterschiede im Antwortverhalten verschiedener homogener Personengruppen zu identifizieren.

### **Handlungsempfehlungen für erste Handlungsansätze zur Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems**

- Soll das eHighway-System auf eine breite Akzeptanz in der Gesellschaft stoßen, so wird es einer **erheblichen Steigerung an aktiver Öffentlichkeitsarbeit für das eHighway-System** bedürfen. Sollen Akzeptanzsubjekte vom eHighway-System überzeugt werden, ist es zwingend erforderlich, dass die Eigenschaften des Akzeptanzobjekts – also die des eHighway-Systems – mindestens transparent zugänglich gemacht, besser jedoch aktiv „vermarktet“ werden. Von besonderer Relevanz ist dabei die **zügige Erschließung der Pioniere sowie der frühen Adoptoren**, die als meinungsführende Personen als essenzielle Multiplikatoren zur Diffusion der relevanten Informationen dienen werden. Es **bedarf unverzüglich einer umfassenden Informationskampagne**. Mögliche erste Themenbereiche, auf die eine solche Informationskampagne fokussieren kann, werden nachfolgend zusammengestellt.
- Es ist unerlässlich, auf das nunmehr **nachgewiesene Potenzial des eHighway-Systems zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr aktiv hinzuweisen**. Es muss dabei vermieden werden, sich lediglich auf die Einsparungen im ELISA-Forschungsprojekt zu fokussieren, was bereits mehrfach zu Fehlinterpretationen geführt hat (vergleiche hierzu zum Beispiel die ungenügende und einseitige Berichterstattung Ende Juli/Anfang August 2023 durch NATHUSIUS (2023) oder HESSENSCHAU (2023B; 2023A)). **Es ist das Gesamtpotenzial des eHighway-Systems zu kommunizieren**, nicht das derzeit erreichte Potenzial in einem deutlich limitierten Feldversuch.
- Im Rahmen einer Informationskampagne ist darauf hinzuweisen, dass **das eHighway-System ab sofort dazu in der Lage ist, die Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr massiv zu reduzieren**. Es steht im unmittelbaren Einklang mit den ambitionierten nationalen, europäischen sowie internationalen Klimaschutzzielen. Das eHighway-System kann es ermöglichen, Klimaneutralität im Straßengüterverkehr bis 2045 Realität werden zu lassen.
- Eine Informationskampagne zum eHighway-System sollte auf die **Notwendigkeit des sinnvollen und möglichst effizienten Einsatzes des kostbaren Guts „Ökostrom“** aufmerksam machen. Hierbei muss deutlich werden, dass mit der gleichen Menge an Ökostrom, die für den Betrieb von O-Lkw erforderlich ist, lediglich eine erheblich geringere Anzahl beispielsweise an Wasserstoff-Lkw oder mit synthetischen Kraftstoffen betriebene Lkw betrieben werden können. Ohne einen weiteren massiven Ausbau von

---

Windkraftanlagen u. ä. ist ein flächendeckender und klimaneutraler Einsatz von Wasserstoff-Lkw oder mit synthetischen Kraftstoffen betriebener Lkw in naher Zukunft unwahrscheinlich.

- Im Rahmen einer Informationskampagne sollte darauf hingewiesen werden, dass durch ein zügiges Implementieren des eHighway-Systems und den damit verbundenen Einsparungen an Treibhausgasemissionen **Restriktionen im, aber auch außerhalb des Verkehrssektors vermieden oder zumindest abgeschwächt werden können**. Zeichnet sich nicht bald ein immenser Rückgang der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor ab, erscheinen harsche Restriktionen – nicht nur im Güter-, sondern auch im (privaten) Personenverkehr (und darüber hinaus) – alles andere als unwahrscheinlich. Gelingt es nicht, die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu senken, kann dies beispielsweise sicherlich in einer stärkeren Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises resultieren. In diesem Zusammenhang ebenfalls denkbar ist, dass die hieraus resultierenden Transportkostensteigerungen sich unmittelbar auch auf Endverbraucherpreise auswirken werden. Sollte sich ein Rückgang der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nicht zeitnah realisieren lassen, werden – als weiteres Beispiel von vielen – auf politischer Ebene sicherlich unter anderem auch Fahrverbote diskutiert werden müssen.
- Im Rahmen einer Informationskampagne ist darauf hinzuweisen, dass **eine Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene sinnvoll und konsequent zu verfolgen ist**. Es muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass eine umfassende **Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene deutliche Grenzen aufweist und nicht die alleinige Lösung zum Erreichen der Klimaschutzziele darstellen wird**. Selbst wenn es gelingen würde, die Güterverkehrsleistung der Schiene zu verdoppeln, ohne, dass zeitgleich das Gesamtaufkommen wächst, verblieben noch immer mehr als 50 % der gesamten Güterverkehrsleistung auf der Straße. Nicht zu vernachlässigen ist hierbei, dass ein Ausbau der Schienengüterverkehrsleistung eine erhebliche Flächeninanspruchnahme durch den Bedarf neuer Infrastruktur erfordert. Neue Trassen sind zu errichten, deren Planung und Realisierung unweigerlich zu Konfliktpunkten mit Anwohnerinnen und Anwohnern führen wird. Auch wenn ein Ausbau der Schieneninfrastruktur sinnvoll ist, wird sich auch dieser nicht ohne erhebliche Herausforderungen realisieren lassen. In diesem Zusammenhang muss deutlich herausgestellt werden, dass das eHighway-System lediglich in die bereits vorhandene Straßeninfrastruktur integriert wird. Es werden durch die Errichtung der Oberleitungsmasten im seitlichen Straßenraum keine neuen Flächen in Anspruch genommen. Auch ist es möglich, aus ästhetischen Gründen insbesondere in dicht besiedelten Gebieten auf die Errichtung einer eHighway-Oberleitungsanlage zu verzichten, da O-Lkw durch ihren elektrischen Energiespeicher ohne Weiteres auch auf nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten operieren können. Grundsätzlich ist deutlich zu kommunizieren, dass das **eHighway-System keine Konkurrenz zum Schienengüterverkehr darstellt – es ist vielmehr ein zusätzlich notwendiger Baustein, um einen klimaneutralen Verkehrssektor überhaupt erst Realität werden zu lassen**.
- Insbesondere im Zusammenhang einer potenziellen Flächeninanspruchnahme muss im Rahmen einer Informationskampagne klar herausgestellt werden, dass das **eHighway-System dazu beitragen kann, die bereits heute angespannte Parksituation auf Tank- und Rastplätzen nicht zusätzlich zu verschärfen**. O-Lkw bedürfen neben der Oberleitungsanlage nicht zwingend einer zusätzlichen stationären Ladeinfrastruktur. Werden beispielsweise für E-Lkw in regelmäßigen Abständen stationäre Ladepunkte benötigt, erfordert deren Errichtung meist eine Flächeninanspruchnahme zu Lasten der Anzahl der zur Verfügung stehenden Lkw-Stellplätze auf Tank- und Rastplätzen. O-Lkw bedürfen keiner solchen Infrastruktur.

---

## 6.6 ZWISCHENFAZIT

Das vorstehende Kapitel war der Diskussion der Ergebnisse sowie der Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Zukunftsfähigkeit des eHighway-Systems gewidmet. Von besonderem Interesse war in diesem Zusammenhang eine **Untersuchung der identifizierten Diskrepanz** zwischen

- dem nachgewiesenen **Potenzial des eHighway-Systems**, in merklichem Umfang **Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr einsparen** zu können, sowie
- dem nicht unerheblichen Anteil an Personen in der Gesellschaft, die das eHighway-System bislang nicht akzeptieren – trotz des identifizierten Bewusstseins, dass es auch für den Straßengüterverkehr effektiver Lösungsansätze zur Treibhausgasemissionsreduktion bedarf.

---

Zur Untersuchung dieser Diskrepanz wurde zunächst die **Belastbarkeit der Quantifizierungsergebnisse hinsichtlich der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems** geprüft. Im Ergebnis ist eine hohe Belastbarkeit festzuhalten: Die Erfassung von über hundert verschiedenen Parametern aus dem Realbetrieb von O-Lkw, ein über mehrere Jahre gereifter und erprobter Quantifizierungsansatz sowie die Integration eines sukzessiv entwickelten Datenbereinigungsverfahrens haben es erlaubt, fundierte Ergebnisse zum realisierbaren Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial durch O-Lkw zu erarbeiten.

Auch die Belastbarkeit **der durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des Exkurses zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems** wurde reflektiert. Die Belastbarkeit der Ergebnisse entspricht dabei dem zugrunde gelegten Anspruch an Granularität und Detailtiefe eines Exkurses: Die Ergebnisse sind korrekt, können durch einen entsprechend höheren Ressourceneinsatz in Zukunft jedoch noch feingranularer differenziert werden. Als interessantes Spannungsfeld hat sich in diesem Zusammenhang jedoch die **Selbsteinschätzung der Akzeptanzsubjekte bezüglich ihres subjektiv empfundenen Informationsstands** zum eHighway-System beziehungsweise zur eHighway-Teststrecke in Hessen herausgestellt: Der Analyseansatz im Exkurs zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems berücksichtigt bislang keine objektive Überprüfung, ob der subjektiv empfundene Informationsstand eines Akzeptanzsubjekts zum eHighway-System/zur eHighway-Teststrecke in Hessen auch unter objektiven Gesichtspunkten tatsächlich der Realität entspricht. Es ist somit nicht auszuschließen, dass Akzeptanzsubjekte ihren Informationsstand zum eHighway-System/zur eHighway-Teststrecke in Hessen falsch eingeschätzt haben. Gibt eine Person an, sich über das eHighway sehr gut informiert zu fühlen, kann diese Angabe bislang nicht unabhängig überprüft werden. Die grundlegende Aussage, dass das eHighway-System von einem nicht unerheblichen Anteil der Gesellschaft abgelehnt wird, bleibt hiervon jedoch unberührt. Eine aufbauende Analyse zu den Ablehnungsgründen des eHighway-Systems lässt die Schlussfolgerungen zu, dass zum aktuellen Zeitpunkt unter anderem

1. die **limitierte Anzahl an Kommunikationskanälen**, über welche Informationen zum eHighway-System an Akzeptanzsubjekte gestreut werden, sowie
2. eine **mangelnde Verfügbarkeit von wissenschaftlich fundierten Informationen** zu den tatsächlichen Eigenschaften sowie zum möglichen Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems

Gründe für die bisher geringe Akzeptanz des eHighway-Systems in der Gesellschaft darstellen können.

Zum einen erscheint es möglich, dass aufgrund der vergleichsweise noch jungen Entwicklungsgeschichte des eHighway-Systems wissenschaftlich fundierte Informationen zum tatsächlichen Potenzial des eHighway-Systems bislang nur bedingt durch die Gesellschaft diffundiert sein könnten. **Der Akzeptanzbildungsprozess bedarf unter Umständen schlichtweg weiterer Zeit.**

Zum anderen ist festzuhalten, dass die (frei zugängliche) Verfügbarkeit an gesicherten Informationen zum eHighway-System bis heute<sup>74</sup> zu sehr limitiert ist: Im Verlauf des ELISA-Forschungsprojektes wurden bisweilen verhältnismäßig wenige Informationen zu den (Zwischen-)Ergebnissen des Testbetriebs der O-Lkw der allgemeinen Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Bislang wurde zu wenig aktive Öffentlichkeitsarbeit zum eHighway-System praktiziert. Es diffundieren dabei nicht nur zu wenige, es diffundieren gleichzeitig auch falsche Informationen zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems durch die Gesellschaft. Fehlende oder gar falsche Informationen beeinflussen die Entscheidung eines Akzeptanzsubjekts über Akzeptanz oder Ablehnung des eHighway-Systems erheblich. **Es bedarf unverzüglich einer erheblichen Intensivierung der Öffentlichkeitsarbeit zum eHighway-System, soll dieses langfristig erfolgreich am Markt etabliert werden.**

---

<sup>74</sup> Anfang August 2023.



---

Ohne die Eigenschaften eines Akzeptanzobjekts zu kennen oder gar fehlerhafte Informationen zu diesem vorliegen zu haben, wird sich ein Akzeptanzsubjekt von einem Akzeptanzobjekt nur selten überzeugen lassen. Eine bislang limitierte Informationsbereitstellung zu den (Zwischen-) Ergebnissen und dem nunmehr nachgewiesenen Potenzial des eHighway-Systems führt zu einer Ablehnung des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft.

---

## 7. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

---

Das letzte Kapitel der Dissertationsschrift ist der Darlegung prägnanter Schlussbetrachtungen gewidmet. Neben einem zusammenfassenden Fazit wird ergänzend auf den weiteren Forschungsbedarf zur voranschreitenden Evaluation des eHighway-Systems hingewiesen.

### 7.1 FAZIT

Das durchgeführte Forschungsvorhaben im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift hat sich intensiv mit der **Forschungsfrage** auseinandergesetzt, wie das eHighway-System konkret dazu beitragen kann, dass Deutschland seine gesetzten Klimaschutzziele erreichen können. Zur Untersuchung der Forschungsfrage wurden im Wesentlichen zwei inhaltliche Schwerpunkte definiert: Soll das eHighway-System erfolgreich zum Erreichen der verabschiedeten Klimaschutzziele beitragen, muss dieses

- einerseits eine merkliche **Reduktion von Treibhausgasemissionen** nachweislich zulassen und
- andererseits auf eine **hohe gesellschaftliche Akzeptanz** stoßen.

Basierend auf 643.096 umfassend analysierten Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs einerseits, sowie auf 752 ausgewerteten Fragebögen einer Gesellschaftsbefragung zum eHighway-System andererseits, lässt das durchgeführte Forschungsvorhaben die nachfolgenden, ganz wesentlichen Kernaussagen zu.

1

**Ein O-Lkw operiert in verschiedenen Betriebsmodi, determiniert durch das Zusammenspiel der Komponenten des Antriebsstrangs sowie der externen Energieversorgung über die Oberleitungsanlage. Die Betriebsmodi können dabei eindeutig voneinander abgegrenzt werden und somit das Betriebsverhalten eines O-Lkws (auch datenbasiert) exakt wiedergeben.**

Die Fahrt eines O-Lkws von einem Ausgangsort A zu einem Zielort B sollte in sieben Betriebsmodi unterteilt werden (auch als „6+1“ Betriebsmodi bezeichnet). Zu unterscheiden sind einerseits die drei hybriden Betriebsmodi *Hybrid-Standardmodus*, *Hybrid-Zwangslademodus* und *Hybrid-Oberleitungsmodus*. Andererseits ist zwischen den drei elektrischen Betriebsmodi *Elektrisch-Standardmodus*, *Elektrisch-Zwangsmodus* und *Elektrisch-Oberleitungsmodus* zu differenzieren. Der Übergang eines Betriebsmodus zu einem anderen wird als *Übergangsmodus* bezeichnet. Durch das charakteristische Zusammenspiel der Komponenten des Antriebsstrangs eines O-Lkws (Verbrennungsmotor, E-Maschine, elektrischer Energiespeicher und Pantograph) sowie der externen Energieversorgung über die Oberleitungsanlage, schließen sich die definierten Betriebsmodi dabei gegenseitig aus: Sie können eindeutig voneinander abgegrenzt werden – auch datenbasiert.

2

**Entsprechend des Betriebsmodus eines O-Lkws ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse, jeweils charakterisiert durch betriebsmodus-individuelle Energieverbrauchskennwerte. Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist dabei insbesondere abhängig von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine sowie vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken.**

Entsprechend des Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws und hieraus resultierend auch betriebsmodus-individuelle Energieverbrauchskennwerte. **Grundsätzlich ist es möglich, dass ein O-Lkw gänzlich ohne Dieselkraftstoffverbrauch operieren kann** – dies ist bei Fahrt in sämtlichen elektrischen Betriebsmodi der Fall. Erforderlich hierfür ist jedoch eine ausreichend leistungsstarke E-Maschine, über die die aktuelle O-Lkw-Generation (noch) nicht verfügt. Kann ein O-Lkw elektrische Energie aus einer Oberleitungsanlage beziehen, lassen sich merkliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch feststellen: Einerseits wird der Dieselkraftstoffverbrauch erheblich, teils vollständig gesenkt; andererseits kann zusätzlich elektrische Energie zur Steigerung der elektrischen Reichweite auf nachgelagerten Streckenabschnitten ohne Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage

aufgenommen werden. Der gesamte Energieverbrauch eines O-Lkws über ein zu betrachtendes Intervall ist dabei schlussendlich abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken. Je höher dieser Anteil ist, desto mehr Dieselkraftstoff kann eingespart werden.

**3 Die aus dem Fahrzeugbetrieb resultierenden Treibhausgasemissionen können durch den Einsatz von O-Lkw um bis zu 100 % gesenkt werden.**

Der Einsatz von O-Lkw erlaubt **messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen** im Straßengüterverkehr: Einsparungen an aus dem Fahrzeugbetrieb resultierenden Treibhausgasemissionen in Höhe von bis zu 100 % sind möglich. Voraussetzung hierfür ist, dass O-Lkw in einem sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen operieren, die externe elektrische Energieversorgung zu 100 % mit Ökostrom erfolgt und der O-Lkw über eine ausreichend leistungsfähige E-Maschine sowie einen sinnvoll dimensionierten elektrischen Energiespeicher verfügt. Soll auch die Distanz vom Startpunkt einer Fahrt bis zum Erreichen eines mit einer Oberleitungsanlage elektrifizierten Streckenabschnitts vollelektrisch zurückgelegt werden, stellt zusätzlich eine Plug-in-Ladefunktion eine sinnvolle Ergänzung der technischen Konfiguration des O-Lkws dar. Mit einem Oberleitungsanteil von weniger als fünf Prozent (Bedingungen, die derzeit im ELISA-Forschungsprojekt vorliegen), kann ein O-Lkw bereits zwischen 14 % und 17 % an Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel) einsparen. Ein Ausbau von Oberleitungsanlagen, so dass der Anteil der elektrifizierten Strecken an der Gesamtfahrtstrecke steigt, führt zu entsprechenden Verbesserungen. Dennoch ist kein durchgehendes Netz an Oberleitungsanlagen notwendig, da sich die elektrische Energie im elektrischen Energiespeicher strategisch klug einsetzen lässt. Insgesamt zeigen die erarbeiteten Ergebnisse, dass O-Lkw durchaus dazu beitragen können, die Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr merklich zu reduzieren. Unter Wahrung der vorstehend genannten Voraussetzungen lassen sich sogar Treibhausgasemissionseinsparungen in Höhe von bis zu 100 % realisieren.

**4 Ein großer Anteil der Gesellschaft (>80 %) ist sich bewusst, dass es an Lösungsansätzen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr bedarf. Trotz nachgewiesenem Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial wird ein Ausbau des eHighway-Systems dennoch von rund der Hälfte der im Rahmen einer standardisierten Befragung mittels Online-Fragebogen konsultierten Personen abgelehnt (n=752).**

**Rund die Hälfte der durch eine standardisierte Befragung (n=752) konsultierten Personen in der Gesellschaft spricht sich dafür aus, dass das eHighway-System nicht ausgebaut werden soll.** Es zeigt sich, dass grundsätzlich zwar durchaus ein Bewusstsein in der Gesellschaft dafür vorliegt, dass der Klimawandel ein ernstzunehmendes Problem darstellt und dass Treibhausgasemissionen reduziert werden müssen. Auch konnte eruiert werden, dass Klimaschutzmaßnahmen sowohl im Verkehrssektor im Allgemeinen, als auch im Straßengüterverkehr im Speziellen von über 80 % der befragten Personen als notwendig erachtet werden. Eine Elektrifizierung von Lkw, in welcher Rubrik auch das eHighway-System zu verorten ist, hält jedoch nur knapp die Hälfte der befragten Personen für eine geeignete Möglichkeit zur Emissionsreduzierung. Bezüglich des eHighway-Systems im Speziellen stellt sich heraus, dass

- erstens über ein Drittel der befragten Personen Befürchtungen gegenüber dem eHighway-System hegen (vor allem hinsichtlich einer Beeinträchtigung von Rettungseinsätzen, gefolgt von Befürchtungen bezüglich einer Beeinträchtigung des Landschaftsbilds oder Zeitverlusten aufgrund von Instandhaltungsarbeiten an der Oberleitungsanlage),
- zweitens knapp die Hälfte der befragten Personen eine negative Haltung gegenüber dem eHighway-System einnimmt,
- drittens fast zwei Drittel der befragten Personen nicht dazu bereit sind, ihre Mitmenschen vom eHighway-System in einem Gespräch zu überzeugen und
- viertens rund die Hälfte der befragten Personen sich dafür ausspricht, dass sie nicht wünschen, dass das eHighway-System in Zukunft weiter ausgebaut wird.

**Es liegt eine Diskrepanz zwischen dem in der Gesellschaft subjektiv wahrgenommenen und dem tatsächlichen Potenzial des eHighway-Systems zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr vor.**

Die Ergebnisse der Dissertationsschrift lassen den Rückschluss zu, dass eine **Diskrepanz zwischen dem in der Gesellschaft subjektiv wahrgenommenen und dem tatsächlich möglichen Potenzial des eHighway-Systems** zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr vorliegt. Auf Seiten der Gesellschaft ist man sich – basierend auf der durchgeführten Online-Befragung – durchaus bewusst, dass es Lösungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr bedarf. Dass das eHighway-System dieser Anforderung gerecht wird, wurde mit der vorliegenden Dissertationsschrift nunmehr nachgewiesen. Dennoch wird ein weiterer Ausbau des eHighway-Systems derzeit von rund der Hälfte der befragten Personen abgelehnt. Es konnte diesbezüglich eruiert werden, dass zum aktuellen Zeitpunkt

1. die **limitierte Anzahl an Kommunikationskanälen**, über welche Informationen zum eHighway-System an Akzeptanzsubjekte gestreut werden, sowie
2. eine **mangelnde Verfügbarkeit von wissenschaftlich fundierten Informationen** zu den tatsächlichen Eigenschaften sowie zum möglichen Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems

Gründe für die bisher geringe Akzeptanz des eHighway-Systems in der Gesellschaft darstellen können.

Zum einen erscheint es möglich, dass aufgrund der vergleichsweise noch jungen Entwicklungsgeschichte des eHighway-Systems wissenschaftlich fundierte Informationen zum tatsächlichen Potenzial des eHighway-Systems bislang nur bedingt durch die Gesellschaft diffundiert sein könnten. **Der Akzeptanzbildungsprozess bedarf unter Umständen schlichtweg weiterer Zeit.**

Zum anderen ist festzuhalten, dass die (frei zugängliche) Verfügbarkeit an gesicherten Informationen zum eHighway-System zu sehr limitiert ist: Im Verlauf des ELISA-Forschungsprojektes wurden bisweilen verhältnismäßig wenige Informationen zu den (Zwischen-)Ergebnissen des Testbetriebs der O-Lkw der allgemeinen Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Generell wurde bisher zu wenig aktive Öffentlichkeitsarbeit zum eHighway-System praktiziert. Dabei diffundieren zusätzlich **nicht nur zu wenige, sondern gleichzeitig auch falsche Informationen zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems** durch die Gesellschaft. Ohne die Eigenschaften eines Akzeptanzobjekts zu kennen oder gar fehlerhafte Informationen zu diesem vorliegen zu haben, wird sich ein Akzeptanzsubjekt von einem Akzeptanzobjekt jedoch nur selten überzeugen lassen. Eine unzureichende Informationsbereitstellung führt in Summe zu einer Ablehnung des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft.

**Vor dem Hintergrund, dass O-Lkw messbar dazu beitragen können, Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr zu reduzieren, sollte das eHighway-System ausgebaut werden. Zeitgleich bedarf es jedoch einer starken Intensivierung von aktiver Öffentlichkeitsarbeit.**

Die vorliegende Dissertationsschrift trägt erheblich zu einer **Erweiterung des aktuellen Wissensstands hinsichtlich alternativer Antriebsoptionen im Straßengüterverkehr** bei. Erstmals werden im Kontext der eHighway-Forschung auf Realdaten basierende Ergebnisse zum Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial von O-Lkw mit dem dargebotenen Detailgrad veröffentlicht. Ähnlich verhält es sich mit den zur Verfügung gestellten Ergebnissen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems: Keine anderweitige Studie wurde bislang veröffentlicht, die basierend auf den Ergebnissen von über 752 befragten Personen zur Akzeptanz des eHighway-Systems in der Gesellschaft berichtet.

Es ist abschließend festzuhalten: Infolge des nachgewiesenen Potenzials zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr durch den Einsatz von O-Lkw muss die Handlungsempfehlung

---

ausgesprochen werden, dass das **eHighway-System ausgebaut werden sollte**. Ein Ausbau wird im gleichen Zuge jedoch auch eine **starke Intensivierung von aktiver Öffentlichkeitsarbeit** bedürfen. Die Diskrepanz zwischen dem in der Gesellschaft subjektiv wahrgenommenen und dem tatsächlich möglichen Potenzial des eHighway-Systems zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr muss gelöst werden, soll das eHighway-System erfolgreich am Markt platziert werden.<sup>75</sup>

## 7.2 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Weiterer Forschungsbedarf zum eHighway-System besteht vor allem hinsichtlich der nachfolgend dargelegten Aspekte<sup>76</sup>:

- Die ELISA-eHighway-Teststrecke wird gegenwärtig in südliche Fahrtrichtung um sieben Kilometer verlängert (Stand: August 2023). In diesem Zusammenhang werden unter anderem **O-Lkw mit einer verbesserten technischen Konfiguration** den Testbetrieb aufnehmen. Diese O-Lkw verfügen einerseits über eine leistungsstärkere E-Maschine, über einen größeren elektrischen Energiespeicher sowie über eine Plug-in-Ladefunktion. Andererseits werden auch rein-elektrische O-Lkw in den Testbetrieb integriert. Es ist zu untersuchen, inwiefern sich die verbesserte technische Konfiguration auf das Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial des eHighway-Systems auswirkt.
- Um das Gesamtpotenzial des eHighway-Systems hinsichtlich möglicher Einsparungen an Treibhausgasemissionen zu untersuchen, sollte ein **gesamtheitliches Life-Cycle-Assessment** durchgeführt werden. Die hierfür notwendigen Eingangsdaten werden durch die vorliegende Dissertationsschrift bereitgestellt.
- Der Einfluss des eHighway-Systems auf eine mögliche Reduktion der **gesundheitsschädlichen Wirkungen** des Straßengüterverkehrs sollte untersucht werden (vor allem bezüglich Stickoxide, Feinstaub und Lärm).
- Es sollten Untersuchungen zur **Zuverlässigkeit der O-Lkw** angestellt werden. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls die **Integration von O-Lkw bei Transportunternehmen** zu überprüfen.
- O-Lkw werden nur dann erfolgreich operieren können, sofern sie in einem strategisch sinnvoll ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen eingesetzt werden. Auch diesbezüglich lässt sich weiterer Forschungsbedarf identifizieren. Studien zu möglichen Ausbaupfaden von Oberleitungsanlagen liegen bereits vor – im Laufe der Dissertationsschrift wurde hierauf eingegangen. Besonderer Forschungsbedarf zeigt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch insbesondere hinsichtlich einer Analyse zum **zuverlässigen Betrieb der Oberleitungsanlagen**. Es sollte untersucht werden, inwieweit Oberleitungsanlagen zuverlässig betrieben werden können und inwieweit eine zuverlässige **Energieversorgung von Oberleitungsanlagen** mit ausschließlich regenerativ erzeugter elektrischer Energie sichergestellt werden kann.
- Das eHighway-System wird nicht die alleinige Lösung zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr darstellen. Vielmehr wird es eines **Technologiemix** bedürfen mit vielfältigen Konzepten, die allesamt über spezifische Vorteile und besonders geeignete Anwendungsgebiete verfügen. So müssen Forschungsaktivitäten unter anderem fortgeführt und intensiviert werden im Hinblick auf die Entwicklung und Verbreitung von synthetischen Kraftstoffen, Biokraftstoffen oder Wasserstoffantrieben (BMVI 2020, S. 5 & 7 & 13). Es sollte hierbei ein **Technologievergleich** zwischen dem eHighway-System und anderweitigen

---

<sup>75</sup> Den durchgeführten Untersuchungen lagen zu prüfende Forschungshypothesen zugrunde. Dem Anhang (S. A54) lässt sich eine Übersicht dieser Forschungshypothesen, inklusive des jeweiligen Beantwortungsstatus, entnehmen.

<sup>76</sup> Die dargelegten Aspekte zum weiteren Forschungsbedarf stellen lediglich eine Auswahl dar. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.



---

alternativen Antriebsoptionen für den Straßengüterverkehr angestrebt werden. In Anbetracht eines notwendigen, zügigen Handelns zur Reduktion an Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sollte neben dem Treibhausgasemissionsreduktionspotenzial der jeweiligen alternativen Antriebstechnologie ebenfalls der Zeithorizont in die Untersuchungen miteingeschlossen werden, den es bedarf, um die alternativen Antriebstechnologien marktreif entwickelt zu haben.

- Die Analysen zur gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems erfordern aufbauende Forschungsaktivitäten. Der Fokus sollte dabei insbesondere darauf gerichtet werden, ob eine **Intensivierung aktiver Öffentlichkeitsarbeit** die Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der Gesellschaft beeinflussen wird.

