

Bachelorarbeit
im Bachelorstudiengang
Wirtschaftsingenieurwesen Logistik
an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm

**Nachhaltige Gestaltung der Transportketten: Die Bedeutung des
Verkehrsträgers Straße für die Zukunft**

Erstkorrektor: Prof. Dr. Michael Grabinski

Verfasser: Abdullah Bostan (Matrikel-Nr.: 257800)

Thema erhalten: 20.12.2022

Arbeit abgegeben: 20.04.2023

Danksagung

Zum Abschluss meiner Bachelorarbeit möchte ich all denen meinen aufrichtigen Dank aussprechen, die mich auf meinem Weg begleitet haben. Ein besonderer Dank gilt hierbei Prof. Dr. Michael Grabinski, der mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit anzufertigen, sowie Frau Nicole Diesinger für Ihre wertvollen Ratschläge und die kontinuierliche Unterstützung während der Anfertigung der Bachelorarbeit. Abschließend möchte ich mich bei meiner Verlobten und meiner Familie danken, die mich in dieser Zeit moralisch und finanziell durchgehend unterstützt haben. Zuletzt danke ich meinen Freund Selcuk Ceylan, der mich durch seine konstruktiven Kritiken inspiriert hat. Ohne deren Unterstützung hätte ich dieses Ziel undenkbar erreicht.

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	
II.	Abkürzungsverzeichnis	
III.	Abbildungsverzeichnis	
IV.	Tabellenverzeichnis	
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Ausarbeitung und Aufbau der Arbeit	2
2	Definitionen	4
2.1	Begrifflichkeiten der Transportkette	4
2.2	Die verschiedenen Verkehrsträger	6
2.3	Nachhaltigkeit	7
2.4	Transportlogistik	9
3	Abstract über die Verkehrsträger und deren Pro und Kontra	10
3.1	Gesamtverkehr	10
3.2	Verkehrsträger Straße	13
3.3	Verkehrsträger Bahn	14
3.4	Verkehrsträger Seeschiffe & Binnenschiffe	15
3.5	Verkehrsträger Flugzeug	17
3.6	Verkehrsträger Rohrleitungsverkehr	18
3.7	Kombinierter Verkehr	19
4	Antriebsarten im Vergleich	20
4.1	Verbrennungsmotor	20
4.1.1	Diesel	20
4.1.2	Flüssigerdgas - LNG	21
4.2	Elektroantrieb	24

4.2.1	Wasserstoff – Brennstoffzellentechnologie	24
4.2.2	Elektro	27
4.2.3	Oberleitungen	31
5	Technische Vorkehrungen	34
5.1	Innovative Fahrzeugtechnologien	34
5.2	Zukunftstechnologien	36
6	Ansätze zur Emissionsreduktion	42
6.1	Vermindern	42
6.2	Vermeiden	45
6.3	Verlagern	46
7	Praxisbesuch im Werk Nikola-Iveco in Ulm	52
8	Fazit	54
V.	Eidesstaatliche Erklärung	57
VI.	Literaturverzeichnis	58

II. Abkürzungsverzeichnis

A1	Autobahn 1
A5	Autobahn 5
ADC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AG	Aktiengesellschaft
AGV	Automated Guided Vehicle
AWM	Abfallwirtschaftsbetrieb München
ATLAS	Automatisierter Transport zwischen Logistikzentren auf Schnellstraßen
BAB	Bundesautobahn
BEV	Battery Electric Vehicle
BKV	Begleiteter Kombiniertes Verkehr
BMVI / BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BVL	Bundesvereinigung Logistik
CH ₄	Methan
Co.	Compagnie
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSR	Corporate Social Responsibility
CTS	Collaborative Transport Solutions
D2D	Door-to-Door
Dena	Deutsche Energie-Agentur
DIN	Deutsches Institut für Normung
DUSS	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße
DVGW	Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches
E-Lkw	Elektro-Lastkraftwagen
ESC	European Stationary Cycle
ELR	European Load Transient Cycle
FCEV	Fuell Cell Electric Vehicle
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung

H2	Wasserstoff
HC	Hydrocarbons
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
JiT	Just-in-time
JiS	Just-in-sequence
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KFZ	Kraftfahrzeug
KG	Kommanditgesellschaft
Km	Kilometer
KLV	kombinierter Ladungsverkehr
KsNI	Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur
KV	Kombinierter Verkehr
kWh	Kilowattstunde
L4	Level 4
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas
Mio	Million
Mrd	Milliarde
NOx	Stickoxide
O-Lkw	Oberleitungs-Lastkraftwagen
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Promethium
Ro/Ro	Roll on – Roll off
SAE	Society of Automotive Engineers
T	Tonne
Tdw	tons dead weight
TEU	Twenty-Foot-Equivalent Unit
TFG	deutscher Anbieter für Frachtverkehr per Güterzug
Tkm	Tonnenkilometer
TtW	Tank-to-Wheel
UBA	Umweltbundesamt
UKV	Unbegleiteten Kombi-Verkehr
WLV	Wagenladungsverkehr

WtT

WtW

z.B.

Weel-to-Tank

Weel-to-Wheel

zum Beispiel

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Transportkette, Quelle: Forschungs-Informationssystem; https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/288483/ [Zugriff am 01.01.2023]	5
Abbildung 2:: 3-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit; in Anlehnung an Michael Stoll, Quelle: https://www.michael-stoll.info/glossar-3-saeulen-modell/ [Zugriff am 14.02.2023]	8
Abbildung 3: Aufgaben der Transportlogistik in Anlehnung an Quelle: Uwe Clausen: Verkehrs- und Transportlogistik S.5	10
Abbildung 4: in Anlehnung an Statistisches Bundesamt. (3. Juni, 2022). Transportleistung einzelner Verkehrsträger in Deutschland in den Jahren 2018 und 2021 (in Milliarden Tonnenkilometern) [Graph]. In Statista. Zugriff am 14. April 2023, von https://de-statista- com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/12243/umfrage/transportleistung-je-verkehrstraeger-in- deutschland/	12
Abbildung 5: in Anlehnung an KBA. (31. Mai, 2022). Anzahl der Lastkraftwagen in Deutschland nach Kraftstoffarten in den Jahren 2020 bis 2022 . In Statista. Zugriff am 05. April 2023, von https://de- statista-com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/468860/umfrage/	21
Abbildung 6: Komponenten bei einem HCEV LKW; Scania; https://www.scania.com/content/www/de/de/home/newsroom/news/2021/how-does-a-hydrogen- fuel-cell-electric-truck- work/_jcr_content/root/responsivegrid/responsivegrid/responsivegrid/heroimage.coreimg.85.1920.j peg/162676957397 [Zugriff am 15.03.2023]	27
Abbildung 7: Oberleitungs-Lkw im Einsatz, Siemens, Quelle: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8324bfa3-ab7c-489a-853c- d00d04aa90ab/width:1024/quality:HIGH/8324bfa3-ab7c-489a-853c-d00d04aa90ab-high.webp [Zugriff am 20.03.2023]	33
Abbildung 8: CargoCap Kreuzung, Quelle:; http://www.cargocap.de/files/cargocap_images/CargoCap_Kreuzung_450p201101.jpg [Zugriff am 15.02.2023]	37
Abbildung 9: CargoCap Station, Quelle: http://www.cargocap.de/files/cargocap_images/CargoCapStationWeiche450p201301.jpg [Zugriff am 15.02.2023]	37
Abbildung 10: Stufenmodell nach SAE J3016; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Quelle: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Schlaglichter/2020-03-forschung-fuer- autonomes-fahren-tabelle-1.jpg?__blob=normal&v=1&size=834w [Zugriff am:10.04.2023]	38
Abbildung 11: Prototypen-Lkw von MAN in Dornstadt; DB-Cargo; Quelle: https://www.dbcargo.com/resource/image/7694384/4:3/968/726/fda8f5485ed0806f62f0ac19257d d84b/40BCE9C7E67F4AD8E40CA38648CAE17C/DB220486.jpg [Zugriff am 05.04.2023]	40
Abbildung 12: Well-to-Wheel Gesamtsystemdarstellung in Anlehnung an Forschungs-Informationssystem, https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/ [Zugriff am 23.03.2023]	43

<i>Abbildung 13: CO2 Reduzierung in Tonnen pro Jahr, in Anlehnung an Paul Wittenbrink, Transportmanagement, S.344</i>	44
<i>Abbildung 14: Jährliche Investitionskosten, in Anlehnung an Paul Wittenbrink, Transportmanagement, S.344</i>	44
<i>Abbildung 15: Allianz pro Schiene. (8. August, 2021). Höhe der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Güterverkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2019 (in Gramm pro Tonnenkilometer) [Graph]. In Statista. Zugriff am 13. April 2023, von https://de-statista-com.ezproxy.hnu</i>	47
<i>Abbildung 16: Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr in Deutschland 2021, in Anlehnung an Umweltbundesamt, https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_g%C3%BCterverkehr_tabelle [Zugriff am 08.03.2023]</i>	48
<i>Abbildung 17: in Anlehnung an Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr. (19. Januar, 2022). Beförderungsmenge im kombinierten Verkehr in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020 (in Millionen Tonnen) [Graph]. In Statista. Zugriff am 03. April 2023, von https://de-statista-com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/12262/umfrage/gueteraufkommen-im-kombinierten-verkehr-seit-dem-jahr-2008/</i>	50
<i>Abbildung 18: Nikola TRE BEV im Hamburger Hafen, Quelle: https://www.hafen-hamburg.de/site/assets/files/570419/220914_hpa_iveco_nikola_3.1920x0.jpg [Zugriff am 28.03.2023]</i>	53

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abgasgrenzwerte für Lkw; in Anlehnung an Umweltbundesamt:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge> [Zugriff am 22.03.2023]

42

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der heutigen Transportwelt sind mehrere Verkehrsträger vorhanden, die einer Transportkette zur Verfügung stehen und somit die Güter von einem Start- zu einem Zielpunkt transportieren. Neben der Unterscheidung eines kombinierten Verkehrs oder intermodalen Verkehrs, stellt sich eher die Frage des Verkehrsträgers im umweltfreundlichen Aspekt. Die Umwelt wird somit durch Emissionen von Feinstaub (PM), Stickoxiden (NOx) und Kohlendioxid (CO₂) belastet. Die Anzahl der Lieferungen, und somit auch die Anzahl der Verkehrsträger, steigen von Tag zu Tag. Im nationalen Verkehr werden ca. 72 % der Güter auf den Straßen zum Kunden geliefert. Experten des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMVI) prognostizieren, dass der Gütertransport in Deutschland bis 2030 um 18% an Volumen und 38% an Transportleistung zunehmen wird (1). Obwohl die Technologie bei den Lkws in den vergangenen Jahren Fortschritte gemacht hat, sind die Treibstoffverbräuche sehr gering oder kaum gesunken, was zu einer hohen Belastung für die Umwelt führt. In einer Transportkette kann es auch vorkommen, dass der Transportmittel gewechselt werden muss und somit die ganze Kette sich um einen Prozess vermehrt, welcher die Umwelt zusätzlich belastet. Um die Umwelt zu schonen und Emissionen zu sparen ist es wichtig die Transportkette effizient zu gestalten und zu nutzen. Jedoch stellt sich jetzt die Frage, welche anderen Antriebsarten derzeit entwickelt werden und ob sie die Transportkette nachhaltiger gestalten können. Heutzutage ist die Just-in-time Lieferung ein wichtiger Aspekt, der den umweltschädlichen Straßengüterverkehr zusätzlich verstärkt.

Bei der Gestaltung einer nachhaltigen Transportkette spielt die Infrastruktur im Güterverkehr eine wichtige Rolle. Die Güterverkehrsstrategie (UBA) hatte als Zielgröße die Treibhausgasemissionen im Verkehr zu reduzieren. Die Verteilung des Güteraufkommens in Deutschland bildet sich aus verschiedenen Verkehrsträgern: Schienen-, Straßengüterverkehr, Flugzeug, Schiffen und Rohrleitung. Den größten Anteil des Güterverkehrs bilden hierbei

die Straße gefolgt von Schiene. Mit steigender Anzahl der Transporte steigen gleichzeitig auch die CO₂-Emissionen im deutschen Güterverkehr. Der Verkehrsträger Lastkraftwagen ist für den größten Anteil der CO₂-Emissionen im Güterverkehr verantwortlich. Dies hat die Frage befeuert, wie in Zukunft im Straßenverkehr eine Transportkette gestaltet werden kann. In den letzten Jahren wird in diesen Bereichen bereits geforscht und entwickelt, Lkws mit emissionsarmen Treibstoffen zu betreiben. Obwohl es bereits Prototypen für batteriebetriebene Lastkraftwagen gibt, wird zugleich deutlich, dass die Inbetriebnahme nicht einfach ist. In dieser Arbeit soll erarbeitet werden, ob die Straße als Verkehrsträger der Zukunft etablieren kann und gleichzeitig wird eine Zusammenfassung der derzeit verfügbaren alternativen Antriebe im Bereich Straßengüterverkehr wiedergegeben.

1.2 Ziel der Ausarbeitung und Aufbau der Arbeit

Das Hauptziel der Bachelorarbeit besteht darin, eine umfangreiche Zusammenfassung über die nachhaltigen und umweltschonenden Antriebsmöglichkeiten im Straßengüterverkehr in der Transportkette aufzustellen. Eine Diskussion darüber, welche Konzepte und Antriebsarten im Straßengüterverkehr für die Region Deutschland am umweltfreundlichsten sind. Die vorliegende Bachelorarbeit ist dabei in acht Kapitel unterteilt. Nach der Einführung im ersten Kapitel werden in Kapitel zwei die Begriffsdefinitionen über die Transportkette, Verkehrsträgern, Nachhaltigkeit und die Transportlogistik erläutert. Das zweite Kapitel befasst sich mit den Begrifflichkeiten und vermittelt dem Leser einen umfassenden Überblick über die Transportlogistik und die Bedeutung von Nachhaltigkeit innerhalb der Transportketten. Der Fokus liegt dabei auf der Identifizierung der Herausforderungen, die mit der Umsetzung umweltfreundlicher Logistiklösungen einhergehen, sowie die Vorstellung von innovativen Ansätzen und Technologien, die dazu beitragen können, diese Herausforderungen zu bewältigen. Anschließend wird in Kapitel drei die verschiedenen Verkehrsträger gegenübergestellt. Daraufhin wird in Kapitel

vier die alternativen Antriebsarten vorgestellt. In Kapitel fünf werden die technischen Maßnahmen erläutert. Im Anschluss wird im sechsten Kapitel die Ansätze zur Emissionsreduzierung durch Verringern, Vermeiden und Verlagerung erklärt. Im vorletzten Kapitel wird ein Praxisbeispiel beschrieben. Die Bachelorarbeit endet im achten Kapitel mit einem Fazit. Insgesamt bietet die Bachelorarbeit einen umfassenden Überblick über die Grundlagen der Transportlogistik und Nachhaltigkeit in der Logistik, ohne dabei auf spezifische technische Details einzugehen, die für das Verständnis des Themas nicht von Bedeutung sind.

2 Definitionen

2.1 Begrifflichkeiten der Transportkette

„Transportkette, Verkehrskette, Reisekette; nach DIN30780 eine Folge von technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden“. (2)

Die Transportkette besteht aus mehreren grundlegenden Phasen:

- Vorlauf
- Hauptlauf
- Nachlauf

Der Vorlauf ist ein wesentlicher Bestandteil der Transportkette und bezeichnet den Transport von der Absenderstelle zu einem Logistikzentrum oder Hub, in der Sendungen dann sortiert, umgeladen und für den Hauptlauf vorbereitet werden (siehe Abb.1). Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf gilt für Kombinierte Verkehre als auch Sammelgut-Transporte, welche nicht per Direktverkehr erfolgen. Der Hauptlauf beginnt nach Abschluss des Vorlaufs, wenn die Sendungen für den weiteren Transport vorbereitet wurden. Im Hub des Empfangsspediteurs wird ein zweiter Umschlag vollzogen, bei welchem die Sendungen für den Nachlauf sortiert, zusammengefasst und auf die Transportmittel verladen werden. Der Nachlauf trägt schließlich zur Lieferung der Sendungen an den Empfänger bei (3). In den meisten Fällen wird der Nachlauf mit dem Lkw durchgeführt. Jedoch kann es auch vorkommen, dass der Nachlauf mit dem Schiff oder der Bahn stattfindet, vorausgesetzt der Empfänger eine Schifffanlegestelle oder eine unmittelbare Verbindung zum Güterverkehrsnetz verfügt. Bei der Lieferkette werden zwei Arten der Transportkette unterschieden. Bei einer eingliedrigen Transportkette werden die Güter ohne eine Unterbrechung des Güterflusses durch Lager- oder Umschlagsprozesse direkt zum Empfänger transportiert (4). Eine eingliedrige Transportkette erfolgt somit im Direktverkehr und wird auch als eine direkte Güterflussart bezeichnet. Ein unimodaler Transport bedeutet, dass nur ein

Verkehrsträger für den Transport verwendet wird (5). Eine Transportkette wird als mehrgliedrig bezeichnet, wenn der Güterfluss nicht direkt verläuft. Das heißt innerhalb der Transportkette werden die Güter mindestens einmal durch Umschlag- oder Lagerprozesse unterbrochen. Multimodale Transporte treten auf, wenn der Transport von einer Quelle zu einer Senke über mehrere Verkehrsträger abgewickelt wird. (6). Auch Containertransporte, bei denen der Vorlauf auf Straße oder Schiene erfolgt und anschließend ein Seeschifftransport durchgeführt wird, sind ein typischer Anwendungsfall. Außerdem werden bei einer mehrgliedrigen Transportkette die Güter durch verschiedene Verkehrsträger ausgeführt. Waren können beispielsweise von einem Lastkraftwagen auf einen anderen Lastkraftwagen umgeladen werden. In einer mehrgliedrigen Transportkette kann das Umladen der Güter auch auf einen Bahnwagen oder ein Containerschiff erfolgen, wodurch mehrere Verkehrsträger zum Einsatz kommen und ein multimodaler Transport entsteht. Die Transportabläufe werden wiederum unterschieden. Als Vorläufe werden in der Logistik die Lkw-Transporte vom Versender zum Umschlagshub bezeichnet. Die Lkw-Transporte vom Umschlagshub zum Empfänger heißen Nachläufe. Die Strecke mit der größten Distanz zwischen den Hubs, wird als Hauptlauf bezeichnet.