---

---

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

ABBILDUNG 1:	DAS eHIGHWAY-SYSTEM.....	4
ABBILDUNG 2:	ENTWICKLUNG DER GÜTERVERKEHRSLEISTUNG NACH VERKEHRSTRÄGERN IN DEUTSCHLAND .....	8
ABBILDUNG 3:	MODAL SPLIT IM INNERDEUTSCHEN GÜTERVERKEHR – VERGLEICH 1991 ZU 2019.....	9
ABBILDUNG 4:	ENTWICKLUNG DES BRUTTOINLANDSPRODUKTS IN DEUTSCHLAND (NACH WIEDERVEREINIGUNG) .....	10
ABBILDUNG 5:	ENTWICKLUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN IN DEUTSCHLAND (NACH SEKTOREN) .....	14
ABBILDUNG 6:	TREIBHAUSGASEMISSIONEN SCHWERER NUTZFAHRZEUGE UND LASTKRAFTWAGEN.....	15
ABBILDUNG 7:	ZIELPFAD ZUR ERREICHUNG DER KLIMASCHUTZZIELE IM VERKEHRSEKTOR .....	17
ABBILDUNG 8:	TEILSYSTEME DES eHIGHWAY-SYSTEMS – ENERGIEVERSORGUNG, FAHRWEG, FAHRZEUG .....	22
ABBILDUNG 9:	WESENTLICHE TEILKOMponentEN DER ENERGIEBEREITSTELLENDEN OBERLEITUNGSANLAGE .....	23
ABBILDUNG 10:	ENERGIEVERBRAUCHSBEEINFLUSSENDE WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN FAHRZEUG, FAHRENDEN UND UMFELD.....	36
ABBILDUNG 11:	VEREINFACHTES SCHEMA DES ANTRIEBSSTRANGS EINES PARALLELHYBRID-FAHRZEUGS .....	44
ABBILDUNG 12:	METHODE ZUR BERECHNUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONEN NACH DIN EN 16258.....	48
ABBILDUNG 13:	ARBEITSSCHRITTE EINER VERKEHRSERHEBUNG .....	49
ABBILDUNG 14:	HINWEISE ZUM AUFBAU DES ENTWICKELTEN 3-EBENEN-MODELLS ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	54
ABBILDUNG 15:	3-EBENEN-MODELL ZUR QUANTIFIZIERUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES eHIGHWAY-SYSTEMS.....	55
ABBILDUNG 16:	TEILVERFAHREN ZUR IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	57
ABBILDUNG 17:	AUSZUG EINER .CSV-ROHDATENDATEI (DATEN BEREITS IN SPALTEN GETRENNT).....	59
ABBILDUNG 18:	GRAPHISCHE AUFBEREITUNG DER VERLAUFSDIAGRAMME AUSGEWÄHLTER FAHRZEUGPARAMETER ZUR BETRIEBSMODIIDENTIFIKATION .....	60
ABBILDUNG 19:	ÜBERTRAGUNG DES FAHRTENPROFILS IN VERLAUFSDIAGRAMME ERHOBENER FAHRZEUGDATEN.....	62
ABBILDUNG 20:	BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	65
ABBILDUNG 21:	TEILVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG CHARAKTERISTISCHER ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS .....	72
ABBILDUNG 22:	ENERGIEFLUSSSCHEMA VERMUTETER ENERGIEFLÜSSE EINES O-LKWS.....	77
ABBILDUNG 23:	GRAFISCHES VALIDIERUNGSVERFAHRENS BERECHNETER ENERGIEFLÜSSE EINES O-LKWS.....	87
ABBILDUNG 24:	VISUALISIERUNG DER FÜR DIE DURCHZUFÜHRENDEN ANALYSEN VERFÜGBAREN DATEN .....	89
ABBILDUNG 25:	VISUALISIERUNG DER ENERGIEFLÜSSE EINES O-LKWS IM HYBRID-OBERLEITUNGSMODUS .....	92
ABBILDUNG 26:	BETRIEBSMODIVERTeilUNG DER IM ELISA-FORSCHUNGSPROJEKT EINGESetzten O-LKW ....	96
ABBILDUNG 27:	TEILVERFAHREN ZUR BERECHNUNG CHARAKTERISTISCHER TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTE SOWIE ZUR ANALYSE DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS VON O-LKW.....	100
ABBILDUNG 28:	AUSSCHNITT BENUTZEROberFLÄCHE „ERSPARNIS“ (AusWAHL GRUNDEINGANGSDATEN)..	112
ABBILDUNG 29:	AUSSCHNITT BENUTZEROberFLÄCHE „ERSPARNIS“ (ERSTELLUNG TOURENPROFIL) .....	113
ABBILDUNG 30:	AUSSCHNITT BENUTZEROberFLÄCHE „ERSPARNIS“ (GRAFISCHE ERGEBNISDARSTELLUNG) .....	118
ABBILDUNG 31:	VISUALISIERUNG DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS VON O-LKW IN EINEM HYPOTHETISCHEN ZUKUNFTSSZENARIO .....	120

ABBILDUNG 32:	ZUSAMMENSPIEL VON AKZEPTANZSUBJEKT UND AKZEPTANZOBJEKT IM AKZEPTANZKONTEXT.....	127
ABBILDUNG 33:	FORMEN DER AKZEPTANZ .....	127
ABBILDUNG 34:	GRUNDKONZEPT VON AKZEPTANZMODELLEN.....	128
ABBILDUNG 35:	INNOVATIONS-ENTSCHEIDUNGSPROZESS .....	130
ABBILDUNG 36:	OPERATIONALISIERUNG DES BEGRIFFS „GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS“ .....	138
ABBILDUNG 37:	KONZEPT ZUR ÜBERPRÜFUNG DER BETROFFENHEIT EINES AKZEPTANZSUBJEKTS VOM BEZIEHUNGSWEISE KENNTNISSTAND ZUM eHIGHWAY-SYSTEM.....	140
ABBILDUNG 38:	VISUALISIERUNG DER AN DER BEFRAGUNG TEILGENOMMENEN PERSONEN IM ZEITLICHEN VERLAUF .....	142
ABBILDUNG 39:	VISUALISIERUNG DER STICHPROBENBILDUNG ZUR TIEFERGEHENDEN ANALYSE DER BEFRAGUNGSERGEBNISSE .....	144
ABBILDUNG 40:	DEMOGRAFISCHE MERKMALE DER STICHPROBEN .....	145
ABBILDUNG 41:	WOHNORT DER BEFRAGTEN.....	146
ABBILDUNG 42:	EINSTELLUNGS- UND VERHALTENSAKZEPTANZ DER BEFRAGTEN ZUM KLIMASCHUTZ IM ALLGEMEINEN .....	147
ABBILDUNG 43:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE ZUR NOTWENDIGKEIT VON KLIMASCHUTZ IM VERKEHRSEKTOR .....	148
ABBILDUNG 44:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE ZUR NOTWENDIGKEIT VON KLIMASCHUTZ IM STRAßENGÜTERVERKEHR.....	149
ABBILDUNG 45:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE ZUR EINSCHÄTZUNG DES TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIALS ZUKÜNFTIGER ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM STRAßENGÜTERVERKEHR .....	150
ABBILDUNG 46:	INFORMATIONSTAND DER BEFRAGTEN ZUM eHIGHWAY-SYSTEM SOWIE ZUR ELISA-eHIGHWAY-TESTSTRECKE UND ART DER INFORMATIONSGEWINNUNG ÜBER eHIGHWAY-SYSTEM/TESTSTRECKE.....	151
ABBILDUNG 47:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE ZUR BEFAHRUNGSHÄUFIGKEIT DER eHIGHWAY-TESTSTRECKEN .....	153
ABBILDUNG 48:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH VORLIEGENDER BEFÜRCHTUNGEN BEZÜGLICH DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	153
ABBILDUNG 49:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH DER HINTERGRÜNDE ZU DEN BEFÜRCHTUNGEN BEZÜGLICH DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	154
ABBILDUNG 50:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH DER HALTUNG DER BEFRAGTEN GEGENÜBER DER ELISA-eHIGHWAY-TESTSTRECKE .....	155
ABBILDUNG 51:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH DES WAHRGENOMMENEN MEINUNGSBILDES EINER BEFRAGTEN PERSON IM GESPRÄCH MIT MITMENSCHEN .....	156
ABBILDUNG 52:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH DER BEREITSCHAFT EINER BEFRAGTEN PERSON, ANDERE PERSONEN VOM eHIGHWAY-SYSTEM ZU ÜBERZEUGEN .....	156
ABBILDUNG 53:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH DES AUSBAUWUNSCHS DES eHIGHWAY-SYSTEMS IN ZUKUNFT .....	157
ABBILDUNG 54:	BEFRAGUNGSERGEBNISSE HINSICHTLICH DES WUNSCHS DER BEFRAGTEN PERSONEN NACH WEITEREN INFORMATIONEN ZUM eHIGHWAY-SYSTEM.....	158
ABBILDUNG 55:	DIFFUSIONS- UND ADOPTIONSKURVE.....	176
ABBILDUNG 56:	HAUPTTHEMEN DER DEM ELISA-FORSCHUNGSPROJEKT ZUGEGANGENEN BÜRGER- UND PRESSEANFRAGEN .....	177
ABBILDUNG 57:	ADAPTIERTER INNOVATIONS-ENTSCHEIDUNGSPROZESS NACH ROGERS (1983).....	179

ABBILDUNG 58:	RÄUMLICHE VERORTUNG DER EHIGHWAY-TESTSTRECKEN IN DEUTSCHLAND.....	A7
ABBILDUNG 59:	TECHNOLOGY ACCEPTANCE MODEL.....	A16
ABBILDUNG 60:	UNIFIED THEORY OF ACCEPTANCE AND USE OF TECHNOLOGY .....	A16
ABBILDUNG 61:	VEREINFACHTE ENERGIEFLUSSSCHEMATA EINES O-LKWS .....	A19
ABBILDUNG 62:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „BATTERYCURRENT“ .....	A20
ABBILDUNG 63:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „BATTERYSOC“ .....	A20
ABBILDUNG 64:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „BATTERYVOLTAGE“ .....	A20
ABBILDUNG 65:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „ACTUALDCLINKSUPPLYCURRENT“ .....	A20
ABBILDUNG 66:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „ACTUALGRIDSUPPLYCURRENT“ .....	A20
ABBILDUNG 67:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „ACTUALGRIDVOLTAGE“ .....	A20
ABBILDUNG 68:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „AUXILIARYVCBCURRENT“ .....	A21
ABBILDUNG 69:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „AVAILABLEDCLINKRETURNCURRENT“ .....	A21
ABBILDUNG 70:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „AVAILABLEDCLINKSUPPLYCURRENT“ .....	A21
ABBILDUNG 71:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „AVAILABLEGRIDRETURNCURRENT“ .....	A21
ABBILDUNG 72:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „AVAILABLEGRIDSUPPLYCURRENT“ .....	A21
ABBILDUNG 73:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „REQDCLINKSUPPLYCURRENT“ .....	A21
ABBILDUNG 74:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „ACTUALDCDCVOLTAGE“ .....	A22
ABBILDUNG 75:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „ACTUALDCLINKSUPCURRENT“ .....	A22
ABBILDUNG 76:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „MEASUREDOCLCURRENT“ .....	A22
ABBILDUNG 77:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „MEASUREDOCLCURRENTGBOX“ .....	A22
ABBILDUNG 78:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „MEASUREDOCLVOLTAGE“ .....	A22
ABBILDUNG 79:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „MEASUREDOCLVOLTAGEGBOX“ .....	A22
ABBILDUNG 80:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „MEASUREDVEHICLEVOLTAGEGBOX“ .....	A23
ABBILDUNG 81:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „EM_CURRENT (A)“ .....	A23
ABBILDUNG 82:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „EM_VOLTAGE (V)“ .....	A23
ABBILDUNG 83:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „FUELRATE (L/H)“ .....	A23
ABBILDUNG 84:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „INSTANTANEOUSFUELECONOMY (KM/L)“ .....	A23
ABBILDUNG 85:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „TRIPFUEL (L)“ .....	A23
ABBILDUNG 86:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „TOTALFUELUSED (L)“ .....	A24
ABBILDUNG 87:	VERLAUFSDIAGRAMM ZUM PARAMETER „AVERAGEFUELECONOMY (KM/L)“ .....	A24
ABBILDUNG 88:	ENTWICKELTER BERECHNUNGSLGORITHMUS FÜR „ERSPARNIS“, TEIL 1 .....	A30
ABBILDUNG 89:	ENTWICKELTER BERECHNUNGSLGORITHMUS FÜR „ERSPARNIS“, TEIL 2 .....	A31
ABBILDUNG 90:	TEILNAHMEAUFTRUF ZUR EHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG ÜBER DEN OFFIZIELLEN FACEBOOK-KANAL DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DARMSTADT AM 28. JANUAR 2022 ..	A32
ABBILDUNG 91:	TEILNAHMEAUFTRUF ZUR EHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG ÜBER DEN OFFIZIELLEN TWITTER-KANAL DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DARMSTADT AM 28. JANUAR 2022.....	A33
ABBILDUNG 92:	TEILNAHMEAUFTRUF ZUR EHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG ÜBER DEN OFFIZIELLEN INSTAGRAM-KANAL DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DARMSTADT AM 01. FEBRUAR 2022 .....	A33
ABBILDUNG 93:	TEILNAHMEAUFTRUF ZUR EHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG ÜBER DAS ONLINE- ANGEBOT DER „ECHO VERLAGE“ AM 08. FEBRUAR 2022.....	A34
ABBILDUNG 94:	TEILNAHMEAUFTRUF ZUR EHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG ÜBER DEN INTERNETAUFTRITT VON „HIT RADIO FFH“ AM 18. FEBRUAR 2022.....	A35
ABBILDUNG 95:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – TITELSEITE, TEIL 1 .....	A36
ABBILDUNG 96:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – TITELSEITE, TEIL 2 .....	A37
ABBILDUNG 97:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 1, TEIL 1 .....	A38
ABBILDUNG 98:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 1, TEIL 2 .....	A39

---

ABBILDUNG 99:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 2, TEIL 1 .....	A40
ABBILDUNG 100:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 2, TEIL 2.....	A41
ABBILDUNG 101:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 3 .....	A42
ABBILDUNG 102:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 4 .....	A43
ABBILDUNG 103:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 5, SEITE 1, TEIL 1 .....	A44
ABBILDUNG 104:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 5, SEITE 1, TEIL 2 .....	A45
ABBILDUNG 105:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 5, SEITE 2, TEIL 1 .....	A45
ABBILDUNG 106:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 5, SEITE 2, TEIL 2 .....	A46
ABBILDUNG 107:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 5, SEITE 3, TEIL 1 .....	A47
ABBILDUNG 108:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 5, SEITE 3, TEIL 2 .....	A48
ABBILDUNG 109:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 6 .....	A49
ABBILDUNG 110:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – ABSCHNITT 7 .....	A50
ABBILDUNG 111:	FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG – SCHLUSSEITE .....	A51
ABBILDUNG 112:	FLYER ZUM AUFRUF ZUR TEILNAHME AN DER GESELLSCHAFTSBEFRAGUNG – VORDERSEITE .....	A53
ABBILDUNG 113:	FLYER ZUM AUFRUF ZUR TEILNAHME AN DER GESELLSCHAFTSBEFRAGUNG – RÜCKSEITE .....	A53



---

---

## TABELLENVERZEICHNIS

---

TABELLE 1:	ZIELE UND FORSCHUNGSHYPOTHESEN .....	5
TABELLE 2:	ÜBERBLICK ÜBER DIE ENTWICKLUNG DER INNERDEUTSCHEN GÜTERVERKEHRSLEISTUNG .....	9
TABELLE 3:	AUSGEWÄHLTE GRÜNDE UND AUSWIRKUNGEN DES STRUKTURWANDELS IM GÜTERVERKEHR .....	11
TABELLE 4:	BEURTEILUNGSKRITERIEN ZUR BESCHREIBUNG DER SYSTEMEIGENSCHAFTEN VON VERKEHRSTRÄGERN .....	13
TABELLE 5:	DATENERHEBUNGSZEITRAUM DER IM ELISA-FORSCHUNGSPROJEKT BETRIEBENEN O-LKW .....	59
TABELLE 6:	FILTERKRITERIEN ZUR DATENBASierten IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	67
TABELLE 7:	FORSCHUNGSHYPOTHESEN ZUR IDENTIFIKATION VON BETRIEBSMODI EINES O-LKWS .....	70
TABELLE 8:	FÜR DIE BERECHNUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS POTENZIELL GEEIGNETE PARAMETER .....	78
TABELLE 9:	FÜR DIE BERECHNUNG VON ENERGIEFLÜSSEN EINES O-LKWS HERANZUZIEHENDE PARAMETER .....	79
TABELLE 10:	FESTGELEGTE SCHWELLENWERTE FÜR RELEVANTE PARAMETER IM DATEN- BEREINIGUNGSVERFAHREN .....	85
TABELLE 11:	KILOMETERGEWICHTETE ZUSAMMENSETZUNG DES FIKTIVEN O-LKWS .....	90
TABELLE 12:	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE EINES O-LKWS .....	91
TABELLE 13:	FORSCHUNGSHYPOTHESEN ZU ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENN- WERTEN EINES O-LKWS .....	98
TABELLE 14:	EMISSIONSFAKTOREN FÜR DIESELKRAFTSTOFF UND STROMMIXSZENARIEN .....	104
TABELLE 15:	CHARAKTERISTISCHE TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTE EINES O-LKWS .....	107
TABELLE 16:	DURCH O-LKW EMITTIERTE UND EINGESPARTE TREIBHAUSGASE IM ELISA- FORSCHUNGSPROJEKT .....	109
TABELLE 17:	FORSCHUNGSHYPOTHESEN ZU TREIBHAUSGASEMISSIONSKENNWERTEN SOWIE ZUM TREIBHAUSGASEMISSIONSREDUKTIONSPOTENZIAL VON O-LKW .....	122
TABELLE 18:	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM ZUSAMMENHANG DES TREIBHAUSGASEMISSIONS- REDUKTIONSPOTENZIALS DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	180
TABELLE 19:	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM ZUSAMMENHANG DER GESELLSCHAFTLICHEN AKZEPTANZ DES eHIGHWAY-SYSTEMS .....	181
TABELLE 20:	ÜBERSICHT ÜBER DIE VON DEN DATENLOGGERN ERFASTEN PARAMETER .....	A18
TABELLE 21:	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE VON EL LEON .....	A25
TABELLE 22:	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE VON EL FIDEL .....	A26
TABELLE 23:	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE VON EL FONDO .....	A27
TABELLE 24:	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE VON EL FEMINA .....	A28
TABELLE 25:	CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE VON EL SALTO .....	A29
TABELLE 26:	AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSPROJEKTE IM KONTEXT DER eHIGHWAY-FORSCHUNG IM ZEITLICHEN VERLAUF .....	A52

---

TABELLE 27:	ÜBERSICHT UND STATUS DER IM RAHMEN DER DISSERTATIONSSCHRIFT BEANTWORTETEN ZIELE UND FORSCHUNGSHYPOTHESEN .....	A54
-------------	---	-----

---

---

## FORMELVERZEICHNIS

---

FORMEL 1:	ALLGEMEINE FAHRWIDERSTANDSGLEICHUNG.....	37
FORMEL 2:	PARAMETRISIERTE FAHRWIDERSTANDSGLEICHUNG.....	37
FORMEL 3:	BERECHNUNG DER MINDEST-ANTRIEBSLEISTUNG VON FAHRZEUGEN.....	39
FORMEL 4:	BERECHNUNG DES KRAFTSTOFFVERBRAUCHS EINES O-LKWS.....	80
FORMEL 5:	BERECHNUNG DES STROMVERBRAUCHS EINES O-LKWS .....	81
FORMEL 6:	BERECHNUNG DER STROMERZEUGUNG EINES O-LKWS .....	81
FORMEL 7:	BERECHNUNG DER GESAMT-LADERATE DES ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERS EINES O-LKWS.....	82
FORMEL 8:	BERECHNUNG DER BEREITSTELLUNG VON TRAKTIONSTROM DURCH DEN ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHER EINES O-LKWS.....	82
FORMEL 9:	BERECHNUNG DER GESAMTSTROMAUFNAHME DURCH DEN PANTOGRAPHEN EINES O-LKWS AUS DER OBERLEITUNGSANLAGE .....	82
FORMEL 10:	BERECHNUNG DER BEREITSTELLUNG VON TRAKTIONSTROM DURCH DEN PANTOGRAPHEN EINES O-LKWS .....	83
FORMEL 11:	BERECHNUNG DER LADERATE DES ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERS DURCH DEN PANTOGRAPHEN EINES O-LKWS .....	83
FORMEL 12:	BERECHNUNG DES STROMVERBRAUCHS DURCH NEBENVERBRAUCHER UND ALLGEMEINE VERLUSTE WÄHREND DER ANGEBÜGELTEN FAHRT EINES O-LKWS.....	84
FORMEL 13:	BERECHNUNG DER GESAMTSTROMAUFNAHME DURCH DEN PANTOGRAPHEN EINES O-LKWS AUS DER OBERLEITUNGSANLAGE, OHNE LADEN DES ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERS .....	84
FORMEL 14:	GLEICHUNG ZUR VALIDIERUNG DER ENTWICKELTEN BERECHNUNGSMETHODE (BEISPIEL).....	87

---

---

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

<b>AC</b>	ALTERNATING CURRENT	<b>ERSPARNIS</b>	ERMITTLUNG VON SPEZIFISCHEN VERBRAUCHSPARAMETERN FÜR ELECTRIC ROAD SYSTEMS NUTZENDE FAHRZEUGE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER ERKENNTNISSE AUS DEM PILOTBETRIEB "ELISA" MIT OBERLEITUNGSGEBUNDENEN LASTKRAFTWAGEN
<b>BAB</b>	BUNDESAUTOBAHN	<b>EU</b>	EUROPÄISCHE UNION
<b>BMDV</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALE UND VERKEHR	<b>EVE</b>	EMPFEHLUNGEN FÜR VERKEHRSERHEBUNGEN
<b>BMU</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT	<b>EVP</b>	EMPFEHLUNGEN FÜR VERKEHRSPLANUNGSPROZESSE
<b>BMUB</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT	<b>FESH</b>	FELDVERSUCH eHIGHWAY SCHLESWIG-HOLSTEIN
<b>BMUV</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ	<b>FGSV</b>	FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
<b>BMVBS</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG	<b>FMP</b>	FLOTTENMANAGEMENTPROGRAMM
<b>BMVI</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR	<b>H EEIS</b>	HINWEISE ZU ENERGIE, LUFTBEZOGENEN EMISSIONEN UND IMMISSIONEN IM STRAßENVERKEHR
<b>BMWi</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE	<b>ISSN</b>	INTERNATIONAL STANDARD SERIAL NUMBER
<b>BMWK</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ	<b>IVV</b>	INSTITUT FÜR VERKEHRSPLANUNG UND VERKEHRSTECHNIK
<b>BMZ</b>	BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG	<b>KBA</b>	KRAFTFAHRT-BUNDESAMT
<b>CO2</b>	KOHLNSTOFFDIOXID	<b>KSG</b>	BUNDES-KLIMASCHUTZGESETZ
<b>CO2E</b>	KOHLNSTOFFDIOXID-ÄQUIVALENT	<b>MS</b>	MICROSOFT
<b>CSV</b>	COMMA-SEPARATED VALUES	<b>NV&amp;V</b>	NEBENVERBRAUCHER UND VERLUSTE
<b>DC</b>	DIRECT CURRENT	<b>O. A.</b>	OHNE AUTOR
<b>EE</b>	ELEKTRISCHER ENERGIESPEICHER	<b>OCL</b>	OVERHEAD CONTACT LINE
<b>ELISA</b>	ELEKTRIFIZIERTER, INNOVATIVER SCHWERVERKEHR AUF AUTOBAHNEN	<b>O. J.</b>	OHNE JAHR
<b>EM</b>	ELEKTRISCHE MASCHINE	<b>OL</b>	OBERLEITUNG
<b>E-MASCHINE</b>	ELEKTRISCHE MASCHINE	<b>O-Lkw</b>	OBERLEITUNGS-LASTKRAFTWAGEN
<b>ENUBA</b>	ELEKTROMOBILITÄT BEI SCHWEREN NUTZFAHRZEUGEN ZUR UMWELTENTLASTUNG IN BALLUNGSRÄUMEN	<b>O. S.</b>	OHNE SEITE
<b>ERS</b>	ELECTRIC ROAD SYSTEMS	<b>OZ</b>	OBERZIEL

---

<b>PAN</b>	PANTOGRAPH
<b>PM</b>	PARTICULATE MATTER
<b>SOC</b>	STATE OF CHARGE
<b>StVZO</b>	STRAßENVERKEHRS-ZULASSUNGS- ORDNUNG
<b>THG</b>	TREIBHAUSGAS
<b>TTW</b>	TANK-TO-WHEEL
<b>VM</b>	VERBRENNUNGSMOTOR
<b>WTT</b>	WELL-TO-TANK
<b>WTW</b>	WELL-TO-WHEEL
<b>ZGG</b>	ZULÄSSIGES GESAMTGEWICHT



---

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- Aberle, G. (2009):** *Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*. 5., überarbeitete und ergänzte Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Ainalis, D., Thorne, C. & Cebon, D. (2022):** *Technoeconomic comparison of an electric road system and hydrogen for decarbonising the UK's long-haul road freight*. Research in Transportation Business & Management 100914.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210539522001353> [Stand 2023-01-02].
- Ajzen, I. (1985):** *From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior*. In: J. Kuhl & J. Beckmann (Hrsg.). Action Control. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 11–39.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-69746-3\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-69746-3_2) [Stand 2023-03-23].
- Allekotte, M. u. a. (2020):** *Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). Berichtsteil „TREMOD.“* Dessau-Roßlau, Heidelberg: Umweltbundesamt (Hrsg.), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29\\_texte\\_116-2020\\_tremod\\_2019\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf) [Stand 2022-07-21].
- Andruleit, H. u. a. (2015):** *Energiestudie 2015. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fachbereich B1.3, Geologie der Energierohstoffe, Polargeologie (Hrsg.).  
[https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie\\_2015.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2) [Stand 2022-07-18].
- Arnold, C. & Klee, C. (2016):** *Akzeptanz von Produktinnovationen. Eine Einführung*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Attelander, P. u. a. (2008):** *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 12., durchgesehene Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Bergk, F. u. a. (2016):** *Texte 56/2016. Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050*. Heidelberg, Bern, München, Dessau-Roßlau: ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg; INFRAS AG, Bern; LBST-Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, München; Umweltbundesamt (Hrsg.).  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte\\_56\\_2016\\_klimaschutzbeitrag\\_des\\_verkehrs\\_2050\\_getagged.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf) [Stand 2022-12-30].
- Bernstein, L. u. a. (2008):** *Klimaänderung 2007. Synthesebericht*. Berlin: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP (Hrsg.).
- Bibliographisches Institut GmbH (2023a):** *Akzeptanz*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Akzeptanz> [Stand 2023-03-22].
- Bibliographisches Institut GmbH (2023b):** *akzeptieren*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/akzeptieren> [Stand 2023-03-22].
- Bibliographisches Institut GmbH (2023c):** *Gesellschaft*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Gesellschaft> [Stand 2023-06-05].
- Bibliographisches Institut GmbH (2023d):** *latent*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/latent> [Stand 2023-04-04].

- 
- Bibliographisches Institut GmbH (2023e):** *manifest*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/manifest> [Stand 2023-04-04].
- Bibliographisches Institut GmbH (2022a):** *Bruttoinlandsprodukt, das*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Bruttoinlandsprodukt> [Stand 2022-04-24].
- Bibliographisches Institut GmbH (2022b):** *Natur, die*. Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Natur> [Stand 2023-01-17].
- Blechschmidt, J. u. a. (2022):** *Texte 50/2022. Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr*. Berlin, Freiburg, München, Dessau-Roßlau: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung, Abteilung Wirtschaftsverkehr, Berlin; TTS TRIMODE Transportation Solutions GmbH, Freiburg; Kantar GmbH München; Umweltbundesamt (Hrsg.). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_50-2022\\_handlungsoptionen\\_fuer\\_eine\\_oekologische\\_gestaltung\\_der\\_transportmittelwahl\\_im\\_gue-terfernverkehr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_50-2022_handlungsoptionen_fuer_eine_oekologische_gestaltung_der_transportmittelwahl_im_gue-terfernverkehr.pdf) [Stand 2022-12-30].
- BMDV (2022):** *Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung*. Berlin: Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (Hrsg.). [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?__blob=publicationFile) [Stand 2022-11-24].
- BMU (2021):** *Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Ausgabe 2021*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.). [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_zahlen\\_2021\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf) [Stand 2022-07-11].
- BMUB (2016):** *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hrsg.). [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=4) [Stand 2022-11-26].
- BMUV (2022a):** *Emissionen des Verkehrs*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs> [Stand 2022-07-17].
- BMUV (2022b):** *Emissionsübersichten in Sektoren*. Dessau-Roßlau: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022\\_03\\_15\\_trendtabellen\\_thg\\_nach\\_sektoren\\_v1.0.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx) [Stand 2022-05-31].
- BMUV (2022c):** *Fahrleistungen, Verkehrsleistung und „Modal Split.“* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split> [Stand 2022-04-10].
- BMUV (2021):** *Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent> [Stand 2022-07-13].

- 
- BMUV (2019):** *Güterverkehr*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.).  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/gueterverkehr> [Stand 2022-05-11].
- BMUV (o. J.):** *Verkehr*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.).  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr> [Stand 2022-03-19].
- BMVBS (2008):** *Verkehr in Zahlen 2008/2009. 37. Jahrgang*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.).
- BMVI (2021):** *Verkehr in Zahlen 2021/2022. 50. Jahrgang*. Flensburg: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.).
- BMVI (2020):** *Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Referat G 22 - Alternative Kraftstoffe und Antriebe, Infrastruktur, Energie (Hrsg.). [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile) [Stand 2022-12-17].
- BMVI (2019):** *Masterplan Binnenschifffahrt*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.).
- BMVI (2017a):** *Aktionsplan Güterverkehr und Logistik - nachhaltig und effizient in die Zukunft*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.).
- BMVI (2017b):** *Masterplan Schienengüterverkehr*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Projektgruppe Masterplan Schienengüterverkehr (Hrsg.).
- BMVI (2016):** *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.).
- BMVI (2014):** *Handbuch für eine gute Bürgerbeteiligung. Planung von Großvorhaben im Verkehrssektor*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.).  
[https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/handbuch-buergerbeteiligung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/handbuch-buergerbeteiligung.pdf?__blob=publicationFile) [Stand 2023-03-22].
- BMWi (2021):** *Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung*. o. O.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.).  
[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx?\\_\\_blob=publicationFile&v=139](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=139) [Stand 2022-07-17].
- BMWK (2022a):** *Klimaschutz*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.).  
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Industrie/klimaschutz.html> [Stand 2022-11-26].
- BMWK (2022b):** *Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes-Klimaschutzgesetzes*. o. O.: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.).  
[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=8) [Stand 2022-11-22].
- BMWK (o. J.):** *BEE. BEV Goes eHighway*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/bee> [Stand 2022-12-29].

- 
- BMWK (o. J.): eHighway.** *Entwicklung einer herstellerunabhängigen Systemtechnologie für Oberleitungs-Lkw.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ehighway> [Stand 2022-12-27].
- BMWK (o. J.): ELISA II-B.** Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elisa-ii-b> [Stand 2022-12-20].
- BMWK (o. J.): ELONSO.** *Elektrifizierung länderübergreifend betriebener Oberleitungs-Nutzfahrzeuge durch sequenzielle Oberleitungsabschnitte.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elonso> [Stand 2022-12-29].
- BMWK (o. J.): ESOB-RKI.** *Elektrischer Straßengüterverkehr mit Oberleitungen und Batterien: Rationalität, Kombinationen und Institutionendesign.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/esob-rki> [Stand 2022-12-27].
- BMWK (o. J.): HiLinE.** *Hochintegrierte Leistungselektronik in E-Lastkraftwagen.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/hiline> [Stand 2022-12-27].
- BMWK (o. J.): OL-Lkw.** *Technologieerprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ol-lkw> [Stand 2022-12-29].
- BMWK (o. J.): PowerCharger.** *Netzintegration eines innovativen Speicherunterwerkes zur Versorgung des eHighways SH.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/powercharger> [Stand 2022-12-27].
- BMWK (o. J.): Projekte | Erneuerbar Mobil.** Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). [https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte?projectsubjects=316&partner=All&project\\_status=All&combine=](https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte?projectsubjects=316&partner=All&project_status=All&combine=) [Stand 2022-07-05].
- BMZ (2023): Folgen des Klimawandels.** Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (Hrsg.). <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/folgen-des-klimawandels-124774> [Stand 2023-04-07].
- Boltze, M. (2020): eHighway – An Infrastructure for Sustainable Road Freight Transport.** In: C. Ha-Minh u. a. (Hrsg.). CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer, S. 35–44.
- Boltze, M. (2019): Oberleitungen auf Autobahnen - nicht nur einen Versuch wert!** *Straßenverkehrstechnik* 4.2019, S. 242.
- Boltze, M., Lehmann, M., u. a. (Hrsg.) (2021): Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway.** Bonn: Kirschbaum Verlag.
- Boltze, M. & Wauri, D. (2019): ELISA.** *Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. Feldversuch zur Erprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung. Teilprojekt ELISA I: Planung, Genehmigung und Errichtung der Infrastruktur. Schlussbericht.* Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik. <https://doi.org/10.2314/KXP:1693463628> [Stand 2022-12-19].

- 
- Boltze, M., Wauri, D., Riegelhuth, G. & Reußwig, A. (2021):** *B.3 Örtliche Gegebenheiten*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 145–149.
- Boltze, M., Wauri, D., Riegelhuth, G., Reußwig, A., u. a. (2021):** *B.2 Beschreibung des Projekts ELISA*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 132–144.
- Boltze, M. u. a. (2022):** *ELISA II-B – Vorbereitung, Durchführung und Evaluation eines realitäts-nahen Probetriebs von OH-Lkw auf der ELISA-Versuchsanlage. Ergebniszwischenbericht. 01.11.2018 - 31.08.2021. Band 0: Zusammenfassender Ergebniszwischenbericht*. Darmstadt, Frankfurt, Erlangen: Technische Universität Darmstadt, Die Autobahn GmbH des Bundes, Siemens Mobility GmbH, ENTEGA AG, COUNT+CARE GmbH & Co. KG. [https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/veroeffentlichungen\\_2/20220311\\_ELISA\\_Ergebniszwischenbericht\\_Band\\_0.pdf](https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/veroeffentlichungen_2/20220311_ELISA_Ergebniszwischenbericht_Band_0.pdf) [Stand 2022-12-19].
- Boltze, M. u. a. (2020):** *Insights into the Operation of Overhead Line Hybrid Trucks on the ELISA Test Track*. 4th Electric Road Systems Webinar 2020, 12th May 2020. online. [https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/konferenzbeitraege/pdf\\_29706.pdf](https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/konferenzbeitraege/pdf_29706.pdf) [Stand 2022-12-23].
- Bratzel, S. & Tellermann, R. (2008):** *Mobilität und Verkehr*. Bundeszentrale für politische Bildung (Hrsg.). <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/izpb/9005/mobilitaet-und-verkehr/> [Stand 2022-03-19].
- Breisig, V., Hess, B. & Rath, L. (2022):** *Texte 33/2022. Ökonomische Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr*. Düsseldorf, Dessau-Roßlau: PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (PwC), Düsseldorf; Umweltbundesamt (Hrsg.). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_33-2022\\_oekonomische\\_bewertung\\_von\\_klimaschutzmassnahmen\\_im\\_verkehr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_33-2022_oekonomische_bewertung_von_klimaschutzmassnahmen_im_verkehr.pdf) [Stand 2022-12-30].
- Breuer, J. L. u. a. (2021):** *How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks*. *Environment International* 152, 106474. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021000994> [Stand 2023-01-02].
- Breuer, S. & Kopp, S. (2016):** *Fahrmechanik*. In: E. Hoepke & S. Breuer (Hrsg.). *Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 37–122.
- Bruhn, C. M. (2007):** *Enhancing consumer acceptance of new processing technologies*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 8, S. 555–558. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856407000604> [Stand 2022-06-10].
- Burchardt, J. u. a. (2021):** *Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. o. O.: Boston Consulting Group (Hrsg.). <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf> [Stand 2022-05-31].



- 
- Burghard, U. & Scherrer, A. (2020):** *Der eHighway aus gesellschaftlicher Perspektive. Erkenntnisse zur sozialen Akzeptanz und den Akteuren rund um Oberleitungs-Lkw-Systeme in Deutschland und Europa.* Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/2020-Bericht-Akzeptanz\\_BOLD\\_eHighways.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/2020-Bericht-Akzeptanz_BOLD_eHighways.pdf) [Stand 2023-01-02].
- Chen, Z., He, F. & Yin, Y. (2016):** *Optimal deployment of charging lanes for electric vehicles in transportation networks.* *Transportation Research Part B: Methodological* 91, S. 344–365. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191261516303319> [Stand 2023-01-02].
- Claes, F. & Knezevic, G. (2022):** *European launch vision for Electric Road Systems.* Berlin: IKEM. Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. <https://usercontent.one/wp/www.ikem.de/wp-content/uploads/2022/11/Studie-European-launch-vision-for-Electric-Road-Systems.pdf?media=1667839188> [Stand 2022-12-30].
- Colovic, A., Marinelli, M. & Ottomanelli, M. (2022):** *A multi-objective network design model for road freight transportation using the eHighway system.* *Transportation Research Procedia* 62, S. 139–146. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522001454?via%3Dihub> [Stand 2022-10-05].
- Connolly, D. (2017):** *Economic viability of electric roads compared to oil and batteries for all forms of road transport.* *Energy Strategy Reviews* 18, S. 235–249. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211467X17300469> [Stand 2023-01-03].
- Davis, F. D. (1985):** *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Döring, N. (2022a):** *Datenerhebung.* In: N. Döring (Hrsg.). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften.* Berlin, Heidelberg: Springer, S. 321–570.
- Döring, N. (2022b):** *Empirische Sozialforschung im Überblick.* In: N. Döring (Hrsg.). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften.* Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–30.
- Döring, N. (2022c):** *Operationalisierung.* In: N. Döring (Hrsg.). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften.* Berlin, Heidelberg: Springer, S. 223–291.
- Döring, N. (2022d):** *Stichprobenziehung.* In: N. Döring (Hrsg.). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften.* Berlin, Heidelberg: Springer, S. 293–320.
- Döring, N. (2022e):** *Untersuchungsdesign.* In: N. Döring (Hrsg.). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften.* Berlin, Heidelberg: Springer, S. 183–221.
- Echo online (2022):** *Wie wird der südhessische „eHighway“ akzeptiert? Forscher der TU Darmstadt rufen Bürger zu einer anonymen Online-Umfrage auf.* Echo online; VRM GmbH & Co. KG (Hrsg.). [https://www.echo-online.de/lokales/darmstadt/wie-wird-der-sudhessische-ehighway-akzeptiert\\_25297010](https://www.echo-online.de/lokales/darmstadt/wie-wird-der-sudhessische-ehighway-akzeptiert_25297010) [Stand 2022-02-09].
- ENTEKA Plus GmbH, Darmstadt (2020):** *Wie sich unser Strommix zusammensetzt. Umweltbelastungen aus der Stromerzeugung 2020.*

- 
- Europäische Kommission (2021):** *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. „Fit für 55“: auf dem Weg zur Klimaneutralität – Umsetzung des EU-Klimaziels für 2030.* Brüssel: Europäische Kommission (Hrsg.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550&from=EN> [Stand 2022-11-28].
- Europäische Kommission (2020a):** *Anhang der Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen.* Brüssel: Europäische Kommission (Hrsg.). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_2&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_2&format=PDF) [Stand 2022-11-30].
- Europäische Kommission (2020b):** *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Mehr Ehrgeiz für das Klimaziel Europas bis 2030. In eine klimaneutrale Zukunft zum Wohl der Menschen investieren.* Brüssel: Europäische Kommission (Hrsg.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0562&from=DE> [Stand 2022-11-28].
- Europäische Kommission (2020c):** *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen.* Brüssel: Europäische Kommission (Hrsg.). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF) [Stand 2022-11-29].
- Europäische Kommission (2019):** *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal.* Brüssel: Europäische Kommission (Hrsg.). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF) [Stand 2022-11-26].
- Europäische Kommission (2018):** *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss, den Ausschuss der Regionen und die Europäische Investitionsbank. Ein sauberer Planet für alle. Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft.* Brüssel: Europäische Kommission (Hrsg.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773> [Stand 2022-11-26].
- Europäische Union (o. J.):** *Arten von Rechtsvorschriften.* Europäische Union. Europäische Kommission, Generaldirektion Kommunikation (Hrsg.). [https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation\\_de](https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_de) [Stand 2022-11-27].
- Europäischer Rat (2014):** *Tagung des Europäischen Rates (23./24. Oktober 2014). Schlussfolgerungen zum Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030.* <https://www.consilium.europa.eu/media/25155/145377.pdf> [Stand 2022-11-28].

- 
- Europäisches Komitee für Normung & Deutsches Institut für Normung e. V. (2013):** *DIN EN 16258. Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN 16258:2012.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Fairbrother, M. (2022):** *Public opinion about climate policies: A review and call for more studies of what people want.* PLOS Climate 1, 5, e0000030.  
<https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000030>  
[Stand 2022-06-12].
- FGSV Verlag (2020):** *Verkehrsplanung. Begriffsbestimmungen. Sachgebiet 2. Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen. Ausgabe 2020.* Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Querschnittsausschuss „Begriffsbestimmungen“. FGSV Verlag, Köln - FGSV 005/1 (Hrsg.).
- FGSV Verlag (2018a):** *Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse. EVP. Ausgabe 2018.* Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Verkehrsplanung“, FGSV Verlag, Köln - FGSV 116 (R 2) (Hrsg.).
- FGSV Verlag (2018b):** *Hinweise zu Energie, luftbezogenen Emissionen und Immissionen im Straßenverkehr. H EEIS. Ausgabe 2018.* Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“, FGSV Verlag, Köln - FGSV 210/1 (W 1) (Hrsg.).
- FGSV Verlag (2012):** *Empfehlungen für Verkehrserhebungen. EVE. Ausgabe 2012.* Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Verkehrsplanung“, FGSV Verlag, Köln - FGSV 125 (R 2) (Hrsg.).
- Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, Verbundprojekt FESH (Hrsg.) (2017):** *FESH - eHighway. Feldversuch eHighway an der BAB 1 in Schleswig-Holstein. Flyer zum Forschungsprojekt.* [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-07/eHighway\\_Flyer.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-07/eHighway_Flyer.pdf) [Stand 2022-07-05].
- Giebel, S. & Hahn, G. (2021):** *B.4 Technische Gestaltung.* In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway.* Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 150–153.
- Giebel, S. u. a. (2021):** *B.5 Errichtung der Versuchsanlage.* In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway.* Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 154–161.
- Göckeler, K. u. a. (2022):** *StratES. Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien. Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung.* Berlin: Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn. [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht\\_2-Befragung\\_Logistikbranche.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht_2-Befragung_Logistikbranche.pdf) [Stand 2022-12-29].
- Göckeler, K. u. a. (2020):** *StratES. Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr. Erster Teilbericht.* Berlin: Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf> [Stand 2022-12-29].

- 
- Google Ireland Limited (2023a):** *Oberleitungs-Lkw - Google Suche.*  
[https://www.google.com/search?q=Oberleitungs-Lkw&client=firefox-b-d&sca\\_esv=573451013&ei=S5oqZfS6FOeM9u8PsNSv-Ac&ved=0ahUKEwi0jOCG1fWBAXVnhv0HHTDqC38Q4dUDCA8&uact=5&oq=Oberleitungs-Lkw&gs\\_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiEE9iZXJsZWl0dW5ncy1Ma3cyBRAAGIAEMgYQABgHGB4yBBAAGB4yBBAAGB4yBBAAGB4yBBAAGB4yBBAAGB5I0CRQhQVY7SJwA3gBkAEAmAFUoAGlCKoBAjE2uAEDyAEA-AEBwgIKEAAYRrxjWBBiwA-IDBBgAIEGIBgGQBgg&scient=gws-wiz-serp](https://www.google.com/search?q=Oberleitungs-Lkw&client=firefox-b-d&sca_esv=573451013&ei=S5oqZfS6FOeM9u8PsNSv-Ac&ved=0ahUKEwi0jOCG1fWBAXVnhv0HHTDqC38Q4dUDCA8&uact=5&oq=Oberleitungs-Lkw&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiEE9iZXJsZWl0dW5ncy1Ma3cyBRAAGIAEMgYQABgHGB4yBBAAGB4yBBAAGB4yBBAAGB4yBBAAGB4yBBAAGB5I0CRQhQVY7SJwA3gBkAEAmAFUoAGlCKoBAjE2uAEDyAEA-AEBwgIKEAAYRrxjWBBiwA-IDBBgAIEGIBgGQBgg&scient=gws-wiz-serp) [Stand 2023-10-14].
- Google Ireland Limited (2023b):** *Wasserstoff-Lkw - Google Suche.*  
[https://www.google.com/search?q=Wasserstoff-Lkw&sca\\_esv=573451013&hl=de&ei=05sqZYjyLcSQ9u8PutCGaA&ved=0ahUKEwjIp\\_B1vWBAXVEiP0HHTqoAQ0Q4dUDCA8&uact=5&oq=Wasserstoff-Lkw&gs\\_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiD1dhc3NlcnN0b2ZmLUxrdzIFEAAyGAgYyBRAAGIAEMgUQABiABDIFEAAyGAgYyBRAAGIAEMgQQABgeMgQQABgeSKqRAVDCBViUFXABeAGQAQCYAUIgAcMEqgECMTK4AQPIAQD4AQHCAGoQABhHGNYEGLADwgIGEAAYBxge4gMEGAAgQYgGAZAGCA&scient=gws-wiz-serp](https://www.google.com/search?q=Wasserstoff-Lkw&sca_esv=573451013&hl=de&ei=05sqZYjyLcSQ9u8PutCGaA&ved=0ahUKEwjIp_B1vWBAXVEiP0HHTqoAQ0Q4dUDCA8&uact=5&oq=Wasserstoff-Lkw&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiD1dhc3NlcnN0b2ZmLUxrdzIFEAAyGAgYyBRAAGIAEMgUQABiABDIFEAAyGAgYyBRAAGIAEMgQQABgeMgQQABgeSKqRAVDCBViUFXABeAGQAQCYAUIgAcMEqgECMTK4AQPIAQD4AQHCAGoQABhHGNYEGLADwgIGEAAYBxge4gMEGAAgQYgGAZAGCA&scient=gws-wiz-serp) [Stand 2023-10-14].
- Google Ireland Limited (2022):** *Google Maps.* <https://www.google.de/maps> [Stand 2022-07-04].
- Gudehus, T. (2012a):** *Logistik 1. Grundlagen, Verfahren und Strategien.* Bd. 1, Studienausgabe der 4., aktualisierten Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Gudehus, T. (2012b):** *Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten.* Bd. 2, Studienausgabe der 4., aktualisierten Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Günther, D. & Gniffke, P. (2022):** *Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2021 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Begleitender Bericht Kurzfassung vom 10. März 2022.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Fachgebiet V1.6 Emissionssituation (Hrsg.).  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310\\_vjs\\_2021\\_-\\_begleitender\\_bericht\\_-\\_sauber\\_vbs\\_korr\\_kurzfassung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310_vjs_2021_-_begleitender_bericht_-_sauber_vbs_korr_kurzfassung.pdf) [Stand 2022-05-31].
- Günther, D. & Gniffke, P. (2021):** *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2019.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Fachgebiet V1.6 Emissionssituation (Hrsg.).  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19\\_cc\\_43-2021\\_nir\\_2021\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_cc_43-2021_nir_2021_1.pdf) [Stand 2022-05-31].
- Hacker, F., Blanck, R., u. a. (2020):** *StratON. Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht.* Berlin: Öko-Institut e.V.; Hochschule Heilbronn; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO); Intraplan Consult GmbH. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf> [Stand 2022-11-22].
- Hacker, F., Jöhrens, J. & Plötz, P. (2020):** *Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland. Eine Synthese.* Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut e.V.; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stand-des-Wissens-OH-Lkw-Zusammenfassung.pdf> [Stand 2023-01-03].

- 
- Hanesch, S. u. a. (2022):** *Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation.* Journal of Cleaner Production 338.  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622002414> [Stand 2022-10-05].
- Hartwig, M. u. a. (2020):** *AMELIE - RED. Abrechnungssysteme und -methoden für elektrisch betriebene Lkw sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext.* Berlin, Greifswald, Stuttgart: IKEM. Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.  
[https://usercontent.one/wp/www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/01/20210122\\_Final-Report\\_Version-v-2.0.pdf?media=1667839188](https://usercontent.one/wp/www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/01/20210122_Final-Report_Version-v-2.0.pdf?media=1667839188) [Stand 2022-12-30].
- Hein, C., Lerchl-Mitsch, K. & Wilke, J. K. (2023):** *Forschungsprojekt Elisa. Akzeptanz für straßengebundene Oberleitungstechnologie.* EW. Magazin für die Energiewirtschaft 1 | 2023, S. 16–19.
- Hendzlik, M. u. a. (2022):** *Klimaschutz im Verkehr.* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (Hrsg.).  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr> [Stand 2022-06-17].
- hessenschau (2023a):** *E-Highway auf A5: Sind Lkw mit Oberleitung ein Fail? | hessenschau DAS THEMA.* <https://www.youtube.com/watch?v=TKAVrqUVqEQ> [Stand 2023-08-12].
- hessenschau (2023b):** *Kritik an E-Highway zwischen Langen und Weiterstadt.* hessenschau.de.  
<https://www.hessenschau.de/tv-sendung/kritik-an-e-highway-zwischen-langen-und-weiterstadt,video-186110.html> [Stand 2023-08-12].
- Hilgers, M. (2016a):** *Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb.* Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hilgers, M. (2016b):** *Gesamtfahrzeug.* 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hilgers, M. (2016c):** *Kraftstoffverbrauch und Verbrauchsoptimierung.* Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hollenberg, S. (2016):** *Fragebögen. Fundierte Konstruktion, sachgerechte Anwendung und aussagekräftige Auswertung.* Wiesbaden: Springer VS.
- Hopf, R. u. a. (2004):** *Verkehr, Energieverbrauch, Nachhaltigkeit.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Icha, P., Lauf, T. & Kuhs, G. (2022):** *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.).  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13\\_cc\\_15-2022\\_strommix\\_2022\\_fin\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf) [Stand 2022-07-21].
- IVV (o. J.):** *Bilderpool des IVV zur eHighway-Teststrecke „ELISA.“* Darmstadt: Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt.
- Jöhrens, J., Allekotte, M., u. a. (2022):** *Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotential des Güter- und Busverkehrs - My eRoads.“* Heidelberg, Karlsruhe: ifeu. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, PTV Transport Consult.  
[https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04\\_-\\_My\\_eRoads\\_-\\_Potentiale\\_Lkw-Antriebstechnologien\\_-\\_final\\_01.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf) [Stand 2022-12-29].



- 
- Jöhrens, J., Lehmann, M., u. a. (2022):** *Aktuelle technische Erkenntnisse zum eHighway-System aus Feldversuch und Begleitforschung*. Arbeitspapier des Arbeitskreises Technik (AK Technik) der Feldversuchs- und Forschungsprojekte. [https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/veroeffentlichungen\\_2/2022-05-02\\_ERS\\_Working\\_Paper\\_Technikbewertung\\_final.pdf](https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/veroeffentlichungen_2/2022-05-02_ERS_Working_Paper_Technikbewertung_final.pdf) [Stand 2022-07-06].
- Jöhrens, J. u. a. (2020):** *Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland*. Heidelberg: ifeu. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2022-12/Roadmap\\_OH%20Lkw\\_Schlussbericht.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2022-12/Roadmap_OH%20Lkw_Schlussbericht.pdf) [Stand 2022-12-29].
- Karle, A. (2020):** *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. 4., aktualisierte Auflage. München: Hanser.
- KBA (2022):** *Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern*. Stand: Februar 2022. SV 1. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.). [https://www.kba.de/DE/Statistik/Verzeichnisse/systematische\\_verzeichnisse\\_inhalt.html?nn=3505666](https://www.kba.de/DE/Statistik/Verzeichnisse/systematische_verzeichnisse_inhalt.html?nn=3505666) [Stand 2022-12-28].
- Küçükay, F. (2022):** *Grundlagen der Fahrzeugtechnik. Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kummer, S. u. a. (2006):** *Einführung in die Verkehrswirtschaft*. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG, WUV.
- Langhagen-Rohrbach, C. & Doepgen, P. (2021):** *B.1 Einführung und politische Einordnung des Projekts ELISA*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 126–131.
- Lehmann, M., Bühs, F., u. a. (2021):** *A.4 Fahrzeuge des eHighway*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 85–100.
- Lehmann, M., Schemmel, A., u. a. (2021):** *A.3 Fahrweg des eHighway*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 67–84.
- Lehmann, M. & Sommer, H. (2021a):** *E.2 Förderprojekte zur Technologie- und Systemforschung*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 230–233.
- Lehmann, M. & Sommer, H. (2021b):** *E.3 Feldversuche und Erprobungen*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 234–235.
- Lehmann, M., Sommer, H., u. a. (2021):** *A.2 Energieversorgung des eHighway*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 30–66.
- Lehmann, M., Wauri, D., u. a. (2021):** *A.1 Systemdefinition und Systemüberblick zum eHighway*. In: M. Boltze u. a. (Hrsg.). *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway*. Bonn: Kirschbaum Verlag, S. 24–29.
- Lenz, H. P. & Cozzarini, C. (1998):** *Emissionen und Luftqualität*. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verlag.

- 
- Linke, R. u. a. (2022):** *The future of the eHighway system: a vision of a sustainable, climate-resilient, and artificially intelligent mega-project.* Journal of Mega Infrastructure & Sustainable Development, Volume 2, 2022, S. 51-64.  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24724718.2022.2131087>  
[Stand 2022-10-31].
- Lucke, D. (1995):** *Akzeptanz. Legitimität in der „Abstimmungsgesellschaft.“* Opladen: Leske + Budrich.
- Mareev, I. & Sauer, D. U. (2018):** *Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation.* Energies 11(12), 3446.  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/12/3446> [Stand 2023-01-04].
- Mayer, H. O. (2013):** *Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung.* 6., überarbeitete Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Microsoft Corporation (2019a):** *MS Excel.* Redmond, WA, USA.
- Microsoft Corporation (2019b):** *MS Word.* Redmond, WA, USA.
- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.) (2020):** *Fragen & Antworten. Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B 462. Informationsbroschüre zum Forschungsprojekt.*  
[https://ewaybw.de/media/download/integration/48511/informationfolder\\_din\\_a6\\_booklet\\_ewaybw.pdf](https://ewaybw.de/media/download/integration/48511/informationfolder_din_a6_booklet_ewaybw.pdf) [Stand 2022-07-05].
- Mitschke, M. & Wallentowitz, H. (2014):** *Dynamik der Kraftfahrzeuge.* 5., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Morris, C. (2017):** *California eHighway demonstration uses overhead lines to charge trucks en route.* Charged Electric Vehicles Magazine, LLC. <https://chargedevs.com/newswire/california-ehighway-demonstration-uses-overhead-lines-to-charge-trucks-en-route/> [Stand 2022-07-05].
- Muchna, C. u. a. (2021):** *Grundlagen der Logistik. Begriffe, Strukturen und Prozesse.* 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Nathusius, I. (2023):** *Zweifelhafte Versuche mit Oberleitungen.* tagesschau.de.  
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/lkw-klimaneutral-lastwagen-100.html>  
[Stand 2023-08-12].
- Netzer, L. u. a. (2022):** *Impact of an E-Highway on the Required Battery Capacities and Charging Infrastructure for Cargo Transport with E-Trucks on the Basis of a Real Use Case.* Energies 15, 19. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7102> [Stand 2022-10-05].
- Neuhausen, J. u. a. (2020):** *Making zero-emission trucking a reality. Truck study 2020: Routes to decarbonizing commercial vehicles.*  
<https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/transport/green-trucking-2020/truck-study-2020.pdf> [Stand 2022-12-06].
- o. A. (2019):** *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.* o. O.  
<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> [Stand 2022-12-01].
- o. A. (o. J.):** *CollERS 2. Home. Latest News. International Research Collaboration on Electric Road Systems II (CollERS2).* Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Hrsg.).  
<https://electric-road-systems.eu/e-r-systems/> [Stand 2022-12-29].

- 
- Plötz, P. u. a. (2019):** *Impact of electric trucks powered by overhead lines on the European electricity system and CO2 emissions.* Energy Policy 130, S. 32–40.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421519302150>  
[Stand 2023-01-02].
- Plötz, P. u. a. (2018):** *Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland.* Karlsruhe, Berlin, Heidelberg: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe (Hrsg.); Öko-Institut, Berlin; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Thesen-Zukunft-StrGueterverkehr.pdf> [Stand 2022-12-30].
- Posset, M. u. a. (2014):** *Intermodaler Verkehr Europa.* 1. Auflage. Wien: Eigenverlag der FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH - Logistikum Steyr.
- Qiu, K., Ribberink, H. & Entchev, E. (2022):** *Economic feasibility of electrified highways for heavy-duty electric trucks.* Applied Energy 326, 119935.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922011928> [Stand 2023-01-02].
- Quaschnig, V. (2020):** *Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende.* 5., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- R Studio (2022):** *R Studio Desktop.* Boston, MA, USA.
- Riegelhuth, G. u. a. (2020):** *ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. Schlussbericht Teilprojekt ELISA I. Planung, Genehmigung und Errichtung der Infrastruktur.* Frankfurt am Main: Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement; Technische Universität Darmstadt - Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.  
<https://doi.org/10.2314/KXP:1730481051> [Stand 2022-07-05].
- Rogers, E. M. (1983):** *Diffusion of innovations.* Third Edition. New York, London: Free Press, Collier Macmillan.
- Rolko, K. (2020):** *Simulationsbasierte Optimierung der Ausstattung von Teilstrecken mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt.* Dissertation am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe der Institute für Verkehr Heft V44, Darmstadt.
- Röth, T. u. a. (2018):** *Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen.* In: A. Kampker, D. Vallée, & A. Schnettler (Hrsg.). Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin: Springer Vieweg, S. 279–383.
- RWTH Aachen (2022):** *LiVe. PEM entwickelt modularen Antriebsstrang-Baukasten für Elektro-Lkw.* Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen (Hrsg.).  
<https://www.pem.rwth-aachen.de/go/id/pypv> [Stand 2022-12-29].
- RWTH Aachen (2020):** *LiVePLuS. Emissionsfreie Sattelzugmaschinen – Enabling Green Logistics.* Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen (Hrsg.).  
<https://www.liveplus.rwth-aachen.de/> [Stand 2022-12-29].
- Sauer, A. u. a. (2005):** *Steigerung der Akzeptanz von FFH-Gebieten.* München, Bonn: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.).  
<https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript144.pdf>  
[Stand 2023-03-27].

- 
- Sauer, D. U. u. a. (2018):** *6 Speicherung der elektrischen Energie*. In: A. Kampker, D. Vallée, & A. Schnettler (Hrsg.). *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin: Springer Vieweg, S. 61–98.
- Schäfer, M. & Keppler, D. (2013):** *Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung. Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energieeffizienz-Maßnahmen*. Berlin: TU Berlin, Zentrum Technik und Gesellschaft.
- Schöpp, F. u. a. (2022):** *Electrification of Road Freight Transport: Energy Flow Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks*. Transportation Research Board 101st Annual Meeting. Washington DC (United States). <https://trid.trb.org/view/1909495> [Stand 2022-06-12].
- Schöpp, F. (2021):** *Electrification of road freight transport: the influence of gross vehicle weight on the energy consumption of (overhead line) hybrid trucks*. 49th European Transport Conference. Online.
- Schöpp, F. u. a. (2021a):** *Electrification of Road Freight Transport – Energy Consumption Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks*. Transportation Research Board 100th Annual Meeting. Washington DC (United States). <https://trid.trb.org/view/1759512> [Stand 2022-01-22].
- Schöpp, F. u. a. (2021b):** *Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Kraftstoff- und Stromverbrauchsanalyse von Oberleitungs-Hybrid-Lastkraftwagen*. In: K. W. Axhausen u. a. (Hrsg.). *Internationales Verkehrswesen*. 73. Jahrgang, Heft 3. Baiersbronn: Dialog Publishers Verlagsgesellschaft, S. 40–45.
- Schorn, M. (2006):** *2 Modelle zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens*. In: R. Isermann (Hrsg.). *Fahrdynamik-Regelung. Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. Mit 340 Abbildungen und 28 Tabellen. *ATZ/MTZ-Fachbuch*. Wiesbaden: Vieweg, S. 27–46.
- Schramm, D., Hiller, M. & Bardini, R. (2018):** *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. 3., aktualisierte und ergänzte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schramm, D. u. a. (2017):** *Fahrzeugtechnik. Technische Grundlagen aktueller und zukünftiger Kraftfahrzeuge*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg.
- Schreiner, K. (2017):** *Verbrennungsmotor - kurz und bündig*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schulte, C. (2013):** *Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Verlag Franz Vahlen GmbH.
- Schwerdfeger, S. u. a. (2022):** *Optimizing the electrification of roads with charge-while-drive technology*. *European Journal of Operational Research* 299, 3, S. 1111–1127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221721007372?via%3Dihub> [Stand 2022-10-05].
- Siemens AG (2017):** *Siemens testet ersten eHighway in den USA*. Siemens. Company. Presse. <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-testet-ersten-ehighway-den-usa> [Stand 2022-07-05].
- Siemens AG (2015):** *Siemens baut ersten eHighway in Schweden*. Siemens. Company. Presse. <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-baut-ersten-ehighway-schweden> [Stand 2022-07-05].
- Siemens AG (2012):** *ENUBA: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Schlussbericht der Siemens AG*. o. O. [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba\\_1.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba_1.pdf) [Stand 2022-07-05].

- 
- Siemens AG, Technische Universität Dresden, & Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2016):** *ENUBA 2. Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung in Ballungsräumen. Schlussbericht der Verbundforschungspartner Siemens AG, TU Dresden und DLR.* München, Dresden, Braunschweig. [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2\\_Abschlussbericht\\_V3\\_TIB\\_31-08-2016.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2_Abschlussbericht_V3_TIB_31-08-2016.pdf) [Stand 2022-07-05].
- Siemens Mobility GmbH (2020):** *ELANO. Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen. Schlussbericht der Siemens Mobility GmbH. Version V2.1 vom 28. August 2020 (zur Veröffentlichung). Projektlaufzeit: 01.01.2016 - 31.12.2019. FKZ: 16EM3001-1.* München. [https://www.tib.eu/de/suchen?tx\\_tibsearch\\_search%5Baction%5D=download&tx\\_tibsearch\\_search%5Bcontroller%5D=Download&tx\\_tibsearch\\_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1751210030&cHash=a6a8f592592e9bad86817b45363fd5d2#download-mark](https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1751210030&cHash=a6a8f592592e9bad86817b45363fd5d2#download-mark) [Stand 2022-12-28].
- Siemens Mobility (2019):** *ELISA-Streckeneröffnung am 7. Mai 2019.* Bilderpool.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022):** *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung. Bruttoinlandsprodukt ab 1970. Vierteljahres- und Jahresergebnisse.* Destatis. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/bruttoinland-vierteljahresdaten-xls-ab-1970.xlsx?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/bruttoinland-vierteljahresdaten-xls-ab-1970.xlsx?__blob=publicationFile) [Stand 2022-04-24].
- Sundelin, H., Gustavsson, M. G. H. & Tongur, S. (2016):** *The maturity of electric road systems.* 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. Toulouse (Frankreich): IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7841380> [Stand 2022-07-02].
- Taherdoost, H. (2018):** *A review of technology acceptance and adoption models and theories.* Procedia Manufacturing 22, S. 960–967. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918304335> [Stand 2022-06-10].
- Tschöke, H. (2019):** *2 Definitionen, Architekturen und Topologien.* In: H. Tschöke, P. Gutzmer, & T. Pfund (Hrsg.). *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen – vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb.* ATZ/MTZ-Fachbuch. Berlin: Springer Vieweg, S. 17–30.
- TU Darmstadt-Facebook (2022):** *Offizieller Facebook-Kanal der TU Darmstadt.* Facebook. <https://de-de.facebook.com/tudarmstadt> [Stand 2023-06-10].
- TU Darmstadt-Instagram (2022):** *Offizieller Instagram-Kanal der TU Darmstadt.* Instagram. <https://www.instagram.com/tudarmstadt/> [Stand 2023-06-10].
- TU Darmstadt-Twitter (2022):** *Offizieller Twitter-Kanal der TU Darmstadt.* Twitter. <https://twitter.com/TUDarmstadt> [Stand 2023-06-10].
- Unipark.com (2022):** *Unipark.com.* Köln: Tivian XI GmbH.
- United Nations (2015):** *Paris Agreement.* o. O.
- United Nations (1998):** *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.* o. O.
- Venkatesh, V. u. a. (2003):** *User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View.* MIS Quarterly 27, 3, S. 425–478. <https://www.jstor.org/stable/30036540> [Stand 2022-07-01].