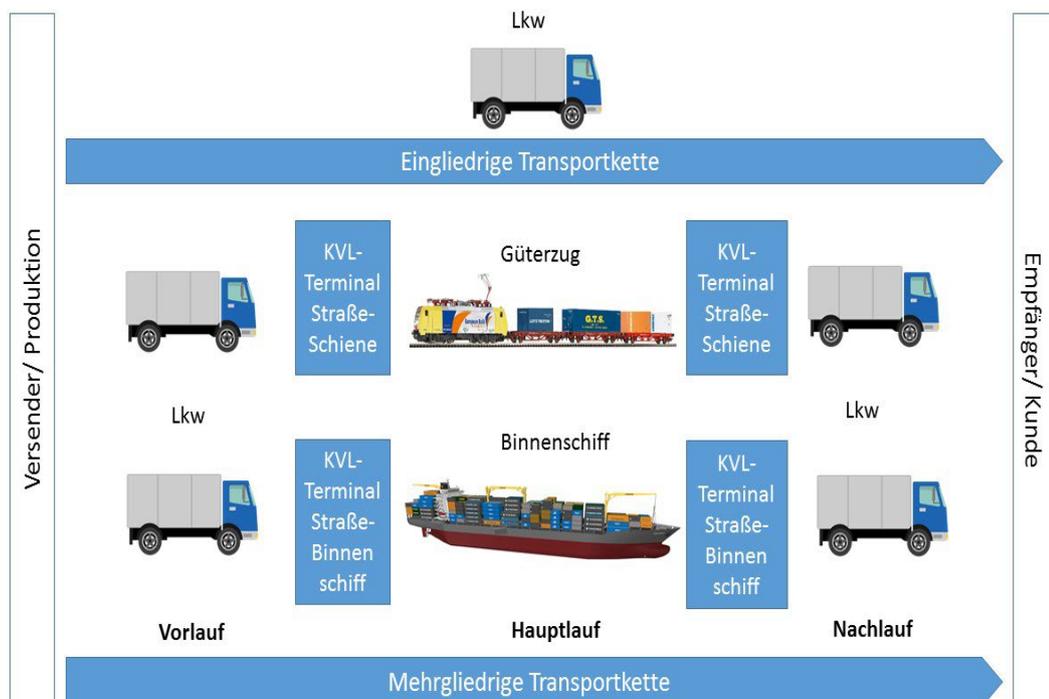


Abbildung 1: Darstellung der Transportkette, Quelle: Forschung-Informationssystem; <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/288483/> [Zugriff am 01.01.2023]

2.2 Die verschiedenen Verkehrsträger

Im Buch „Grundlagen der Logistik“ wird Verkehrsträger wie folgt definiert: „Die Gesamtheit aller (externen) Verkehrsmittel, die eine gleichartige Infrastruktur nutzen, wird als Verkehrsträger bezeichnet“. (7)

Verkehrsträger	Verkehrsmittel	Verkehrswege
-Güterkraftverkehr	-Lastkraftwagen	-Straßennetz
-Eisenbahngüterverkehr	-Eisenbahn	-Schienennetz
-Seeschifffahrt	-Seeschiffe	-Meere, Flüsse, Kanäle
-Binnenschifffahrt	-Binnenschiffe	-Flüsse, Kanäle
-Luftverkehr	-Flugzeuge	-Luftstraße
-Rohrleitungsverkehr	-Pipelines	-Rohrleitungen

Im Straßenverkehr werden Transportmittel mit und ohne eigenen Antrieb benutzt. Diese dürfen ein maximales Gesamtgewicht von 40 Tonnen transportieren (8). Zu den Verkehrsmitteln mit eigenem Antrieb gehören Lastkraftwagen, Zugfahrzeuge und Tankfahrzeuge. Diese Fahrzeuge sind in der Lage, selbstständig auf der Straße zu fahren (9). Verkehrsmittel ohne eigenen Antrieb im Straßengüterverkehr sind Sattelanhänger, Container, Pritschen und Wechselbrücken. Im Schienengüterverkehr werden Transportmittel ohne eigenen Antrieb eingesetzt (10). Zu diesen Verkehrsmitteln gehören zum Beispiel Waggons, Tankwagen und Silowagen. Triebfahrzeuge mit elektrischem oder Verbrennungsmotor ziehen die Schienenverkehrsmittel entlang der Strecke (11). Die Seeschifffahrt ist ein wichtiger Bestandteil des Welthandels und gehört zu den wichtigsten Transportmitteln für den Export und Import von Waren. Die Schifffahrt hat den Vorteil, da Sie eine günstige und sichere Transportmöglichkeit für große Mengen darstellt. Im nächsten Kapitel wird der Begriff Nachhaltigkeit genauer beschrieben und unter Punkt 3.1 werden die Pro und Kontra sowie weitere Informationen zu diesem Thema erläutert.

2.3 Nachhaltigkeit

Die Bezeichnung Nachhaltigkeit hat in jüngster Zeit immer mehr an Relevanz in der Praxis gewonnen. Das steigende Bewusstsein der Verbraucher hat dafür gesorgt, dass Nachhaltigkeit inzwischen auf der Tagesordnung aller Unternehmen steht. Der Begriff stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und wurde Anfang des 18. Jahrhunderts erstmals verwendet (12). Wegen der unkontrollierten und hohen Nutzung von Holz für den Bau, bezeichnete Hans Carl von Carlowitz, deutscher Oberberghauptmann das Prinzip der Nachhaltigkeit. Er forderte, dass nur so viel Holz zu schlagen ist wie stetig nachwächst. Aufgrund der hohen CO₂-Emissionen ist die Nachhaltigkeit innerhalb der Logistikbranche wichtig geworden.

Die Nachhaltigkeit kann man in drei Kategorien einteilen: Die ökologische Nachhaltigkeit besagt, dass eine Institution (Unternehmen/Staat) die Umwelt schonend nutzen soll. Ziel ist es, Schäden an ihr zu vermeiden. Dabei sollen natürliche Rohstoffe rücksichtsvoll nutzen, mehr auf erneuerbare Energie setzen und Produkte recyceln. Der Erhalt der Umwelt für zukünftige Generationen ist ein zentrales Anliegen der ökologischen Nachhaltigkeit. Privatpersonen und Unternehmen sind gleichermaßen gefordert, das Konzept der Nachhaltigkeit in Ihren Alltag zu integrieren (13).

Die ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt den wirtschaftlichen Erfolg im Hinblick auf die Bewahrung der natürlichen Ressourcen. Die Optimierung des Energieverbrauches ist ein Beispiel für eine ökonomisch nachhaltige Politik eines Unternehmens. Nachhaltiges Wirtschaften steht bei der Säule der Ökonomie im Mittelpunkt. Daher müssen Unternehmen und Politik nicht nur auf den Gewinnmaximierungsgedanken schauen, sondern auch darauf achten, dass das Wohl der Gesellschaft und Umwelt gesichert werden. Dies erfordert strategische Planungen, um die Lebensqualität für die heutige und künftige Generation zu gewährleisten (14).

Alle sozialen Gesichtspunkte werden in der sozialen Nachhaltigkeit geschildert. Themen wie gerechtere Löhne, Gleichstellung der Geschlechter im sozialen, wirtschaftlichen und politischen Sinne sowie die Berücksichtigung zukünftiger Generationen werden unter diesem Standpunkt behandelt. Der Fokus der sozialen Nachhaltigkeit liegt auf der Gesellschaft

und dem Menschen. Er verdient Respekt und die Freiheit, sich entfalten zu können. Zudem soll jeder gleiche Chancen erhalten, ohne an seine Abstammung, Religion oder Bildung gebunden zu sein (15).

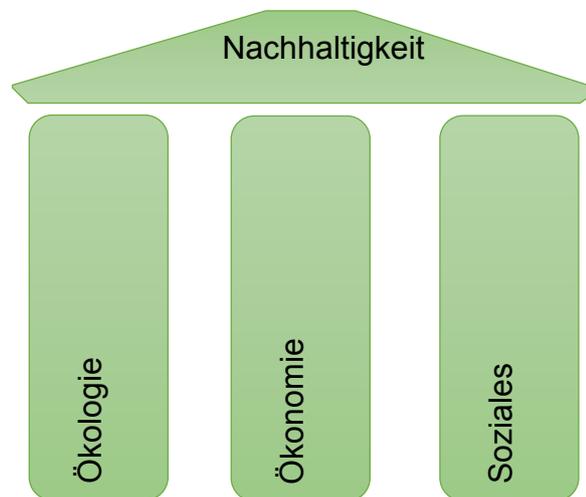


Abbildung 2:: 3-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit; in Anlehnung an Michael Stoll, Quelle: <https://www.michael-stoll.info/glossar-3-saeulen-modell/> [Zugriff am 14.02.2023]

Das Drei Säulen Modell ist eines der drei klassischen Nachhaltigkeitsmodelle, die die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales widerspiegeln. Abbildung 2 veranschaulicht das Drei Säulen Modell. Weitere Modelle sind das Schnittmengenmodell und das Nachhaltigkeitsdreieck. Das 3-Säulen-Modell der Corporate Responsibility (CSR) betont die Notwendigkeit einer nachhaltigen Umsetzung auf verschiedenen Ebenen eines Unternehmens. Dabei wird jeder Bereich als gleichrangig angesehen. Obwohl die Herkunft des Drei Säulen Modells nicht eindeutig ist, erlangte es spätestens durch die Erwähnung im Vertrag von Amsterdam der Europäischen Union breite Aufmerksamkeit. Die Europäische Union bezog sich hier unter anderem auf demokratische Strukturen sowie eine gerechte Verteilung von Einkommen (16). Beim Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg im Jahr 2002 wurde das 3-Säulen-Modell international anerkannt als ein Weg zu einer gerechten Verteilung von Einkommen.

2.4 Transportlogistik

Der Begriff „*Transport*“ stammt vom lateinischen Verb "*transportare*" ab und bedeutet "hinübersetzen", "tragen" oder "bringen". (17). Somit bedeutet Transport die Ortsveränderung von bestimmten Gütern anhand von Transportmitteln. In der Transportlogistik wird zwischen innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Transportsystemen unterschieden. Sie untersucht die Organisation, den Betrieb und das Management von Transportsystemen. Die Transportlogistik ist eine wichtige Unternehmensdisziplin, da Transportsysteme zur Verfügung stehen, um Produkte zu transportieren. Sie ermöglicht es Unternehmen, produzierten Gütern schnell und effizient zu versenden. Die Transportlogistik ist auch für den Handel von Waren von großer Bedeutung. Die Transportlogistik unterstützt nachhaltige Entwicklung, indem sie energieeffiziente Verkehrsmittel und Logistiklösungen fördert. Dies bedeutet, dass die Transportlogistik zur Verbesserung der Umwelt beiträgt. Dazu gehören die Einführung von energieeffizienteren Fahrzeugen, eine bessere Nutzung von Transportkapazitäten sowie die Einführung von emissionsarmen Fahrzeugen. Des Weiteren kann die Transportlogistik helfen, die Wirtschaftlichkeit der Logistik zu verbessern. Durch die Reduzierung der Lieferzeiten und die Erhöhung der Effizienz können Kosten eingespart werden. Der Schwerpunkt in dieser wissenschaftlichen Arbeit liegt in den außerbetrieblichen Transportmitteln. Zu den außerbetrieblichen Transportsystemen gehören die Verkehrsträger wie Luftverkehr, Straßenverkehr, Schiffsverkehr, Schienenverkehr und der Rohrleitungsverkehr. In Abbildung 3 werden die Aufgaben in der modernen Transportlogistik aufgelistet.

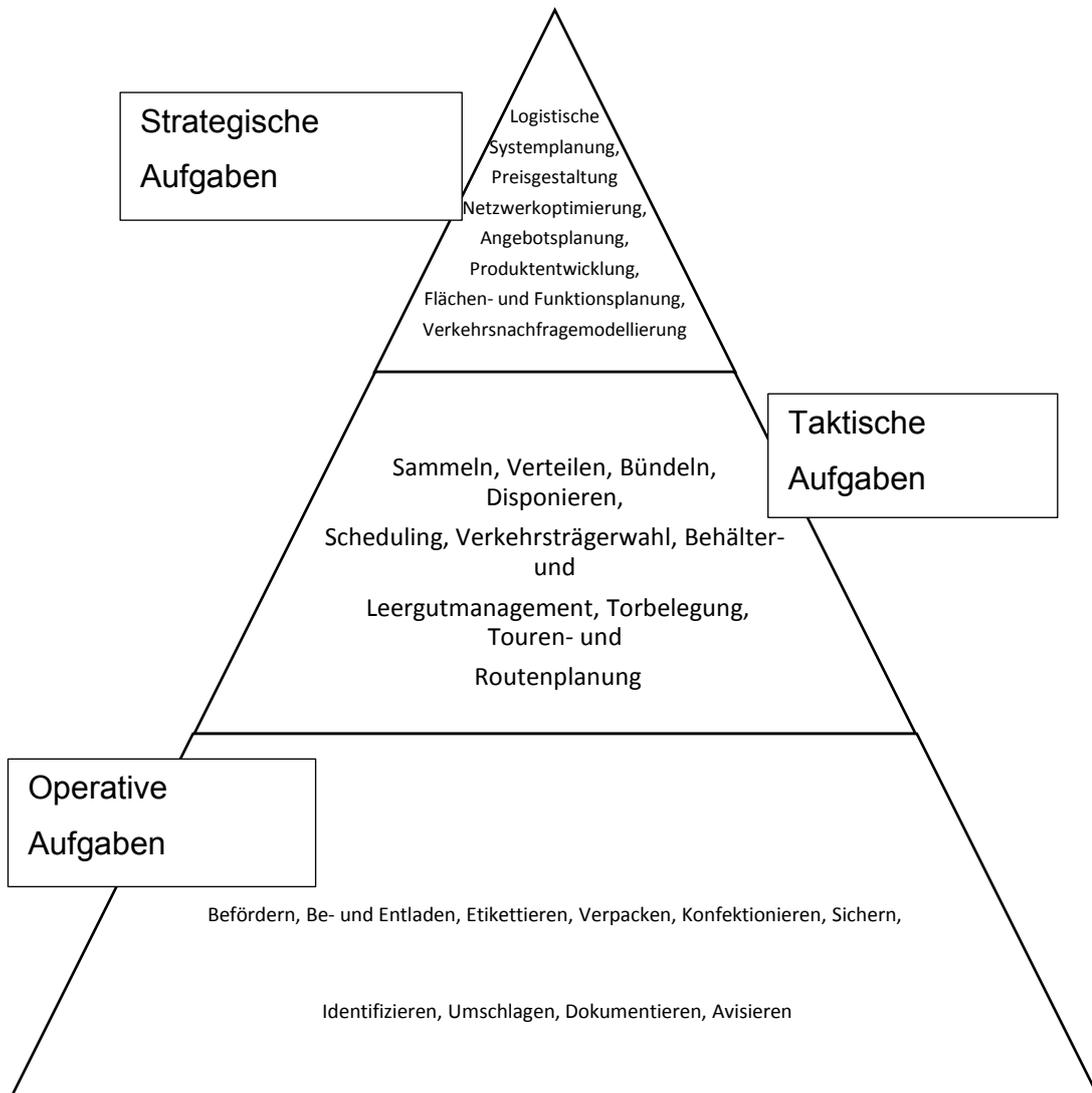


Abbildung 3: Aufgaben der Transportlogistik in Anlehnung an Quelle: Uwe Clausen: Verkehrs- und Transportlogistik S.5

Neben den Aufgaben der Transportlogistik gibt es wesentliche Ziele wie z.B.: Effektivität, Effizienz, Sicherheit, Robustheit, Nachhaltigkeit und die Wirtschaftlichkeit.

3 Abstract über die Verkehrsträger und deren Pro und Kontra

3.1 Gesamtverkehr

Der Güterverkehr in Deutschland ist ein wichtiger Bestandteil des deutschen Verkehrsnetzes. Er beinhaltet den Transport von Gütern und Waren zwischen

Produzenten, Verbrauchern und Händlern. Seit den letzten Jahren hat der Gesamtgüterverkehr in Deutschland ein starkes Wachstum erlebt (18). Dies ist auf die steigende Nachfrage nach Gütern und Waren sowie auf die fortschreitende Globalisierung zurückzuführen. Der Gesamtgüterverkehr in Deutschland wird hauptsächlich durch den Straßenverkehr erledigt. Zudem hat die Zunahme an Lkw-Verkehr zu einem Anstieg der Güterverkehrsdichte auf deutschen Straßen geführt. Im Jahr 2020 betrug das Transportaufkommen in Deutschland rund 4,561 Milliarden Tonnen (19). Im Folgejahr betrug das Güteraufkommen bei circa 4,673 Milliarden Tonnen (20). Im Jahr 2021 stieg die Verkehrsleistung deutscher Lastkraftwagen im In- und Ausland gegenüber zum Vorjahr um ca. 0,9 % auf insgesamt 307,3 Mrd. tkm. (siehe Abbildung 4). Im Jahr 2021 verzeichnete die Binnenschifffahrt überdurchschnittliche Steigerungen. Laut dem Statistischen Bundesamt stieg die Gütermenge im Vergleich zum vergangenen Jahr um 3,8 % auf 195,1 Mio. t, während die Verkehrsleistung um 4,0 % auf 48,2 Mrd. tkm. zunahm (21). Dieses Wachstum fand vor allem im Schienen- und Kombinierten Verkehr statt. Diese Ergebnisse beruhen auf Daten, die ausschließlich größeren Unternehmen (die eine Transportleistung von mindestens 10 Mio. tkm insgesamt bzw. 1 Mio. tkm im Kombinierten Verkehr erbracht haben) zugrunde liegen (22).

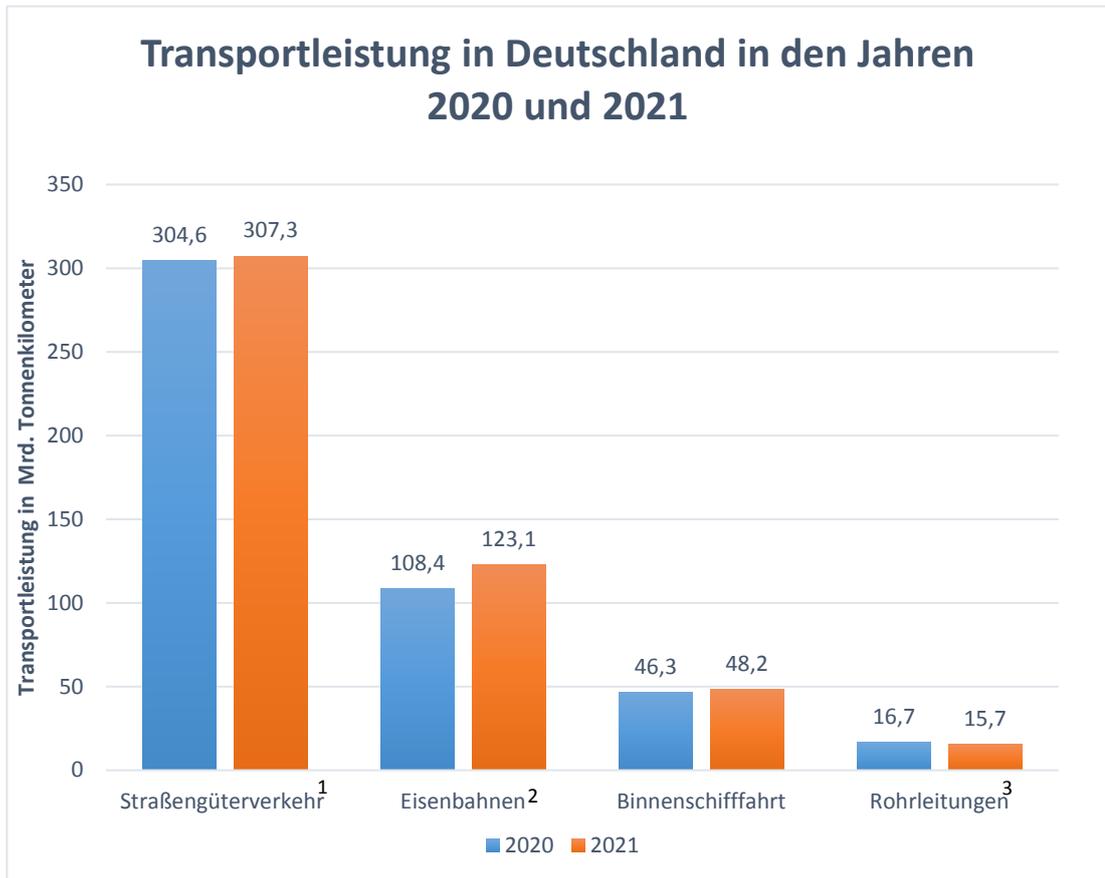


Abbildung 4: in Anlehnung an Statistisches Bundesamt. (3. Juni, 2022). Transportleistung einzelner Verkehrsträger in Deutschland in den Jahren 2018 und 2021 (in Milliarden Tonnenkilometern) [Graph]. In Statista. Zugriff am 14. April 2023, von <https://de-statista.com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/12243/umfrage/transportleistung-je-verkehrstraeger-in-deutschland/>

¹ Binnen- und grenzüberschreitender Verkehr deutscher LKWs, ohne Kabotage

² Ohne ausländischer Fahrzeuge im Straßengüterverkehr

³ Nur größere Firmen, die eine Transportleistung von mind. 10 Mio. tkm insgesamt erbracht haben

Aufgrund des größten Infrastrukturnetzes hat der Verkehrsträger Straßengüterverkehr eine hohe Flächenabdeckung, welches von keinen anderen Verkehrsträgern erreicht werden kann. Des Weiteren ist der Lastkraftwagen das flexibelste Verkehrsmittel. Im Vergleich zu der Seeschifffahrt und Eisenbahn kann jedoch im Straßengüterverkehr mit einer Fahrt eine relativ geringe Transportmenge überführt werden. Die richtige Verkehrsmittelauswahl ist abhängig von einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Die wichtigsten Einflussgrößen sind z.B.: die Transportkosten, Ladungsgröße, Ladungsmenge und die Transportqualität.