- 
- Wellburn, A. R. (1997):** *Luftverschmutzung und Klimaänderung. Auswirkungen auf Flora, Fauna und Mensch.* Berlin, Heidelberg: Springer.
- Werner, H. (2013):** *Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling.* 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Wietschel, M. u. a. (2017):** *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw.* Karlsruhe.  
[https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS\\_Machbarkeitsstudie\\_Hybrid-Oberleitungs\\_Lkw\\_Bericht\\_2017.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS_Machbarkeitsstudie_Hybrid-Oberleitungs_Lkw_Bericht_2017.pdf) [Stand 2022-07-06].
- Wilhelm, M. (2022):** *Lkw-Teststrecke an der A5. Online-Befragung zum eHighway gestartet.* Hit Radio FFH. <https://www.ffh.de/link/f2e2211> [Stand 2022-02-18].

#### **RICHTLINIENVERZEICHNIS**

- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG).** *Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.*  
<https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.html#BJNR251310019BJNE000101116>  
[Stand 2022-07-12].
- DIN EN 16258.** *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN 16258:2012.*
- Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates.**  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31998L0070&from=de>  
[Stand 2022-11-28].
- Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates.**  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0087&from=DE>  
[Stand 2022-11-28].
- Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten.**  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0029&from=DE>  
[Stand 2022-11-28].
- Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG.**  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0030&from=DE>  
[Stand 2022-11-28].

- 
- Richtlinie 2009/33/EG** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0033&from=DE>  
[Stand 2022-11-30].
- Richtlinie (EU) 2015/652** des Rates vom 20. April 2015 zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichterstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0652&from=de>  
[Stand 2022-11-28].
- Richtlinie (EU) 2018/410** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2018 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Unterstützung kosteneffizienter Emissionsreduktionen und zur Förderung von Investitionen mit geringerem CO<sub>2</sub>-Ausstoß und des Beschlusses (EU) 2015/1814.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0410&from=DE>  
[Stand 2022-11-28].
- Richtlinie (EU) 2019/1161** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE>  
[Stand 2022-11-30].
- Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)**. Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091) geändert worden ist.  
[https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/index.html#BJNR067910012BJNE003401311](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/index.html#BJNR067910012BJNE003401311)  
[Stand 2022-12-27].
- Verordnung (EU) 2018/842** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0842&from=DE>  
[Stand 2022-11-28].
- Verordnung (EU) 2018/1999** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates.
- Verordnung (EU) 2021/1119** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“).  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119&from=DE>  
[Stand 2022-11-28].

---

---

## ANHANG

---

*Im Folgenden werden ergänzende Materialien zur Dissertationsschrift bereitgestellt. Eine Übersicht, welche ergänzenden Materialien bereitgestellt werden, lässt sich nachfolgendem Verzeichnis entnehmen.*

### ANHANGSVERZEICHNIS

- A: EINBLICK IN DEN REGULATORISCHEN RAHMEN INTERNATIONALER UND EUROPÄISCHER KLIMASCHUTZPOLITIK
- B: LAGE DER eHIGHWAY-TESTSTRECKEN IN DEUTSCHLAND
- C: STAND DER FORSCHUNG ZUM eHIGHWAY-SYSTEM
- D: ERGÄNZENDE AUSFÜHRUNGEN ZU AKZEPTANZMODELLEN
- E: ÜBERSICHT ÜBER DIE VON DEN DATENLOGGERN ERFASSTEN PARAMETER
- F: VEREINFACHTE ENERGIEFLUSSSCHEMATA EINES O-LKWS, DIFFERENZIIERT NACH BETRIEBSMODI
- G: VERLAUFSDIAGRAMME POTENZIELL RELEVANTER ENERGIEFLUSSPARAMETER (ERGÄNZUNG)
- H: CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE DER EINZEL-O-LKW
- I: ENTWICKELTER BERECHNUNGSLGORITHMUS FÜR „ERSPARNIS“
- J: AUSWAHL VERSCHIEDENER TEILNAHMEAUFRUFE ZUR eHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG
- K: ONLINE-FRAGEBOGEN ZUR AKZEPTANZBEFRAGUNG IN DER GESELLSCHAFT
- L: AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSPROJEKTE IM KONTEXT DER eHIGHWAY-FORSCHUNG IM ZEITLICHEN VERLAUF
- M: FLYER ZUM AUFRUF ZUR TEILNAHME AN DER GESELLSCHAFTSBEFRAGUNG ZUM eHIGHWAY-SYSTEM
- N: ÜBERSICHT UND STATUS DER IM RAHMEN DER DISSERTATIONSSCHRIFT BEANTWORTETEN ZIELE UND FORSCHUNGSHYPOTHESEN

---

## A: EINBLICK IN DEN REGULATORISCHEN RAHMEN INTERNATIONALER UND EUROPÄISCHER KLIMASCHUTZPOLITIK

*Im Nachfolgenden werden in Kürze relevante Zielvorgaben internationaler und europäischer Abkommen dargelegt (aktuell und historisch bedeutend), zu deren Einhaltung sich die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet hat. Diese Verpflichtung dient dem internationalen, europäischen sowie nationalen Klimaschutz.*

### INTERNATIONALE EBENE

#### KYOTO-PROTOKOLL

Die (politische) Bedeutung des Klimaschutzes blickt auf eine längere Historie zurück. Ein wesentlicher Meilenstein wurde 1998 mit Verabschiedung des von zahlreichen internationalen Staaten unterzeichneten **Kyoto-Protokolls** erreicht (United Nations 1998). Die Vertragsstaaten haben in diesem Protokoll festgehalten, dass sie ihre Treibhausgasemissionen bis 2012 um mindestens fünf Prozent, verglichen mit ihren ausgestoßenen Treibhausgasemissionen im Basisjahr 1990, reduzieren werden (United Nations 1998, Artikel 3 Absatz 1).

#### PARISER KLIMASCHUTZABKOMMEN

Im Jahr 2015 wurde das **Pariser Klimaschutzabkommen** als Nachfolger des Kyoto-Protokolls verabschiedet (United Nations 2015). In diesem einigten sich die Vertragsstaaten, dass dringend Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die globale Erderwärmung auf maximal 2° C (besser 1,5° C), verglichen mit dem Niveau des vorindustriellen Zeitalters, zu beschränken (United Nations 2015, Artikel 2 Absatz 1a)).

### EUROPÄISCHE EBENE

Auf europäischer Ebene werden für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union zahlreiche Verordnungen, Richtlinien, Beschlüsse o. Ä. verabschiedet, die häufig eine verpflichtende Wirkung für EU-Mitgliedsländer mit sich bringen (Europäische Union o. J., o. S.). Im Folgenden wird eine Auswahl dieser EU-Verabschiedungen präsentiert, die einen Bezug zur Dissertationsschrift haben.

#### RICHTLINIEN 98/70/EG, 2009/30/EG UND (EU) 2015/652

Bereits 1998 wurde eine Richtlinie verabschiedet, die die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen insbesondere von Straßenkraftfahrzeugen reglementiert. Ziel der Richtlinie ist, die Treibhausgasemissionen insbesondere von Straßenkraftfahrzeugen entlang des gesamten Lebenszyklus zu reduzieren (Artikel 1 **Richtlinie 98/70/EG**). Dies erfolgt durch „Inverkehrbringen von Kraftstoffen, die strengeren umweltbezogenen Spezifikationen unterliegen“ (Artikel 6 Richtlinie 98/70/EG).

Die Richtlinie 98/70/EG wurde 2009 durch die **Richtlinie 2009/30/EG** ergänzt. So wurde unter anderem ein zusätzlicher Artikel aufgenommen (7a), der explizit die Minderung von Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit Kraftstoffen tangiert (Artikel 1 Abschnitt 5 Richtlinie 2009/30/EG).

Mit der **Richtlinie (EU) 2015/652** wurden 2015 ergänzend „Vorschriften zu den Verfahren der Berechnung und den Berichterstattungspflichten nach der Richtlinie 98/70/EG festgelegt“ (Artikel 1 Absatz 1 Richtlinie (EU) 2015/652).

#### RICHTLINIEN 2003/87/EG, 2009/29/EG UND (EU) 2018/410

Um die Treibhausgasemissionen in Europa zu reduzieren, wurde von der Europäischen Union ein System zum Handel mit Emissionszertifikaten etabliert – auch bekannt als EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS). Zurückführen lässt sich dieses Emissionshandelssystem auf die **Richtlinie 2003/87/EG** aus dem Jahr 2003. Unternehmen müssen, damit sie Treibhausgase emittieren dürfen, Zertifikate im Gegenwert

---

der Höhe ihrer ausgestoßenen Treibhausgase erwerben. Ein Handel der Zertifikate zwischen Unternehmen ist möglich. Im Verlauf der Zeit wird die Anzahl der Zertifikate begrenzt und reduziert, so dass aufgrund der Reglementierung sukzessive weniger Zertifikate von Unternehmen gehalten werden können und die Treibhausgasemissionen in Folge limitiert werden (da die Anzahl an sich im Umlauf befindenden Zertifikaten nach und nach reduziert wird). Der Gegenwert eines einzelnen Zertifikats wird marktregulatorisch gesteuert und verteuert sich mit einer Abnahme der insgesamt verfügbaren Zertifikate. Hierdurch soll ein Anreiz geschaffen werden, in Maßnahmen zur faktischen Emissionsreduzierung zu investieren anstatt daran festzuhalten, teurer werdende Zertifikate zu erwerben. Das Emissionshandelssystem zählt dabei als eines der zentralen Instrumente europäischer Politik, um die Klimaziele Europas zu realisieren (BMWK 2022a, o. S., Europäischer Rat 2014, S. 2-4). Mit der **Richtlinie 2009/29/EG** wurde im Jahr 2009 die Ursprungsrichtlinie aus dem Jahr 2003 aktualisiert. Auch die **Richtlinie (EU) 2018/410** nimmt Aktualisierungen der ursprünglichen Richtlinie vor. Das in dieser Richtlinie tangierte EU-Emissionshandelssystem bezieht sich jedoch lediglich auf Unternehmen der Energiewirtschaft, Industrien mit einem hohen Energieeinsatz, sowie auf europaweit agierende Luftverkehrsgesellschaften (BMWK 2022a). Für den Straßenverkehr, und damit auch für den Straßengüterverkehr im Speziellen, zeigt diese Richtlinie entsprechend keine Anwendung. Ein Einbezug des Verkehrssektors in das Emissionshandelssystem ist allerdings nicht grundsätzlich ausgeschlossen, wie aus einer Erklärung des Europäischen Rats zu einer Tagung aus dem Jahr 2014 hervorgeht (Europäischer Rat 2014, S. 5).

#### RICHTLINIEN 2009/33/EG UND (EU) 2019/1161

Für den Straßenverkehr von Bedeutung zeigt sich die **Richtlinie 2009/33/EG**. Mit Verabschiedung dieser Richtlinie wurde auf europäischer Ebene die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge zur Verbesserung des Beitrags des Verkehrssektors auf die Umwelt beschlossen (Artikel 1 Richtlinie 2009/33/EG). Vor allem zeigen sich nach dieser Richtlinie der Energieverbrauch, als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fahrzeugs als wichtige Beurteilungsparameter zur Bewertung, inwieweit ein Fahrzeug und dessen Betrieb sich auf die Umwelt auswirken (Artikel 5 Richtlinie 2009/33/EG).

Die **Richtlinie (EU) 2019/1161** hat zum Ziel, die bis dato aktuelle Richtlinie 2009/33/EG zu aktualisieren. Anhand dieser Aktualisierung wird vor allem eine Verschärfung der bisherigen Richtlinie vorgenommen und die jeweiligen EU-Mitgliedsstaaten werden stärker in die Pflicht genommen (siehe beispielsweise Artikel 1 Richtlinie (EU) 2019/1161).

#### VERORDNUNGEN (EU) 2018/1999 UND (EU) 2021/1119

Anhand der **Verordnung (EU) 2018/1999** soll auf europäischer Ebene sichergestellt werden, dass die EU-Mitgliedsstaaten ihren Zusagen im Pariser Klimaschutzabkommen gerecht werden (Artikel 1 Absatz 1 a) Verordnung (EU) 2018/1999). In der Verordnung (EU) 2018/1999 wird unter anderem aber auch das (bis dahin) allgemeine klimapolitische Ziel der EU wiedergegeben: Bis 2030 sind die EU-weiten Treibhausgasemissionen – verglichen mit den Treibhausgasemissionen aus dem Basisjahr 1990 – um mindestens 40 Prozent zu senken (Artikel 2 Verordnung (EU) 2018/1999). Im Jahr 2050 ist eine Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen und in Folge sind negative Treibhausgasemissionen zu realisieren (Artikel 15 Absatz 2 a) Verordnung (EU) 2018/1999). Die Verordnung (EU) 2018/1999 wird dabei auch als Europäisches Klimagesetz verstanden (beispielsweise nach Verordnung (EU) 2021/1119).

Um dieses Ziel zu erreichen, ist jeder EU-Mitgliedstaat deshalb dazu angehalten, einen sogenannten integrierten nationalen Energie- und Klimaplan zu erstellen, und die in diesem Plan festgehaltenen Ziele umzusetzen (Artikel 3 Absatz 1 Satz 1 Verordnung (EU) 2018/1999). Es ist in regelmäßigen Abständen zum Stand der Realisierung und des Fortschritts des erstellten Energie- und Klimaplan zu berichten



---

(Artikel 17 Absatz 1 Verordnung (EU) 2018/1999). Darüber hinaus sind Langfrist-Strategien aufzustellen und in regelmäßigen Abständen zu überarbeiten, um das Erreichen der Klimaschutzziele sicherzustellen (Artikel 15 Absatz 1 Satz 1 und 2 Verordnung (EU) 2018/1999). In den Langfrist-Strategien sind dabei auch Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu berücksichtigen (Anhang IV Verordnung (EU) 2018/1999).

Auf Grundlage der Verordnung (EU) 2018/1999 wird die Europäische Kommission weiterhin dazu ermächtigt, gegenüber EU-Mitgliedsstaaten Empfehlungen auszusprechen, sollte sich abzeichnen, dass diese ihre nationalen Klimaschutzziele voraussichtlich nicht werden einhalten können (Artikel 30 Absatz 1 und 2 Verordnung (EU) 2018/1999).

Mit der **Verordnung (EU) 2021/1119** wurde von der EU schlussendlich der verbindliche Rahmen zur Umsetzung der europäischen Klimaschutzziele geschaffen (Artikel 1 Verordnung (EU) 2021/1119). Die Verordnung baut dabei auf die Verordnung (EU) 2018/1999 auf. Im Vergleich zur Verordnung (EU) 2018/1999 wird mit der Verordnung (EU) 2021/1119 das europäische Klimaschutzziel jedoch nochmals verschärft: Noch immer gilt das primäre Ziel, dass spätestens bis 2050 Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden muss (Artikel 2 Absatz 1 Verordnung (EU) 2021/1119). Zudem wird das zu erreichende Zwischenziel bis 2030 entsprechend des European Green Deal (siehe nachfolgend) angepasst und auf nunmehr 55 Prozent Einsparung an Treibhausgasemissionen angehoben, verglichen zum Ausgangsjahr 1990 (Artikel 4 Absatz 1 Verordnung (EU) 2021/1119).

#### VERORDNUNG (EU) 2018/842

In Ergänzung zu den vorstehend erläuterten Verordnungen wurde unter anderem mit der **Verordnung (EU) 2018/842** ein weiteres Instrument geschaffen, dass die EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen im Zeitraum von 2021 bis 2030 um mindestens 30 % (verglichen mit dem Ausgangsjahr 2005) zu reduzieren (Artikel 1 Verordnung (EU) 2018/842). Die Verordnung (EU) 2018/842 legt dabei für jeden EU-Mitgliedsstaat **konkrete Zielvorgaben** fest, in welcher Höhe Treibhausgasemissionen bis 2030 jeweils tatsächlich einzusparen sind (Artikel 4 Absatz 1 Verordnung (EU) 2018/842). Auf Basis dieser Verordnung ist Deutschland beispielsweise dazu verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 38 Prozent gegenüber dem Ausgangsjahr 2005 zu senken (Anhang I Verordnung (EU) 2018/842).

#### EUROPEAN GREEN DEAL

Mit dem **European Green Deal** (im deutschsprachigen Raum auch als „europäischer Grüner Deal“ bekannt) werden seitens EU mit Nachdruck die dringend erforderlichen Ambitionen zum Schutz des Klimas untermauert. Mit dem European Green Deal möchte die EU sicherstellen, dass einerseits die gesetzten Klimaschutzziele erreicht werden. Andererseits soll hierunter der Wohlstand Europas nicht leiden. Das Wirtschaftswachstum soll losgelöst werden von der Abhängigkeit der Verwendung kritischer und klimaschädlicher Ressourcen. In Summe verfolgt der European Green Deal die Realisierung einer nachhaltigen Wachstumsstrategie für Europa, die Klimaschutz und Wirtschaftswachstum vereinen soll (Europäische Kommission 2019, S. 2).

Im Rahmen des European Green Deal wurde erkannt, dass die bisherigen Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen nicht ausreichen werden, um bis 2050 in der Europäischen Union eine Treibhausgasneutralität zu erreichen. Um dieses Ziel jedoch nicht zu gefährden, wurde das Zwischenziel verschärft: Bis 2030 sind nunmehr mindestens 50 % Treibhausgasemissionen (verglichen mit 1990) einzusparen, angestrebt wird eine Reduktion sogar um 55 % (Europäische Kommission 2019, S. 5).

---

Auch der Verkehrssektor wird im European Green Deal explizit berücksichtigt. Soll in der EU Treibhausgasneutralität erreicht werden, so wird auch der Verkehrssektor seinen Beitrag leisten müssen. Es werden hierbei alle Verkehrsträger angesprochen und das Ziel verankert, zukunftsfähigere Alternativen zum derzeit gewohnten Status quo offerieren zu können. Als ein Handlungsansatz wird hierbei verfolgt, dass Transporte, die derzeit auf der Straße abgewickelt werden, bestmöglich auf die Schiene zu verlagern sind. Weiterhin wird festgehalten, dass die Wirkung von Verkehrsprozessen auf die Umwelt sich schlussendlich auch im Preis widerspiegeln muss. Unter anderem wird dabei überlegt, Subventionen für fossile Energieträger abzuschaffen (Europäische Kommission 2019, S. 12-13). Der Straßengüterverkehr würde in Folge auf der Kostenseite also höhere Ausgaben verbuchen müssen, welche sich langfristig auf den dem Kunden in Rechnung gestellten Preis auswirken und Alternativlösungen wettbewerbsfähiger werden lassen. Weiterhin setzt sich die EU zum Ziel, nachhaltige Kraftstoffe und Antriebskonzepte langfristig am Markt zu etablieren (Europäische Kommission 2019, S. 13).

Generell wird dem European Green Deal höchste politische Priorität eingeräumt (Europäische Kommission 2020b, S. 2). Insbesondere wird erkannt, dass eine Emissionsreduktion im Verkehrssektor besondere Herausforderungen mit sich bringt (Europäische Kommission 2020b, S. 3). Unter anderem sind es die benötigten und teils langen Vorlaufzeiten, bis Klimaschutzmaßnahmen im Verkehrssektor umgesetzt werden können (Europäische Kommission 2020b, S. 3). Bezogen auf den Straßenverkehr liegt dies nicht zuletzt an den relativ langen Lebensdauern von Fahrzeugen, die nach Anschaffung durchschnittlich zehn bis 15 Jahre verwendet werden (Europäische Kommission 2021, S. 10). Von besonderer Bedeutung ist dabei aber auch, dass es sich nicht um Klimaschutzmaßnahmen handeln soll, die den Verkehr ‚abwürgen‘. Vielmehr soll eine Dekarbonisierung realisiert werden, die gleichzeitig den Klimaschutzzielen gerecht wird sowie das Verkehrsangebot in seiner bisherigen Qualität nicht verschlechtert, sondern sogar weiter verbessert (Europäische Kommission 2020b, S. 5). Um das zu erreichen, ergeben sich insbesondere für die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs jedoch erhebliche Herausforderungen (Europäische Kommission 2020b, S. 11).

#### „FIT FÜR 55“-PAKET

Für die Umsetzung des European Green Deal wurde das sogenannte „Fit für 55“-Paket verabschiedet (Europäische Kommission 2021, S. 1-2). „Fit für 55“ steht an dieser Stelle für das seitens der EU gesetzte Zwischenziel, bis 2030 Treibhausgasreduktionen in Höhe von 55 Prozent (verglichen mit 1990) zu erreichen. Besonderer Bestandteil des „Fit für 55“-Pakets sind auch konkrete Maßnahmen für den Verkehrssektor, und im Speziellen auch für den Straßenverkehr. So sieht das Paket unter anderem vor, dass es strengeren CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für den Straßenverkehr bedarf, als auch dass die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe ausgebaut werden muss (Europäische Kommission 2021, S. 4 & 8). Weiterhin wird überlegt, das EU-Emissionshandelssystem zusätzlich um den bislang ausgesparten Straßenverkehr zu erweitern (siehe Ausführungen zu den Richtlinien 2003/87/EG, 2009/29/EG und Richtlinie (EU) 2018/410). Gegenwärtig zeigt sich, dass eine solche Anwendung ab 2026 möglich erscheint (Europäische Kommission 2021, S. 9).

#### STRATEGIE FÜR NACHHALTIGE UND INTELLIGENTE MOBILITÄT

In Ergänzung zum European Green Deal und des „Fit für 55“-Pakets wurde zusätzlich auf europäischer Ebene eine **Strategie konkret für eine nachhaltige und intelligente Mobilität** erarbeitet. Anhand dieser Strategie soll das **europäische Verkehrssystem zukunftsfähig** ausgestaltet werden (Europäische Kommission 2020c). Diese Strategie umfasst mannigfaltige Maßnahmenansätze.

Für die **Transformation des Verkehrssektors im Allgemeinen** werden unter anderem die nachfolgenden Ansätze diskutiert:

- 
- Verringerung der Abhängigkeiten des Verkehrssektors von fossilen Brennstoffen;
  - Verlagerung des Verkehrsaufkommens vor allem auf Verkehrsträger, die sich durch eine höhere Nachhaltigkeit auszeichnen;
  - Verabschiedung strengerer Normen für Luftschadstoffe von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren;
  - Beeinflussung der Nachfrage nach emissionsfreien Fahrzeugen;
  - Preisregulatorische Ansätze wie eine Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, etwaige Steuervergünstigungen oder Straßennutzungsgebühren;
  - Umfassender Auf- und Ausbau von Lade- und Betankungsinfrastruktur alternativer Antriebsformen;
  - Reibungslose Integration von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in das Stromnetz;
  - Sicherstellung einer grenzüberschreitenden Interoperabilität von Elektrofahrzeugen (Europäische Kommission 2020c, S. 1-8).

Neben den vorstehend gelisteten Ansätzen, deren Wirkungen jeweils auf den gesamten Verkehrssektor abzielen, findet **im Speziellen auch der Güterverkehr besondere Beachtung**. So wird für diesen unter anderem Folgendes diskutiert:

- Eine Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf nachhaltige Verkehrsträger ist anzustreben (beispielsweise eine Verlagerung auf die Schiene oder Binnenschifffahrt);
- Der Schienengüterverkehr soll intensiv gefördert werden, beispielsweise durch eine Steigerung der Kapazität, eine optimierte Koordinierung im grenzüberschreitenden Verkehr, ein verbessertes Gesamtmanagement des Schienennetzes oder durch die Verwendung neuer Technologien;
- Das EU-Emissionshandelssystem (siehe vorstehende Ausführungen zu den Richtlinien 2003/87/EG, 2009/29/EG und (EU) 2018/410) soll überarbeitet und gegebenenfalls um weitere Anwendungsgebiete erweitert werden (zum Beispiel um den Straßenverkehr);
- Subventionen auf fossile Brennstoffe sollen eingestellt werden (Europäische Kommission 2020c, S. 11-13).

Die verschiedenen Zielstellungen, die im Rahmen der Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität erarbeitet wurden, wurden schlussendlich in einem Aktionsplan zusammengefasst (Europäische Kommission 2020a).

## B: LAGE DER eHIGHWAY-TESTSTRECKEN IN DEUTSCHLAND

Nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die räumliche Verortung der gegenwärtig drei in Deutschland betriebenen eHighway-Teststrecken. Nahe Lübeck ist in Schleswig-Holstein Deutschlands nördlichste eHighway-Teststrecke auf der A1 in Betrieb. Ihr Testbetrieb wird evaluiert durch das **Forschungsprojekt FESH**. In der Nähe von Karlsruhe befindet sich Deutschlands gegenwärtig südlichste eHighway-Teststrecke. Auf einer Bundesstraße bei Gaggenau wird im Rahmen des **Forschungsprojekts eWayBW** zur Erforschung des eHighway-Systems beigetragen. Die zum **ELISA-Projekt** gehörende hessische eHighway-Teststrecke befindet sich zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt und ist wesentlicher Gegenstand dieser Dissertationsschrift.



**Abbildung 58: Räumliche Verortung der eHighway-Teststrecken in Deutschland**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP (2021, FOLIE 6); Karte: GOOGLE IRELAND LIMITED (2022, o. S.))



## C: STAND DER FORSCHUNG ZUM EHIGHWAY-SYSTEM

*Neben den praktischen Erprobungen auf den eHighway-Teststrecken und den vorangegangenen Machbarkeitsstudien (ENUBA, ELISA, FESH, etc.) werden in einigen nationalen und europäisch-internationalen Projekten und Studien vor allem strategische Untersuchungen angestellt und Querschnittsthemen adressiert. Ein Überblick über die wesentlichen Forschungsaktivitäten im Kontext der eHighway-Forschung wird im Folgenden aufbereitet.*

### DIE EHIGHWAY-FORSCHUNG IM VORWIEGEND NATIONALEN KONTEXT

Auf nationaler Ebene lassen sich zunächst vielfältige Aktivitäten hinsichtlich der technischen Optimierung des eHighway-Systems, und hierbei insbesondere mit Fokus auf dem O-Lkw, feststellen. So wurden bspw. im Rahmen des Projekts „ELANO“<sup>77</sup> Optimierungen an Schlüsselkomponenten eines O-Lkws vorgenommen, insbesondere am Pantographen (Siemens Mobility GmbH 2020, S. 8-9). Die technische Einsatzfähigkeit der Oberleitungs-Technologie, erneut mit Fokus auf dem Pantographen, wurde ebenfalls im Projekt „OL-Lkw“<sup>78</sup> optimiert (BMWK o. J., o. S.).

Allgemeine technische Verbesserungen am eHighway-System wurden im Projekt „ELONSO“<sup>79</sup> verfolgt (BMWK o. J., o. S.). Auch dem Projekt „eHighway“<sup>80</sup> liegt als Schwerpunkt die technische Weiterentwicklung des eHighway-Systems zugrunde, jedoch vor dem Hintergrund, neben hybriden auch voll-elektrischen O-Lkw die zuverlässige dynamische Energieversorgung über eine Oberleitungsanlage zu ermöglichen. Der Kern dieses Projekts liegt vor allem darin, Produkte zu entwickeln, die explizit für den Einsatz im oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehr vorgesehen sind und nicht, wie bisher gängige Praxis, lediglich Produkte aus dem Schienenverkehr heranzuziehen und für den eHighway-Gebrauch zu adaptieren (BMWK o. J., o. S.). Weitere Verbesserungen, insbesondere bezüglich der verbauten elektrischen Komponenten in einem O-Lkw, werden im Projekt „HiLine“<sup>81</sup> vorgenommen. Der Fokus in diesem Projekt liegt im Wesentlichen auf der Entwicklung und Optimierung eines Ladegeräts zur idealen Ladung des elektrischen Energiespeichers von O-Lkw (BMWK o. J., o. S.).

In den Projekten „Live“<sup>82</sup> und „LivePLuS“<sup>83</sup> erfolgt die Konzeptionierung eines modularen und individuell anpassbaren Antriebsstrangs für verschiedene Elektro-Lastkraftwagen, unter anderem auch explizit für O-Lkw (RWTH Aachen 2022; RWTH Aachen 2020). Eine ähnliche Schwerpunktsetzung wurde auch dem Projekt „BEE“<sup>84</sup> zugrunde gelegt, in welchem die Entwicklung eines O-Lkws inklusive anschließender Erprobung adressiert wird. In Ergänzung werden Technologievergleiche zwischen reinen batterieelektrischen Lkw und oberleitungs-basierten Lkw durchgeführt (BMWK o. J., o. S.).

Ferner trugen unter anderem MAREEV & SAUER (2018) zur eHighway-Forschung bei, indem sie **O-Lkw vor allem unter ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten** analysierten. Sie fokussierten sich hierbei räumlich auf das deutsche Autobahnnetz und zogen verschiedene Speicherkapazitäten des elektrischen Energiespeichers in ihre Untersuchungen mit ein. Durchgeführte Modellrechnungen basierten dabei einerseits auf eigens definierten Annahmen, andererseits auf Ergebnissen der ENUBA-Projekte. Sie kamen zu dem Schluss, dass der Stromverbrauch von O-Lkw bei etwa 1,66-1,82 kWh/km

<sup>77</sup> „Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen“.

<sup>78</sup> „Technologieerprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung“.

<sup>79</sup> „Elektrifizierung länderübergreifend betriebener Oberleitungs-Nutzfahrzeuge durch sequenzielle Oberleitungsabschnitte“.

<sup>80</sup> „Entwicklung einer herstellerunabhängigen Systemtechnologie für Oberleitungs-Lkw“.

<sup>81</sup> „Hochintegrierte Leistungselektronik in E-Lastkraftwagen“.

<sup>82</sup> „Lebenszyklusreduktion im elektrischen Verteilerverkehr durch individuell adaptierbaren Antriebsstrang“.

<sup>83</sup> „Lebenszykluskostenreduktion im elektrischen Verteilerverkehr durch pantographenbasierte Baukastensysteme für Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen“.

<sup>84</sup> „BEV Goes eHighway“.



---

liegen dürfte. Weiterhin schlussfolgerten sie, dass O-Lkw hinsichtlich anfallender Kosten im Lebenszyklus gegenüber Diesel-Lkw konkurrenzfähig sein dürften (Mareev & Sauer 2018, S. 14-15).

Neben den fahrzeugbezogenen Aspekten, die wesentlicher Untersuchungsgegenstand der vorstehend umrissenen Forschungsprojekte und -studien waren bzw. sind, finden auch infrastrukturelle Aspekte Beachtung in jüngeren Forschungsvorhaben. So beispielsweise im Rahmen des Projekts „**PowerCharger**“<sup>85</sup>, in welchem die eHighway-Teststrecke in Schleswig-Holstein um ein Forschungsunterwerk inklusive Batteriespeicher zum Ausgleich verschiedener Lastsituationen erweitert wurde (BMWK o. J., o. S.). Es lassen sich anhand dieses Forschungsunterwerks vertiefte Analysen zur Energieversorgung einer Oberleitungsanlage durchführen. Auch PLÖTZ U. A. (2019) haben sich bereits mit den Auswirkungen, die von einem eHighway-System auf das Stromnetz ausgehen, beschäftigt. Sie schlussfolgerten, dass die Auswirkungen strombeziehender O-Lkw auf das Stromnetz beherrschbar seien.

Im Kontext von Forschungsaktivitäten, die sich mit infrastrukturellen Teilaspekten des eHighway-Systems auseinandersetzen, ist auch die Dissertationsschrift von ROLKO (2020) anzuführen. ROLKO (2020) hat sich intensiv mit der **Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für die möglichst optimale Ausstattung von Fahrwegen mit dynamisch-elektrischen Energieversorgungssystemen** am Beispiel des eHighway-Systems auseinandergesetzt.

Und auch der Beitrag von LINKE U. A. (2022) ist vorrangig in dem Teilgebiet der infrastrukturellen Aspekte eines eHighway-Systems zu verorten. LINKE U. A. (2022) beschäftigten sich mit einer **Zukunftsvision des eHighway-Systems als skaliertes Megaprojekt**. Sie stellten eine erste Studie an, in der sie untersuchten, inwieweit sich die **Integration künstlicher Intelligenz** positiv auf den Betrieb und die Verfügbarkeit eines eHighway-Systems auswirken kann. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass durch die Verwendung künstlicher Intelligenz durchaus positive Wirkungen zu erwarten sein dürften und sich die Systemverfügbarkeit verbessern werde. Es bedürfe hierfür aber einer umfassenden und qualitätsgeprüften Basis an Realdaten.

HANESCH U. A. (2022) erarbeiteten Ergebnisse zu einem **Life Cycle Assessment** (auch „Lebenszyklusanalyse“ oder „Ökobilanz“) eines eHighway-Systems. Auf der Grundlage der zum damaligen Zeitpunkt verfügbaren Zwischenergebnisse des eHighway-Betriebs auf der ELISA-Teststrecke kamen HANESCH U. A. (2022) zu dem Schluss, dass selbst wenn O-Lkw weitere Komponenten und zusätzliche Infrastruktur in Form von Oberleitungsanlagen benötigen, Einsparungen an Treibhausgasemissionen möglich seien. Die Höhe der Einsparungen hänge jedoch von dem betrachteten Anwendungsfall und den verfügbaren Eingangsdaten für die Bewertung der Ökobilanz ab. Darüber hinaus seien der für die Berechnungen verwendete Strommix sowie die verfügbare Länge einer elektrifizierten Strecke von größter Bedeutung.

Parallel zu den Forschungsprojekten und Studien, die sich vorrangig mit einer technischen Verbesserung des eHighway-Systems auseinandersetzen, lassen sich ferner auch Aktivitäten hinsichtlich der Erarbeitung von **Markteintritts- und Markthochlaufstrategien, Ausbaupfaden sowie Technologievergleichen** vorfinden.

Im Projekt „**StratON**“<sup>86</sup> wurde beispielsweise analysiert, dass O-Lkw – selbst bei Verwendung eines Strommixes, der nicht vollumfänglich durch regenerative Energiequellen erzeugt wird – bereits erhebliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen zulassen können: Ein durch Oberleitungsanlagen elektrifiziertes Kernnetz in Deutschland von etwa 4.300 Kilometern stellt sich dabei – so die Autoren der Studie – als zielführend heraus und erlaubt einen Großteil der Fahrleistung des Straßengüterverkehrs zu elektrifizieren. Mit einem solchen Kernnetz ließen sich, so die Studie, im Jahr 2040 etwa neun bis

---

<sup>85</sup> „Netzintegration eines innovativen Speicherunterwerkes zur Versorgung des eHighways SH“.

<sup>86</sup> „Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“.

---

zwölf Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen. Die Kosten eines solchen Kernnetzes beliefen sich auf etwa 12 Milliarden Euro. Voraussetzung für die Errichtung eines solchen Kernnetzes sei jedoch die vorherige Erarbeitung eines für alle Beteiligten verlässlichen, regulatorischen Rahmens (Hacker, Blanck, u. a. 2020, S. 15-25).

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich im Projekt „**Roadmap OH-Lkw**“<sup>87</sup>. In diesem Projekt wurde ein Systemvergleich verschiedener Antriebsalternativen zum herkömmlichen Diesel-Lkw vorgenommen und es wurden dabei Hemmnisse und Herausforderungen untersucht, die bei Markteinführung aufkommen könnten. Unter Einbezug des politischen Rahmens wurden weiterhin für den O-Lkw vorteilhafte Einsatzszenarien erarbeitet und das jeweilige Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen beziffert. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass etwa 3.200 Kilometer deutscher Fernstraßen elektrifiziert werden müssen, um merkbare Einsparungen an Treibhausgasemissionen zu erlauben. Der Aufbau eines solchen Netzes an Oberleitungsanlagen müsse durch den Staat, bzw. durch dessen Obhut erfolgen. In Folge zeigen sich jährliche Einsparungen von in Summe knapp zehn Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> als realistisch (Jöhrens u. a. 2020, S. 3-4). Eine Betrachtung auf Fahrzeugebene zeigt ferner, dass Diesel-Hybrid-O-Lkw in etwa 26 % und rein batterieelektrische O-Lkw gut 50 % an Treibhausgasemissionen gegenüber einem Diesel-Lkw einsparen können (Jöhrens u. a. 2020, S. 10).

HACKER, JÖHRENS U. A. (2020) erarbeiteten eine vergleichbare Schlussfolgerung. In ihrer Studie, die sich grundsätzlich mit einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, Analysen von Umweltwirkungen als auch der Erarbeitung von Ausbauszenarien zum eHighway-System beschäftigt, identifizieren sie den Bedarf eines Kernnetzes an Oberleitungsanlagen mit einer Länge von 4.000 Kilometern. Auf den identifizierten Kernstrecken fänden knapp 65 % der Fahrleistung des Lkw-Fernverkehrs statt – das eHighway-System ließe sich entsprechend für eine hohe Nutzeranzahl als Antriebsalternative darbieten. Die Errichtung eines solchen Netzes wird mit rund 10 Milliarden Euro beziffert. HACKER, JÖHRENS U. A. (2020) kommen darüber hinaus zu dem Schluss, dass die Nutzenphase eines O-Lkws maßgeblich die Treibhausgasemissionsbilanz eines O-Lkws bestimmen wird. Der Fahrzeugherstellung sowie der Errichtung der Oberleitungsanlagenkomponenten rechnen sie in diesem Zusammenhang weniger Bedeutung zu. Generell kommen sie zu dem Ergebnis, dass selbst unter Berücksichtigung des Strommixes von 2030, der nicht vollumfänglich aus erneuerbaren Energien erzeugt werden wird, Diesel-Hybrid-O-Lkw dennoch bis zu 26 % an Treibhausgasemissionen gegenüber einem Diesel-Lkw werden einsparen können. Reinelektrische O-Lkw könnten sogar Einsparungen von bis zu 44 % ermöglichen. Ferner geht die Studie davon aus, dass sich langfristig mit einem ausgebauten Netz an Oberleitungsanlagen mit einer Länge von 4.000 Kilometern jährlich rund 12 Millionen Tonnen an Treibhausgasemissionen einsparen ließen (Hacker, Jöhrens, u. a. 2020, S. 5 & S. 20-21 & S. 27).

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für alternative Antriebstechnologien wurden unter anderem auch im Projekt „**My eRoads**“ durchgeführt. Diese Studie schlussfolgert, dass in erster Linie strombasierte Antriebskonzepte eine kostengünstige Alternative zum Diesel-Lkw darstellen. Wasserstoff erweise sich, zumindest auf kurze Sicht, als wenig konkurrenzfähig. Ferner stellt sich heraus, dass hinsichtlich des Einsparpotenzials an Treibhausgasemissionen vor allem batterieelektrische und oberleitungsbasierte Lastkraftwagen Vorteile aufweisen könnten (Jöhrens, Allekotte, u. a. 2022, S. 6-12).

Dem Projekt „**StratES**“<sup>88</sup> liegt als Zielstellung die Untersuchung der Anforderungen an alternative Antriebstechnologien für den Straßengüterverkehr durch den Transport- und Logistikmarkt zugrunde. Das Projekt zeichnet sich aus durch die umfassende Evaluation von regulatorischen und marktspezifischen Rahmenbedingungen; zusätzlich werden Markthochlaufstrategien aufgestellt (Göckeler u. a.

---

<sup>87</sup> „Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland“.

<sup>88</sup> „Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“.

---

2020, S. 6-7). Ein weiteres Augenmerk wird ergänzend auf die Analyse gelegt, inwieweit die alternativen Antriebstechnologien durch die Nutzenden akzeptiert werden. Im Ergebnis zeigt sich, dass Transportunternehmen vor allem den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Lastkraftwagen als vielversprechend ansehen; batterieelektrische Lkw sowie O-Lkw würden bislang weniger akzeptiert werden (Göckeler u. a. 2022, S. 7-10). Weitere Markteinführungsstrategien für zukunftsfähige Antriebslösungen im Straßen-güterverkehr werden darüber hinaus im Forschungsvorhaben „**ESOB-RKI**“<sup>89</sup> bis Ende 2024 erarbeitet. Handlungsempfehlungen werden abgeleitet und Synergiepotenziale zwischen den gegenwärtig diskutierten alternativen Antriebskonzepten untersucht (BMWK o. J., o. S.).

Der Projektreihe „**AMELIE**“<sup>90</sup> (siehe unter anderem HARTWIG U. A. (2020)) liegt hingegen vor allem die Entwicklung von Abrechnungssystemen für ERS mit besonderem Fokus auf O-Lkw zugrunde. Diese Projektreihe zeichnet sich dabei insbesondere durch eine starke Ausrichtung auf den regulatorischen Rechtsrahmen aus.

JÖHRENS U. A. (2022) stellen mit einem Arbeitspapier eine **übergeordnete Zusammenfassung** des zu Beginn des Jahres 2022 aktuellen Wissensstands zum eHighway-System und zugehörigen Querschnittsthemen zur Verfügung. Der Wissensstand basiert maßgeblich auf Erkenntnissen, die im Rahmen der Begleitforschung zu den drei deutschen eHighway-Teststrecken gewonnen werden konnten. Auch die Studie von BERGK U. A. (2016) trägt zur übergeordneten eHighway-Forschung bei. Die Studie setzt sich zunächst allgemein mit der Herleitung von Minderungszielen für Treibhausgasemissionen im (Güter-)Verkehrssektor bis 2050 auseinander und betrachtet in diesem Zusammenhang als Teilaspekt ebenfalls O-Lkw. Es wird geschlussfolgert, dass trotz hoher Aufwendungen, die für ein angemessen ausgebautes Netz an Oberleitungsanlagen notwendig seien, O-Lkw die effizienteste Elektrifizierungsoption für den Straßengüterverkehr darstellen. Sie weisen jedoch darauf hin, dass neben dem primären Ziel – *der umfassenden Reduktion von Treibhausgasemissionen* – ferner zusätzlich darauf geachtet werden müsse, auch sekundäre Zielstellungen zu erreichen: So sei auch die gesellschaftliche Akzeptanz von Bedeutung und sollte bei Ausbauvorhaben nicht außer Acht gelassen werden (Bergk u. a. 2016, S. 20-22). Dass es für den erfolgreichen Einsatz von O-Lkw eines (europaweit) adäquat ausgebauten Netzes an Oberleitungsanlagen bedarf, um merklich Einsparungen an Treibhausgasemissionen zu realisieren, schlussfolgern dabei nicht nur BERGK U. A. (2016, S. 104-105), sondern unter anderem auch PLÖTZ U. A. (2018, S. 2-8). Auch akzeptanzbezogene Aspekte werden durch PLÖTZ U. A. (2018) adressiert, die sich ähnlich wie BERGK U. A. (2016) dafür aussprechen, dass mangelnde Akzeptanz zu einer ausbleibenden Nachfrage an O-Lkw führen könne (Plötz u. a. 2018, S. 6). Beide Studien zeigen darüber hinaus allerdings auch einen besonderen Vorteil der eHighway-Technologie auf: Durch die Direktnutzung der über die Oberleitungen zur Verfügung gestellten elektrischen Energie stehen O-Lkw unmittelbar im Einklang mit den Zielvorgaben des Klimaschutzplans 2050. Nach diesem sind erneuerbare Energien in einer solchen Form zugänglich zu machen, dass diese für eine direkte Nutzung zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 2.1.4) (Bergk u. a. 2016, S. 104-105; Plötz u. a. 2018, S. 6; BMUB 2016, S. 14-15). Weiterhin zeigen PLÖTZ U. A. (2018, S. 10-12), dass eine Verwendung von O-Lkw dazu beitragen kann, Abhängigkeiten bzgl. des Imports von fossilen Kraftstoffen zu minimieren.

Insbesondere aufgrund eines identifizierten **Mangels an hinreichend vorhandenen Erkenntnissen zur gesellschaftlichen Akzeptanz** des eHighway-Systems (Burghard & Scherrer 2020, S. 9), haben sich vor allem BURGHARD & SCHERRER (2020) intensiver mit eben dieser auseinandergesetzt. Basierend auf einer Zusammenstellung von vorliegenden Ergebnissen aus den drei Forschungsprojekten zu den eHighway-Teststrecken in Deutschland, einer auf Zeitungsartikeln beruhenden Medienanalyse sowie einer Identifikation von Akteuren, kamen BURGHARD & SCHERRER (2020, S. 12-14 & S. 22 & S. 30) zu dem

---

<sup>89</sup> „Elektrischer Straßengüterverkehr mit Oberleitungen und Batterien: Rationalität, Kombinationen und Institutionendesign“.

<sup>90</sup> „Abrechnungssysteme und -methoden für elektrisch betriebene Lkw sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext“.

---

Ergebnis, dass vor allem die hohen Kosten für die Errichtung der Infrastruktur zu einer Ablehnung der eHighway-Technologie in der Bevölkerung führen. Die Öffentlichkeit favorisiere derzeit eine Stärkung des Schienengüterverkehrs bzw. generell anderweitiger Antriebsalternativen für den Straßengüterverkehr, statt der Verwendung von O-Lkw. Als weitere Schlussfolgerung der Studie zeigt sich, dass eine mangelnde lokale Akzeptanz von Bürgerinnen und Bürgern, die in der Nähe einer eHighway-Strecke wohnen (bzw. in Zukunft wohnen könnten), zu Herausforderungen beim Ausbau eines Netzes an Oberleitungsanlagen führen könne. Unter anderem aus diesem Grund sei eine frühzeitige Beteiligung der Öffentlichkeit an geplanten Ausbauvorhaben von besonderer Relevanz (Burghard & Scherrer 2020, S. 30 & S. 38). Allgemein kommen BURGHARD & SCHERRER (2020, S. 37) zu dem Ergebnis, dass die Akzeptanzforschung zur eHighway-Technologie bislang wenig fortgeschritten sei und kaum belastbare (empirische) Erkenntnisse hierzu vorlägen. Jüngst (Anfang 2023) wurde zur eHighway-Akzeptanzforschung jedoch weiters durch HEIN U. A. (2023) beigetragen, die sich insbesondere mit der **Akzeptanz auf Seiten von Energieversorgungsunternehmen** beschäftigt haben.

Auch im Rahmen der Analysen von BREISIG U. A. (2022) findet das eHighway-System Beachtung. BREISIG U. A. (2022) beschäftigten sich mit der Erarbeitung verschiedener Einzelmaßnahmen sowie Maßnahmenbündeln, die dazu beitragen sollen, die Klimaschutzziele im Verkehr nach Klimaschutzplan 2050 bzw. Klimaschutzgesetz (siehe Kapitel 2.1.4) zu erreichen. Besonderer Fokus ihrer Studie liegt auf einer ökonomischen Bewertung der aufgestellten Maßnahmen(bündel). In Summe wurden 14 Einzelmaßnahmen aufgestellt. Eine dieser Einzelmaßnahmen adressiert explizit die Einführung von O-Lkw. Basierend auf den Erkenntnissen des Forschungsprojekts „StratON“ (siehe vorherige Ausführungen) schlussfolgern BREISIG U. A. (2022, S. 140), dass bis 2050 durch O-Lkw in etwa 30 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (kumuliert) eingespart werden können. Trotz Einsparungen an Treibhausgasen in dieser Höhe kommen BREISIG U. A. (2022, S. 24) allerdings zu dem Ergebnis, dass die Einführung von O-Lkw im Vergleich zu den anderen aufgestellten Maßnahmen deutlich weniger Einsparungspotenzial zuließe (zum Vergleich: Die Einführung einer Pkw-Maut führe zu Einsparungen in Höhe von 466 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente bis 2050). Es zeige sich aber auch, dass mit der umfassenderen Einführung von O-Lkw anderweitige positive Effekte verbunden seien, wie bspw. wertschöpfende Auswirkungen auf die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (siehe Kapitel 2.1.2: Rund 32 Milliarden Euro dürften im Bruttoinlandsprodukt bis 2050 hierdurch in Summe verbucht werden können (Breisig u. a. 2022, S. 190-191)).

#### DIE EHIGHWAY-FORSCHUNG IM VORWIEGEND EUROPÄISCH-INTERNATIONALEN KONTEXT

Deutschland nimmt hinsichtlich der eHighway-Forschung zweifelsohne eine Vorreiterrolle ein, wie unter anderem auch die Vielzahl der vorstehend vorgestellten Forschungsprojekte und Studien deutlich unterstreicht. So sehen es auch CLAES & KNEZEVIC (2022), die Deutschland gar als „ERS-Pionier“ (aus dem Englischen für „ERS-pioneers“ (Claes & Knezevic 2022, S. 2)) betiteln. Generell ordnen CLAES & KNEZEVIC (2022, S. 2) (europäische) Länder hinsichtlich ihrer Aktivitäten im Zusammenhang mit ERS in drei Gruppen ein: Neben den ERS-Pionieren differenzieren CLAES & KNEZEVIC (2022, S. 2) zusätzlich zwischen sogenannten „Second-Movers“ (bspw. Österreich oder Niederlande) und „Observers“ (bspw. Polen oder Ungarn). Von besonderer Relevanz zeigt sich dabei, dass CLAES & KNEZEVIC (2022, S. 35) davon ausgehen, dass Second-Movers und Observers ihre Entscheidung hinsichtlich des Auf- und Ausbaus einer ERS-Infrastruktur davon abhängig machen werden, inwieweit ERS durch Pioniere erfolgreich am Markt platziert werden konnten. Generell beschäftigen sich CLAES & KNEZEVIC (2022) im Rahmen ihrer Studie mit der grenzüberschreitenden Interoperabilität von ERS.

Es wird sukzessive deutlich, dass der weitreichende Auf- und Ausbau von Oberleitungsanlagen für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs kein ausschließlich nationales, sondern mindestens ein europäisches Handeln erfordert. Es verwundert somit kaum, dass auch im europäisch-internationalen



---

Raum etwaige Forschungsaktivitäten zur eHighway-Technologie zu verzeichnen sind. So beispielsweise das Projekt „CollERS2“<sup>91</sup>, in welchem eine Zusammenarbeit zwischen Deutschland, Frankreich und Schweden hinsichtlich der Erarbeitung von Konzepten zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs zur Transformation desselben beitragen soll. Besonderer Fokus dieses Projekts liegt dabei auf ERS. Das wesentliche Ziel dieses Projekts ist ein gegenseitiger Erfahrungs- und Wissensaustausch unter Einbezug verschiedener europäischer Länder (o. A. o. J.). Ferner beschäftigten sich unter anderem aber auch QIU U. A. (2022) mit dem eHighway-System. In ihrer Studie untersuchen sie vor allem ökonomische Gesichtspunkte von Lkw, die dynamisch während der Fahrt mit elektrischer Energie versorgt werden können. Ihren Fokus lagen sie dabei einerseits auf O-Lkw, andererseits auf Lkw, die induktiv und somit kontaktlos geladen werden. QIU U. A. (2022) kamen dabei zu dem Ergebnis, dass elektrische Energiespeicher grundsätzlich eine kostspielige Komponente darstellen und sich infolge sowohl eine induktiv-dynamische als auch eine induktiv-dynamische elektrische Energieversorgung positiv auf der Kostenseite bemerkbar machen können. Auch ließen sich deutliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen realisieren. Kostenvorteile von ERS-Fahrzeugen im Allgemeinen werden auch von CONNOLLY (2017) als möglich und wahrscheinlich erachtet. In diesem Zusammenhang ist auch die Studie von NETZER U. A. (2022) anzuführen, die die Auswirkungen eines eHighway-Systems auf die erforderliche Bruttokapazität von elektrischen Energiespeichern von elektrischen Lkw untersuchten.

BREUER U. A. (2021) fokussieren auf einen Technologievergleich zwischen Brennstoffzellen-Lkw, batterieelektrischen Lkw, Diesel-Hybrid-O-Lkw, als auch rein batterieelektrischen O-Lkw, insbesondere mit den Analyseschwerpunkten des Einsparpotenzials an Treibhausgasen und Luftschadstoffen, den Errichtungskosten der jeweils notwendigen Infrastruktur einerseits, sowie den anfallenden Kosten im späteren Betrieb andererseits. BREUER U. A. (2021) kommen zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von Diesel-Hybrid-O-Lkw aus der Kostenperspektive nur auf vielbefahrenen Strecken lohnt, reine batterieelektrische O-Lkw hingegen mit Unsicherheiten hinsichtlich eines ausreichend ausgebauten Netzes an Oberleitungsanlagen verbunden sei. Sowohl dieselhybride als auch rein batterieelektrische O-Lkw ließen jedoch eine Reduktion an Treibhausgasemissionen zu. Bezüglich des Auf- und Ausbaus eines Oberleitungsanlagenetzes trugen indes auch COLOVIC U. A. (2022) oder SCHWERDFEGGER U. A. (2022) mit ihren Forschungen bei. COLOVIC U. A. (2022) erarbeiteten ein Modell, dessen Anwendung bei Planungsvorhaben von Oberleitungsanlagen bei der räumlichen Verortung dieser unterstützen soll. SCHWERDFEGGER U. A. (2022) entwickelten ein Optimierungsverfahren, dessen Anwendung es erlauben soll, die Errichtungskosten für ERS am Beispiel des eHighway-Systems möglichst zu minimieren unter Gewährleistung einer gleichzeitigen Versorgungssicherheit der das ERS nutzenden Fahrzeuge. Ein weiterer Technologievergleich zwischen (vorrangig) batterieelektrischen O-Lkw und Brennstoffzellen-Lkw wurde von AINALIS U. A. (2022) durchgeführt. Sie untersuchten, vor allem unter ökonomischen Gesichtspunkten, welchen Beitrag die jeweilige Technologie zur Erreichung einer Treibhausgasneutralität Großbritanniens bis 2050 leisten kann. Im Ergebnis zeigt sich, dass in diesem Vergleich O-Lkw die sowohl kosten- als auch energieeffizientere Dekarbonisierungsoption für den Straßengüterverkehr darstellen. Ferner schlagen sie vor, dass auf politischer Ebene in Großbritannien Ambitionen gehegt werden sollten, die eHighway-Technologie in einem praktischen Feldversuch zu erproben. Indirekt wurde die eHighway-Technologie weiterhin auch von CHEN U. A. (2016) betrachtet, die sich im Rahmen ihrer Studie mit der Einrichtung von Ladespuren generell für ERS beschäftigt haben und dabei analysierten, wie sich solche auf die Routenwahl der Fahrenden von ERS-Fahrzeugen auswirken. Als eines ihrer Ergebnisse soll hervorgehoben werden, dass die Fahrenden von ERS-Fahrzeugen auf den eingerichteten Ladespuren womöglich mit geringerer Geschwindigkeit fahren werden, um ihre elektrischen Energiespeicher möglichst vollständig zu laden.

---

<sup>91</sup> „International Research Collaboration on Electric Road Systems II“.



---

## ZWISCHENRESÜMEE

In den vorstehenden Ausführungen zeigt sich die Vielfalt der Analysen, die bislang im Kontext der eHighway-Forschung bereits durchgeführt wurden, bzw. gegenwärtig durchgeführt werden. Es zeigt sich ferner, dass die bislang zum Stand der Forschung beigetragenen Ergebnisse mangels vorhandener Daten aus praktischen Erprobungen unter realen Bedingungen vor allem theoretischer Natur sind und vorwiegend auf Annahmen beruhen. Auch wenn die eHighway-Technologie technisch grundsätzlich einer Serienreife nah zu sein scheint, bedarf es zunächst vor allem an belastbaren Kenntnissen und Ergebnissen aus einer Erprobung der eHighway-Technologie unter Realbedingungen – so unter anderem auch HACKER, JÖHRENS U. A. (2020, S. 35-36); Ein Ziel, das sich unter anderem auch das Forschungsprojekt ELISA zur Aufgabe gemacht hat.

---

## D: ERGÄNZENDE AUSFÜHRUNGEN ZU AKZEPTANZMODELLEN

Die ‘Theory of Reasoned Action’, das ‘Technology Acceptance Model’ sowie die ‘Unified Theory of Acceptance and Use of Technology’ finden in der Akzeptanzforschung weite Verbreitung. Ihre wesentlichen Merkmale werden im Folgenden als Ergänzung zu den Ausführungen im Hauptteil der Dissertationsschrift dargelegt.

### THEORY OF REASONED ACTION

Der **Theory of Reasoned Action**, im deutschsprachigen Raum auch als Theorie des vernünftigen Handelns beschrieben, liegt die Annahme zugrunde, dass sich Menschen stets *vernünftig* verhalten. Sie verfolgen grundsätzlich eine eigene Verhaltensabsicht, die aufgrund innerer Werte und Vorstellungen schon vor der eigentlichen Handlung durch die Person entschieden wurde (Arnold & Klee 2016, S. 14-15; Ajzen 1985, S. 11). Basierend auf Wahrscheinlichkeitsrechnungen lassen sich Verhaltensabsichten einer Person voraussagen, so die Theorie. Die Verhaltensabsicht werde dabei vor allem durch zwei Variablen determiniert: Einerseits verfüge eine Person zunächst über eine eigene, persönliche Überzeugung und eigene Wertevorstellungen; andererseits werde das Verhalten einer Person aber auch durch das jeweilige soziale Umfeld beeinflusst. Es liegt hierbei die Annahme zugrunde, dass das soziale Umfeld eine gewisse Erwartungshaltung an das Verhalten einer Person ausübt – verwendet wird hierfür auch häufiger der Begriff des *sozialen Drucks*. Es erscheint somit möglich, dass sich die Entscheidung einer Person stärker an der sozialen Erwartungshaltung orientiert, als an der eigentlichen eigenen Überzeugung (Arnold & Klee 2016, S. 14-15; Ajzen 1985, S. 12).

Die Theorie des vernünftigen Handelns ist hinsichtlich ihrer Ergebnis-Reliabilität nicht unumstritten. Impulsentscheidungen einer Person – beispielsweise Impulskäufe im Supermarkt – die von dem eigentlich vernünftigen Handeln abweichen, können in der Regel nur schlecht beziehungsweise gar nicht vorhergesagt werden, da sie nicht durch eine *vernünftige* Verhaltensabsicht erklärt werden können. Ferner ist die Zeitspanne, die zwischen der Verhaltensvorhersage und dem eigentlichen Ereignis liegt, von zentraler Bedeutung, da sich Verhaltensabsichten einer Person über die Zeit verändern können – je länger also die Zeitspanne zwischen der Verhaltensvorhersage und dem eigentlichen Ereignis, desto schwieriger und ungenauer eine schlussendlich zutreffende Verhaltensvorhersage (Arnold & Klee 2016, S. 14-16).

### TECHNOLOGY ACCEPTANCE MODEL NACH DAVIS (1985)

Das **Technology Acceptance Model** stammt ursprünglich aus dem IT-Bereich. Es dient der Untersuchung, inwiefern eine Person die Verwendung einer Computer-Software akzeptiert (Davis 1985, S. 7). Es stützt sich darauf, dass die Akzeptanz einer Person durch die beiden Variablen *wahrgenommene Nützlichkeit* (Perceived Usefulness) sowie *wahrgenommene Nutzerfreundlichkeit* (Perceived Ease of Use) determiniert wird. Unter der wahrgenommenen Nützlichkeit wird verstanden, inwieweit eine Person die Verwendung einer Computer-Software als nützlich erachtet, also einen Mehrwert im Vergleich zum Status quo beziehungsweise zu anderweitigen Alternativen feststellen kann. Die wahrgenommene Nutzerfreundlichkeit beschreibt, inwieweit eine Person die Verwendung einer Computer-Software als angenehm empfindet, also frei von körperlicher und/oder mentaler Anstrengung. Auch hierbei zieht eine Person anderweitige Alternativen in ihren Abwägungsprozess mit ein (Arnold & Klee 2016, S. 18-19; Davis 1985, S. 24-26). Abbildung 59 zeigt das Technology Acceptance Model nach DAVIS (1985) grafisch auf. Es wurde für den Kontext dieser Dissertationsschrift leicht modifiziert und dabei verallgemeinert.<sup>92</sup>

---

<sup>92</sup> Das **Technology Acceptance Model nach Davis** (1985) und die **Diffusionstheorie nach Rogers** (1983) werden gelegentlich miteinander in Verbindung gebracht. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass sich beispielsweise die Variable der wahrgenommenen Nützlichkeit im Technology Acceptance Model mit der Variable des relativen Nutzens aus der Diffusionstheorie, oder die Variable der Komplexität mit der Variable der wahrgenommenen Nutzerfreundlichkeit vergleichen lassen (Arnold & Klee 2016, S. 18).

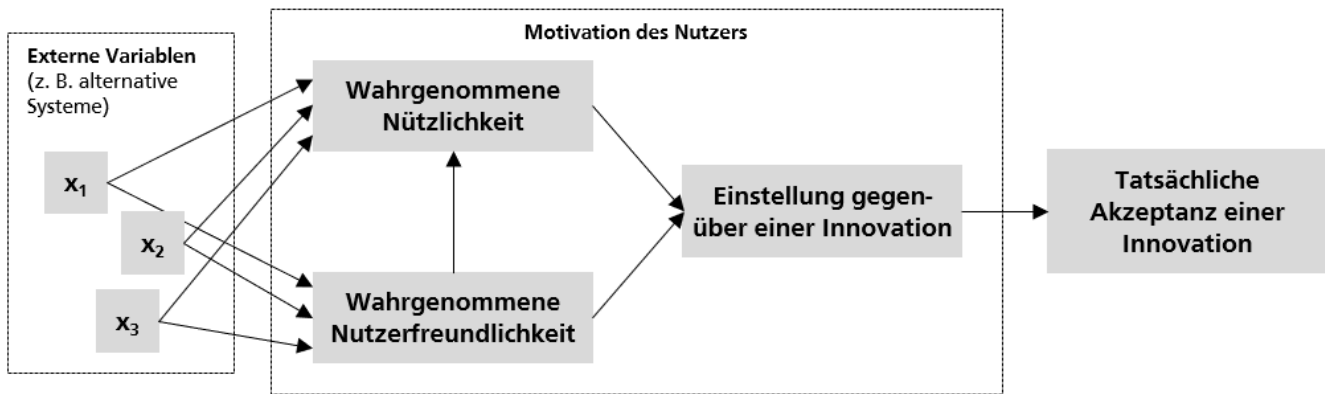


Abbildung 59: Technology Acceptance Model nach DAVIS (1985)

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DAVIS (1985, S. 24) und ARNOLD & KLEE (2016, S. 19))

#### UNIFIED THEORY OF ACCEPTANCE AND USE OF TECHNOLOGY

Die **Unified Theory of Acceptance and Use of Technology** wurde durch VENKATESH U. A. (2003) erarbeitet. Grundsätzlich für den IT-Bereich entwickelt, im Laufe der Zeit aber vielfach adaptiert, liegt ihr die Zielstellung zugrunde, aus der Vielzahl vorliegender Akzeptanztheorien ein vereinheitlichtes Akzeptanzmodell zu formen (Venkatesh u. a. 2003, S. 426). Nachfolgende Abbildung 60 zeigt das von VENKATESH U. A. (2003) entwickelte Akzeptanzmodell auf. Es wurde für den Kontext dieser Dissertationsschrift leicht modifiziert und dabei verallgemeinert.