Der Vergleich der Verkehrsträger hängt von den spezifischen Anforderungen ab, die sie erfüllen müssen. Alle Verkehrsträger weisen sowie Vor- als auch

Nachteile. Im Folgenden werden einige der häufigsten Verkehrsträger und ihre Vor- und Nachteile beschrieben.

3.2 Verkehrsträger Straße

Der Lastkraftwagen ist der am häufigsten verwendete Verkehrsmittel und hat den Vorteil, dass er relativ einfach und kostengünstig ist. Allerdings ist der Verkehrsträger auch mit einigen Nachteilen verbunden, wie z.B. Verkehrsstaus, schlechte Straßenqualität und Umweltverschmutzung. Die hohe Dichte des Straßennetzes ist ein wesentlicher Vorteil im Straßengüterverkehr. Neben der hohen Netzdichte im Straßenverkehr ist das hohe Transportvolumen auch ein besonders wichtiges Merkmal. Im Güterverkehr ist eine „door-to-door“ (D2D) - Lieferung umsetzbar. Das heißt wiederum, dass die Ware innerhalb der Transportkette vom Absender bis zum Empfänger befördert werden kann (23).

Generell können alle möglichen Güterarten wie Stück-, Schütt-, Flüssig-, Kühl- und Containergut auf dem Lastkraftwagen transportiert werden. Massengüter, beispielsweise Kohle, Erz und Erdöl eignen sich unter der Voraussetzung, dass die Strecke nicht kurz ist, für Schienen- und Schifffahrtsverkehr besser.

Weitere Vorteile im Straßengüterverkehr sind:

- JiT-Lieferung / JiS-Lieferung
- Niedrige Investitionskosten
- Schnell bei kurzen Distanzen
- Niedrige Betriebskosten
- Kurzfristige Verfügbarkeit
- Direkter Transport zwischen Quelle und Senke
- Hohe Flexibilität

Zu den Nachteilen gehören:

- Abhängigkeit der Rohstoffpreise
- Eingeschränkte Transportmenge

- Hohe Frachtkosten je Tausendkilometer
- Konkurrenzkampf
- Einige Verkehrsstörungen wie z.B.: Stau und Unfall

3.3 Verkehrsträger Bahn

Die Bahn zählt in Deutschland nach dem Straßengüterverkehr als der zweitgrößte Verkehrsträger. Der Bahnverkehr ist in der Lage, eine größere Menge an Gütern zu befördern als der Straßenverkehr. Daher ist die Bahn eine wichtige Option für den Gütertransport in Deutschland. Eisenbahngütertransporte sind oft gebrochene Transporte, da nicht jeder Versender und Empfänger direkt an einer Schienenstrecke liegt und daher zusätzliche Lkw-Transporte erforderlich sind. Es gibt jedoch Ausnahmen, wie z.B. direkte Transporte von Erzeugern zu Großbaustellen, solange ein Anschlussgleis vorhanden ist. In diesen Fällen können die Waren direkt mit dem Zug transportiert werden, ohne dass ein Vor- oder Nachlauf per Lkw erforderlich ist. Außerdem gilt der Eisenbahngüterverkehr als einer der umweltverträglichsten Verkehrsträger überhaupt. Im Gegensatz zum Lkw entfallen typische Kosten wie die Mineralsteuer und Mautpflicht. Die Eisenbahn ist ein Verkehrsträger, der hauptsächlich für den Schienengütertransport im Fernverkehr eingesetzt wird, insbesondere über mittlere Strecken innerhalb des europäischen Kontinents. Darüber hinaus hat sich ein interkontinentaler Bahnverkehr zwischen China und Europa entwickelt. In den vergangenen Jahren hat die Eisenbahn als Transportmittel für den globalen Gütertransport zugenommen und ist zu einer zuverlässigen und kostengünstigen Option für internationale Lieferketten geworden (24). Des Weiteren gibt es bei der Bahn keine Lenk- und Ruhezeiten.

Vorteile im Eisenbahngüterverkehr:

- Hohe Kapazität
- Kein höchstzulässiges Gesamtgewicht
- Schnelle Transportzeit auf längeren Strecken

- i.d.R. zuverlässig
- günstige Frachtkosten je Tausendkilometer

Nachteile im Eisenbahngüterverkehr:

- geringe Netzdichte
- Ökologisch betrachtet → Lärm
- Schieneninfrastruktur
- Flexibilität ist durch fixe Fahrpläne beschränkt
- Gebrochene Transporte
- Hoher Aufwand bzgl. Vor- und Nachlauf

3.4 Verkehrsträger Seeschiffe & Binnenschiffe

Verkehrsmittel in der Seeschifffahrt

In der Seeschifffahrt werden unterschiedliche Arten von Schiffen eingesetzt, um den Gütertransport zu ermöglichen. Dazu gehören Containerschiffe mit einer Kapazität von bis zu 24.000 TEU (Twenty-foot-Equivalent Unit), Massengutschiffe als Bulkcarrier mit einer maximalen Tragfähigkeit von bis zu 400.000 Tonnen, Tankschiffe mit einer Tragfähigkeit über 200.000 tdw. (25). Die verschiedenen Arten von Seeschiffen variieren sich in Bezug auf ihre Eigenschaften, Einsatzbereiche und Transportgüter. Zum Beispiel transportieren Trockengutfrachter trockenes Massengut. Tankschiffen eignen sich für flüssige Güter aus und Ro/Ro-Schiffe für Autos. Die Seeschifffahrt kann Gütertransporte über längere Distanzen auf dem Meer ermöglichen. Diese Art des Transports ist ideal für den Transport größerer Mengen, da sie eine effiziente und kostengünstige Lösung bietet. Der Seetransport kann interkontinental sein, was bedeutet, dass er über mehrere Kontinente und Länder hinweg reicht. Der Seetransport ist somit eine zuverlässige Art des Fernverkehrs für die Beförderung von Gütern. Der Gütertransport wird hauptsächlich durch den Containertransport (auf Containerschiffen) und den Massenguttransport (auf Massengutschiffen)

sowie in geringerem Maße durch den Stückgut- und Fährtransport gekennzeichnet. Zu den meist befahrenen Seeschiffahrtskanälen der Welt gehört der Suezkanal, der Panamakanal, der Nord-Ostsee-Kanal, Skagerrakkanal und der Bosphorus. Diese Schifffahrtswege verbinden Europa, Asien, Amerika und Rohstoffländer über ein globales Seeschiffahrtsverkehrsnetz miteinander.

Vorteile der Seeschifffahrt:

- Umweltfreundlich
- Geringe Transportkosten
- Zuverlässigkeit
- Massenleistungsfähigkeit über größere Distanzen
- Einsatz rund um die Uhr 24/7-Betrieb

Nachteile der Seeschifffahrt:

- Lange Transportzeiten, geringe Geschwindigkeit
- Kaum D2D Lieferung
- Vor- und Nachläufe können zu lange dauern
- Hoher Aufwand bzgl. Vor- und Nachlauf

Verkehrsmittel in der Binnenschifffahrt

In der europäischen Binnenschifffahrt werden Schiffe in verschiedenen Größen eingesetzt, um den Anforderungen nachzukommen. Sie reichen von kleinen Motorgüter-, Container-, Autotransporterbinnenschiffen und Schubbooten, die Längen von 38 Meter aufweisen, bis hin zu großen Tankschiffen, die eine Länge von bis zu 135 Metern haben und ein Fassungsvermögen von maximal 604.000 Tonnen aufweisen (26). Die Schiffe werden nach den spezifischen Anforderungen an die Beförderung von Trocken-, Flüssig- und Gasgütern eingesetzt. Binnenschiffe bewegen sich auf den Verkehrswegen, wie Flüsse und Kanälen. Zu den Stärken der Schifffahrt zählen die Umweltfreundlichkeit des Transports und die hohe

Transportleistung. Hinzu kommt noch, dass es beim Transport auf dem Schiff keine Beschränkungen gibt, wie z.B.: Fahrverbote. Somit ist ein 24/7-h Betrieb möglich. Innerhalb Deutschlands wird außerdem der Straßengüterverkehr entlastet. Alle Güterarten können auf den Schiffseinheiten transportiert werden. Der Anteil der Binnenschifffahrt bezogen auf die Transportleistung des Güterverkehrs ist seit dem Jahr 2013 stetig am sinken. Im Jahr 2013 betrug die Verkehrsleistung 9,3 Prozent, 2021 waren es nur noch 6,9 % (27). Die Binnenschifffahrt ermöglicht wasserstraßengebundene Gütertransporte über kurze und mittelfristige Strecken innerhalb des europäischen Kontinents.

Vorteile der Binnenschifffahrt:

- Umweltfreundlich
- Kostenvorteile
- Zuverlässigkeit
- Massenguttauglichkeit
- Einsatz rund um die Uhr 24/7-Betrieb

Nachteile der Binnenschifffahrt:

- Lange Transportzeiten
- Kaum D2D Lieferung
- Vor- und Nachläufe können zu lange dauern
- Niedrigwasserstände senken den Güterumschlag

3.5 Verkehrsträger Flugzeug

Bei Transporten, bei dem viel Wert auf möglichst kurze Lieferzeiten gegeben wird, ist der Verkehrsträger Luftverkehr am geeignetsten. Neben seiner unschlagbaren Liefergeschwindigkeit ist das Flugzeug gleichzeitig auch einer der sichersten Verkehrsträger. Die Beförderungsmenge im Luftverkehr lag im Jahr 2021 bei 5,275 Millionen Tonnen und im Jahr 2020 bei 4,488 Millionen Tonnen (28).

Vorteile im Luftverkehr:

- Schneller Transport
- Zuverlässiger Transport
- Niedrige Kapitalbindungskosten aufgrund der kurzen Transportdauer

Nachteile im Luftverkehr:

- Hohe Frachtkosten
- Eingeschränkte Kapazität, abhängig vom Flugzeugtyp
- Gebrochener Verkehr, hoher Anteil an multimodalem Verkehr
- Sehr Umweltbelastend
- Nachtflugverbot möglich

3.6 Verkehrsträger Rohrleitungsverkehr

Der Rohrleitungsverkehr bezeichnet den Transport von Produkten in Rohrleitungen (Pipelines). Die Rohrleitungssysteme werden selbst auch als eigenständiger Verkehrsträger betrachtet. Generell werden die Pipelines für den Transport von verschiedenen flüssigen oder gasförmigen Gütern benutzt (29). Die Rohrleitungssysteme werden zwischen zwei Arten unterschieden: zum einen gibt es die Rohölleitungen, bei denen nur Rohöl transportiert wird und die Produktleitungen, die für die Beförderung von gasförmigen (z.B.: Erdgas), flüssigen oder verflüssigter Produkte ausgelegt sind (30).

Das Verkehrsaufkommen von Rohöl in Deutschland ist in den letzten Jahren gesunken. Begründet wird dies mit dem Anfang der Covid-19 Pandemie (31). Die Verkehrsleistung betrug im Jahr 2017 90,9 Millionen Tonnen. Im Jahr 2021 wurden lediglich 79,6 Millionen Tonnen Rohöl durch Rohrleitungen befördert (32).

Es ist eine der sichersten Arten des Transports und bietet eine kostengünstige Lösung für den Transport von Gütern über lange Strecken, kann aber auch mit einigen Risiken verbunden sein, wie z.B. Leckagen und Umweltverschmutzung.

Vorteile im Rohrleitungsverkehr:

- Geringe Transportkosten
- Hohe Zuverlässigkeit
- Geringe Umweltbelastung

Nachteile im Rohrleitungsverkehr:

- Hohe Investitionskosten
- Beschränkt auf Massengüter

Insgesamt hängt die Auswahl eines Verkehrsträgers von den spezifischen Anforderungen ab. Jeder Verkehrsträger hat seine eigenen Vor- und Nachteile, die berücksichtigt werden müssen, um eine fundierte Entscheidung zu treffen.

3.7 Kombiniertes Verkehr

Der KV ist ein Verkehrskonzept, bei dem verschiedene Verkehrsträger wie Bahn, Lkw, Schiff und Flugzeug miteinander kombiniert werden, um die schnellste, sicherste und kostengünstigste Art des Transportes zu erzielen. Dies ermöglicht es, die verschiedenen Verkehrsträger zu integrieren, um die Effizienz und die Kosten des Transportes zu erhöhen. Dadurch können Unternehmen direkt von den Vorteilen des kombinierten Verkehrs profitieren. Der Umschlag ist ein wesentlicher Bestandteil der Lieferkette, da er die Übergänge zwischen den einzelnen Verkehrsträger sicherstellt. Das Gut befindet sich innerhalb der ganzen Lieferung in selben Ladeeinheit. Im Rahmen des Umschlags werden Förder- und Lagervorgänge an den Übergängen der Waren auf ein Transportmittel, beim Abgang der Waren von einem Transportmittel und beim Verkehrsmittelwechsel der Güter durchgeführt (33). Im Kombinierten Verkehr bieten verschiedene Verkehrsnetzwerke in Deutschland Regelverbindungen zwischen Umschlagsknoten an. Zu den bekanntesten Verkehrsnetzbetreibern im Kombinierten Verkehr zählen die

TFG, die Deutsche Bahn AG, die Hapag-Lloyd AG, die Rhenus Logistics GmbH sowie der Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr GmbH & Co. KG (34). Diese Verkehrsnetzbetreiber stellen ein weitreichendes Netzwerk bereit, welches innerhalb Deutschlands sowie in Europa Verbindungen schafft. Im Jahr 2018 stieg die Anzahl der kombinierten Verkehre innerhalb Deutschlands auf 114,4 Millionen Tonnen (35). Im Vorjahr lag die Anzahl der KV in Deutschland bei 111,4 Millionen Tonnen (36). Die meisten kombinierten Verkehre wurden im Hafen Hamburg abgewickelt, gefolgt von den Häfen Bremen/Bremerhaven und Duisburg. Die meisten kombinierten Verkehre wurden in den Häfen von Shanghai, Singapur, Rotterdam und Antwerpen abgewickelt.

4 Antriebsarten im Vergleich

4.1 Verbrennungsmotor

4.1.1 Diesel

Obwohl alternative Antriebskonzepte einen Erfolg haben könnten, wird der Dieselmotor im Lastwagenverkehr weiterhin eine wesentliche Rolle spielen. Ein abruptes Ende des Einsatzes von konventionellen Antrieben ist deshalb ausgeschlossen. Insbesondere im Straßengüterverkehr werden sie weiterhin zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund ist den konventionellen Antrieben dieses Kapitel gewidmet. Der Dieselmotor wurde von Ingenieur Rudolf Diesel im Jahr 1893 erfunden (37). Der Dieselmotor verbraucht weniger Brennstoff als übliche Dampfmaschinen und der Wirkungsgrad ist auch höher (38). Der Dieselmotor wurde in kürzester Zeit zu einer bevorzugten Wahl für viele verschiedene Arten von Anwendungen, insbesondere für Lastkraftwagen. Der Dieselmotor gehört

zu den herkömmlichen Antriebsarten. Die Technologie bzw. Antriebsart ist bis heute der am meiste verbaute Motor bei Nutzfahrzeugen. Zudem wurde die Tankstelleninfrastruktur über Jahrzehnte hinweg aufgebaut und ist somit auch flächendeckend vorhanden. Durch die hohe Reichweite pro Tankfüllung und die Effizienz der Dieselmotoren bietet der Lastkraftwagen einen übertroffenen Vorteil. Durch die hohe Leistung und den geringen Verbrauch hat der Dieselmotor schon seit seiner Einführung im Vergleich zum Ottomotor Aufsehen erregt. Diese Merkmale sind bis heute geblieben, wie die Nutzfahrzeugbestände in Deutschland zeigen. Rund 93 % aller Nutzfahrzeuge verfügen über einen Dieselmotor, wie die Abbildung unten illustriert.

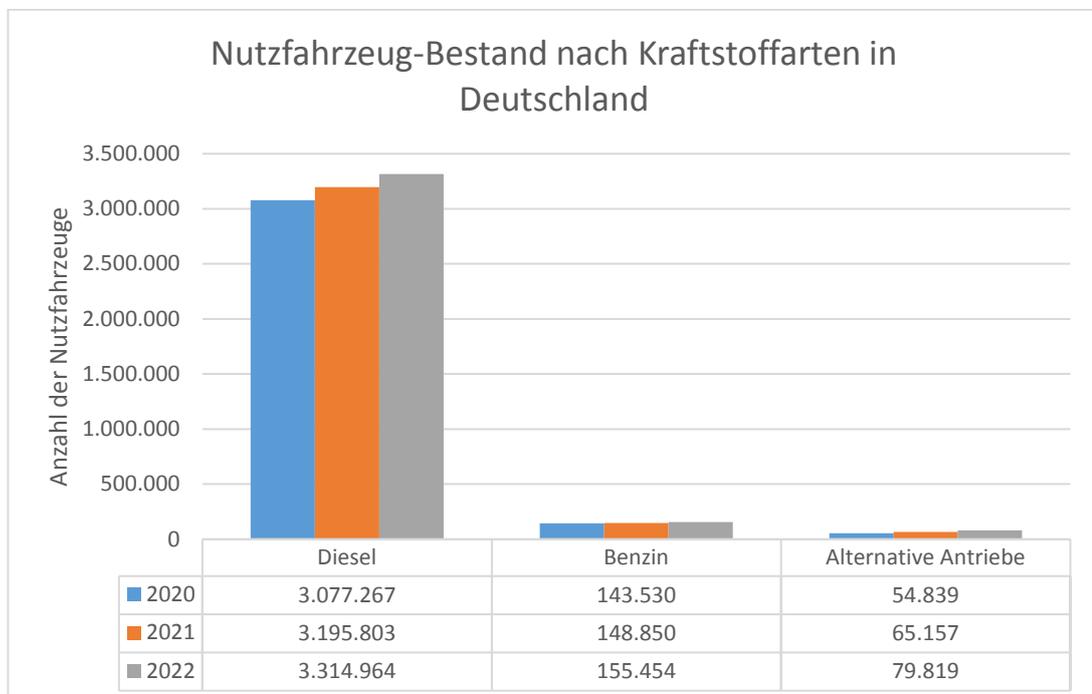


Abbildung 5: in Anlehnung an KBA. (31. Mai, 2022). Anzahl der Lastkraftwagen in Deutschland nach Kraftstoffarten in den Jahren 2020 bis 2022. In Statista. Zugriff am 05. April 2023, von <https://de-statista-com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/468860/umfrage/>