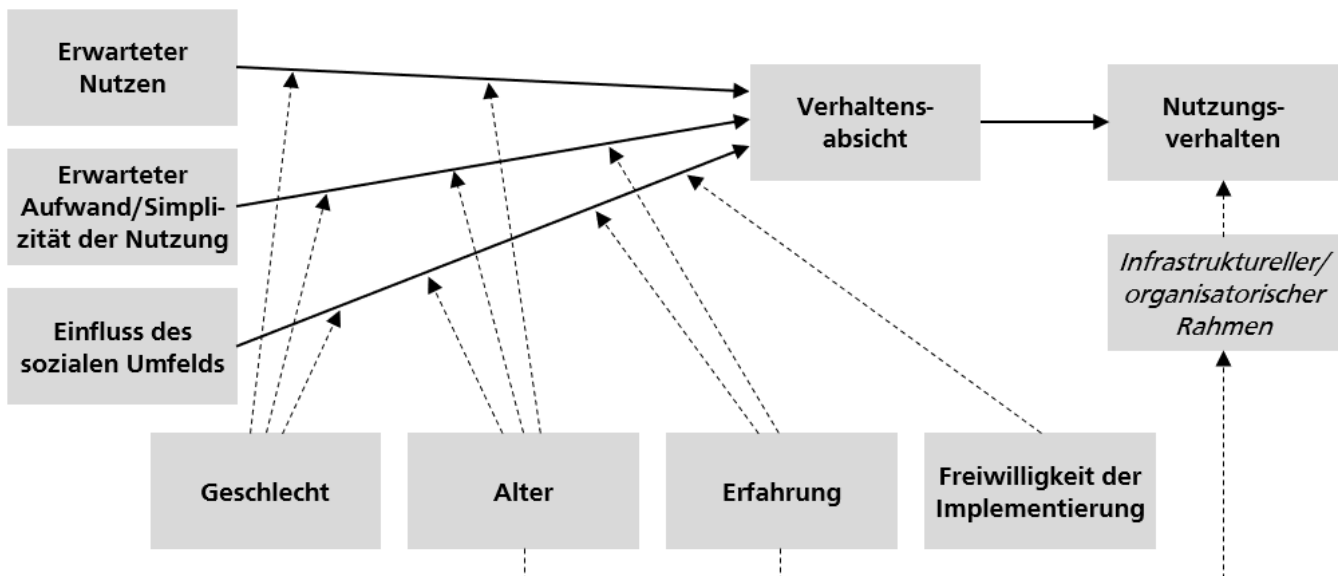


Abbildung 60: Unified Theory of Acceptance and Use of Technology nach VENKATESH U. A. (2003)

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an VENKATESH U. A. (2003, S. 447))

Auf Basis einer Analyse bereits bestehender Akzeptanztheorien kommen die Autoren zu dem Schluss, dass zunächst

- der *erwartete Nutzen* an eine Innovation,
- der *erwartete Aufwand*, der durch die Verwendung einer Innovation entsteht,
- sowie der *Einfluss des sozialen Umfelds* auf einen Entscheidungsträger

bedeutende Rollen hinsichtlich der Verhaltensabsicht eines Entscheidungsträgers bezüglich Akzeptanz oder Ablehnung der Innovation innehaben (Venkatesh u. a. 2003, S. 446-447). Soziökonomische Eigen-

---

schaften des Entscheidungsträgers wie *Geschlecht, Alter* oder *bisherige Erfahrungswerte* können dabei die Verhaltensabsicht beeinflussen. Weiterhin bestehe eine Abhängigkeit zwischen der *Freiwilligkeit der Implementierung* einer Innovation und dem Einfluss des sozialen Umfelds (Venkatesh u. a. 2003, S. 446-451). Auch sprechen sich VENKATESH U. A. (2003) dafür aus, dass zusätzlich der *infrastrukturelle und organisatorische Rahmen*, in dem eine Innovation platziert wird, den Entscheidungsträger beeinflussen könne. „Der infrastrukturelle und organisatorische Rahmen ist dabei definiert als Maß, zu dem ein Entscheidungsträger glaubt, dass eine organisatorische und technische Infrastruktur existiert, um die Nutzung einer Innovation zu unterstützen.“<sup>93</sup> (Venkatesh u. a. 2003, S. 453) Dies inkludiert beispielsweise auch das Angebot an technischem Support, sollte ein Entscheidungsträger nach Implementierung einer Innovation auf Unterstützung angewiesen sein. Der infrastrukturell-organisatorische Rahmen beeinflusse dabei allerdings nicht die grundsätzliche Verhaltensabsicht eines Entscheidungsträgers gegenüber einer Innovation, sondern das der Verhaltensabsicht nachgelagerte Nutzungsverhalten (Venkatesh u. a. 2003, S. 453-454).

---

<sup>93</sup> Übersetzt aus dem Englischen. Im Original: „Facilitating conditions are defined as the degree to which an individual believes that an organizational and technical infrastructure exists to support use of the system.“ (Venkatesh u. a. 2003, S. 453).

## E: ÜBERSICHT ÜBER DIE VON DEN DATENLOGGERN ERFASSTEN PARAMETER

Tabelle 20: Übersicht über die von den Datenloggern erfassten Parameter  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Time	DisconnectReason	EM_Current (A)
BatteryCurrent	GeofencingStatus	EM_Speed (rpm)
BatterySOC	MeasuredOclCurrent	EM_Voltage (V)
BatteryStackOperationMode	MeasuredOclCurrentGbox	AxleLocation
BatteryVoltage	MeasuredOclVoltage	GPS_Latitude
ActualDclinkSupplyCurrent	MeasuredOclVoltageGbox	GPS_Longitude
ActualGridSupplyCurrent	MeasuredVehicleVoltageGbox	GPS_HPOS_UNCERTAINTY
ActualGridVoltage	OclAvailable	GPS_VPOS_UNCERTAINTY
ActualSwitchStatus	OclCurrentLimit	GPS_Altitude
AuxiliaryVcbCurrent	OclCurrentLimitReason	GPS_Speed
AvailableDclinkReturnCurrent	OclDistanceToCurrentLimit	EM_Torque (Nm)
AvailableDclinkSupplyCurrent	OclPosition	TrailerDetection
AvailableGridReturnCurrent	AcceleratorPedalPosition (%)	ParkingTrailerAirPressure (kPa)
AvailableGridSupplyCurrent	AmbientAirTemperature (deg)	PowertrainCircuitSupplyPressure (kPa)
DistanceToLeftLaneLineIn	BrakePedalPosition (%)	ElectricDriveModeRequest (-)
DistanceToRightLaneLineIn	FuelRate (L/h)	VKMEngineTorque (Nm)
GridSystemState	InstantaneousFuelEconomy (km/L)	DirectionIndicatorLeftIntended
HybridSystemState	WheelBasedVehicleSpeed (km/h)	DirectionIndicatorRightIntended
InsideLaneIn	TripFuel (L)	MainBeamIntended
InsideNarrowCorridorIn	HighResolTotalVehicleDistance	
InsideWideCorridorIn	TotalEngineHours (hr)	
PowerManagerEngineState	TotalEngineRevolutions (r)	
PredInsideNarrowCorridorIn	TotalFuelUsed (L)	
PredInsideWideCorridorIn	AverageFuelEconomy (km/L)	
ReqDclinkSupplyCurrent	InputShaftSpeed (rpm)	
ReqSwitchStatus	OutputShaftSpeed (rpm)	
SteeringWheelAngleIn	CurrentGear (Gear)	
VehicleGridConnectionState	ActualGearRatio	
DistanceToLeftLaneLine	BrakeSwitch	
DistanceToRightLaneLine	ClutchSwitch	
InsideLane	ParkingBrakeSwitch	
InsideNarrowCorridor	BarometricPressure (kPa)	
InsideWideCorridor	PneumaticSupplyPress (kPa)	
PantographActualStatus	AuxiliarySupplyPressure (kPa)	
ActualDcdcTemperature	AxleWeight (kg)	
ActualDcdcVoltage	TrailerWeight (kg)	
ActualDclinkSupCurrent	CargoWeight (kg)	
AttentionButton	ReferenceEngineTorque	
DcdcChargerStatus	ActualEngine_PercTorque (%)	
DcdcDeviceInfoMessage	ActualEngine_PercTorqueHighRes (%)	
DcdcFailureStatus	EngineCoolantTemperature (deg)	
DcdcMainsStatus	EngineSpeed (rpm)	
DcdcTemperatureStatus	EngineStarterMode	



F: VEREINFACHTE ENERGIEFLUSSSCHEMATA EINES O-LKWS, DIFFERENZIERT NACH BETRIEBSMODI

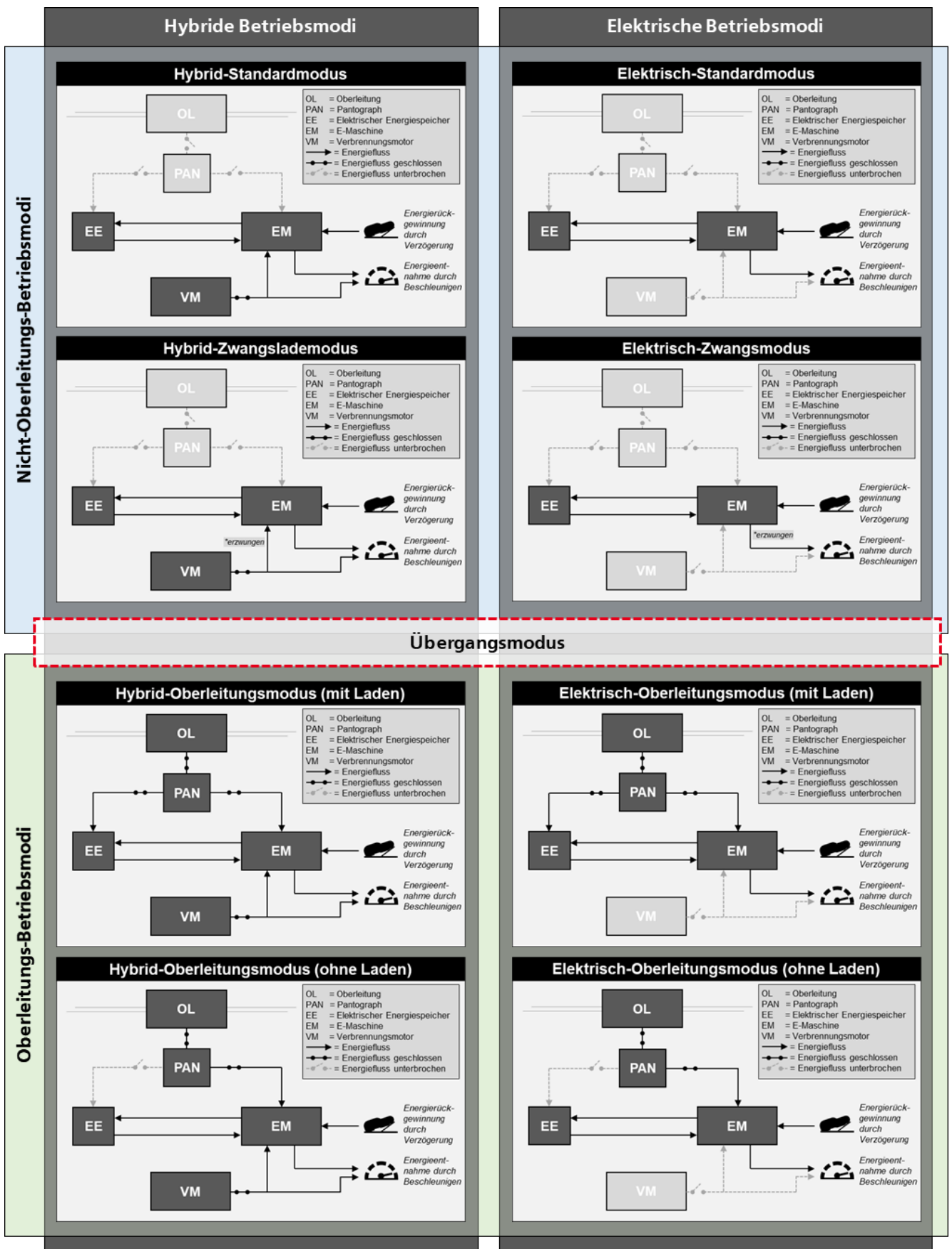


Abbildung 61: Vereinfachte Energieflussschemata eines O-Lkws (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖPP U. A. (2022, S. 8))

## G: VERLAUFSDIAGRAMME POTENZIELL RELEVANTER ENERGIEFLUSSPARAMETER (ERGÄNZUNG)

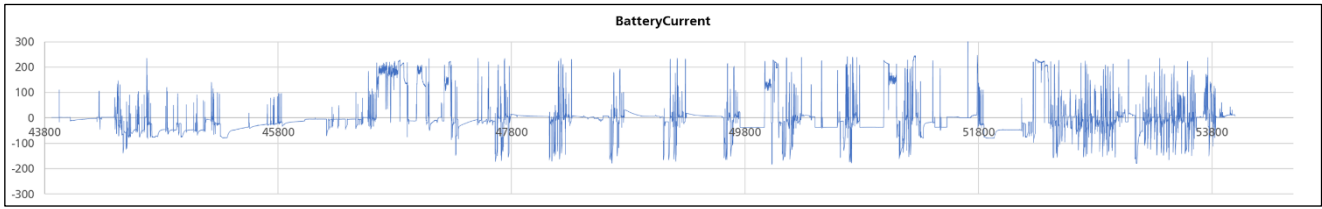


Abbildung 62: Verlaufsdiagramm zum Parameter „BatteryCurrent“  
(Quelle: Eigene Darstellung)

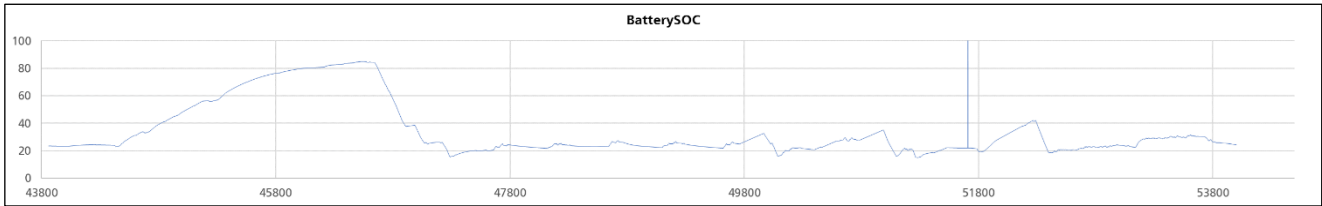


Abbildung 63: Verlaufsdiagramm zum Parameter „BatterySOC“  
(Quelle: Eigene Darstellung)

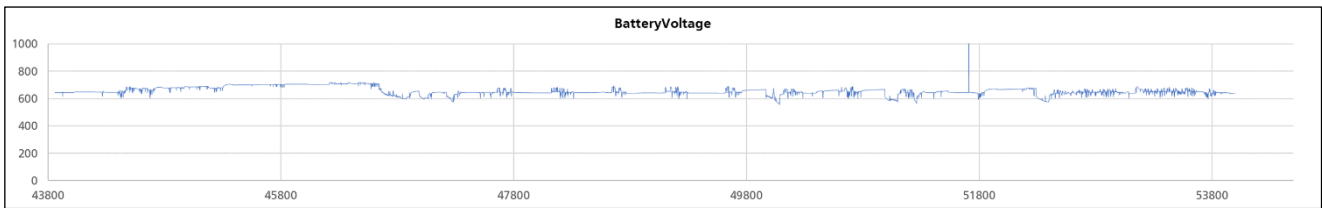


Abbildung 64: Verlaufsdiagramm zum Parameter „BatteryVoltage“  
(Quelle: Eigene Darstellung)

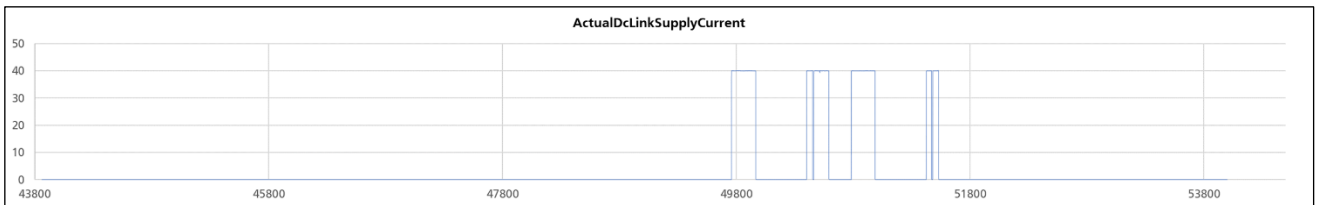


Abbildung 65: Verlaufsdiagramm zum Parameter „ActualDcLinkSupplyCurrent“  
(Quelle: Eigene Darstellung)

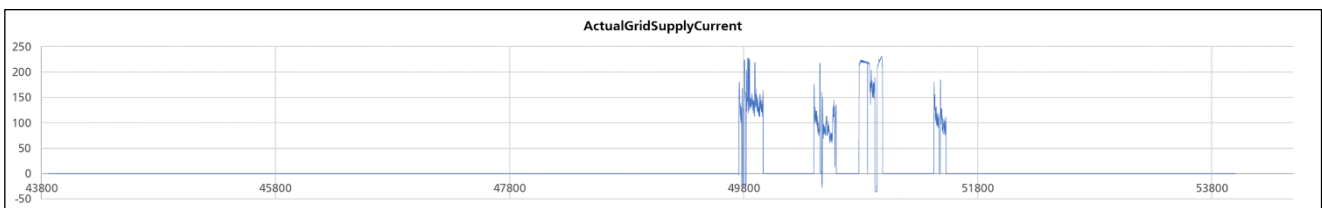


Abbildung 66: Verlaufsdiagramm zum Parameter „ActualGridSupplyCurrent“  
(Quelle: Eigene Darstellung)

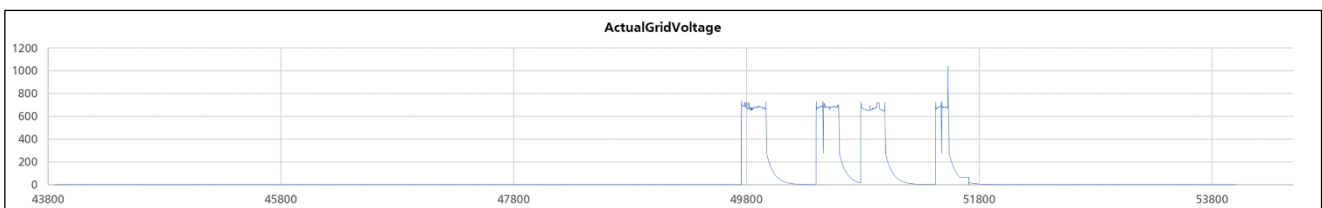
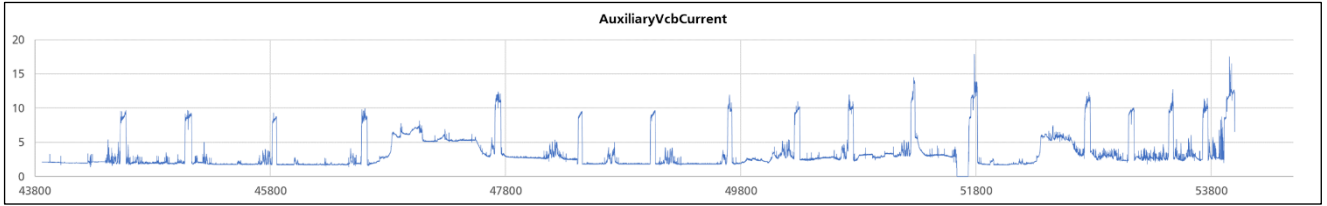
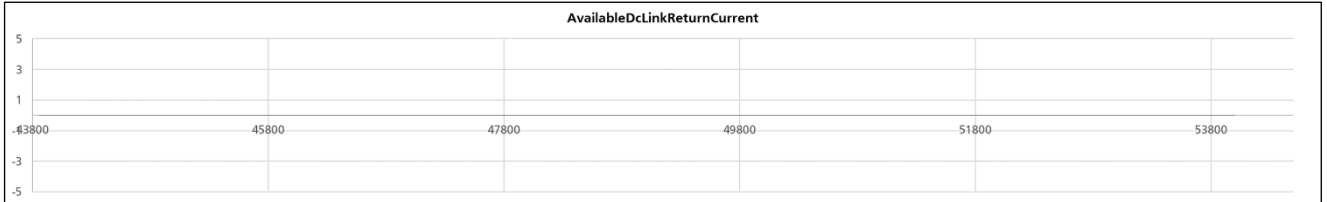


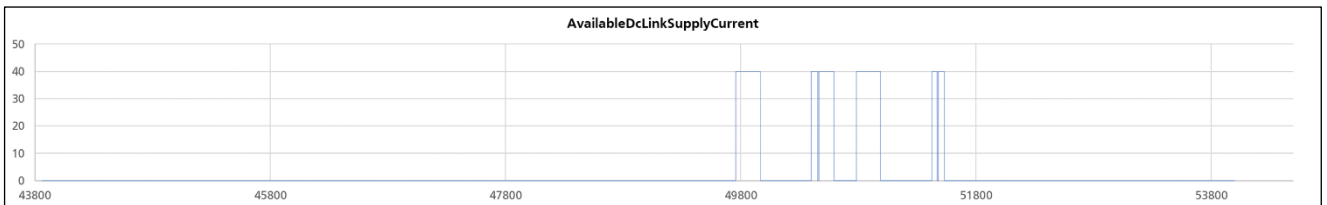
Abbildung 67: Verlaufsdiagramm zum Parameter „ActualGridVoltage“  
(Quelle: Eigene Darstellung)



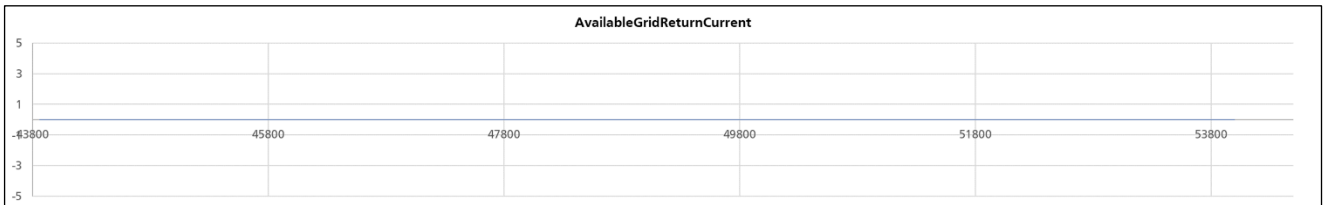
**Abbildung 68: Verlaufsdiagramm zum Parameter „AuxiliaryVcbCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



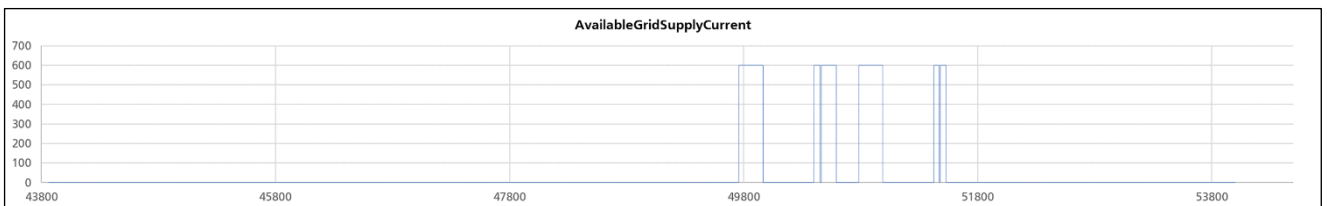
**Abbildung 69: Verlaufsdiagramm zum Parameter „AvailableDcLinkReturnCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



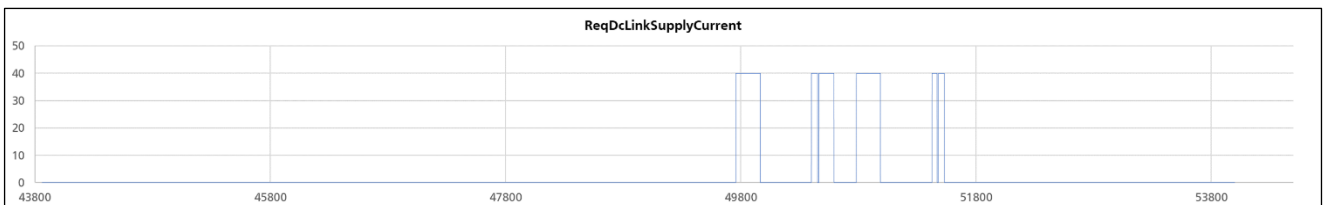
**Abbildung 70: Verlaufsdiagramm zum Parameter „AvailableDcLinkSupplyCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



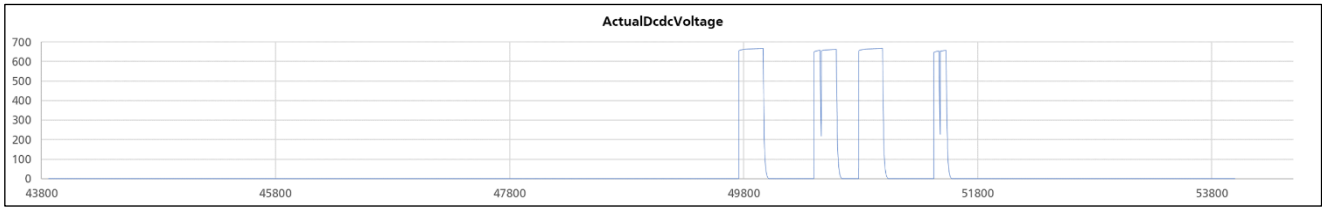
**Abbildung 71: Verlaufsdiagramm zum Parameter „AvailableGridReturnCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



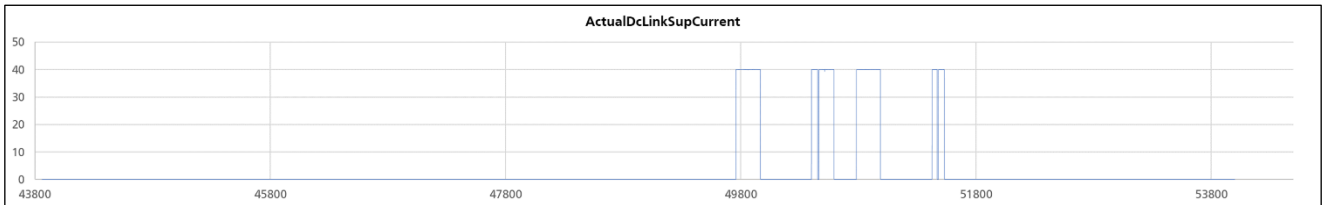
**Abbildung 72: Verlaufsdiagramm zum Parameter „AvailableGridSupplyCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



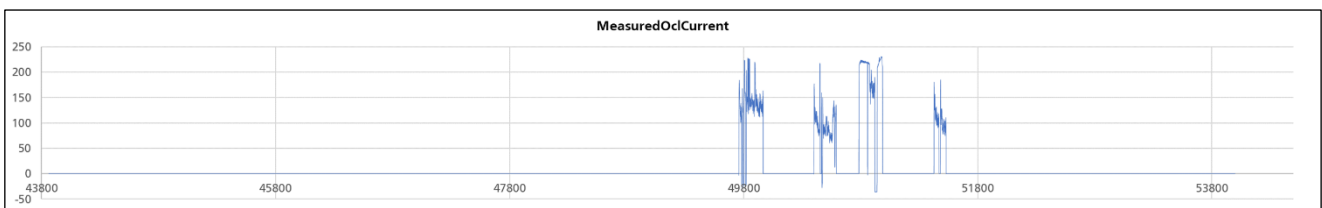
**Abbildung 73: Verlaufsdiagramm zum Parameter „ReqDcLinkSupplyCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



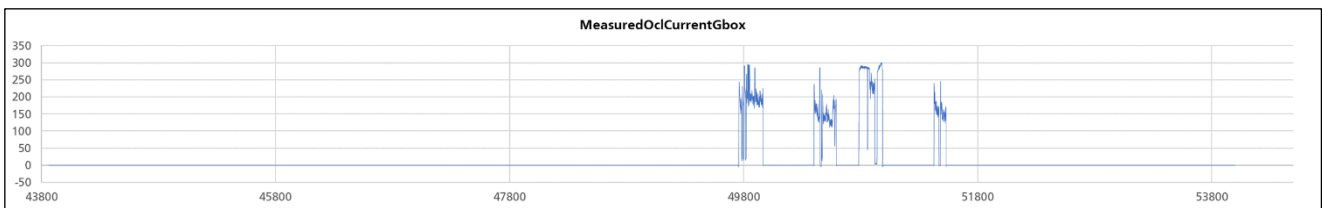
**Abbildung 74: Verlaufdiagramm zum Parameter „ActualDcdcVoltage“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



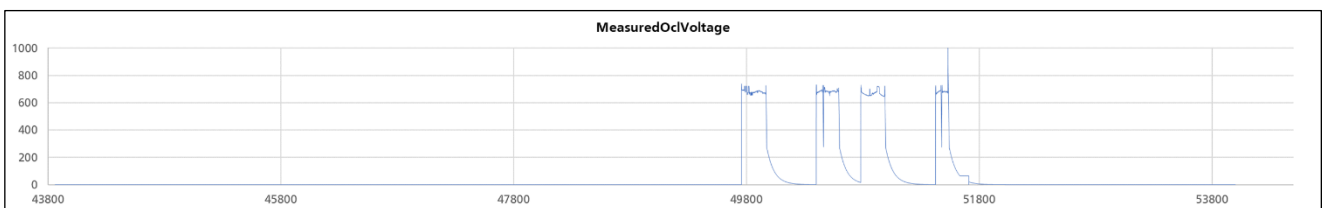
**Abbildung 75: Verlaufdiagramm zum Parameter „ActualDcLinkSupCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



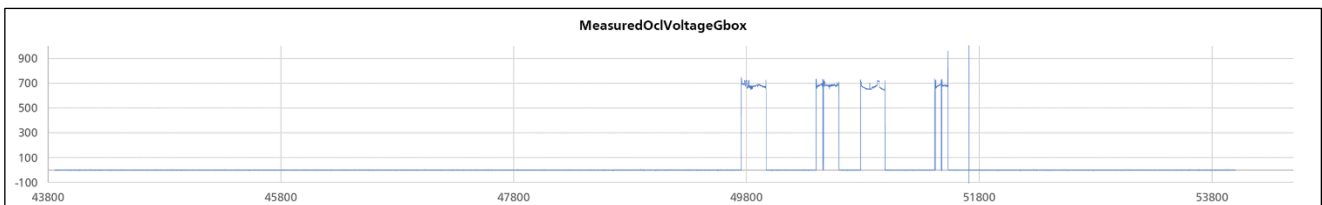
**Abbildung 76: Verlaufdiagramm zum Parameter „MeasuredOclCurrent“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



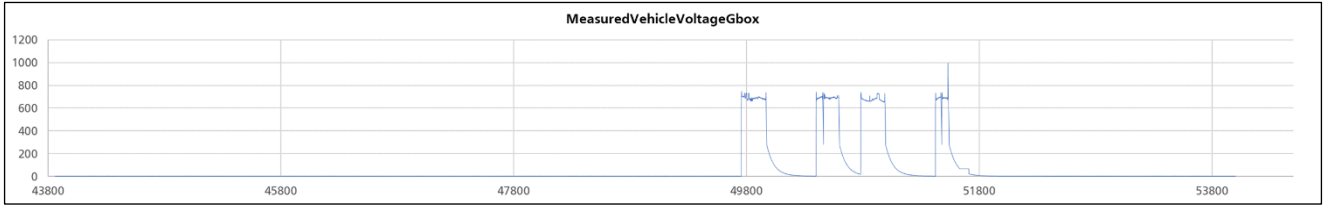
**Abbildung 77: Verlaufdiagramm zum Parameter „MeasuredOclCurrentGbox“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



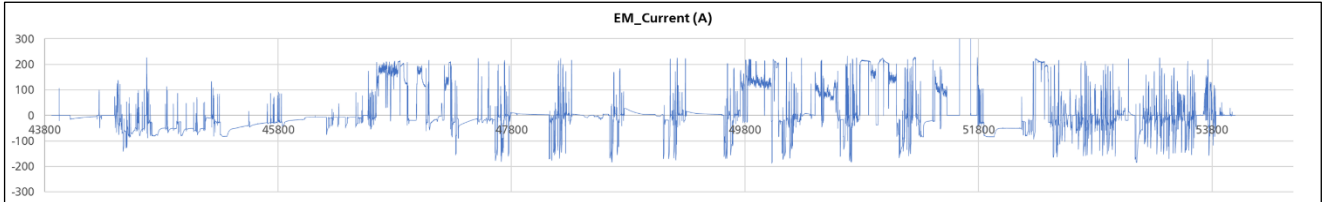
**Abbildung 78: Verlaufdiagramm zum Parameter „MeasuredOclVoltage“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



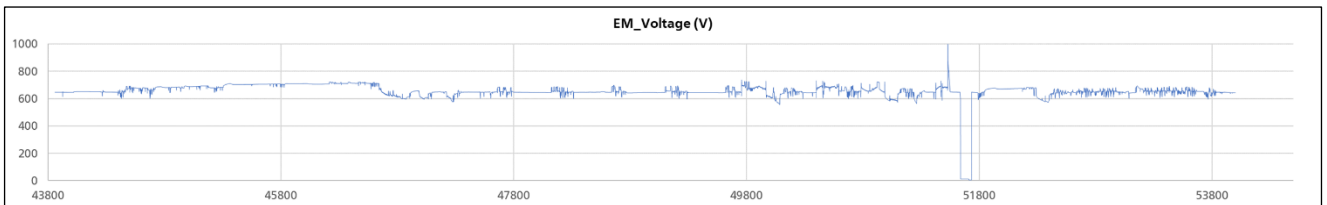
**Abbildung 79: Verlaufdiagramm zum Parameter „MeasuredOclVoltageGbox“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



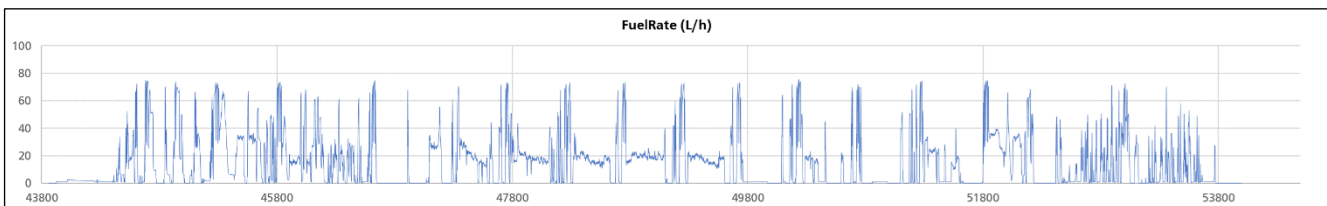
**Abbildung 80: Verlaufsdiagramm zum Parameter „MeasuredVehicleVoltageGbox“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



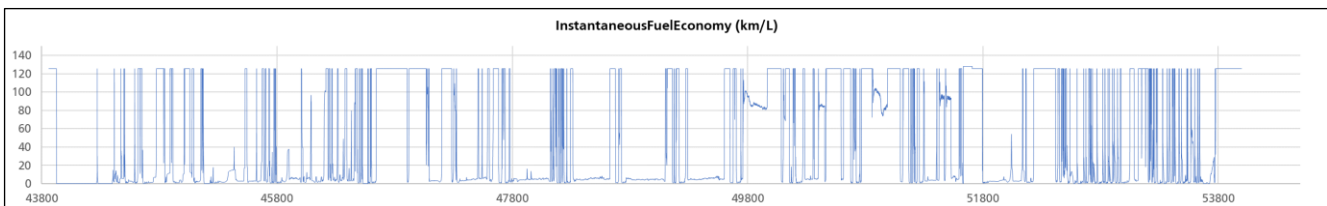
**Abbildung 81: Verlaufsdiagramm zum Parameter „EM\_Current (A)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



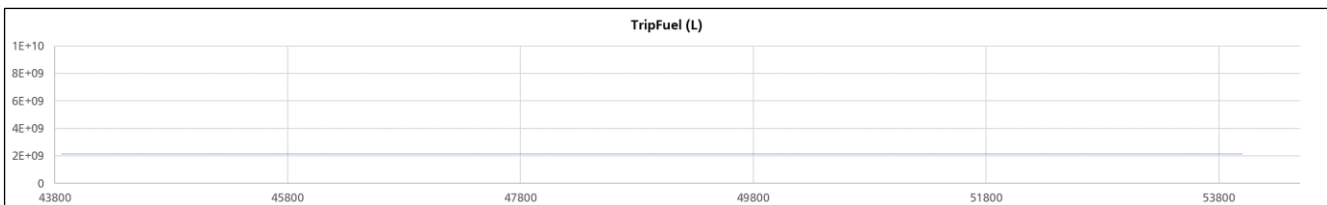
**Abbildung 82: Verlaufsdiagramm zum Parameter „EM\_Voltage (V)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



**Abbildung 83: Verlaufsdiagramm zum Parameter „FuelRate (L/h)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

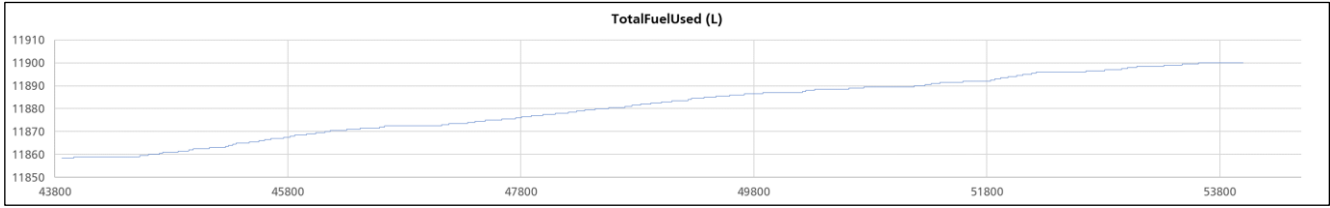


**Abbildung 84: Verlaufsdiagramm zum Parameter „InstantaneousFuelEconomy (km/L)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

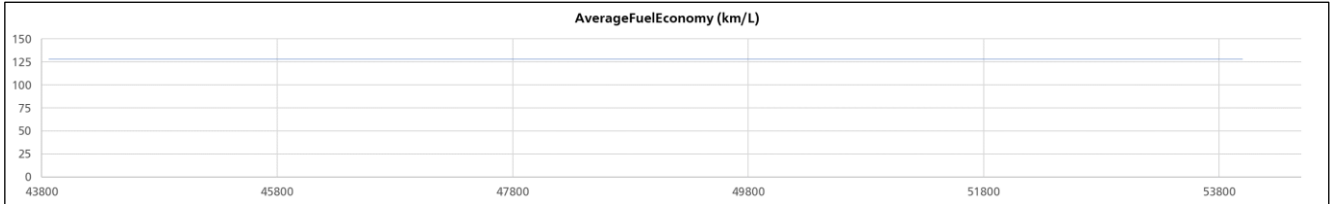


**Abbildung 85: Verlaufsdiagramm zum Parameter „TripFuel (L)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)





**Abbildung 86: Verlaufsdiagramm zum Parameter „TotalFuelUsed (L)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)



**Abbildung 87: Verlaufsdiagramm zum Parameter „AverageFuelEconomy (km/L)“**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

## H: CHARAKTERISTISCHE ENERGIEFLUSS- UND ENERGIEVERBRAUCHSKENNWERTE DER EINZEL-O-LKW

Tabelle 21: Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte von El Leon  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für El Leon. Datenbasis: Juni 2019 bis Dezember 2022)

Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte – El Leon*			
<b>Hybrid-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	32,31 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	3,05 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	11,62 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	95,48 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	20,46 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,93 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	17,67 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	22,64 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	13,84 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,64 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	133,04 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	96,10 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	21,72 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	15,22 kWh/100km
<b>Elektrisch-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	3,05 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	46,18 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	95,48 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	43,00 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,93 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	38,47 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt**</sub>	0,00 - 0,93 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	68,28 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,64 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	111,32 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	96,10 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	15,22 kWh/100km
<b>Übergangsmodus</b>		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,11 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	48,24 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	94,02 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	33,70 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,85 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	30,44 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	24,52 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	51,74 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,88 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	133,82 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	95,32 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	23,67 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	14,83 kWh/100km
		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
		VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
		EM <sub>Stromverbrauch</sub>	94,02 kWh/100km
		EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,85 kWh/100km
		EE <sub>Laderate, gesamt**</sub>	0,00 - 0,85 kWh/100km
		EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,88 kWh/100km
		PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	110,15 kWh/100km
		PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	95,32 kWh/100km
		PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
		PAN <sub>NV&amp;V</sub>	14,83 kWh/100km

\* Die dargestellten Werte basieren auf 149.394 auswertbaren Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs von El Leon und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration des Fahrzeugs.

\*\* Bei den Oberleitungs-Betriebsmodi ohne zeitgleiches Laden des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen handelt es sich um hypothetische Betriebsmodi.  
Die EE<sub>Laderate, gesamt</sub> kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht datenbasiert berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese jedoch zwischen 0,00 bis maximal des Werts der EM<sub>Stromerzeugung</sub> betragen wird.

**Tabelle 22: Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte von El Fidel**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für El Fidel. Datenbasis: September 2019 bis Dezember 2022)

**Charakteristische Energiefluss-, Kraftstoff- und Stromverbrauchskennwerte – El Fidel\***

<b>Hybrid-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	32,23 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	4,42 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	8,78 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	96,07 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	25,94 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	1,91 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	21,12 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	27,35 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	11,29 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,23 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	137,31 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	98,48 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	25,44 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	13,39 kWh/100km
<b>Elektrisch-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	4,42 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	82,31 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	96,07 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	42,91 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	1,91 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	38,14 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 1,91 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	108,46 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,23 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	111,87 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	98,48 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	13,39 kWh/100km
<b>Übergangsmodus</b>		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,15 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	62,78 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	107,76 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	32,93 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,49 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	29,48 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	28,29 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	69,24 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,91 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	150,30 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	110,32 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	27,80 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	12,18 kWh/100km
		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
		VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
		EM <sub>Stromverbrauch</sub>	107,76 kWh/100km
		EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,49 kWh/100km
		EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,49 kWh/100km
		EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,91 kWh/100km
		PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	122,50 kWh/100km
		PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	110,32 kWh/100km
		PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
		PAN <sub>NV&amp;V</sub>	12,18 kWh/100km

\* Die dargestellten Werte basieren auf 163.418 auswertbaren Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs von El Fidel und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration des Fahrzeugs.

\*\* Bei den Oberleitungs-Betriebsmodi ohne zeitgleiches Laden des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen handelt es sich um hypothetische Betriebsmodi. Die EE<sub>Laderate, gesamt</sub> kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht datenbasiert berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese jedoch zwischen 0,00 bis maximal des Werts der EM<sub>Stromerzeugung</sub> betragen wird.

**Tabelle 23: Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte von El Fondo**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für El Fondo. Datenbasis: Juli 2020 bis Dezember 2022)

**Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte – El Fondo\***

<b>Hybrid-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	25,38 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	2,61 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	7,87 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	86,53 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	18,03 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,39 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	14,84 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	22,79 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	9,62 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,58 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	111,35 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	88,29 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	22,40 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,65 kWh/100km
<b>Elektrisch-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	2,61 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	55,98 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	86,53 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	33,66 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,39 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	29,94 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,39 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	75,94 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,58 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	88,95 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	88,29 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,65 kWh/100km
<b>Übergangsmodus</b>		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,13 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	49,97 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	83,51 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	25,77 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,21 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	23,26 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	22,81 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	53,44 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	1,04 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	108,17 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	85,02 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	22,60 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,55 kWh/100km
		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
		VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
		EM <sub>Stromverbrauch</sub>	83,51 kWh/100km
		EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,21 kWh/100km
		EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,21 kWh/100km
		EE <sub>Traktionsstrom</sub>	1,04 kWh/100km
		PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	85,57 kWh/100km
		PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	85,02 kWh/100km
		PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
		PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,55 kWh/100km

\* Die dargestellten Werte basieren auf 115.228 auswertbaren Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs von El Fondo und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration des Fahrzeugs.

\*\* Bei den Oberleitungs-Betriebsmodi ohne zeitgleiches Laden des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen handelt es sich um hypothetische Betriebsmodi. Die EE<sub>Laderate, gesamt</sub> kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht datenbasiert berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese jedoch zwischen 0,00 bis maximal des Werts der EM<sub>Stromerzeugung</sub> betragen wird.

**Tabelle 24: Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte von El Femina**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für El Femina. Datenbasis: Juli 2020 bis Dezember 2022)

**Charakteristische Energiefluss-, Kraftstoff- und Stromverbrauchskennwerte – El Femina\***

**Hybrid-Standardmodus**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	30,53 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	8,49 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	15,80 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	13,00 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	10,80 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km

**Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	3,69 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	83,92 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,45 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	23,59 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,64 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	111,40 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	85,89 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	23,14 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	2,38 kWh/100km

**Elektrisch-Standardmodus**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	37,63 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	33,60 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	30,76 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	51,94 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km

**Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	3,69 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	83,92 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,45 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,45 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,64 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	88,26 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	85,89 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	2,38 kWh/100km

**Übergangsmodus**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,11 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	41,59 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	27,43 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	25,15 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	44,56 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km

**Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	92,14 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,18 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	26,40 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,70 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	122,05 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	93,83 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	26,23 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	1,99 kWh/100km

**Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)**

VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	92,14 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,18 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub> **	0,00 - 0,18 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,70 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	95,82 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	93,83 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	1,99 kWh/100km

\* Die dargestellten Werte basieren auf 105.628 auswertbaren Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs von El Femina und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration des Fahrzeugs.

\*\* Bei den Oberleitungs-Betriebsmodi ohne zeitgleiches Laden des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen handelt es sich um hypothetische Betriebsmodi. Die EE<sub>Laderate, gesamt</sub> kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht datenbasiert berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese jedoch zwischen 0,00 bis maximal des Werts der EM<sub>Stromerzeugung</sub> betragen wird.



**Tabelle 25: Charakteristische Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte von El Salto**  
(Quelle: Eigene Darstellung. Werte für El Salto. Datenbasis: Juli 2020 bis Dezember 2022)

**Charakteristische Energiefluss-, Kraftstoff- und Stromverbrauchskennwerte – El Salto\***

<b>Hybrid-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	31,21 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	2,89 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	10,43 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	89,58 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	20,81 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,26 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	16,29 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	23,43 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	13,34 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,42 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	123,80 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	91,01 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	23,17 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,62 kWh/100km
<b>Elektrisch-Standardmodus</b>		<b>Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	2,89 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	58,43 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	89,58 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	47,23 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,26 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	42,72 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt**</sub>	0,00 - 0,26 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	72,53 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,42 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	100,63 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	91,01 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,62 kWh/100km
<b>Übergangsmodus</b>		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)</b>	
VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,13 l/100km	VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
EM <sub>Stromverbrauch</sub>	61,49 kWh/100km	EM <sub>Stromverbrauch</sub>	100,57 kWh/100km
EM <sub>Stromerzeugung</sub>	35,98 kWh/100km	EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,11 kWh/100km
EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	32,49 kWh/100km	EE <sub>Laderate, gesamt</sub>	26,78 kWh/100km
EE <sub>Traktionsstrom</sub>	66,16 kWh/100km	EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,96 kWh/100km
PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	137,90 kWh/100km
PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	101,30 kWh/100km
PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>Laderate</sub>	26,66 kWh/100km
PAN <sub>NV&amp;V</sub>	0,00 kWh/100km	PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,94 kWh/100km
		<b>Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)</b>	
		VM <sub>Kraftstoffverbrauch</sub>	0,00 l/100km
		EM <sub>Stromverbrauch</sub>	100,57 kWh/100km
		EM <sub>Stromerzeugung</sub>	0,11 kWh/100km
		EE <sub>Laderate, gesamt**</sub>	0,00 - 0,11 kWh/100km
		EE <sub>Traktionsstrom</sub>	0,96 kWh/100km
		PAN <sub>Gesamtstromaufnahme</sub>	111,24 kWh/100km
		PAN <sub>Traktionsstrom</sub>	101,30 kWh/100km
		PAN <sub>Laderate</sub>	0,00 kWh/100km
		PAN <sub>NV&amp;V</sub>	9,94 kWh/100km

\* Die dargestellten Werte basieren auf 109.428 auswertbaren Kilometern des O-Lkw-Realbetriebs von El Salto und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration des Fahrzeugs.

\*\* Bei den Oberleitungs-Betriebsmodi ohne zeitgleiches Laden des elektrischen Energiespeichers durch den Pantographen handelt es sich um hypothetische Betriebsmodi. Die EE<sub>Laderate, gesamt</sub> kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht datenbasiert berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese jedoch zwischen 0,00 bis maximal des Werts der EM<sub>Stromerzeugung</sub> betragen wird.

## I: ENTWICKELTER BERECHNUNGSLGORITHMUS FÜR „ERSPARNIS“

Im Nachfolgenden wird der entwickelte Berechnungsalgorithmus für den Skalierungs- und Vergleichsrechner „ERSparnis“ präsentiert. Der Berechnungsalgorithmus wird beispielhaft dargestellt für einen O-Lkw der betrachteten Generation. Die zu berechnende Relation verfügt über eine Gesamtlänge von 50 Kilometern. Auf der Relation befindet sich ein fünf Kilometer langer Streckenabschnitt, der mit einer Oberleitungsanlage elektrifiziert wurde. Die elektrifizierte Strecke erreicht der O-Lkw 15 Kilometer nach Start. Der Ladestand des elektrischen Energiespeichers ist zu Beginn der Fahrt gleich Null.

Eingangsdaten		
Fahrzeugtyp	-	HEV+PAN_Konfiguration_1 (450-130-18,5)
Dieselmotortyp	-	Dieselmotortyp mit 7% Biodiesel
Strommix	-	Strom-THG-Emissionsfaktor 2021, mit Vorkette

Länge der zu berechnenden Relation	km	50,00
Entfernung Startpunkt der Relation bis Erreichen des ERS	km	15,00
Auf der Relation verfügbare Länge des ERS	km	5,00
State of Charge des Energiespeichers bei Abfahrt	%	0,00

Berechnungen		
1. Fahrabschnitt: Vorlauf zur OL		
Länge des Vorlaufs bzw. der Etappe Startpunkt bis Erreichen ERS	km	15,00
Ladestand elektrischer Energiespeicher bei Abfahrt	%	0,00
Ladestand elektrischer Energiespeicher bei Abfahrt	kWh	0,00
Elektrische Reichweite durch Restladung in elektrischem Energiespeicher bei Start bei voll-elektrischer Fahrt	km	0,00
Fahrt im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) durch Restladung in elektrischem Energiespeicher	km	0,00
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Erreichen Ende Etappe 1 (Erreichen ERS)	kWh	0,00
Restliche Fahrtstrecke im Zulauf	km	15,00
Anteil Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	7,62
Anteil Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	90,60
Anteil Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	1,78
Anteil Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	0,00
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus)	km	1,14
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus)	km	13,59
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus)	km	0,27
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt)	km	0,00

2. Fahrabschnitt: Fahrt mit OL		
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Erreichen ERS	kWh	0,00
Elektrische Reichweite durch Restladung in elektrischem Energiespeicher	km	0,00
Auf der Relation verfügbare Länge eines ERS	km	5,00
Verluststrecke aufgrund Verbindungsaufbau zum ERS	km	0,20
Fahrt der Verluststrecke bis Verbindung mit ERS im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) auf	km	0,00
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bis tatsächliche Verbindung zu ERS	kWh	0,00
Restliche Fahrtstrecke bis tatsächliche Verbindung zum ERS	km	0,20
Anteil Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	7,62
Anteil Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	90,60
Anteil Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	1,78
Anteil Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	0,00
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) von Ankunft am ERS bis Verbindung final hergestellt	km	0,02
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus) von Ankunft am ERS bis Verbindung final hergestellt	km	0,18
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus) von Ankunft am ERS bis Verbindung final hergestellt	km	0,00
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt) von Ankunft am ERS bis Verbindung final hergestellt	km	0,00
Maximal Netto-Nachladbar durch ERS	kWh	12,03
Effektiv nutzbare Strecke ERS	km	4,80
Ausnutzungsgrad ERS (Überholungen, Verbindungsabbrüche, etc.) - Annahmen basierend auf den Erfahrungen	%	70,00
Tatsächlich verbundene Strecke ERS	km	3,36
Anteil Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung) an ERS-Fahrt	%	27,33
Anteil Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung) an ERS-Fahrt	%	72,67
Laderate elektrischer Energiespeicher im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung)	kWh/km	0,27
Laderate elektrischer Energiespeicher im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung)	kWh/km	0,23
Im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung) theoretisch maximal benötigte Fahrt	km	12,36
Im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung) theoretisch maximal benötigte Fahrt	km	37,58
Summe theoretisch maximal benötigte Fahrt für vollständige Ladung elektrischer Energiespeicher unter Einwirkung ERS	km	49,94
Generell maximal benötigte Fahrt für Vollladung elektrischer Energiespeicher (von 0% auf 100%)	km	49,94
Tatsächliche Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung)	km	0,92

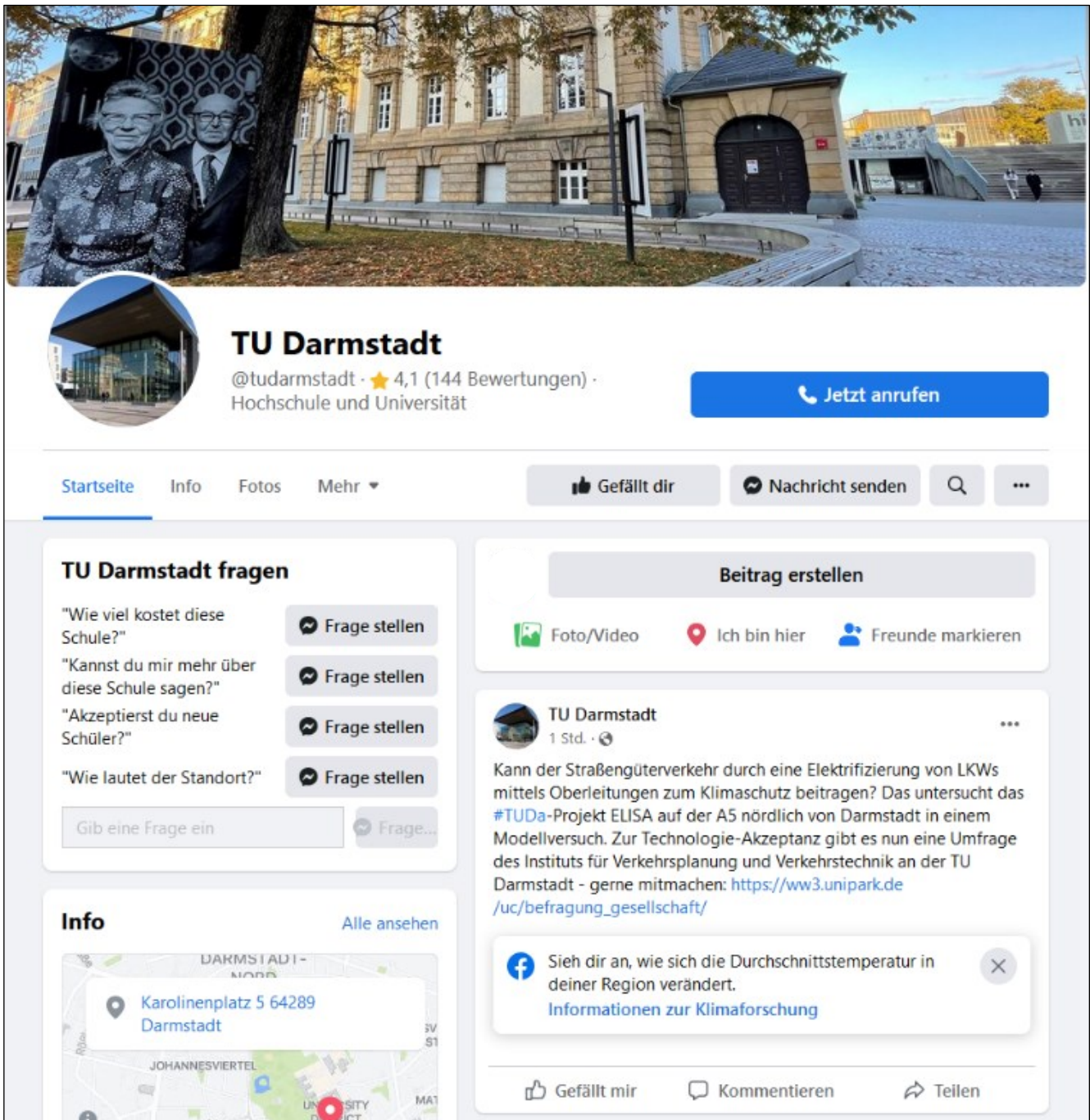
Abbildung 88: Entwickelter Berechnungsalgorithmus für „ERSparnis“, Teil 1  
(Quelle: Eigene Darstellung)

Tatsächliche Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung)	km	2,44
Tatsächliche Ladung des elektrischen Energiespeichers im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitu	kWh	0,24
Tatsächliche Ladung des elektrischen Energiespeichers im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungs	kWh	0,57
Summe tatsächliche Ladung während Verbindung zum ERS	kWh	0,81
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Ende Nutzung ERS	kWh	0,81
Gesamtfahrtstrecke während Nutzung ERS, plus Ladung des elektrischen Energiespeichers	km	3,36
Fahrtstrecke ohne Ladung des elektrischen Energiespeichers, da bereits voll geladen	km	0,00
Anteil Betriebsmodus mERS_1_oL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, ohne Ladung) an ERS-Fahrt	%	27,33
Anteil Betriebsmodus mERS_2_oL (Hybrid-Oberleitungsmodus, ohne Ladung) an ERS-Fahrt	%	72,67
Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_1_oL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, ohne Ladung)	km	0,00
Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_2_oL (Hybrid-Oberleitungsmodus, ohne Ladung)	km	0,00
Elektrische Reichweite durch Restladung in elektrischem Energiespeicher	km	1,02
Restliche Fahrtstrecke ohne Nutzung ERS durch zwischenzeitliche Verbindungsabbrüche/Überholungen und	km	1,44
Theoretisch insgesamt zusätzlich über ERS geladene Energie zum Ausgleich temporärer Verbindungsabbrü	kWh	1,15
Theoretisch zusätzlich geladene Energie im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit	kWh	0,31
Theoretisch zusätzlich geladene Energie im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit La	kWh	0,84
Theoretisch zusätzlich benötigte Fahrt im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit L	km	1,18
Theoretisch zusätzlich benötigte Fahrt im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladu	km	3,60
Fahrt im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) durch vorhandene Ladung in elektrischem Ener	km	1,02
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Erreichen Ende ERS	kWh	0,00
Restliche Fahrt bis Erreichen Ende ERS, ohne Nutzung ERS und Reichweite durch Ladestand in elektrischem	km	0,42
Anteil Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	7,62
Anteil Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	90,60
Anteil Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	1,78
Anteil Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	0,00
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus)	km	0,03
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus)	km	0,39
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus)	km	0,01
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt)	km	0,00
Zusätzlich insgesamt über ERS geladene Energie zum Ausgleich temporärer Verbindungsabbrüche+Vollladu	kWh	0,00
Zusätzlich geladene Energie im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung) zur	kWh	0,00
Zusätzlich geladene Energie im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung) zum A	kWh	0,00
Zusätzliche Fahrt im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung) zum Ausgleich	km	0,00
Zusätzliche Fahrt im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung) zum Ausgleich te	km	0,00
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) gesamt	km	1,06
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus) gesamt	km	0,57
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus) gesamt	km	0,01
Fahrtstrecke im Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt) gesamt	km	0,00
Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_1_mL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, mit Ladung) gesamt	km	0,92
Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_2_mL (Hybrid-Oberleitungsmodus, mit Ladung) gesamt	km	2,44
Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_1_oL (Elektrisch-Oberleitungsmodus, ohne Ladung) gesamt	km	0,00
Fahrtstrecke im Betriebsmodus mERS_2_oL (Hybrid-Oberleitungsmodus, ohne Ladung) gesamt	km	0,00
Insgesamt durch ERS für die Ladung des elektrischen Energiespeichers zugeflossene elektrische Energie	kWh	0,81

<b>3. Fahrtabschnitt: Nachlauf nach OL</b>		
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Erreichen Ende ERS	kWh	0,00
Länge Ende ERS bis Zielpunkt	km	30,00
Elektrische Reichweite durch Restladung in elektrischem Energiespeicher bei Beginn Nachlauf	km	0,00
Fahrt im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus) durch Restladung in elektrischem Energiespeic	km	0,00
Restliche Fahrtstrecke im Nachlauf	km	30,00
Anteil Betriebsmodus oERS_1 (0) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	7,62
Anteil Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	90,60
Anteil Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	1,78
Anteil Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt) an Fahrt ohne Nutzung ERS	%	0,00
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_1 (Elektrisch-Standardmodus)	km	2,29
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_2 (Hybrid-Standardmodus)	km	27,18
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_3 (Übergangsmodus)	km	0,53
Restliche Fahrt im Betriebsmodus oERS_4 (nicht besetzt)	km	0,00
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Ankunft am Ziel	kWh	0,00
Netto-Restladestand in elektrischem Energiespeicher bei Ankunft am Ziel	kWh	0,00

**Abbildung 89: Entwickelter Berechnungsalgorithmus für „ERSparnis“, Teil 2**  
(Quelle: Eigene Darstellung)

## J: AUSWAHL VERSCHIEDENER TEILNAHMEAUFRUFE ZUR eHIGHWAY-AKZEPTANZBEFRAGUNG



The image shows a screenshot of the official Facebook page of TU Darmstadt. At the top, there is a cover photo of a building with a large mural of two men. Below the cover photo is the profile picture of TU Darmstadt, a circular image of a modern building. The name "TU Darmstadt" is displayed, along with the handle "@tudarmstadt", a star rating of 4.1 (144 reviews), and the text "Hochschule und Universität". A blue button labeled "Jetzt anrufen" is visible.

Navigation tabs include "Startseite", "Info", "Fotos", and "Mehr". Action buttons for "Gefällt dir", "Nachricht senden", and search are present.

The main content area features a "TU Darmstadt fragen" section with four questions, each with a "Frage stellen" button:

- "Wie viel kostet diese Schule?"
- "Kannst du mir mehr über diese Schule sagen?"
- "Akzeptierst du neue Schüler?"
- "Wie lautet der Standort?"

Below this is an "Info" section with a map showing the location "Karolinenplatz 5 64289 Darmstadt".