4.1.2 Flüssigerdgas - LNG

Um die Ziele der nachhaltigen Logistik entlang der Transportkette nachzugehen, besteht die Möglichkeit alternative Antriebsarten zu verwenden. Eines der bedeutendsten Kraftstoffe ist derzeit das flüssige Erdgas. Erdgas,

auch als Liquefied Natural Gas (LNG) bekannt, hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung im Straßengüterverkehr zugenommen. Verflüssigtes Erdgas hat ein Volumen von 600-mal weniger als das ursprüngliche Erdgas, wodurch es effizienter zu transportieren ist (39). Liquefied Natural Gas (LNG) wird durch die Abkühlung von Erdgas auf Temperaturen von -160°C hergestellt. Bei der Nutzung von Erdgasmotoren im Straßenverkehr werden Abgase wie Schwefel, Rußpartikel und Kohlenwasserstoffe vermieden (40). Ein weiterer wichtiger Vorteil bei der Nutzung von Erdgas-Lkws ist, dass die Einfahrverbote in den Innenstädten diese nicht betreffen. Die mit Erdgas betriebenen Motoren sind außerdem äußerst sparsam im Verbrauch. Liquefied Natural Gas verbrennt im Vergleich zu klassischen Diesel-Verbrennungsmotoren mit einer geringeren Menge an Schadstoffen und Emissionen als Diesel. Zudem ist der Ottomotor, welcher durch Erdgas betrieben wird, leiser als gebräuchliche Dieselmotoren. Mehrere Hersteller von Lastkraftwagen, wie Iveco, Scania und Volvo, stellen derzeit hochleistungsfähige Nutzfahrzeuge auf Basis von Erdgas her, die in Bezug auf Leistung und Effizienz mit einem Diesel-Lkw gleichzusetzen sind (41). Der Verbrauch eines Flüssigerdgas-Lkws ist im Schnitt 10 bis 15 % niedriger als der eines vergleichbaren dieselbetriebenen Lkws. Als Beispiel: ein Diesel-Lkw hat einen Verbrauch von 28,5 Liter pro 100 Kilometer, ein Flüssigerdgas-Lkw benötigt dagegen nur 24,25 Kilogramm pro 100 Kilometer. (42) Der Vorreiter in diesem Teilbereich ist der europäische

Lastkraftwagenhersteller Iveco. Iveco stellt derzeit Lastkraftwagen her, welche mit Erdgas betrieben werden. Der erdgasbetriebene Lkw Stralis Natural Power kann eine Strecke von bis zu 1600 km ohne Probleme meistern (43). Laut Iveco wird durch den Einsatz von Stralis Natural Power Lastkraftwagen 70 % weniger Stickoxide und 99 % weniger Rußpartikel abgegeben und somit entsteht eine verbesserte Luftqualität (44). Nicht nur Iveco ist ein Hersteller der sogenannten Liquefied Natural Gas-Lkws. Die Nutzfahrzeug-Hersteller Scania und Volvo bieten ebenso LNG-Antriebe an. Der Nutzfahrzeughersteller Scania mit Sitz in Schweden gehört zu der Dachorganisation der Volkswagen AG. Die hohe Energiedichte von Flüssiggas macht den gasbetriebenen Lastkraftwagen von Scania zu einer hervorragenden Lösung für regionale Transportlösungen und Fernverkehrsanswendungen. Durch die Verwendung

von Flüssiggas als Kraftstoff können größere Entfernungen zurückgelegt werden, ohne dass häufige Tankstopps erforderlich sind. Die Kraftstofftanks der Scania-Gas-Lkw bieten eine Reichweite von bis zu 1.700 Kilometer, was die Verwendung von Flüssiggas als Kraftstoff noch attraktiver macht (45). Mit dieser hohen Reichweite der Gas-Lkws und der Verfügbarkeit der Tankstellen in vielen Regionen Deutschlands wird Flüssiggas immer beliebter als alternative Kraftstoffquelle. Das einzige Problem ist derzeit die LNG-Tankstelleninfrastruktur, welche noch nicht ganz verbreitet ist. Laut der Deutschen Energie-Agentur (dena) sind insgesamt 151 LNG-Tankstellen in Betrieb und 49 Tankstellen sind derzeit noch in der Planung (Stand März 2023) (46). Die Deutsche Energie-Agentur (dena) spielt eine zentrale Rolle bei der Koordination und Moderation der Initiative Erdgasmobilität und LNG-Taskforce als branchenübergreifender Ansprechpartner für Erdgas in Deutschland. Die Initiative unterstützt das Ziel der Bundesregierung, den Anteil am Kraftstoffmix zu steigern und die Klimaziele des Verkehrs bis 2030 zu erreichen. Die dena hat 2015 gemeinsam mit dem DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) und Zukunft Gas die LNG-Taskforce gegründet, um die Einführung von LNG als alternative Kraftstoffquelle für den Straßentransport in Deutschland voranzutreiben (47). Eines der wichtigsten Aufgaben für die problemlose Funktionalität und Inbetriebnahme für das erdgasbetriebene Lkw ist der Aufbau des LNG-Tankstelleninfrastrukturnetzes. Für Unternehmen entstehen neben der Nachhaltigkeit noch ein weiterer Aspekt, um sich für Erdgas-Lkws zu entscheiden: Die Maut Gebühren. Laut Gesetz sind alle Erdgasfahrzeuge bis Ende des Jahres 2023 von der Lkw-Maut befreit (48). Somit haben Nutzfahrzeuge, die mit LNG angetrieben werden und die ein Gewicht von 7,5 Tonnen überschreiten, haben bis zum 31. Dezember 2023 Anspruch auf dieselben Vorteile wie E-Lkws. Im Jahr 2018 hat das Bundesministerium das Förderprogramm „Energieeffiziente und/oder CO₂-arme schwere Nutzfahrzeuge“ ins Leben gerufen. Dabei wurden Unternehmen bei der Anschaffung von Erdgas- und Elektro-Lkw finanziell unterstützt. Insgesamt wurden in zwei Jahren 2.932 Förderanträge gestellt, wobei 97%

davon auf Lkw mit Erdgasantrieb entfielen (49). Bis zum Jahr 2024 möchte das BMVI für die Anschaffung von Nutzfahrzeugen für Unternehmen ca. 1,6 Milliarden Euro bereitstellen (50).

4.2 Elektroantrieb

4.2.1 Wasserstoff – Brennstoffzellentechnologie

Eine weitere Antriebstechnologie ist der Wasserstoffantrieb. Die Wasserstoffantriebe können, wie die erdgasbetriebenen LKW, Emissionen im Güterverkehr reduzieren. Im Jahr 1839 folgte die Entwicklung der Brennstoffzelle (51). Kurze Zeit später wurde im Jahr 1860 auch das erste Fahrzeug gebaut, das durch einen Verbrennungsmotor angetrieben wurde und Wasserstoff als Brennstoff verwendete (52). Um Wasserstoff zu produzieren wird normalerweise eine Elektrolyse unter Verwendung von viel Energie durchgeführt. Wenn man jedoch nachhaltigen und umweltfreundlichen Wasserstoff herstellen möchte, ist es wichtig, Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu nutzen. Die Produktion von ausschließlich "grünem" Wasserstoff wird in Deutschland durch den aktuellen Anteil von lediglich 44% erneuerbarer Energiequellen an der Stromerzeugung (Stand 2022) erschwert. (53). Wenn der so hergestellte Wasserstoff nicht aus erneuerbaren Energiequellen stammt, wird er als „grauer“ Wasserstoff bezeichnet. Die Herstellung von Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV) bietet noch großes Einsparungspotential in Bezug auf die Anschaffungskosten (54). Diese sind hauptsächlich auf den hohen Platinanteil zurückzuführen (55). Platin ist ein wichtiger Bestandteil der Brennstoffzelle, da es als Katalysator fungiert und die chemische Reaktion unterstützt, die den Strom erzeugt. Der Preis für Platin ist jedoch hoch und macht einen großen Teil der Gesamtkosten einer Brennstoffzelle aus (56). Der Betrieb von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen ist derzeit noch teurer als der eines Diesel Nutzfahrzeugs(NFZ). Als Vergleich, ein SNF verbraucht pro 100 km ca. 25 Liter Diesel, dagegen liegt der Verbrauch bei einem BCEV bei rund 8 Kilogramm Wasserstoff auf 100Kilometer (57). Der Preis für 1 Kilogramm Wasserstoff an den Tankstellen

beträgt ca. 12,85€ (58). Einer der wichtigsten Vorteile von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) im Lkw Bereich ist die Möglichkeit, größere Lasten zu transportieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Batterie-Elektrische Fahrzeuge (BEV) eine Batterie mit einer Kapazität von bis zu 1000 kWh benötigen, was einem Gewichtsverlust von 4.000 bis 20.000 Pfund führen kann (59). Der Kapazitätsverlust der Batterie beeinträchtigt nachweislich den Flottenbetrieb und erfordert in einigen Fällen den Einsatz eines zusätzlichen BEV-LKW im Vergleich zu einem FCEV-Lkw, um alle Waren auszuliefern (60). Seit Beginn der 2000er stellen die Hersteller wie Toyota, Hyundai und Honda Pkws her. Unterschieden werden zwei Konzepte: Beim Wasserstoffverbrennungsmotor wird Wasserstoff in die Brennräume eingespritzt, und die Umsetzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle mit einem Elektromotor (61). Fakt ist, dass bei beiden Antriebskonzepten eine Emissionsreduzierung realisierbar ist. Beide Antriebskonzepte können den Anforderungen wie Nutzlast, Flexibilität und Reichweite nachkommen (62). Wenn die Brennstoffzelle mit einem Elektromotor kombiniert wird, entsteht ein emissionsfreies Antriebskonzept. Notwendig ist derzeit eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur. Derzeit existieren 93 PKW-Tankstellen, bei den PKWs tanken können (63). Die Personenkraftfahrzeuge speichern den Wasserstoff mit 700 Bar, die Nutzfahrzeuge hingegen speichern den Wasserstoff mit 350 Bar. Der Grund für den geringeren Druck beim LKW ist es, dass es für einen LKW keinen Schnelltank Protokoll gibt, welches auf 700 Bar basiert. In dem Fall würde es für einen Tankvorgang bei einem LKW zu lange dauern. Bisher wurden bei H2-Tankstellen zwischen 350 Bar Druck und 700 Bar unterschieden (64). Derzeit sind in Deutschland nur 20 Tankstellen in Betrieb und 17 Tankstellen sind noch in der Realisierungsphase, wo LKWs tanken können (65). H2-Mobility GmbH & Co. KG ist ein Unternehmen aus Deutschland, welche sich für den Ausbau der H2-Tankstelleninfrastruktur einsetzt (66). Für einen flächendeckenden Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erhält H2-Mobility durch das Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur Fördermittel (67). Zurzeit arbeitet die Firma ElringKlinger AG in Dettingen gemeinsam mit zwei Kooperationspartner an der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen für die Stromversorgung an Bord von Nutzfahrzeugen. Die Entkoppelung der Stromversorgung für den Antriebsstrang und elektrische Verbraucher an Bord ermöglicht es, den

Kraftstoffverbrauch durch die emissionsfreie Versorgung aller elektrischen Komponenten mit Wasserstoff zu senken (68). Laut dem deutschen Hersteller MAN reicht für Nutzfahrzeuge eine volle Tankfüllung bei einem Wasserstoff-LKW mit Brennstoffzellen bis zu 800 Kilometer (69). Der Tankvorgang ist in wenigen Minuten erledigt. Bereits im Jahr 2015 hat MAN mit der Entwicklung begonnen und im Jahr 2021 wurden die ersten MAN Wasserstoff-Lkw auf die Teststrecke gebracht. Neben der Brennstoffzellentechnologie forscht MAN auch an einem Wasserstoffverbrennungsmotor. Daimler Trucks forscht und entwickelt bereits auch an wasserstoffbasierten Brennstoffzellenantrieben. Im Jahr 2020 stellte Daimler den GenH2 Truck vor. Schon im Jahr 2027 möchte Daimler Trucks die ersten Serienfahrzeuge des GenH2 Trucks zum Verkauf anbieten. Beide Antriebsvarianten sind noch nicht marktreif. Zum einen existieren nicht genügend Wasserstoff Tankstellen für LKWs und zum anderen sind die Wasserstoff-LKWs noch in der Entwicklungsphase. Neben den deutschen Nutzfahrzeuge-Hersteller ist bereits auch der asiatische Hersteller Hyundai dabei, einen wasserstoffbasierten Lkw zu entwickeln. Die Reichweite des Modells XCIENT beträgt rund 400 Kilometer (70). Die Nutzfahrzeuge sind derzeit in einer Testphase und werden in einem Pay-per-Use Modell vermietet. Grund hierfür ist, dass die Kunden nicht die hohen Anfangsinvestitionen tragen sollen (71). Das Pilotprojekt wurde in der Schweiz eingeführt, um die Alltagstauglichkeit von wasserstoffbasierten Brennstoffzellen-Lkws zu erproben. Die REWE Group gehört auch zu den ersten, die in Deutschland ein Wasserstoff-Lkw im Einsatz haben und gleichzeitig hat die REWE Group sich das Ziel gesetzt, bis 2040 auf Unternehmensebene klimaneutral zu sein (72). Im Rahmen einer Initiative der deutschen Regierung zur Förderung von umweltfreundlichen Nutzfahrzeugen haben sieben regionale Unternehmen die Integration von 27 XCient Fuel Cell Lkws in ihre Flotte geplant (73). Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV) fördert den Kauf von Batterie-, Brennstoffzellen- und Oberleitungs- Elektrofahrzeuge und unterstützt bis 2024 mit einem Finanzvolumen von 1,6 Milliarden Euro (74). Mehrere Hersteller setzen sich für eine umweltfreundliche und nachhaltige Zukunft. Das gute an Wasserstoff ist, dass bei Wasserstoff-Lkws kein Kohlenstoffdioxid, sondern nur Wasserdampf ausgestoßen wird. Somit werden kein CO₂ und Stickstoffoxide emittiert. Abbildung 6 verdeutlicht, den Aufbau eines Wasserstoff-Lkws mit den notwendigen Komponenten.

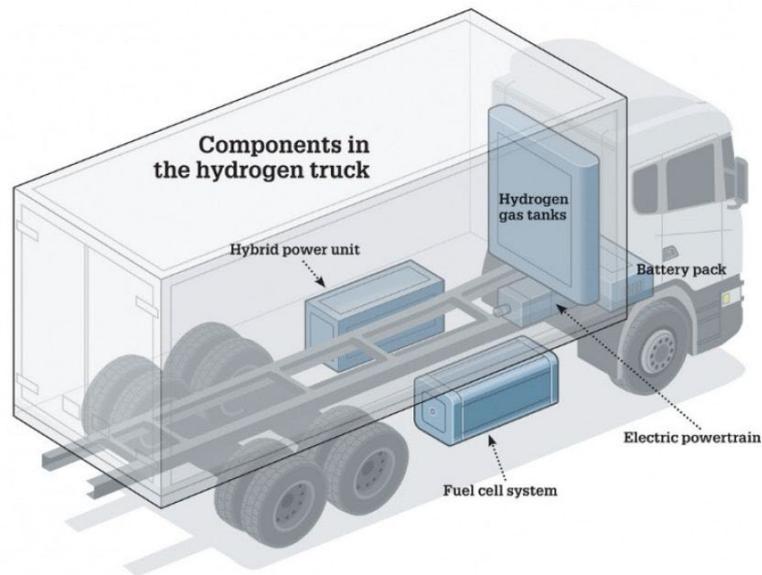


Abbildung 6: Komponenten bei einem HCEV LKW; Scania;
https://www.scania.com/content/www/de/de/home/newsroom/news/2021/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work/_jcr_content/root/responsivegrid/responsivegrid/responsivegrid/heroimage.coreimg.85.1920.jpeg/162676957397 [Zugriff am 15.03.2023]

4.2.2 Elektro

Eine weitere Antriebstechnologie ist der Elektro-LKW. Mehrere Hersteller sind dabei, innovative Akku-Technologien zu entwickeln. Um den Wandel in eine nachhaltige Zukunft voranzutreiben, ist der Elektro-LKW ein entscheidender Punkt. Elektromotoren sind schon seit langer Zeit ein fester Bestandteil unserer Technologie. Seit über 190 Jahren werden Elektromotoren in der Industrie sowie im Alltag eingesetzt. Dies ist länger als der im Jahr 1876 patentierte Otto-Verbrennungsmotor, was beweist, dass Elektromotoren keineswegs eine neue Technologie sind. Sondern wurde sie wiederentdeckt und weiterentwickelt, um sie noch effizienter und leistungstärker zu machen. Der Einsatz von Elektromotoren im Lastkraftwagen ist eine wachsende Technologie, die in den letzten Jahren einige große Fortschritte gemacht hat und an Bedeutung gewonnen hat. Zudem hat die Antriebstechnologie Elektro in den letzten Jahren das Interesse der Medien und auch der Politik aufgeweckt. Derzeit bietet der Staat Anreize wie die Befreiung von Steuern

und Mautgebühren sowie Zuschüsse an, um den Einsatz von umweltfreundlichen Antriebstechnologien zu fördern. Laut Statista waren Anfang des Jahres 2022 ca. 43.768 Elektro-Lastkraftwagen in Deutschland registriert (75). Unter dem Begriff „Elektromobilität“ werden Fahrzeuge wie PKW, Schienenfahrzeuge und Lkw verstanden, die entweder ganz oder teilweise mit Strom betrieben werden, über eine Vorrichtung zur Energiespeicherung verfügen und ihren Antrieb meist aus dem Stromnetz beziehen. Bei den Elektro-Lkw handelt es sich um die sogenannten BEVs (Battery Electric Vehicles) (76). Einer der Vorteile des Einsatzes von Elektromotoren im Lastkraftwagen ist, dass sie eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Antriebssystemen bietet. Der größte Vorteil der Elektro-Lkws findet sich im 100%-emissionsfreien Betrieb. D.h., dass die E-Lkws im Vergleich zu den gewöhnlichen Diesel-Lkws keine Treibhausgase produzieren. Natürlich muss hierfür der Strom aus erneuerbaren Quellen stammen. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist das Elektro-Lkws beinahe keine Geräusche verursachen. Da die Elektro-Lkws keine Abgase ausstoßen und sehr leise sind, bieten elektrische Lkw eine angenehme Arbeitsatmosphäre für die Fahrer und tragen zur Lebensqualität der Bewohner in der Stadt. Aufgrund dieser Eigenschaften können elektrische Lkw in bestimmten Gebieten oder zu bestimmten Zeiten eingesetzt werden, für die herkömmlichen Antriebe nicht geeignet sind (77). Die Antriebstechnologie bringt neben seinen spezifischen Vorteilen auch Nachteile mit sich. Zum Beispiel haben die E-Lkw derzeit keine hohen Reichweiten. Im Vergleich kann ein Diesel-Lkw mehrere tausende Kilometer zurücklegen und in kürzester Zeit wieder aufgetankt werden, während ein Elektro-Lkw eine viel längere Aufladezeit mit sich bringt. Die Infrastruktur ist wie beim Erdgas- und Wasserstoffantrieb noch nicht ausgebaut. Die Anschaffungspreise sind trotz Förderungen viel höher als herkömmliche Diesel-Lkws. Der Nutzfahrzeuge Hersteller Scania präsentiert ihren ersten Elektro-Lastkraftwagen für den Regionalverkehr. Der batteriebetriebene Lkw mit einer Batteriekapazität von 624 kWh soll bis zu 350 km Reichweite erzielen (78). Die Reichweite des Lastkraftwagens ist stark vom Ladegewicht abhängig. Die Ladedauer der Batterie soll laut Scania in weniger als 90 Minuten stattfinden (79). Der schwedische Lastwagenhersteller Volvo bietet ebenfalls schon Nutzfahrzeuge mit einer breiten Palette von Spezialtransporteinsätzen. Zu den Segmenten gehören z.B.: die

Güterverteilung, Abfallentsorgung und Baustellen. Die Elektromodelle von Volvo sollen bis zu 300 km Reichweite meistern können. Vollständige Aufladung der Batterie bei dem Modell Volvo FH Electric dauert 2,5 Stunden mit Gleichstrom (80).