The main post is titled "Beitrag erstellen" and contains the following text:

Kann der Straßengüterverkehr durch eine Elektrifizierung von LKWs mittels Oberleitungen zum Klimaschutz beitragen? Das untersucht das #TUDa-Projekt ELISA auf der A5 nördlich von Darmstadt in einem Modellversuch. Zur Technologie-Akzeptanz gibt es nun eine Umfrage des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik an der TU Darmstadt - gerne mitmachen: [https://ww3.unipark.de/uc/befragung\\_gesellschaft/](https://ww3.unipark.de/uc/befragung_gesellschaft/)

Below the post is a notification: "Sieh dir an, wie sich die Durchschnittstemperatur in deiner Region verändert. Informationen zur Klimaforschung".

At the bottom of the post are buttons for "Gefällt mir", "Kommentieren", and "Teilen".

Abbildung 90: Teilnahmeaufruf zur eHighway-Akzeptanzbefragung über den offiziellen Facebook-Kanal der Technischen Universität Darmstadt am 28. Januar 2022 (Quelle: TU DARMSTADT-FACEBOOK (2022))





Abbildung 91: Teilnahmeaufruf zur eHighway-Akzeptanzbefragung über den offiziellen Twitter-Kanal der Technischen Universität Darmstadt am 28. Januar 2022 (Quelle: TU DARMSTADT-TWITTER (2022))



Abbildung 92: Teilnahmeaufruf zur eHighway-Akzeptanzbefragung über den offiziellen Instagram-Kanal der Technischen Universität Darmstadt am 01. Februar 2022 (Quelle: TU DARMSTADT-INSTAGRAM (2022))



Dienstag, 08.02.2022 - 23:00 1 min

# Wie wird der südhessische "eHighway" akzeptiert?

Forscher der TU Darmstadt rufen Bürger zu einer anonymen Online-Umfrage auf.

Von **red**




Auf der A 5 zwischen Frankfurt und Darmstadt ist eine zehn Kilometer lange Teststrecke errichtet worden. Archivfoto: dpa



DARMSTADT - Wie steht die Gesellschaft zur Elektrifizierung des Güterverkehrs auf Autobahnen und was hält sie vom "eHighway" auf der A5? Unter anderem diesen Fragen gehen Forschende der TU Darmstadt im Rahmen einer Befragung nach, zu der alle Bürgerinnen und Bürger eingeladen sind. Die anonyme Online-Umfrage ist zu erreichen über den Internet-Link [https://ww3.unipark.de/uc/befragung\\_gesellschaft/](https://ww3.unipark.de/uc/befragung_gesellschaft/); sie dauert etwa zehn Minuten.

ANZEIGE



DAS IST IHR RECHT

MEHR ERFAHREN

Abbildung 93: Teilnahmeaufruf zur eHighway-Akzeptanzbefragung über das Online-Angebot der „Echo Verlage“ am 08. Februar 2022 (Quelle: ECHO ONLINE (2022))



Nachrichten > Südhessen > Online-Befragung zum E-Highway gestartet

18.02.2022

## Lkw-Teststrecke an der A5

### ONLINE-BEFragung ZUM E-HIGHWAY GESTARTET



© dpa

Ein Spezial-Lkw fährt auf der eHighway-Teststrecke entlang der A5 (Archiv)

Wie kommt die millionenteure Lkw-Elektro-Highway-Teststrecke an der A5 eigentlich bei den Bürgern an? Das versuchen jetzt Verkehrsplanungs-Experten der TU Darmstadt herauszufinden.

WERBUNG



Akzeptanz wird abgefragt

Spezielle Elektro-Lkw docken sich an der A5 an eine Oberleitung, ziehen sich Strom und fahren elektrisch. Das ist der

Abbildung 94: Teilnahmeaufruf zur eHighway-Akzeptanzbefragung über den Internetauftritt von „Hit Radio FFH“ am 18. Februar 2022 (Quelle: WILHELM (2022))





## Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen

Befragung im Rahmen des Forschungsprojekts ELISA II-B

Vielen Dank, dass Sie interessiert sind, an dieser Befragung teilzunehmen!



### Warum erheben und verarbeiten wir Ihre Daten?

Im Folgenden finden Sie einige Fragen zum Projekt Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen – kurz: ELISA.

Im Rahmen des ELISA-Projekts wird untersucht, inwieweit durch eine Elektrifizierung von Lastkraftwagen mittels Oberleitungen der Straßengüterverkehr in Zukunft zum Klimaschutz beitragen kann. Hierzu wurde auf der Bundesautobahn A5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt eine zehneinhalb Kilometer lange Teststrecke errichtet, auf der fünf Testfahrzeuge im Realbetrieb für die weitere Erforschung der sogenannten eHighway-Technologie beständig im Einsatz sind. In diesem Zusammenhang beschäftigt sich unter anderem das **Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik** der **Technischen Universität Darmstadt** mit der wissenschaftlichen Begleitforschung. Von besonderem Interesse ist dabei die **gesellschaftliche Akzeptanz** des Projekts sowie der eHighway-Technologie – also der Elektrifizierung von Lastkraftwagen mittels Oberleitungen.

Die Umfrage dauert **ca. 10 Minuten**, ist **anonym** und **freiwillig**. Eine Registrierung zur Teilnahme ist nicht erforderlich. Die Auswertung der Befragung erfolgt **gemäß den Vorgaben der DSGVO** durch das Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.

### Wie können Sie uns kontaktieren?

M.Sc. Ferdinand Schöpp

Technische Universität Darmstadt

Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

schoepp@verkehr.tu-darmstadt.de

**Abbildung 95: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Titelseite, Teil 1**  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))




Wenn Sie mehr Informationen über die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten wünschen, bitte auf [hier](#) klicken.

Ich stimme zu, dass meine personenbezogenen Daten gemäß den hier aufgeführten Angaben verarbeitet werden.


[Ich möchte nicht teilnehmen](#)


[WEITER ZUR UMFRAGE](#)



**Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt**

**Abbildung 96: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Titelseite, Teil 2**  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))



  
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Teil 1: Allgemeines

*Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.*

#### 1.1 Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an.\*

---

weiblich

männlich

divers

keine Angabe

#### 1.2 Bitte geben Sie Ihr Alter an.\*

---

unter 18 Jahre

18-24 Jahre

25-34 Jahre

35-44 Jahre

45-54 Jahre

55-64 Jahre

65 Jahre und älter

keine Angabe

#### 1.3 Bitte geben Sie Ihren höchsten Bildungsabschluss an.

---

Wenn Ihr Bildungsabschluss nicht aufgelistet ist, wählen Sie bitte den Abschluss aus, der am besten vergleichbar mit Ihrem Abschluss ist.

(noch) kein Schulabschluss

Hauptschulabschluss

Realschulabschluss (Mittlere Reife)

(Fach-) Abitur

(Fach-) Hochschulabschluss (Bachelor, Master, Magister, Diplom, Staatsexamen)

Promotion/Habilitation

keine Angabe

**Abbildung 97: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 1, Teil 1**  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))






1.4 Bitte geben Sie an, in welchem Bundesland Sie wohnen.\*

Bitte wählen Sie aus der Liste. Wenn Sie nicht in Deutschland wohnen, scrollen Sie bitte bis ans Ende der Liste.

Select a choice

10% WEITER



Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt

Abbildung 98: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 1, Teil 2  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))

## ABSCHNITT 2: KLIMASCHUTZ IM ALLGEMEINEN



### Teil 2: Klimaschutz im Allgemeinen

Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.

#### 2.1 Bitte bewerten Sie die nachfolgenden Aussagen.

	stimme voll und ganz zu	stimme eher zu	teils, teils	stimme eher nicht zu	stimme gar nicht zu	weiß nicht
a) Der Klimawandel ist ein ernstzunehmendes Problem.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
b) Es ist wichtig, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
c) Es ist wichtig, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d) Klimaschutz ist vor allem Aufgabe der Regierung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
e) Klimaschutz kann nur durch ein gemeinsames Handeln in der Gesellschaft erreicht werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
f) Mir selbst ist Klimaschutz wichtig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
g) Ich engagiere mich aktiv für den Klimaschutz.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

#### 2.2 Haben Sie bereits eine oder mehrere der folgenden Möglichkeiten genutzt?

Bitte wählen Sie. Mehrfachantworten sind möglich.

- Sie haben ein neues Auto gekauft, und der Kraftstoffverbrauch war ein wichtiger Faktor für Ihre Kaufentscheidung.
- Sie haben ein Hybrid-/Elektrofahrzeug gekauft.
- Sie nutzen in den letzten Jahren (soweit möglich) vermehrt umweltfreundliche Fortbewegungsmittel wie zu Fuß gehen, Radfahren, öffentliche Verkehrsmittel oder Car-Sharing.
- Sie haben Ihr Zuhause besser isoliert, um Ihren Energiebedarf zu reduzieren.
- Sie haben in den letzten Jahren eine Immobilie erworben und dabei auf einen niedrigen Energiebedarfswert geachtet.
- Beim Kauf eines neuen Haushaltsgeräts, zum Beispiel eines Kühlschranks, ist ein geringer Energiebedarf ein wichtiger Faktor für Ihre Kaufentscheidung.
- Um einen höheren Anteil an Ökostrom zu beziehen, haben Sie Ihren Stromversorger beziehungsweise den Tarif gewechselt.
- Sie berücksichtigen Ihren ökologischen Fußabdruck, wenn Sie beispielsweise in Ihren Urlaub fahren/fliegen oder längere Reisen planen.


Abbildung 99: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 2, Teil 1  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))




Sie versuchen Ihren Abfall zu reduzieren, zum Beispiel durch Einsparung von Einwegartikeln oder übermäßigen Verpackungen.

Sie achten auf eine korrekte Entsorgung von Abfällen, zum Beispiel durch Mülltrennung.

ZURÜCK  20% WEITER

 **Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt**

**Abbildung 100: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 2, Teil 2**  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))

### Teil 3: Klimaschutz im Verkehrssektor

*Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.*

#### 3.1 Bitte bewerten Sie die nachfolgenden Aussagen.

	stimme voll und ganz zu	stimme eher zu	teils, teils	stimme eher nicht zu	stimme gar nicht zu	weiß nicht
a) Es ist wichtig, dass im Verkehrssektor Maßnahmen ergriffen werden, die gezielt Treibhausgasemissionen reduzieren und damit zum Klimaschutz beitragen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
b) Es ist wichtig, dass im Verkehrssektor Maßnahmen ergriffen werden, die gezielt Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub reduzieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
c) Es ist wichtig, dass im Verkehrssektor Maßnahmen ergriffen werden, die gezielt den Verkehrslärm reduzieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

#### 3.2 Bitte bewerten Sie die nachfolgenden Aussagen.

	stimme voll und ganz zu	stimme eher zu	teils, teils	stimme eher nicht zu	stimme gar nicht zu	weiß nicht
a) Die Verlagerung des Straßengüterverkehrs im größtmöglichen Umfang auf die Schiene ist sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
b) Da auch bei sehr erfolgreicher Verlagerung auf die Schiene in absehbarer Zeit trotzdem der größte Anteil der Güter auf der Straße transportiert werden wird, muss der Straßengüterverkehr ebenfalls deutlich emissionsärmer gestaltet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

ZURÜCK

30%

WEITER



**Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt**

Abbildung 101: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 3  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))





### Teil 4: Zukünftige Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr

*Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.*

#### 4.1 Bitte bewerten Sie: Eine geeignete Möglichkeit, den Straßengüterverkehr emissionsärmer zu gestalten, ist...

	stimme voll und ganz zu	stimme eher zu	teils, teils	stimme eher nicht zu	stimme gar nicht zu	weiß nicht
a) ...eine stetige Verbesserung von Verbrennungsmotoren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
b) ...der Einsatz von Hybrid-Lkw.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
c) ...der Einsatz von Gas-Lkw (LNG - Liquid Natural Gas).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d) ...die Elektrifizierung von Lkw.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
e) ...die Entwicklung und Anwendung von synthetischen Kraftstoffen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
f) ...die Entwicklung und Verbreitung von Brennstoffzellen-/Wasserstoff-Lkw.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

ZURÜCK

40%

WEITER



**Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt**

**Abbildung 102: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 4**  
 (Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))



## Teil 5: Oberleitungsgebundener Straßengüterverkehr

Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.



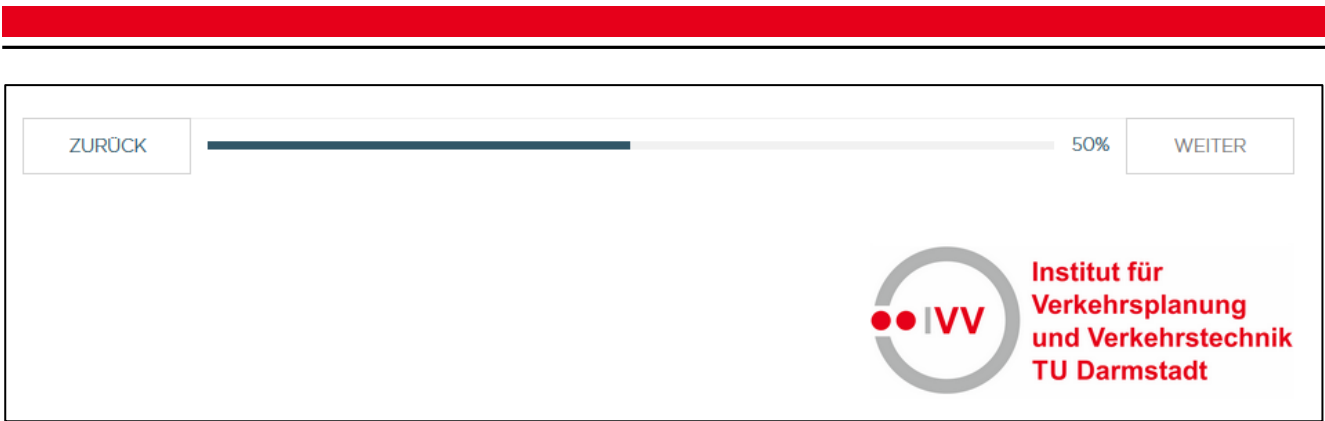
### 5.1 Wie gut fühlen Sie sich über den oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehr – das sogenannte eHighway-System – informiert?

- sehr gut informiert
- eher gut informiert
- weder gut informiert, noch schlecht informiert
- eher schlecht informiert
- sehr schlecht informiert
- Mir sagt das eHighway-System nichts.
- weiß nicht

### 5.2 Wie gut fühlen Sie sich über die eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen informiert?\*

- sehr gut informiert
- eher gut informiert
- weder gut informiert, noch schlecht informiert
- eher schlecht informiert
- sehr schlecht informiert
- Mir sagt die eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen nichts.
- weiß nicht

Abbildung 103: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 5, Seite 1, Teil 1  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))



**Abbildung 104: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 5, Seite 1, Teil 2**  
 (Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))

**ABSCHNITT 5, SEITE 2: OBERLEITUNGSGEBUNDENER STRAßENGÜTERVERKEHR**



**Abbildung 105: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 5, Seite 2, Teil 1**  
 (Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))

5.4 Wie häufig fahren Sie wöchentlich über die eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen?\*(*im Pkw, Transporter, Bus, Lkw, etc. – auch als Mitfahrer*)

Bitte schätzen Sie ungefähr die Anzahl der Fahrten im Jahresdurchschnitt.

- bisher noch nie über die eHighway-Teststrecke auf der A5 in Hessen gefahren
- bisher einmalig über die eHighway-Teststrecke auf der A5 in Hessen gefahren
- weniger als 1 Mal pro Woche
- 1-2 Mal pro Woche
- 3-10 Mal pro Woche
- mehr als 10 Mal pro Woche

5.5 Sind Sie schon einmal über eine der anderen eHighway-Teststrecken in Deutschland gefahren?\*(*im Pkw, Transporter, Bus, Lkw, etc. – auch als Mitfahrer*)

Bitte wählen Sie. Mehrfachantworten sind möglich.

- Ja, die eHighway-Teststrecke auf der A1 in Schleswig-Holstein.
- Ja, die eHighway-Teststrecke auf der B462 in Baden-Württemberg.
- Nein, ich habe bisher noch keine der beiden anderen eHighway-Teststrecken befahren.

5.6 Haben Sie Befürchtungen bezüglich des eHighway-Systems?\*

- ja
- nein
- weiß nicht

ZURÜCK


60%


WEITER



Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt

Abbildung 106: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 5, Seite 2, Teil 2  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))





TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Teil 5: Oberleitungsgebundener Straßengüterverkehr

*Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.*

#### 5.7 Welche Befürchtungen bezüglich des eHighway-Systems haben Sie?\*

---

Bitte wählen Sie. Mehrfachantworten sind möglich.

- Ich befürchte, dass andere Verkehrsteilnehmende vom Verkehrsgeschehen abgelenkt werden.
- Ich befürchte, dass ich mich selbst vom Verkehrsgeschehen ablenken lasse.
- Ich befürchte eine Beeinträchtigung der Lesbarkeit der Beschilderung.
- Ich befürchte Zeitverluste aufgrund von Instandhaltungsarbeiten an der eHighway-Infrastruktur.
- Ich befürchte eine Behinderung von Rettungseinsätzen (z. B. bei Hubschraubereinsätzen, Abschleppen von Fahrzeugen).
- Ich befürchte umkippende Masten.
- Ich befürchte herabfallende Oberleitungen.
- Ich befürchte Funkenflug.
- Ich befürchte elektromagnetische Wirkungen.
- Ich befürchte eine Beeinträchtigung des Landschaftsbilds.
- weiß nicht
- Sonstiges:

#### 5.8 Was trifft bezüglich Ihrer Haltung gegenüber der eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen am ehesten zu?

---

Bitte wählen Sie die Antwort, die Ihre Meinung am ehesten widerspiegelt.

- Ich würde/werde mich aktiv für die eHighway-Teststrecke engagieren beziehungsweise engagiere mich bereits aktiv.
- Ich stehe der eHighway-Teststrecke wohlwollend gegenüber.
- Ich dulde die eHighway-Teststrecke.
- Die eHighway-Teststrecke ist mir gleichgültig.
- Ich stehe der eHighway-Teststrecke zwiespalten gegenüber.
- Ich lehne die eHighway-Teststrecke grundsätzlich ab.
- Ich würde/werde mich aktiv gegen die eHighway-Teststrecke engagieren beziehungsweise engagiere mich bereits aktiv dagegen.

Abbildung 107: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 5, Seite 3, Teil 1  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))





ZURÜCK 70% WEITER



**Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt**

**Abbildung 108: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 5, Seite 3, Teil 2**  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))





### Teil 6: Das eHighway-System im gesellschaftlichen Kontext

*Hinweis: Mit Stern (\*) gekennzeichnete Fragen sind Pflichtfragen.*

#### 6.1 Im Gespräch mit Ihren Mitmenschen: Wie ist das Meinungsbild zum eHighway-System?

- positiv
- eher positiv
- neutral
- eher negativ
- negativ
- Das eHighway-System war noch nie Gesprächsthema.
- weiß nicht


#### 6.2 Im Gespräch mit Ihren Mitmenschen: Versuchen Sie/Würden Sie versuchen, andere vom eHighway-System zu überzeugen?

- Ja, ich versuche/würde versuchen, meine Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen.
- Nein, ich versuche nicht/würde nicht versuchen, meine Mitmenschen vom eHighway-System zu überzeugen.
- weiß nicht

#### 6.3 Möchten Sie, dass das eHighway-System in Zukunft ausgebaut wird?\*

- ja
- nein
- weiß nicht

ZURÜCK  80% WEITER



**Institut für  
Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik  
TU Darmstadt**

Abbildung 109: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 6  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))

The screenshot shows a survey form with the following elements:

- Logos:** 'eLISA' logo with a lightning bolt icon and 'TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT' logo.
- Title:** 'Teil 7: Anmerkungen'.
- Question 7.1:** '7.1 Hat Ihnen etwas gefehlt? Möchten Sie auf etwas aufmerksam machen? Lob, Kritik, Anmerkungen? Hier haben Sie die Möglichkeit dazu.' Below this is a large empty text box.
- Question 7.2:** '7.2 Wünschen Sie sich mehr Informationen zum eHighway-System?' Below this are three radio button options: 'ja', 'nein', and 'Ist mir egal.' The 'nein' option is highlighted with a grey background.
- Progress Bar:** A horizontal bar with 'ZURÜCK' on the left, a dark grey progress indicator, '90%' in the middle, and 'WEITER' on the right.
- Footer:** Logo of 'IVV Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik TU Darmstadt'.

Abbildung 110: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Abschnitt 7  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))



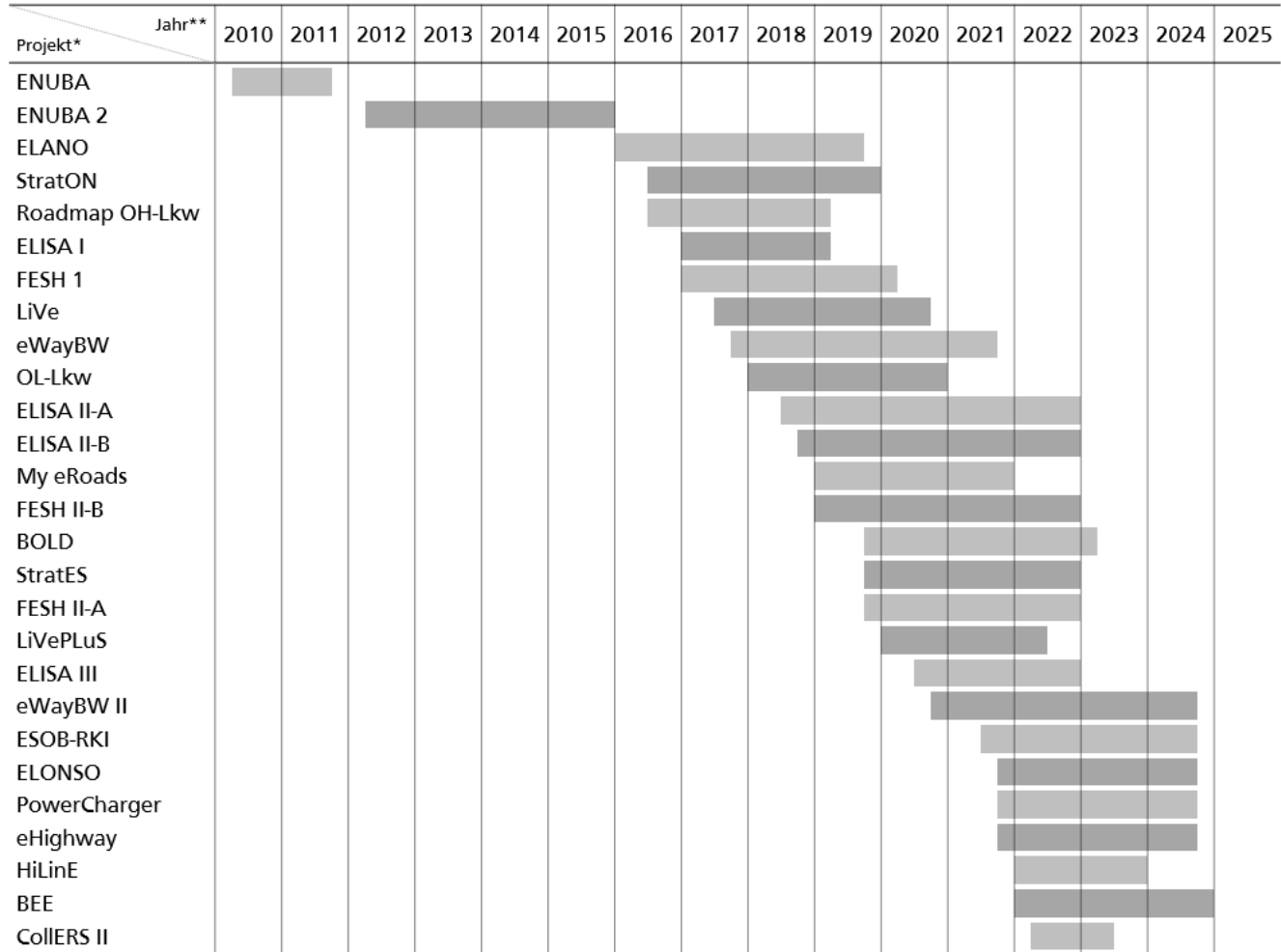
Abbildung 111: Fragebogen zur Akzeptanzbefragung – Schlussseite  
(Quelle: Eigener Fragebogen, generiert mit UNIPARK.COM (2022))

## L: AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSPROJEKTE IM KONTEXT DER EHIGHWAY-FORSCHUNG IM ZEITLICHEN VERLAUF

Nachfolgende Tabelle 26 zeigt ausgewählte Forschungsprojekte im Kontext der eHighway-Forschung im zeitlichen Verlauf. Es ist deutlich zu erkennen, dass etwa ab dem Jahr 2016 die Forschungsaktivitäten zur Untersuchung des eHighway-Systems deutlich zunahmen.

**Tabelle 26: Ausgewählte Forschungsprojekte im Kontext der eHighway-Forschung im zeitlichen Verlauf**

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMWK (o. J., o. S.); Stand 12/2022)



\*Auswahl

\*\*unterteilt in Quartale

## M: FLYER ZUM AUFRUF ZUR TEILNAHME AN DER GESELLSCHAFTSBEFragung ZUM eHIGHWAY-SYSTEM

Im Nachfolgenden wird der entworfene Flyer zum Aufruf zur Teilnahme an der Gesellschaftsbefragung zum eHighway-System dargestellt. Aufgrund mangelnder Kapazitäten im ELISA-Forschungsprojekt konnte eine Verteilung des Flyers schlussendlich nicht realisiert werden. Der Flyer kann künftigen Forschungsaktivitäten in diesem Zusammenhang jedoch als Orientierung dienen.



Abbildung 112: Flyer zum Aufruf zur Teilnahme an der Gesellschaftsbefragung – Vorderseite  
(Quelle: Eigene Darstellung)

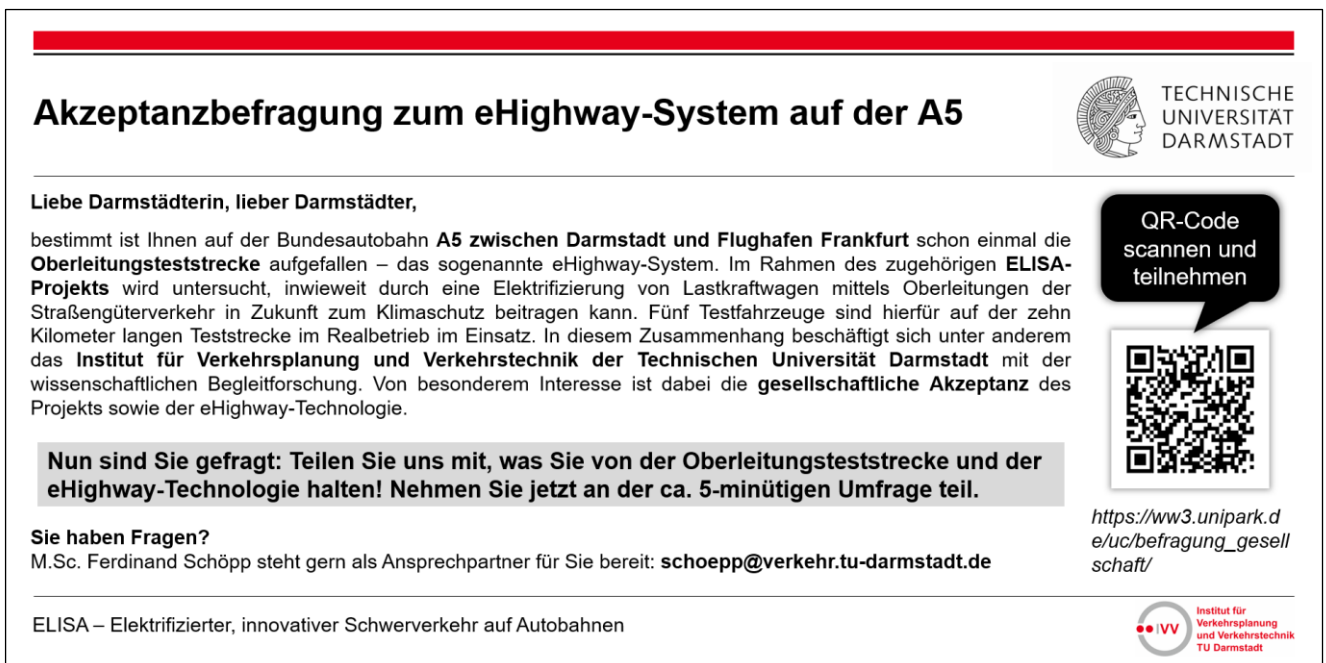


Abbildung 113: Flyer zum Aufruf zur Teilnahme an der Gesellschaftsbefragung – Rückseite  
(Quelle: Eigene Darstellung)



---

## N: ÜBERSICHT UND STATUS DER IM RAHMEN DER DISSERTATIONSSCHRIFT BEANTWORTETEN ZIELE UND FORSCHUNGSHYPOTHESEN

Der Bearbeitung der Dissertationsschrift lagen verschiedene Forschungshypothesen zugrunde. Nachfolgender Tabelle 27 können diese zusammenfassend entnommen werden. Dabei wird auch der jeweilige Beantwortungsstatus der Forschungshypothesen ersichtlich.

Tabelle 27: Übersicht und Status der im Rahmen der Dissertationsschrift beantworteten Ziele und Forschungshypothesen (Quelle: Eigene Darstellung)

---

### Hauptziel: Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des eHighway-Systems

Oberziel 1: Identifikation von Betriebsmodi eines O-Lkws	Status
H1a: Ein O-Lkw operiert in verschiedenen Betriebsmodi.	Bestätigt
H1b: Die Betriebsmodi eines O-Lkws werden durch das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Antriebsstrangs und der externen Energieversorgung bestimmt.	Bestätigt
H1c: Die Betriebsmodi eines O-Lkws können funktional eindeutig voneinander abgegrenzt werden.	Bestätigt
H1d: Die Betriebsmodi eines O-Lkws können auch datenbasiert eindeutig voneinander abgegrenzt werden.	Bestätigt
<b>Oberziel 2: Ermittlung und Berechnung charakteristischer Energiefluss- und Energieverbrauchskennwerte eines O-Lkws</b>	
H2a: Entsprechend dem Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Energieflüsse eines O-Lkws.	Bestätigt
H2b: Die Energieflüsse eines O-Lkws können datenbasiert berechnet werden.	Bestätigt
H2c: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus des O-Lkws.	Bestätigt
H2d: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der E-Maschine.	Bestätigt
H2e: Der Energieverbrauch eines O-Lkws ist abhängig vom Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten und nutzbaren Strecken.	Bestätigt
H2f: Der Energieverbrauch eines O-Lkws wird durch die Nutzung der Oberleitungsanlage gesenkt.	Bestätigt
<b>Oberziel 3: Berechnung charakteristischer Treibhausgasemissionskennwerte und Analyse des Treibhausgasemissionsreduktionspotenzials von O-Lkw</b>	
H3a: Die durch einen O-Lkw emittierten Treibhausgase sind abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus eines O-Lkws.	Bestätigt
H3b: Der Strommix beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an emittierten Treibhausgasen von O-Lkw.	Bestätigt
H3c: Der Anteil der durch Oberleitungsanlagen elektrifizierten Streckenabschnitte im Vergleich zu den nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten einer Fahrt beeinflusst die Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen von O Lkw.	Bestätigt
H3d: Der Einsatz von O-Lkw erlaubt messbare Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr.	Bestätigt

---

### Nebenziel: Allgemeine Betrachtung der gesellschaftlichen Akzeptanz des eHighway-Systems

---