Praxisbeispiel: Volvo FE Electric Abfallwirtschaftsbetrieb München

Der Volvo FE Electric wurde in München als erstes vollelektrisches Serienfahrzeug in Betrieb genommen. Dieser Lastkraftwagen soll einen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität und zur Reduzierung des Verkehrslärms leisten. Der LKW ist mit einem Abrollkipper ausgestattet und wird vom Abfallwirtschaftsbetrieb München (AWM) eingesetzt (81). Der Volvo FE Electric ist der erste vollelektrische LKW in Bayern, der bei der Abfallentsorgung zum Einsatz kommt, und der erste seiner Art in ganz Deutschland (82). Der Volvo FE Electric wird im Münchner Stadtgebiet für die Logistik der Wertstoffhöfe eingesetzt. Der 27-Tonner hat eine Reichweite von ca. 120 Kilometer (83).

Mercedes-Benz-Trucks gehört ebenfalls zu den E-Lkw Hersteller auf dem Markt. Mercedes-Benz-Trucks möchte mit seinem neuen Modell eActros LongHaul, ein Elektro-Lkw für den Fernverkehr konzipieren. Mercedes-Benz-Trucks hat das E-Lkw als Konzept-Prototyp im Jahr 2022 bei der IAA vorgeführt (84). Der Elektro-Lkw eActros LongHaul verfügt über eine 600 kWh Batteriekapazität und soll eine Reichweite von etwa 500 Kilometer mit einer vollen Ladung erreichen (85). Geplant ist das der batteriebetriebene Lkw im Jahr 2024 in Wörth am Rhein vom Band laufen soll. Das Logistik Unternehmen DB Schenker plant die Integration von einhundert Mercedes-Benz eActros LongHaul in seinen Fuhrpark für den Fernverkehr (86). Eine gemeinsame Absichtserklärung zwischen Mercedes Benz Trucks und DB Schenker wurde bereits unterzeichnet, um dieses Vorhaben in die Tat umzusetzen (87). Derzeit bietet Daimler-Trucks weitere batteriebetriebene Lkw an, wie eActros 300 mit einer Reichweite von bis zu 300 km und den eActros 400 mit einer Reichweite von bis zu 400 km (88). Daimlers Elektro-Lkw „eActros“ wurde bereits im Jahr 2018 an Kunden als Test übergeben. Der Lkw Hersteller MAN hat vor ab 2024 Elektro-Lkw in Serie herzustellen. Der neue MAN eTruck ist mit einer

beeindruckenden Palette an Innovationen ausgestattet. Diese umfassen unter anderem einen emissionsfreien Antriebsstrang, eine große Reichweite, eine effiziente Rekuperation, ein angenehmes Fahrverhalten und eine benutzerfreundliche Bedienung sowie ein effektives Thermomanagement (89). Besonders hervorzuheben ist die Einsatzflexibilität des Fahrzeugs, die es ermöglicht, die Batteriepakete je nach Bedarf entweder für eine höhere Nutzlast oder eine größere Reichweite zu optimieren (90). Ab dem Jahr 2025 wird der MAN eTruck Reichweiten von bis zu 800 Kilometern ermöglichen (91). Laut Toyota kann durch einen 30-prozentigen elektrifizierten Güterverkehr, sechs Millionen Tonnen CO₂ gespart werden (92). Der Hersteller Volvo bietet derzeit den Kunden eine komplette E-Truck Modellpalette an. Die Modellreihe umfasst Lkws von 16 bis 44 Tonnen. Je nach Batteriegröße kann der Elektro-Truck bis zu 300 Kilometer Reichweite schaffen. Volvo hat das Ziel bis 2040 die gesamte Produktpalette ohne fossile Energieträger anzubieten (93). In Ulm wurde im Jahre 2012 bei IVECO der letzte Lkw mit Verbrennungsmotor produziert. Der US-amerikanische Hersteller Nikola und der italienische Nutzfahrzeughersteller haben für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr eine Partnerschaft abgeschlossen. In Zukunft wird das Modell Nikola Tre in Ulm gefertigt. Das Modell Nikola-Tre soll eine Reichweite von bis zu 560 Kilometer haben (94). Die Bundesregierung fördert Investitionen in Ladeinfrastruktur für den Betrieb von Elektro-Lkw mit bis zu 80 % der Kosten durch die Richtlinie „Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur“ (KsNI 2021) (95). Bis 2023 sind Förderungen in Höhe von 5 Mrd. Euro bewilligt (96). Die Flächendeckung einer Ladeinfrastruktur für Elektro-Lkw im Nah-, Regional- und Fernverkehr hat eine hohe Relevanz. Zur Erreichung dieser Flächendeckung müssen geeignete Liegenschaften identifiziert und eine Mindestanzahl an Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Um den Ladebedarf der folgenden Jahre zu decken, müssen die Standorte entsprechend skaliert werden (97). Das Joint Venture von Daimler-Trucks, der Traton Gruppe und der Volvo Group beim öffentlichen Laden für den Fernverkehr sieht den Aufbau und Betrieb eines Hochleistungs-Ladenetzwerks für batteriebetriebene Fernverkehrs-Lastkraftwagen in Europa vor (98). Das Joint Venture der drei Unternehmen wurde mit Sitz in Amsterdam gegründet und mit einer halben

Milliarde Euro finanziert. Laut Expertenschätzungen müssen bis Ende des Jahrzehnts etwa 50.000 Ladepunkte errichtet werden, um die wachsende Anzahl der Elektro Lkw mit Energie zu versorgen (99).

4.2.3 Oberleitungen

Eine weitere Variante des Elektro-Lkws ist der Oberleitungs-Laster, auch O-Lkw genannt. Die Nutzung ist einfach aufgebaut: die Lkws erhalten den Strom von Oberleitungen für die Fahrt und gleichzeitig wird der Akku während der Fahrt aufgeladen. Der Pantograf (Stromabnehmer), der auf dem Dach der Fahrerkabine montiert ist, dockt automatisch an und der Antrieb schaltet auf den elektrischen Betrieb um. Gleichzeitig wird die Batterie durch die Rückgewinnung von Bremsenergie geladen (100). Schweden nutzt seit 2016 schon Oberleitungs-Laster. In den letzten Jahren erlebt der oberleitungsgebundene elektrische Betrieb der Lastkraftwagen eine deutliche Verstärkung. Seit 2011 befindet sich auf dem früheren Militärgelände bei Groß Dölln in der Nähe von Berlin ein geschlossenes elektrifiziertes Testgelände, auch bekannt als eHighway-System (101). In Deutschland kann man die eHighways derzeit auf der A5 zwischen Langen und Weiterstadt in Hessen sowie auf der A1 bei Lübeck in Schleswig-Holstein finden (102). Dort werden O-Lkw von Scania derzeit verwendet. Beide Teststrecken wurden ab 2019 in Betrieb gegangen. Das Pilotprojekt wurde auf der Autobahn A5 zwischen Frankfurt und Darmstadt gestartet (103). Die Teststrecke beträgt ca. zehn Kilometer lang. Optisch ähnelt es sich an Straßenbahnen. Das Projekt geht insgesamt drei Jahre lang und wird vom Bundesumweltministerium finanziert. Alle drei Teststrecken wurden vom Bund mit ca. 72,8 Millionen Euro finanziert (104). Im Jahr 2021 wurde ein 18 Kilometer langer Abschnitt der Bundesstraße 462 zwischen Kuppenheim und Gaggenau in Baden-Württemberg unter den Namen „eWayBW“ eröffnet (105). Die Pilotstrecke auf der BAB A1 in Schleswig-Holstein wurde unter dem Namen „FESH“ und die Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen wurde unter dem Projektnamen „ELISA“ genannt (106). Ein aus der Oberleitung-Lkw resultierender wichtiger Vorteil ist, dass keine schweren Lithium-Ionen-Batterien benötigt werden. Somit wiegt

auch das Lkw deutlich weniger und die Lkws müssen somit keine dauernden Stopps anlegen. Der Ausbau der Infrastruktur für Oberleitungen ist kostspielig. Neben dem großen Aufwand die mit hohen Kosten verbunden sind, ist der Instandhaltungsaufwand auch enorm. Zum Beispiel wird die Batterie im Falle eines Staus nicht geladen. Auch witterungsbedingte Faktoren wie Eis und Schnee oder Wind können die Oberleitungen beeinträchtigen. Destotrotz wird das Prinzip des eHighway als eine vielversprechende und kosteneffiziente Lösung zum Klimaschutz im Straßengüterverkehr betrachtet. Obwohl die Kosten für den Einsatz dieser alternativen Antriebe im Vergleich zu dieselbetriebenen Nutzfahrzeugen derzeit höher sind, wird erwartet, dass sich diese Einsparungen bei einem Einstieg in den Massenmarkt deutlich verbessern wird. Laut dem Projektpartner Siemens sollte bei einem 40t-Sattelzugmaschine mit einer Jahresleistung von 100.000 km auf einem eHighway rund 16.000 Euro an Kraftstoff eingespart werden (107). Vorausgesetzt, dass die wichtigsten Fernverkehrsachsen innerhalb Deutschlands mit einem Infrastrukturnetzwerk der Oberleitungen von etwa 4.000 Kilometern ausgestattet sind (108). Der Feldversuch wird die Durchführbarkeit sowie die wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen im Verkehrsbetrieb bewerten. Das Ziel ist es, die Politik bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen, ob die Technologie ausgebaut und in das Netzwerk integriert werden soll. Die ökologischen Auswirkungen auf Mensch- und Tierwelt werden ebenfalls betrachtet. Insgesamt ist es aber ein interessanter Weg, um den Verkehr emissionsärmer zu machen.



Abbildung 7: Oberleitungs-Lkw im Einsatz, Siemens, Quelle: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8324bfa3-ab7c-489a-853c-d00d04aa90ab/width:1024/quality:HIGH/8324bfa3-ab7c-489a-853c-d00d04aa90ab-high.webp> [Zugriff am 20.03.2023]

5 Technische Vorkehrungen

5.1 Innovative Fahrzeugtechnologien

Kraftstoffverbrauch und Luftverunreinigungen können durch innovative Fahrzeugtechnologien reduziert werden. Eines der bedeutsamsten Technologien sind die Automatikgetriebe bei den Nutzfahrzeugen. Die Schaltvorgänge sind bei einem Automatikgetriebe kürzer als bei einem Schaltgetriebe. Das bedeutet, dass bereits bei einem optimalen Drehzahlbereich automatisch hoch- oder runtergeschaltet wird. Durch ein Automatikgetriebe ist folglich eine Kraftstoffeinsparung und die Senkung der CO₂ Emissionen realisierbar. Eine zusätzliche innovative Technologie bietet der Hersteller Volvo-Trucks bei seinen Automatikgetrieben an. *I-See* ist ein System von Volvo, welche die Streckentopografie analysiert und anhand der Informationen, die Getriebe zum bestmöglichen Zeitpunkt zum Schalten informiert. Die Kartendaten entnimmt das System aus der Cloud. Durch dieses System können vorausliegende Steigungen und Gefällen im Vorfeld analysiert werden (109). Eine weitere Technologie ist die Start-Stopp-Automatik bei den Nutzfahrzeugen. Sobald der Lastkraftwagen länger als drei Sekunden im Leerlauf steht, wird der Motor abgeschaltet (110). Anhand der Start-Stopp Technik können bis zu 5% CO₂ Emissionen gespart werden (111). Neben den technologischen Maßnahmen, um die Luftverunreinigungen bei den Nutzfahrzeugen zu mindern, haben auch Nebenkompente wie Reifen einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit. Die aerodynamisch gestalteten Verkleidungen des Lkws können zusätzlich den Kraftstoffverbrauch verringern. Durch eine richtige Auswahl an Aerodynamikkomponenten verringert sich auch der Luftwiderstand. Durch die Nutzung von Aerodynamischen Außenspiegel, Radabdeckungen, Seitenverkleidungen und Dachspoilern können Optimierungen vorgenommen werden. Auch der Rollwiderstand hat einen enormen Einfluss auf den Energieverbrauch des Lkws. Leichtlaufreifen können Rollwiderstände reduzieren. Dank automatischer Reifendruckkontrolle kann der Luftdruck von den Reifen überwacht werden. Somit kann vermieden werden, dass die Nutzfahrzeuge

mit einem zu niedrigen Luftdruck fahren. Bei einem nicht optimalen Reifendruck können sich die Reifen verformen und somit steigt auch der Rollwiderstand. Minderdruck an den Reifen führt gleichzeitig zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch. Somit sind Reifendruckkontrollsysteme ein wesentlicher Faktor für den Kraftstoffverbrauch, da sie den Rollwiderstand minimieren können. Mit dem Einsatz von Reifenfülldruck-Überwachungssystemen können ebenfalls CO₂ reduziert werden. Des Weiteren kann der Rollwiderstand durch den Einsatz von Leichtlaufreifen reduziert werden. Die Leichtlaufreifen haben eine spezielle Gummimischung mit einem Silica-Anteil. Durch die Nutzung von Leichtlaufreifen können bis zu 3 % Kraftstoff eingespart werden (112). Eine besondere Fähigkeit der Reifen sind die Nachschneidbarkeit und Runderneuerungsfähigkeit des Reifens. Der Hersteller Michelin gibt eine Rohstoffeinsparung von ca. 70 % an, dies wiederum entspricht eine Reduktion von 50 Kilogramm Rohstoffe pro Reifen (113). Eine weitere Maßnahme zur CO₂ Emissionsminderung ist die Verwendung von vollsynthetischen Leichtlaufölen. Durch die Verwendung von vollsynthetischen Leichtlaufölen wird der interne Motorwiderstand verringert. Es zeigt sich, dass die Ölverteilung bei Motorkaltstart besser und schneller ist als bei üblichem Motorenöl. Dies führt zu einem Rückgang des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 2%. Hinzu kommen noch die CO₂-Emissionen, die durch häufigere Motorölwechsel um bis zu 3 % gesenkt werden können (114).

5.2 Zukunftstechnologien

„CargoCap gehört zu den 100 Produkten der Zukunft – Wegweisende Ideen, die unser Leben verändern werden“. (115) Um eine nachhaltige Zukunft im Logistikbereich zu verwirklichen, besteht neben den innovativen Fahrzeugtechnologien auch ein Zukunftsprojekt. Hierzu gehört auch CargoCap. Dieses neuartige Güterverkehrssystem transportiert automatisiert Stückgüter durch ein unterirdisches Rohrleitungsnetz. CargoCap ist eine Transportalternative, die derzeitigen Verkehrsprobleme und die daraus resultierenden Umweltbelastungen in Ballungsräumen reduzieren soll (116). Durch dieses System könnte die Anzahl von Nutzfahrzeugen im Stadtverkehr entlastet werden. Der Gütertransport erfolgt vollautomatisch über die Transportfahrzeuge, Caps genannt. Der Antrieb wird durch einen Drehstrommotor gewährleistet. Die aerodynamischen Caps haben eine Kapazität bis zu drei Euro-Paletten. Die Nenngeschwindigkeit beträgt bei den Transportfahrzeugen ca. 36 km/h (117). Hierzu wurde in einem alten Kraftwerk-Maschinenhaus eine Teststrecke im Maßstab 1:2 errichtet. Dieses umweltfreundliche Transportsystem stellt zu einem ein innovatives und nachhaltiges Gütertransport dar. Durch den Einsatz des Transportsystems entstehen für die Stadt positive Umwelteffekte, hierzu gehören: Lkw-Verkehr wird reduziert, Feinstaub, Lärm, Stickoxide und andere Gasen werden weniger (118). Die CargoCap-Stationen bieten somit eine innovative Lösung für die Beförderung von Gütern in Städten und Industriegebieten. Diese Stationen können flexibel an verschiedenen Standorten errichtet werden, sowohl in der Innenstadt als auch am Rand von Fabriken. Darüber hinaus leisten das CargoCap-System einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung von Feinstaub- und Lärmbelastung. Durch die punktgenaue Platzierung der CargoCap-Stationen können sie den Straßengüterverkehr auf der letzten Meile abwickeln und somit auch die Emissionen von Nutzfahrzeugen und anderen Transportmitteln verringern.



Abbildung 8: CargoCap Kreuzung, Quelle:
http://www.cargocap.de/files/cargocap_images/CargoCap_Kreuzung_450p201101.jpg [Zugriff am 15.02.2023]

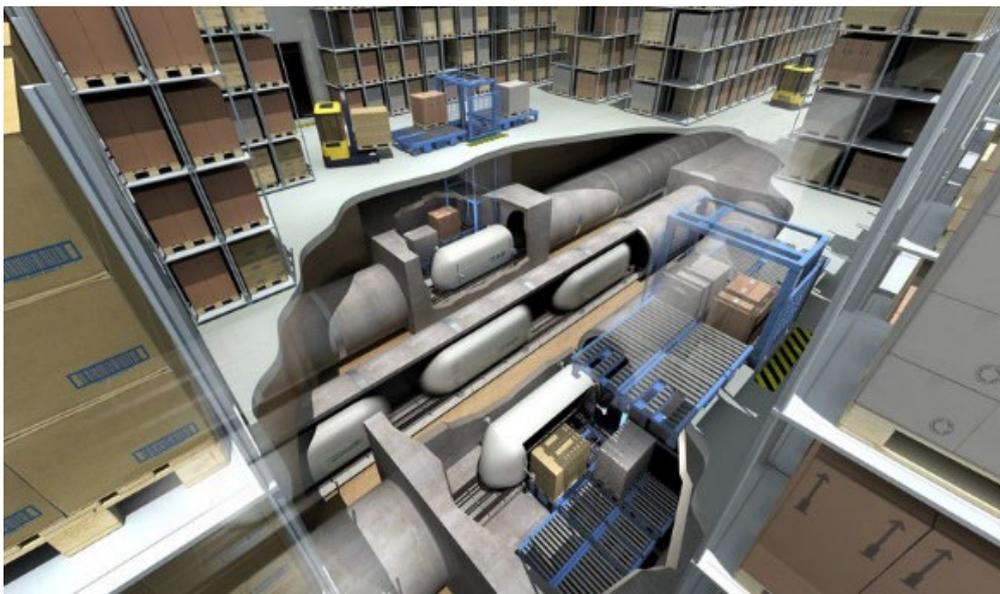


Abbildung 9: CargoCap Station, Quelle:
http://www.cargocap.de/files/cargocap_images/CargoCapStationWeiche450p201301.jpg [Zugriff am 15.02.2023]

Autonome Lkw gehört auch zu einen der interessantesten Zukunftstechnologien. Autonom bedeutet, dass das System im Lkw die komplette Fahrt übernimmt, ohne dass ein Fahrer erforderlich ist. Die Automatisierung wird in 6 Stufen / Levels untergliedert. Die Society for Automotive Engineers (SAE) hat ein hierarchisches Modell formuliert, welches die Automatisierungsgrade von Fahrzeugsystemen in verschiedene Stufen kategorisiert. Dieses Modell soll dazu dienen, eine standardisierte Sprache und eine klare Terminologie in der Automobilindustrie zu etablieren, um Missverständnisse und Inkonsistenzen bei der Beschreibung von Automatisierungsfähigkeiten zu vermeiden (119). In Abbildung 10 werden die sechs Stufen des autonomen Fahrens nach SAEJ J3016 abgebildet.

SAE-STUFE	NAME	BESCHREIBUNG	QUER- UND LÄNGSFÜHRUNG (LENKEN / BREMSEN / BESCHLEUNIGEN)	UMGEBUNGS-BEOBACHTUNG	RÜCKFALLEBENE
Stufe 0	No Automation (Keine Automation)	Der Fahrer fährt eigenständig, auch wenn unterstützende Systeme (z. B. ABS oder ESP) vorhanden sind.	Fahrer	Fahrer	keine
Stufe 1	Driver Assistance (Assistenzsysteme)	Fahrerassistenzsysteme helfen bei der Fahrzeugbedienung bei Längs- oder Querführung (u. a. ACC).	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer
Stufe 2	Partial Automation (Teilautomatisierung)	Ein oder mehrere Fahrerassistenzsysteme helfen bei der Fahrzeugbedienung bei Längs- und gleichzeitiger Querführung.	System	Fahrer	Fahrer
Stufe 3	Conditional Automation (Bedingte Automatisierung)	Autonomes Fahren mit der Erwartung, dass der Fahrer auf Anforderung zum Eingreifen reagieren muss.	System	System	Fahrer
Stufe 4	High Automation (Hochautomatisierung)	Automatisierte Führung des Fahrzeugs ohne die Erwartung, dass der Fahrer auf Anforderung zum Eingreifen reagiert. Ohne menschliche Reaktion steuert das Fahrzeug weiterhin autonom.	System	System	System
Stufe 5	Full Automation (Vollautomatisierung)	Vollständig autonomes Fahren, bei dem die dynamische Fahraufgabe unter jeder Fahrbahn- und Umgebungsbedingung, welche auch von einem menschlichen Fahrer beherrscht wird, durchgeführt wird.	System	System	System

Abbildung 10: Stufenmodell nach SAE J3016; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Quelle: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Schlaglichter/2020-03-forschung-fuer-autonomes-fahren-tabelle-1.jpg?__blob=normal&v=1&size=834w [Zugriff am:10.04.2023]

Es existieren derzeit autonome Nutzfahrzeuge, jedoch sind sie noch nicht in großem Umfang im Einsatz. Es gibt mehrere Unternehmen, die an der Entwicklung von autonomen Lastkraftwagen arbeiten. Einige Unternehmen haben bereits Tests auf öffentlichen Straßen durchgeführt, aber es gibt noch zahlreiche regulatorische und technologische Herausforderungen zu meistern, bevor autonome Nutzfahrzeuge im großen Stil eingesetzt werden können. Es wird prognostiziert, dass autonome Lastkraftwagen in den kommenden Jahren zunehmend verbreitet sein werden und in einigen Anwendungsfällen, wie beispielsweise in geschlossenen Anlagen, bald zum Einsatz kommen könnten. Die autonome Fahrzeugtechnologie gilt auch im Transportwesen als eine entscheidende Zukunftstechnologie, die dazu beitragen kann, wichtige Handlungsfelder der Branche anzugehen (120). Laut ADAC könnten bereits ab dem Jahr 2025 in der USA die autonomen Lkw zum Einsatz kommen (121). Dasselbe Ziel verfolgt auch der Lkw-Hersteller-MAN in Deutschland. Die Dachgesellschaft Traton arbeitet mit Knorr-Bremse, Leoni, Bosch, der Fraunhofer Gesellschaft und den Universitäten in München und Braunschweig zusammen, um an dem gemeinsamen Forschungsprojekt ATLAS-L4 zu arbeiten (122). Das Ziel des Projekts ist es, einen autonomen Lkw zu entwickeln, der alle Anforderungen erfüllt, um zwischen Logistikknotenpunkten fahrerlos betrieben werden zu können. Das Forschungsprojekt ATLAS-L4, auch bekannt als „Automatisierter Transport zwischen Logistikzentren auf Schnellstraßen im Level 4“, hat zum Ziel, den Betrieb autonomer Lkw auf öffentlichen Bundesautobahnen und Schnellstraßen zu ermöglichen (123). Das Vorhaben hat das Ziel, einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Verkehrsstaus und Unfällen zu leisten, indem der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen verringert und die Flexibilität bei der Verwendung von Fahrzeugen erhöht werden (124). Gleichzeitig soll das Entwicklungsprojekt auch dazu beitragen, Konzepte gegen den Fahrpersonalmangel zu entwickeln.

Praxisbeispiel – Projekt ANITA in Ulm

Nachdem MAN erfolgreich autonome Lkw am Hamburger Hafen getestet hat, wird ein weiteres Automatisierungsprojekt in Ulm durchgeführt. Das Projekt ANITA bietet MAN und seinen Partnern die Möglichkeit, einen

vollautomatisierten Lkw im realen Terminalbetrieb zu testen. In Ulm Dornstadt kooperieren Deutsche Bahn, MAN Truck & Bus, die Hochschule Fresenius und die Götting KG im Rahmen des Projekts ANITA, das sich der digitalen Transformation im Bereich des Verkehrs widmet (125). Ziel ist es, vollautomatisierte Lkw auf dem Container-Depot von DB Intermodal Services und dem DUSS-Terminal einzusetzen und damit den KV effizienter und flexibler zu gestalten (126). Durch den Einsatz dieser Technologie sollen zukünftig mehr Güter im umweltfreundlichen Kombinierten Verkehr transportiert werden können (127). Am 1. Juli 2020 wurde das Forschungs- und Entwicklungsprojekt ANITA initiiert. Die Finanzierung des Projekts erfolgt über das Programm "Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, welches mit 5,5 Millionen Euro dotiert ist und eine Laufzeit von 39 Monaten hat. (128).



Abbildung 11: Prototypen-Lkw von MAN in Dornstadt;DB-Cargo; Quelle: <https://www.dbcargo.com/resource/image/7694384/4:3/968/726/fda8f5485ed0806f62f0ac19257dd84b/40BCE9C7E67F4AD8E40CA38648CAE17C/DB220486.jpg> [Zugriff am 05.04.2023]

Die visuelle Darstellung 11 illustriert den Prototypen-Lastkraftwagen, welcher über eine Fülle von optischen und sensorischen Erfassungsgeräten verfügt. Insbesondere kommen dabei 360° Kameras sowie Lidar- und Radarsensoren zum Einsatz (129). Laut den Aussagen des Geschäftsführers der Deutschen

Bahn verlaufen die Fortschritte des Vorhabens im Einklang mit dem planmäßigen Zielen. Die erste Projektphase wurde erfolgreich abgeschlossen. Hierbei erfolgte eine umfassende Erfassung der örtlichen Infrastruktur und ihrer Schnittstellen durch das Expertenteam. Das Ziel war, eine zukünftige Kommunikation zwischen Lastkraftwagen und Umschlaggeräten zu ermöglichen. Hierfür wurden sowohl menschliche als auch maschinelle Aktivitäten entlang der Prozessketten beobachtet und detailliert dokumentiert (130).

6 Ansätze zur Emissionsreduktion

6.1 Vermindern

Um die Folgen des heutigen Verkehrs auf die Umwelt zu minimieren, müssen Lösungen gefunden werden, die nicht nur das Vermeiden und Verlagern eines Teils des Verkehrs ermöglichen, sondern auch dazu beitragen, die Emissionen zu senken (131). Eine Emissionsreduzierung ist durch einen Übergang zu einem Erdgas-Lkw möglich. Auch mit der Nutzung von innovativen Technologien können zum einen Kraftstoff gespart werden und somit CO₂ reduziert werden. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei auch das Alter des Fuhrparks. Mit der Nutzung von Lkw mit dem Schadstoffnorm EURO-6 ist eine Reduzierung der Stickoxide zum Vorgängernorm möglich. Die EURO-6 Schadstoffnorm, die im Jahr 2013 beziehungsweise 2014 eingeführt wurde, führte zu einer deutlichen Verringerung der Schadstoffgase. Im Vergleich zur EURO-0 Norm konnten die Emissionen von Kohlenmonoxid drastisch verringert werden. Es konnte eine Reduzierung der Stickoxide, der Kohlenwasserstoffe und der Rußpartikel erzielt werden. Auch die CO₂-Emissionen lassen sich somit mit der Modernisierung des Fuhrparks verringern. In der untenstehenden Tabelle werden die Lkw Abgasemissionsgrenzwerte von EURO-0 bis EURO-6 dargestellt.

	EURO -0	EURO -I	EURO -II	EURO -III	EURO -IV	EURO -V	EURO -VI
CO ^[1]	11,2	4,5	4	2,1	1,5	1,5	1,5
HC ^[1]	2,4	1,1	1,1	0,66	0,46	0,46	-
NO _x ^[1]	14,4	8	7	5	3,5	2	0,4
Partikelmasse	-	0,36	0,15	0,1	0,02	0,02	0,01

Tabelle 1: Abgasgrenzwerte für Lkw; in Anlehnung an Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge> [Zugriff am 22.03.2023]

[1] in g/kwH

Messungen bei EURO-I und EURO-II erfolgen im 13-Stufen-Test.

Messungen bei EURO-III bis EURO-VI erfolgen im ESC und ELR-Verfahren

ESC = European Stationary Cycle

ELR = European Load Transient Cycle

Nutzfahrzeuge mit modernen Technologien und neuen Systemen sind umweltfreundlicher als ältere Lkws. Neben dem Technologisierungsgrad des Lkws hat auch der Fahrer einen Einfluss auf den Energieverbrauch somit auch auf die Umwelt. Durch kontinuierliche Fahrerschulungen können dem Fahrer theoretische, als auch praktische Wissen mitgegeben werden. Einige Hersteller bieten Trainings an, um beim Fahrer seinen Fahrverhalten und auch das Wissen zu verbessern. Derartige Schulungen ist nicht nur für die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens positiv, sondern auch für die nachhaltige Logistik. Durch die Durchführung von Fahrerschulungen können bis zu 5 % CO₂ reduziert werden (132). Die Abbildung unten illustriert die möglichen Reduktionen bei den CO₂ Emissionen, die durch den WTW-Ansatz erreicht werden können. Zur Bewertung der konventionellen und alternativen Antriebstechnologien bedarf es einer akkuraten Well-to-Wheel Analyse. Diese Analyse umfasst sowohl die direkten als auch indirekten Emissionen über den gesamten Energiepfad, beginnend bei der Gewinnung des Treibstoffes oder Energieträgers und endend mit der Umwandlung in Bewegungsenergie (133). Es empfiehlt sich eine systematische Vorgehensweise zu wählen, um die Auswirkungen der konkreten Maßnahmen für die Optimierung des eigenen Fuhrparks zu prüfen (134). Zudem ist es wichtig, die Kosten und Nutzen jeder Maßnahme zu berücksichtigen, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können. Mit einer solchen systematischen Vorgehensweise kann die Kraftstoffeinsparung optimiert und die CO₂ Emissionen reduziert werden.

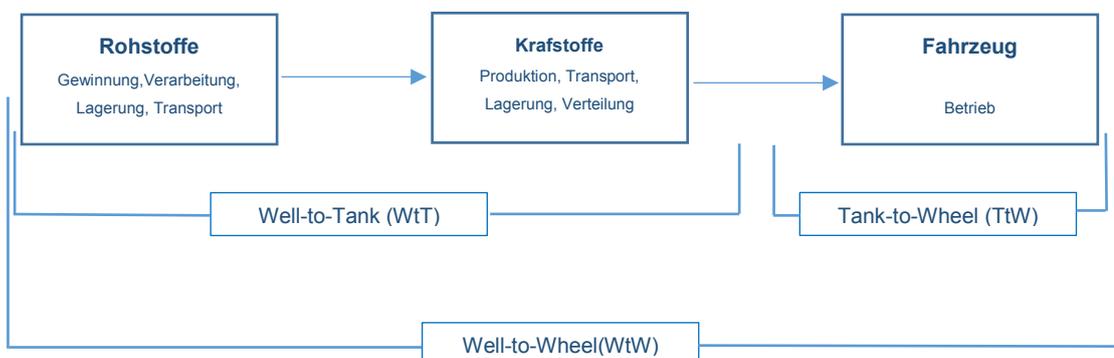


Abbildung 12: Well-to-Wheel Gesamtsystemdarstellung in Anlehnung an Forschungs-Informationssystem, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/> [Zugriff am 23.03.2023]

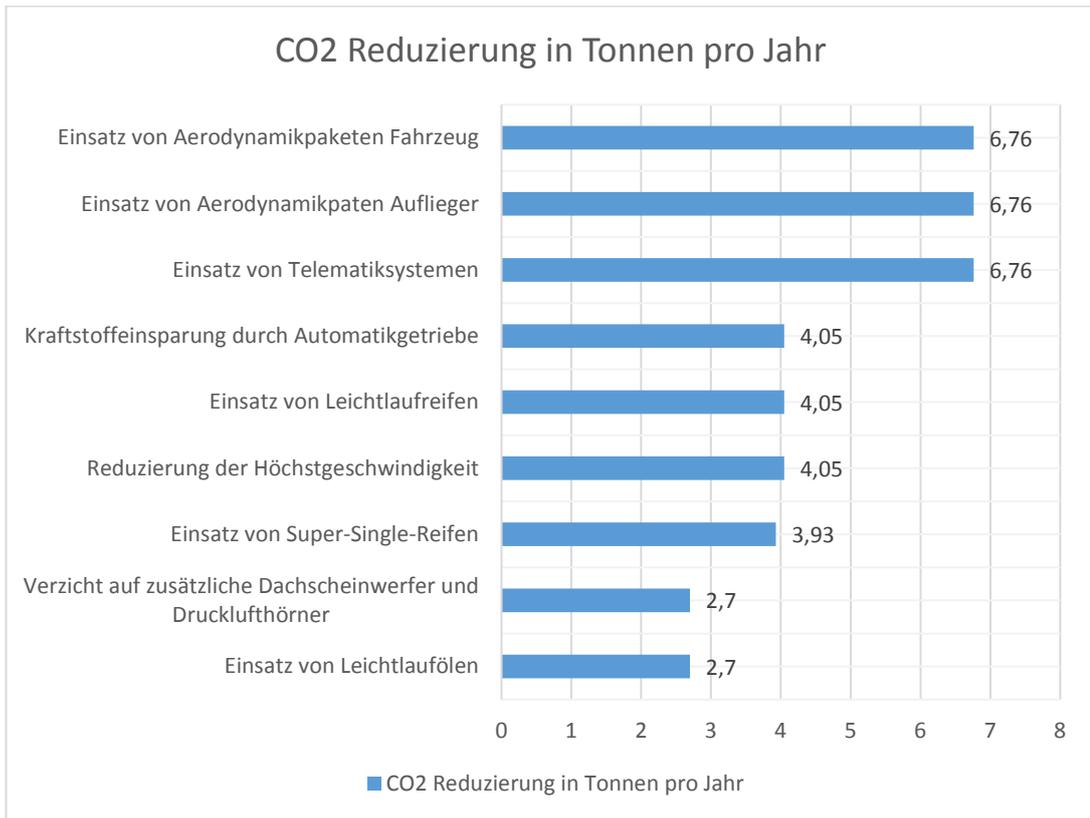


Abbildung 13: CO2 Reduzierung in Tonnen pro Jahr, in Anlehnung an Paul Wittenbrink, *Transportmanagement*, S.344

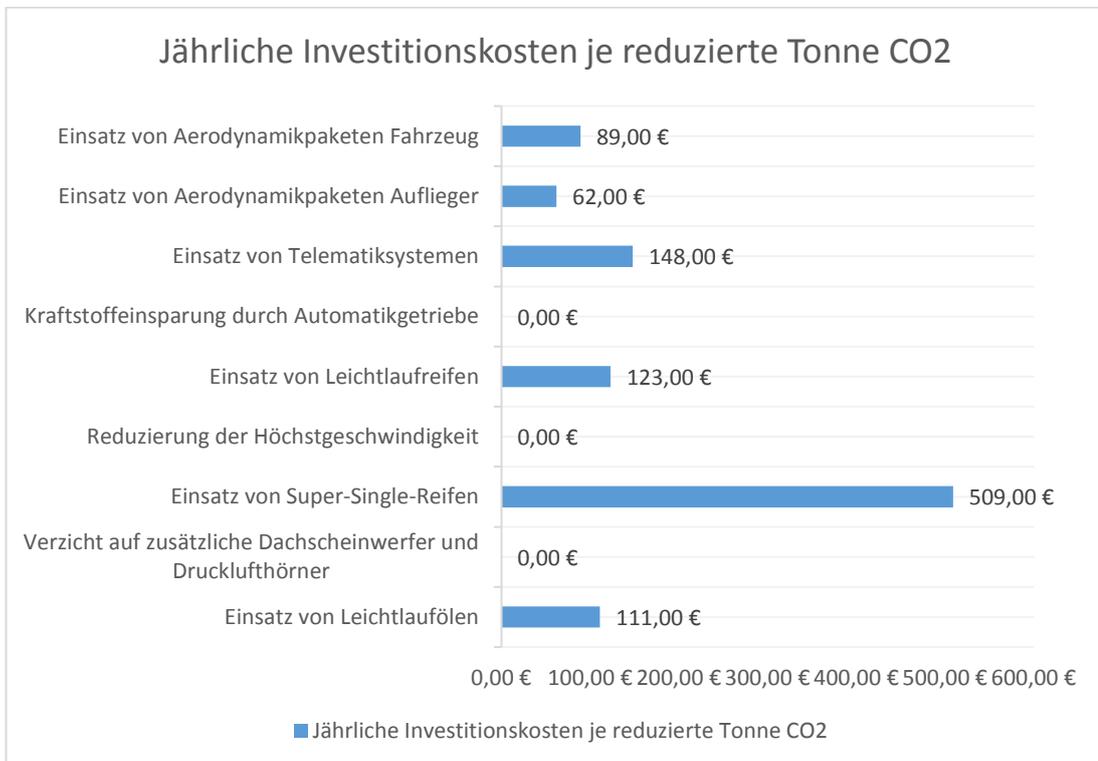


Abbildung 14: Jährliche Investitionskosten, in Anlehnung an Paul Wittenbrink, *Transportmanagement*, S.344

6.2 Vermeiden

Neben der Verminderung der CO₂ Emissionen besteht auch die Möglichkeit überflüssigen Verkehr zu vermeiden. Dies kann durch eine Transportbündelung entstehen. D.h., dass der Versand von Gütern mit hoher Auslastung von Lkws stattfindet. Ziel ist es in erster Linie Transporte zu vermeiden und Transporte zu optimieren bezüglich des Auslastungsgrades. Eine effizientere Nutzung von Güterkraftverkehr kann durch höhere Transportbündelung erreicht werden. Dadurch werden größere Lkw benötigt. Dadurch steigert sich die Effizienz des Güterkraftverkehrs und die Co₂-Emissionen werden reduziert. Laut Kraftfahrt Bundesamt war im Jahr 2021 die Anzahl der Leerfahrten auf dem deutschen Bundesgebiet 151,2 Millionen Fahrten (135). Eine Alternative, um Leerfahrten vermeiden zu können, ist die Nutzung von Frachtbörsen. Die Disponenten der Frachtbörsen versuchen, Fahrten so effizient wie möglich zu planen und die Leerfahrten auf ein Minimum zu reduzieren. Somit ergeben sich Vorteile wie Kosteneinsparungen zu erzielen und gleichzeitig wird das Klima geschont. Nach Angaben von GreenRouter können dadurch die Auslastung des Fuhrparks um bis zu 30 % und die Umsatzgewinne um bis zu 15 % gesteigert werden, während der Co₂ Ausstoß um 23 Prozent reduziert wird (136). Kurzfristige Anschlussaufträge finden sich dank der digitalen Transportplattformen leicht und effizient (137).

Praxisbeispiel: Firma WEPA und Firma CHEP

Die Collaborative Transportation Solutions von CHEP hat bei der Firma WEPA dazu beigetragen, dass die Anzahl der Leerfahrten und die CO₂ Emissionen zu reduzieren. Durch die Kollaboration des Unternehmens für nachhaltige Hygienelösungen mit dem führenden Anbieter im Bereich Palettenpooling wurden jährlich 113,8 Tonnen CO₂ und 141.000 Kilometer durch eine optimierte Lkw-Auslastung eingespart (138). Seit sieben Jahren profitiert die Firma WEPA, einer der ersten Kunden des Pooling-Experten, von den Collaborative Transport Solutions (CTS) von CHEP, einem Programm zur Logistiko Optimierung, das durch Millionen von Palettenbewegungen und Big-Data Leistungsfähigkeit angetrieben wird. Die Integration von WEPA in

Collaborative Transport Solutions begann 2014 in Italien und beide Partner teilten sich seither insgesamt 12 Fahrwege in vier Ländern: Polen, Frankreich, Deutschland und Italien. Der gemeinsame Transport von CHEP-Paletten und WEPA-Produkten optimiert die Hin- und Rückfahrten und verringert somit die Leerkilometer (139).

Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von Euro Combi, dem sogenannten Lang-Lkw. In der BRD sind die Lang-Lkw bereits in den meisten Bundesländern zugelassen. Durch die Nutzung der Lang-Lastkraftwagen können Unternehmen Kraftstoffkosten sparen und die damit verbundenen Abgase werden gesenkt. Die Lang-Lkw haben eine Maximallänge von 25,25 Meter (140). Mit dem Einsatz von Lang-Lkw wird auch die Kapazität des Laderaums erhöht. Eine weitere Variante besteht anhand der Nutzung der Routenoptimierung. Dies kann gelungen werden, in dem die Navigationssysteme benutzt werden. Zudem kann bereits bei der Planung und Optimierung der Routen in der Disposition eine effizientere Route realisiert werden. Mit einem Lkw Routenplaner kann sichergestellt werden, dass die Route des Lkws so effizient wie möglich ist. Anhand der Routenplanung werden die befahrbaren Strecken aufgrund von Höhen- und Gewichtsbeschränkungen ermittelt. Hinzu werden Straßen vermieden, die nicht für Nutzfahrzeuge zugelassen sind. Dank des Routenplaners ist eine Zeit- und Kostenersparnis realisierbar (141).

Eine weitere Maßnahme ist der Einsatz von Telematiksystemen. Telematiksysteme können dazu beitragen, Energiereduzierungen herbeizuführen. Diese Systeme vereinen Telekommunikation und Informatik, sodass aktuelle Verkehrsrouten, Standorte, Fahrzeuge und Kundenanforderungen übermittelt werden können (142). Dadurch wird die Transparenz und Effizienz des Transports verbessert. Mit dem Einsatz der Telematiksysteme ist eine Treibstoffreduktion von bis zu 5 % realisierbar (143).

6.3 Verlagern

Neben der Vermeidung und Verminderung ist der Wechsel des Verkehrsträgers eine Möglichkeit, Emissionen zu reduzieren. Die Verlagerung

auf Verkehrsträgern wie Bahn und Binnenschiff kann zur CO₂-Reduktion beitragen, indem sie Emissionen auf der Straße reduziert. Gleichzeitig ist der Verkehrsträger Straße der am meisten benutzte Transportmittel. Die Verlagerung auf den Verkehrsträger Schiene oder die verstärkte Nutzung des Kombinierten Verkehrs ist eine der am häufigsten genannten politischen Anliegen auf dem Weg zu „Grüner Logistik“ (144). Die Verlagerung von Transporten auf dem Wasser oder Schienenweg ist bei geeigneten Rahmenbedingungen eine gute Alternative, Emissionen deutlich zu reduzieren (145). Die Schiene ist im Vergleich zur Straße deutlich umweltfreundlicher. Abbildung 15 wird verdeutlicht, dass der Lkw höhere Emissionswerte aufweist. Die Güterzüge emittieren deutlich weniger Treibhausgase als der Lastkraftwagen. Durch die Nutzung des kombinierten Verkehrs ergeben sich einige Vorteile. Zum einen wird der Verkehr entlastet, darüber hinaus entsteht dadurch auch ein geringerer Schadstoffausstoß. Die Schiene ist klimaschonender und kostengünstiger als der Lastkraftwagen. Der Lkw kann im kombinierten Verkehr im Vor- und Nachlauf wieder zum Einsatz kommen. Ein weiterer Vorteil ist die Reduzierung der Mautgebühren. Für eine nachhaltige Logistik ist ein Wechsel der Verkehrsträger eine wichtige Maßnahme.

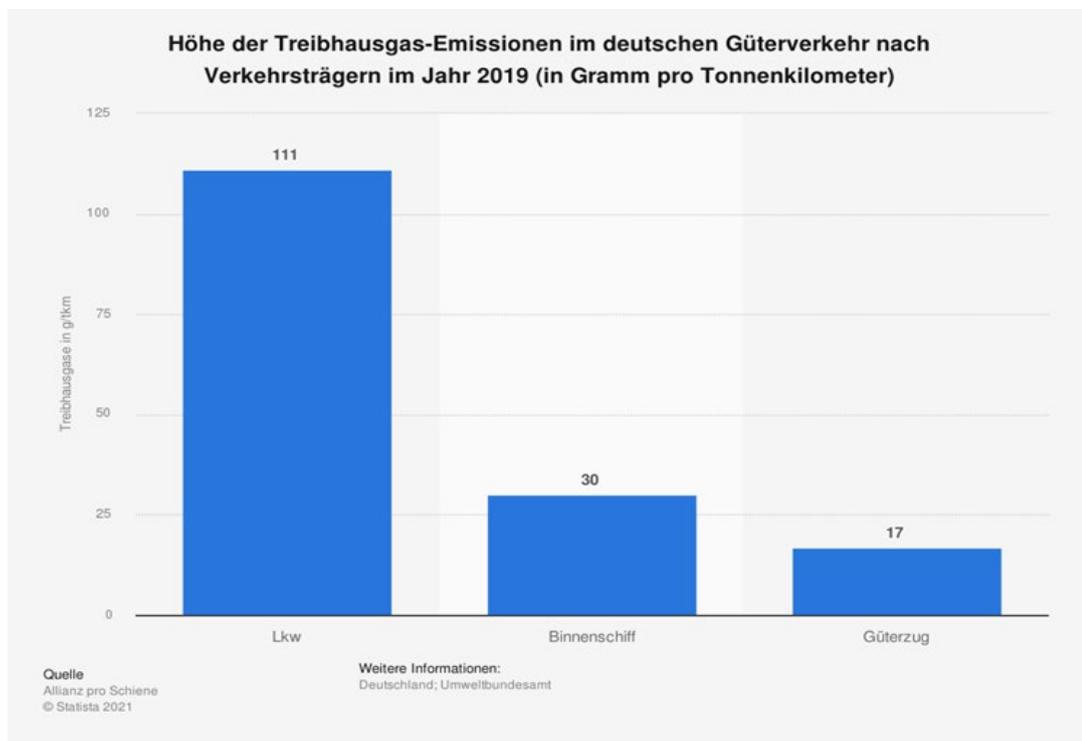


Abbildung 15: Allianz pro Schiene. (8. August, 2021). Höhe der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Güterverkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2019 (in Gramm pro Tonnenkilometer) [Graph]. In Statista. Zugriff am 13. April 2023, von <https://de-statista-com.ezproxy.hnu>

Der Straßengüterverkehr hat eine erhebliche Senkung der signifikanten Emissionen erreicht, ist jedoch immer noch eindeutig höher als die anderen Verkehrsmittel (siehe Abbildung 15). Die Werte der Emissionen werden unter der untenstehenden Abbildung 16 verdeutlicht. Trotzdem dominiert der Straßengüterverkehr weiterhin den Gütertransport.

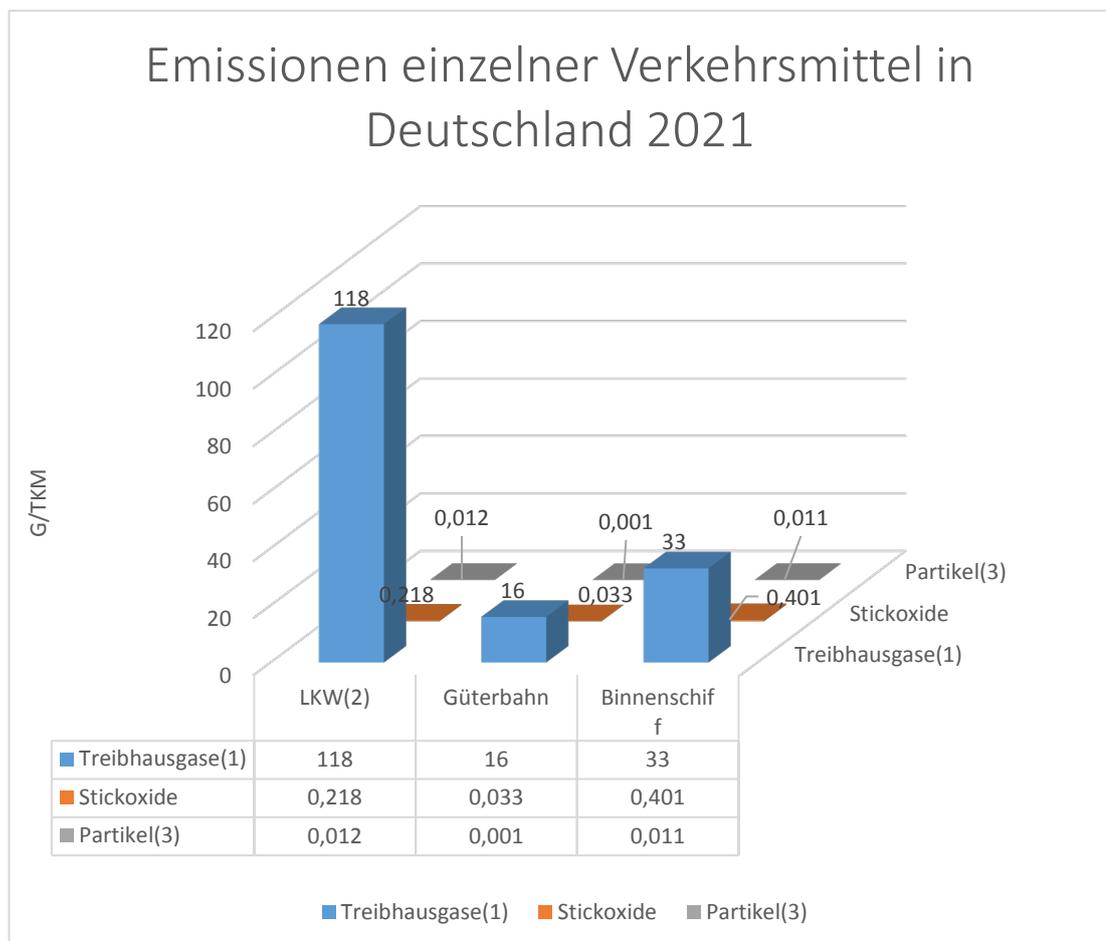


Abbildung 16: Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr in Deutschland 2021, in Anlehnung an Umweltbundesamt, https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_g%C3%BCterverkehr_tabelle [Zugriff am 08.03.2023]

1= CO₂,CH₄ und N₂O ; 2= Lkw ab 3,5t ; 3=Ohne Abrieb von Straßenbelag, Bremsen, Reifen und Oberleitungen

Als nächstes werden die daraus resultierenden Pro und Kontra bei der Verlagerung auf den Schienengüterverkehr dargestellt. Hierfür ist es notwendig, einige wichtige Begriffe im Schienengüterverkehr abzuleiten. Im

Schienengüterverkehr wird zwischen kombinierten Verkehr und konventionellen Verkehr unterschieden. Beim konventionellen Verkehr wird die Ladung unmittelbar in den Eisenbahngüterwagen geladen oder geschüttet. Der konventionelle Verkehr wird zum einen in den Wagenladungsverkehr (WLV) und in den Ganzzugverkehr aufgeteilt. Im Gegensatz zum konventionellen Verkehr werden im Kombinierten Verkehr die Ladeeinheiten, wie Sattelaufleger, Container oder Wechselbrücken, zwischen den Verkehrsmitteln umgeschlagen, anstatt der Ladung. Der Kombinierte Verkehr lässt sich wiederum in den Begleiteten Kombinierten Verkehr (BKV) und den Unbegleiteten Kombinierten Verkehr (UKV) unterscheiden. Bei dem Begleiteten Kombinierten Ladungsverkehr, ist der Lkw-Fahrer während des Transports mit involviert. Der kombinierte Verkehr, auch intermodaler Verkehr genannt, ist somit eine effiziente und umweltfreundliche Transportlösung. Dabei wird der überwiegende Teil der zurückgelegten Strecke mit der Eisenbahn, dem Binnenschiff oder dem Seeschiff bewältigt, während der Vorlauf und Nachlauf nach wie vor auf der Straße gehalten wird (146). Mehrere Vorteile resultieren aus diesem Verfahren: Zum einen ist es eine umweltfreundlichere Alternative zum reinen Transport im Straßengüterverkehr, da die Nutzung von Schiene, Wasserstraßen oder Seewegen die CO₂ Emissionen reduziert. Zum anderen ermöglicht der kombinierte Verkehr eine effiziente Nutzung der Infrastrukturen, da Schienen- und Wasserwege generell weniger stark frequentiert sind als die Straßenwege. (147) Prognosen deuten darauf hin, dass das Güteraufkommen im Kombinierten Verkehr (KV) von 2010 bis 2030 um rund 79 % steigen wird (148). Im Jahr 2018 verzeichnete der Kombinierte Verkehr im Vergleich zum Vorjahr ebenfalls eine deutliche Zunahme. Abbildung 17 illustriert die Beförderungsmenge im KV in Deutschland zwischen den Jahren 2012 und 2018.

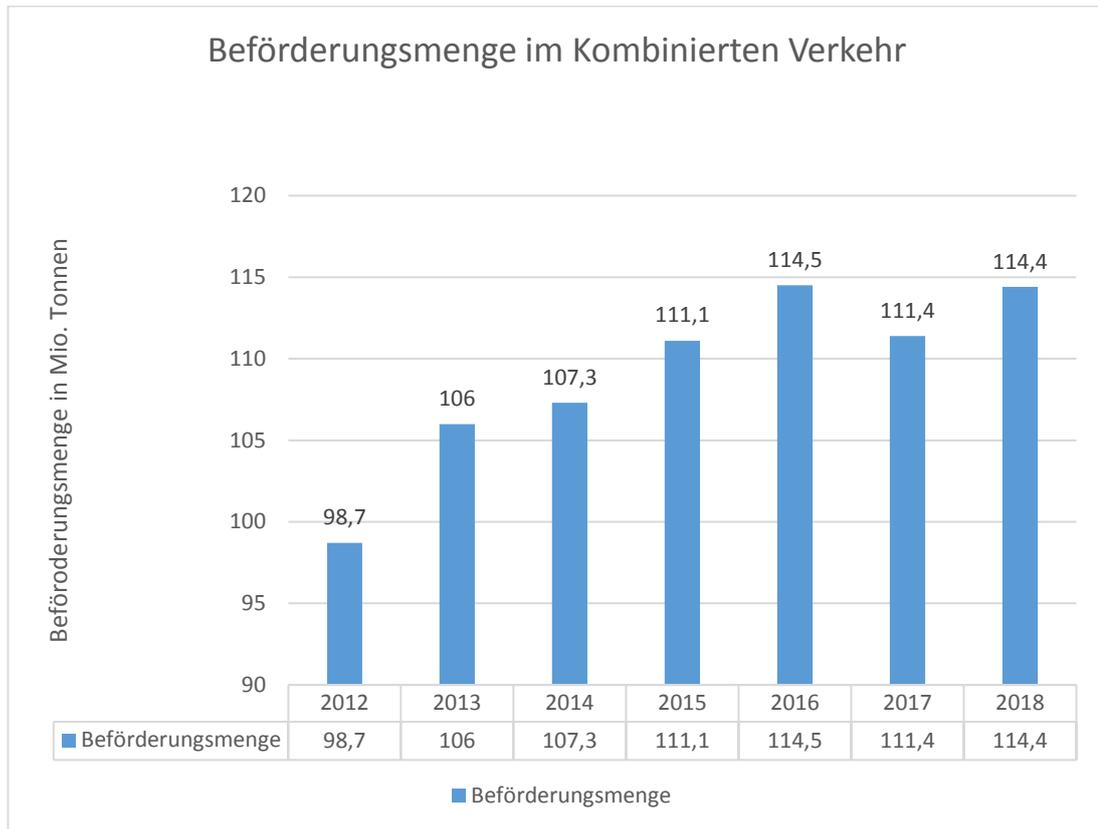


Abbildung 17: in Anlehnung an Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr. (19. Januar, 2022). Beförderungsmenge im kombinierten Verkehr in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020 (in Millionen Tonnen) [Graph]. In Statista. Zugriff am 03. April 2023, von <https://de-statista-com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/12262/umfrage/gueteraufkommen-im-kombinierten-verkehr-seit-dem-jahr-2008/>

Einer der wichtigsten Gründe der für die Nutzung des Kombinierten Verkehrs angeführt wird, ist das die Nutzfahrzeuge, die im Vor-oder Nachlauf zu oder vom nächstgelegenen Terminal innerhalb der Luftlinie von 150 km transportieren, dürfen ein Gesamtgewicht von 44 Tonnen haben. Durch die Erhöhungen des zulässigen maximalen Gesamtgewichts können größere Mengen transportiert werden, was zu Einsparungen bei den Transporten führt (149). Das zulässige Maximalgewicht bei den Nutzfahrzeugen im reinen Straßengüterverkehr liegt bei 40 Tonnen. Zusätzlich sind die Nutzfahrzeuge, die im Vor- und Nachlauf des KV eingesetzt werden und sich innerhalb der 150 Kilometer vom Terminal bewegen, sind von der Kfz-Steuer befreit (150). Ein weiterer betriebswirtschaftlicher Vorteil ist das die Fahrzeuge von Fahrverboten an Sonn- und Feiertagen ausgenommen sind (151). Allerdings darf die Strecke, die vom Bahnhof oder Hafenterminal bis zum Empfänger oder Versender zurückgelegt wird, nicht länger als 150 Kilometer sein.

Zu den weiteren Vorteilen des Kombinierten Verkehrs gehören:

- Ökonomische Nutzung des einzelnen Verkehrsträgers
- Entlastung der Straßen von Nutzfahrzeugen
- Kostenvorteile durch Massenguttauglichkeit
- Deutliche Verringerung von Treibhausgasen

7 Praxisbesuch im Werk Nikola-Iveco in Ulm

In Ulm wurde im Jahre 2012 bei IVECO der letzte Lkw mit Verbrennungsmotor produziert. Der US-amerikanische Hersteller Nikola und der italienische Nutzfahrzeughersteller haben für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr eine Partnerschaft abgeschlossen. In Zukunft wird das Modell Nikola Tre in Ulm gefertigt. Das Produktionswerk hat insgesamt eine Fläche von 50.000 Quadratmeter. Davon ist etwa die Hälfte der Fläche überdacht, um die Produktion unter optimalen Bedingungen durchführen zu können. Der Bereich, wo ausschließlich die Produktion stattfindet, umfasst eine Fläche von ca. 11.000 Quadratmeter. Den Materialtransport innerhalb der Fertigungshalle werden von den Fahrerlosen Transportsystemen übernommen (FTS). Auch bekannt als Automated Guided Vehicle (AGV). Von den automatisierten Transportsystemen sind insgesamt 32 Stück im Einsatz und ermöglichen somit einen optimierten Materialfluss entlang der Produktionslinie. Die Produktionslinie ist in 14 Arbeitsstationen aufgeteilt. Für die Erprobung der Fahrzeuge ist eine Teststrecke am selben Standort vorhanden. Der Pilotkunde der Hamburger Hafen hat im Jahr 2022 25 E-Lkw, zum Test erhalten. Im Werk in Ulm werden folgende zwei Modelle aus dem Band laufen: die batterieelektrische Antriebsart – BEV-Lkw und das Brennstoffzellen-Lkw (FCEV). Am neuen Produktionsstandort werden zuerst batterieelektrische Fahrzeuge im 4x2- und 6x2-Format hergestellt. Der elektrische Antrieb ist in der Lage, eine Dauerleistung von bis zu 480 kW zu erbringen (152). Nikolas Antriebstechnologie, Steuerungen und Infotainment-Systeme sind in den in der Entwicklung befindlichen Nikola Tre integriert. Dieses Fahrzeug basiert auf der neuen IVECO S-WAY-Plattform und wird somit von modernster Technologie unterstützt (153). Beide Nikola-Fahrzeuge haben einen elektrischen Antriebsstrang, aber der Unterschied liegt im System, das für die Erzeugung der elektrischen Energie verantwortlich ist. Während Batterien für das BEV verwendet werden, werden bei FCEV Wasserstoffbrennstoffzellen eingesetzt, um den elektrischen Antriebsstrang anzutreiben. Der Nikola Tre BEV ist mit 9 Batterien ausgestattet, die eine Gesamtenergie von bis zu 738 kWh speichern können, infolgedessen kann das Fahrzeug eine Reichweite von bis zu 500 Kilometern erreichen (154). Wenn der Ladezustand von 10-

90% erreicht werden soll, dauert das Aufladen nur etwa 160 Minuten, wenn ein 175 kW-Lader verwendet wird (154). Mit einer Dauerleistung von 480 kW und einer Gesamtenergie von 738 kWh ist die FPT Industrial eAchse in der Lage, den Hub-to-Hub-Verkehr sowie regionale Transporte problemlos zu bewältigen (155). Auf der Messe wurde die Beta-Version der Nikola Tre FCEV 6x2-Sattelzugmaschine vorgestellt, die mit einer lenkbaren Nachlaufachse und einem neuen Fahrerhaus mit verbesserter Aerodynamik ausgestattet ist (156). Die Aufnahmekapazität des Fahrzeugs beläuft sich auf rund 70 kg Wasserstoff, welcher bei einem Druck von 700 bar gespeichert wird (157). Dank dieser Speicherkapazität ist es möglich, mit dem Fahrzeug bis zu 800 Kilometer zurückzulegen, und der Tankvorgang dauert lediglich etwa 20 Minuten (158). Die Markteinführung des Nikola Tre FCEV in Europa im Jahr 2024 wird es ermöglichen, lokal emissionsfreie Elektroantriebe für Langstreckeneinsätze zu nutzen (159). Bereits 100 Schwerlast-Wasserstoff-Lkws wurden von der Firma GP Joule gekauft. Geplant ist, dass GP JOULE im Jahr 2024 30 der ersten 100 Nikola Tre FCEVs erhält, während die übrigen 70 Fahrzeuge im Jahr 2025 ausgeliefert werden (160).



Abbildung 18: Nikola TRE BEV im Hamburger Hafen, Quelle: https://www.hafen-hamburg.de/site/assets/files/570419/220914_hpa_iveco_nikola_3.1920x0.jpg [Zugriff am 28.03.2023]

8 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass derzeit im Straßengüterverkehr keine absolut erwiesene Technologie verfügbar ist, die im direkten Vergleich mit dem Dieselantrieb mithalten kann. Obwohl einige vielversprechende Antriebstechnologien erforscht werden, gibt es noch keine optimalen Standards, die in Bezug auf ihren ökologischen und ökonomischen Nutzen mit dem Dieselantrieb vergleichbar wären. Fast alle Alternativen haben Einschränkungen in Bezug auf Reichweite und Infrastruktur, was bedeutet, dass eine flächendeckende Anwendung dieser Technologien noch nicht möglich ist. Basierend auf dieser Arbeit wird jedenfalls deutlich, dass der Dieselantrieb als Technologie auf dem absteigenden Ast ist. Der Klimawandel und die damit verbundenen Klimaziele erfordern eine Umstellung der Branche. Die Unterstützung und Förderung durch die Politik, um diesen Wandel voranzutreiben, wird dazu beitragen, eine höhere Akzeptanz zu schaffen und die zusätzlichen Kosten im Vergleich zum Dieselantrieb zu mildern. Insgesamt ist es offensichtlich, dass eine Veränderung notwendig ist und dass alternative Antriebstechnologien weiter erforscht und umgesetzt werden müssen, um den Anforderungen des Klimawandels zu genügen. Wie aus dieser Arbeit hervorgeht, sind bereits Konzepte für den Infrastrukturaufbau in Arbeit. Es wird jedoch noch einige Jahre dauern, bis diese flächendeckend umgesetzt sind. In der Zwischenzeit gibt es marktreife Technologien, die zwar immer noch Treibhausgase emittieren, aber deutlich weniger als der herkömmliche Dieselantrieb. LNG ist bereits verfügbar und kann mittelfristig zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen. Um die Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen, müssen emissionsärmere alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr eingeführt werden. Trotz dieser vielversprechenden Aussichten steht die Entwicklung des Marktes für alternative Antriebe und Kraftstoffe jedoch noch vor großen Herausforderungen. Nur wenn diese Herausforderungen erfolgreich gemeistert werden, kann der Straßengüterverkehr in Deutschland einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten (161). Elektrofahrzeuge eignen sich besonders für kurze Strecken, da ihre Reichweite noch begrenzt ist. Brennstoffzellen-Lkw hingegen sind für mittlere

und lange Strecken geeignet, da sie bereits eine höhere Reichweite aufweisen. Oberleitungs-Lkw sind sinnvoll in Bereichen, in denen regelmäßige Verkehre stattfinden und das Oberleitungsnetzwerk ausgebaut ist. Die Elektrifizierung der Transportindustrie hat das Potenzial, die Effizienz von Warenlieferungen zu verbessern. Die jüngsten Fortschritte im Bereich der Batterietechnologie und der Motorentechnik eröffnen neue Perspektiven für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in der städtischen Logistik (162). Besondere Chancen bieten sich hierbei für die „letzte Meile“, die nicht nur als eine der kostspieligsten, sondern auch als eine der umweltbelastendsten Stufen der Warenlieferung betrachtet wird. Es besteht daher ein erhebliches Potenzial für den Einsatz von Elektro-Nutzfahrzeugen, um diesen kritischen Abschnitt der Transportkette ökologischer und wirtschaftlicher zu gestalten. Mit der zunehmenden Etablierung des E-Commerce steigt nicht nur die Anzahl von Hauszustellungen, sondern auch der Fahrzeugverkehr in den Großstädten aufgrund der Rückwärtslogistik (163). In zahlreichen städtischen Gebieten werden noch immer konventionelle Nutzfahrzeuge eingesetzt, um Waren zu liefern und Rücksendungen von Kunden entgegenzunehmen sowie ins Lagerhaus zurückzuführen. Die Einführung von E-Lkw bietet eine vielversprechende Alternative, die nicht die Kosten für derartige Transporte zu reduzieren, sondern auch zu einer nachhaltigen Logistik beitragen kann. Im Zuge des Klimawandels und der steigenden Bedenken hinsichtlich der Umweltauswirkungen des Verkehrs hat die Elektrifizierung des Transportwesens eine immer größere Bedeutung erlangt. Im Jahr 2015, als das Pariser Abkommen zum Klimawandel unterzeichnet wurde, waren Transport und Logistik für ca. 24 % der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich (164). Um diesem Problem zu begegnen, riefen die Vereinten Nationen in ihrem Bericht "The Paris declaration on electro-mobility and climate change & call to action" dazu auf, bis zum Jahr 2030 mindestens 20 % aller Straßenfahrzeuge elektrisch anzutreiben (165). Durch den technologischen Fortschritt der letzten Jahre sind elektrische Lkw zu einer immer realistischeren Option geworden, um die Effizienz des Güterverkehrs zu steigern und die Umweltbelastung zu reduzieren. Zudem müssen auch die Kosten für alternative Antriebe weiter sinken, um eine breitere Akzeptanz bei den Transportunternehmen zu erreichen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde das Ziel verfolgt, die Nachhaltigkeit in der Transportkette beim Verkehrsträger Straße zu untersuchen. Die vorliegenden Statistiken belegen, dass der Transport mittels den Nutzfahrzeugen auch in Zukunft eine bedeutende Rolle für eine nachhaltige Logistik spielen wird. Es ist erfreulich zu sehen, dass sich die Branche bereits auf den Weg zu einer umweltfreundlicheren und nachhaltigeren Zukunft gemacht hat und dass weiterhin intensiv an neuen Technologien geforscht werden. Es bleibt abzuwarten, welche Antriebstechnologie sich letztendlich durchsetzen wird, um den Dieselantrieb als dominante Technologie abzulösen.

V. Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Senden, den 17.04.2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Bostan'.

Abdullah Bostan

VI. Literaturverzeichnis

1. BMDV. Verkehrsverflechtungsprognose 2030; 2022 [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030.html>.
2. Walldorf EG, editor. Gabler Lexikon Auslands Geschäfte: Erfolgreich auf internationalen Märkten: Außenhandel und Kooperation Marktforschung und Marketing Finanzierung und Sicherung. Wiesbaden: Gabler Verlag; 2000. (Springer eBook Collection Business and Economics).;[Seite 543]
3. Logistische Informationssysteme. Fachbegriff: Vorlauf,Hauptlauf und Nachlauf [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://www.lis.eu/lexikon/vorlauf/>.
4. BWL-Lexikon. Transportkette [cited 2023 Feb 15]. Available from: URL: <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/transportkette/>.
5. Muchna C, Brandenburg H, Fottner J, Gutermuth J. Grundlagen der Logistik: Begriffe, Strukturen und Prozesse. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler; 2021. (Lehrbuch).
6. Muchna C, Brandenburg H, Fottner J, Gutermuth J. Grundlagen der Logistik: Begriffe, Strukturen und Prozesse. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler; 2021. (Lehrbuch).
7. Claus Muchna, Hans Brandenburg, Johannes Fottner, Jens Gutermuth. Grundlagen der Logistik.[Seite 106]
8. BUNDESVERKEHRSMINISTERIUM. Lkw dürfen nicht schwerer beladen werden. Wirtschafts Woche [cited 2023 Feb 1]. Available from: URL: <https://www.wiwo.de/politik/deutschland/bundesverkehrsministerium-lkw-duerfen-nicht-schwerer-beladen-werden-/23652904.html>.
9. Claus Muchna, Hans Brandenburg, Johannes Fottner, Jens Gutermuth. Grundlagen der Logistik.[Seite 106]

10. Muchna C, Brandenburg H, Fottner J, Gutermuth J. Grundlagen der Logistik: Begriffe, Strukturen und Prozesse. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler; 2021. (Lehrbuch).
11. Muchna C, Brandenburg H, Fottner J, Gutermuth J. Grundlagen der Logistik: Begriffe, Strukturen und Prozesse. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler; 2021. (Lehrbuch).
12. Baunetzwissen. Ursprung des Begriffs Nachhaltigkeit [cited 2023 Feb 1]. Available from: URL: <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/einfuehrung/ursprung-des-begriffs-nachhaltigkeit-665829>.
13. Studyflix. Ökonomische Nachhaltigkeit [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://studyflix.de/wirtschaft/okonomische-nachhaltigkeit-6187>.
14. Studyflix. Ökonomische Nachhaltigkeit [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://studyflix.de/wirtschaft/okonomische-nachhaltigkeit-6187>.
15. Studyflix. Ökonomische Nachhaltigkeit [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://studyflix.de/wirtschaft/okonomische-nachhaltigkeit-6187>.
16. Michael Stoll. 3-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://www.michael-stoll.info/glossar-3-saeulen-modell/>.
17. wortbedeutung.info. transportieren [cited 2023 Feb 15]. Available from: URL: <https://www.wortbedeutung.info/transportieren/>.
18. Statistisches Bundesamt. Güterverkehr: Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern [cited 2023 Mar 17]. Available from: URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-1r.html>.
19. Statista. Gesamtes Transportaufkommen von Gütern in Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2021 [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/7041/umfrage/gesamtes-gueteraufkommen-in-deutschland/#:~:text=Betrachtet%20wurden%20dabei%20die%20Verkehrstr%C3%A4ger,insgesamt%20rund%204%2C673%20Milliarden%20Tonnen>.
20. Statista. Gesamtes Transportaufkommen von Gütern in Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2021 [cited 2023 Apr 12]. Available from: URL:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/7041/umfrage/gesamtes-gueteraufkommen-in-deutschland/#:~:text=Betrachtet%20wurden%20dabei%20die%20Verkehrstr%C3%A4ger,insgesamt%20rund%204%2C673%20Milliarden%20Tonnen.>

21. Statistisches Bundesamt. Güterverkehr: GüterverkehrBeförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern [cited 2023 Mar 2]. Available from: URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-Ir.html>.

22. Statistisches Bundesamt. Verkehr: Verkehr aktuell [cited 2023 Mar 30]. Available from: URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf?__blob=publicationFile.;[Seite 7]

23. time-matters. Was bedeutet D2D?: Glossar Notfall Logistik [cited 2023 Mar 12]. Available from: URL: <https://www.time-matters.com/de/glossar-notfall-logistik/d2d-door-to-door/>.

24. Keller S. Bahn- & Schienenverkehr: Transportleistung des Schienengüterverkehrs in der Europäischen Union von 2006 bis 2021; 2022 [cited 2023 Mar 14]. Available from: URL: <https://de-statista-com.ezproxy.hnu.de/statistik/daten/studie/282306/umfrage/transportleistung-des-schienengueterverkehrs-in-der-eu/>.

25. Puckelwald J. HINTERGRUND – SCHIFFSTYPEN; 2023 [cited 2023 Mar 30]. Available from: URL: <https://dmz-maritim.de/hintergrund-schiffstypen/>.

26. Transport-Informationen-System. Schiffe: 4.6 Bestand der deutschen Binnenflotte [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.tis-gdv.de/tis/tagungen/svt/svt07/renner/inhalt04-htm/>.

27. Statista. Anteil der Binnenschifffahrt an der Transportleistung im Güterverkehr in Deutschland in den Jahren von 2013 bis 2024 [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12204/umfrage/anteil-der-binnenschifffahrt-am-gueterverkehr-in->

36. SGKV. Kombiniertes Verkehr [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://sgkv.de/wp-content/uploads/2022/01/Zahlen-und-Fakten-2021.pdf>.;[Seite4]
37. ard alpha. RUDOLF DIESEL UND SEIN DIESELMOTOR: Ein Motor mit explosiver Kraft; 2022 [cited 2023 Feb 9]. Available from: URL: <https://www.ardalpha.de/wissen/geschichte/kulturgeschichte/rudolf-diesel-dieselmotor-automobil-erfinder-100.html#:~:text=Jahrelang%20t%C3%BCftelt%20Rudolf%20Diesel%20an,Erfinder%20bringt%20er%20kein%20GI%C3%BCck>.
38. Paschotta Rüdiger. Dieselmotor [cited 2023 Feb 10]. Available from: URL: <https://www.energie-lexikon.info/dieselmotor.html>.
39. gascom. LNG: LNG [cited 2023 Feb 11]. Available from: URL: [https://www.gascom.de/leistungen/rund-ums-erdgas/lng/#:~:text=Als%20LNG%20\(Liquefied%20natural%20gas,in%20nur%20einen%20Kubikmeter%20FI%C3%BCssigerdgas](https://www.gascom.de/leistungen/rund-ums-erdgas/lng/#:~:text=Als%20LNG%20(Liquefied%20natural%20gas,in%20nur%20einen%20Kubikmeter%20FI%C3%BCssigerdgas).
40. IVECO. ERDGAS: GLEICHE LEISTUNG, WENIGER EMISSIONEN [cited 2023 Feb 20]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/germany/unternehmen/pages/erdgas.aspx>.
41. Rolande. Die Vorteile von LNG; 2020. Available from: URL: <https://rolandelng.de/die-vorteile-von-lng/#:~:text=Mit%20LNG%20f%C3%A4hrt%20man%20sauberer,eines%20normalen%20LKW%20zu%20verlieren.&text=Fahren%20mit%20LNG%20ist%20sauberer,Gesundheitssch%C3%A4den%20durch%20Feinstaub%20und%20NOx>.
42. Rolande. Die Vorteile von LNG; 2020. Available from: URL: <https://rolandelng.de/die-vorteile-von-lng/#:~:text=Mit%20LNG%20f%C3%A4hrt%20man%20sauberer,eines%20normalen%20LKW%20zu%20verlieren.&text=Fahren%20mit%20LNG%20ist%20sauberer,Gesundheitssch%C3%A4den%20durch%20Feinstaub%20und%20NOx>.
43. IVECO. DER STRALIS NP [cited 2022 Feb 20]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/Germany/Neufahrzeuge/Pages/new-stralis-np-gas-truck.aspx>.

44. IVECO. DER STRALIS NP [cited 2022 Feb 20]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/Germany/Neufahrzeuge/Pages/new-stralis-np-gas-truck.aspx>.
45. Scania Deutschland. Technische Daten Gas-Lkw: ALTERNATIVE KRAFTSTOFFQUELLEN [cited 2023 Mar 14]. Available from: URL: <https://www.scania.com/de/de/home/products/trucks/gas-truck/gas-truck-specifications.html>.
46. dena, Deutsche-Energie-Agentur. LNG-Taskforce und Initiative Erdgasmobilität; 2023. Available from: URL: <https://www.dena.de/themenprojekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet>.
47. dena. LNG-Taskforce und Initiative Erdgasmobilität [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://www.dena.de/themenprojekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet/>.
48. Bundesamt für Logistik und Mobilität. Mautbefreiung für Erdgasfahrzeuge: Änderung der Voraussetzungen ab dem 1. Oktober 2021; 2021 [cited 2023 Mar 17]. Available from: URL: https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2021/mautbefreiung_erdgasfahrzeuge_ndab21102020.html.
49. Johannes Reichel. Förderung für Erdgas-Lkw: LNG schwer gefragt - E-Trucks kaum [cited 2023 Feb 10]. Available from: URL: <https://vision-mobility.de/news/foerderung-fuer-erdgas-lkw-lng-schwer-gefragt-e-trucks-kaum-60581.html>.
50. Redaktion (allg.). BMVI: Förderung für klimafreundliche Lastwagen [cited 2023 Feb 15]. Available from: URL: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-bmvi-foerderung-fuer-klimafreundliche-lastwagen-73897.html>.
51. diebrennstoffzelle. Die Geschichte der Brennstoffzelle [cited 2023 Mar 18]. Available from: URL: <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/geschichte/index.shtml>.
52. Zwettler M. Erfinden und Konstruieren in Perfektion; 2021 [cited 2023 Mar 20]. Available from: URL: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/erfinden-und-konstruieren-in-perfektion-a-997384/?cflt=rdt>.

53. Die Bundesregierung. Energie und Klimaschutz: Anteil der Erneuerbaren Energien steigt weiter; 2023 [cited 2023 Apr 1]. Available from: URL: [https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/faq-energiewende-2067498#:~:text=Wie%20hoch%20ist%20der%20Anteil,2023\)%20hervor.](https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/faq-energiewende-2067498#:~:text=Wie%20hoch%20ist%20der%20Anteil,2023)%20hervor.)
54. Domenico Sciurti. ICCT-Studie: So werden die Kosten für emissionsfreie Lkw sinken: Die Antriebsformen im Einzelnen – Kosten werden sinken [cited 2023 Mar 18]. Available from: URL: <https://www.electrive.net/2022/03/01/icct-studie-so-werden-die-kosten-fuer-emissionsfreie-lkw-sinken/>.
55. Alternativ Mobil. Brennstoffzellenfahrzeuge(FCEV) [cited 2023 Mar 19]. Available from: URL: <https://www.alternativ-mobil.info/alternative-antriebe/brennstoffzellenfahrzeuge-fcev#:~:text=Brennstoffzellenfahrzeuge%20sind%20im%20Grunde%20Elektrautos,Lastspitzen%20beispielsweise%20beim%20Beschleunigen%20ab.>
56. Degussa-Goldhandel. BRENNSTOFFZELLEN UND PLATIN: WIESO DER BEDARF STEIGEN KÖNNTE [cited 2023 Mar 22]. Available from: URL: <https://www.degussa-goldhandel.de/brennstoffzellen-und-platin-wieso-der-bedarf-steigen-koennte/#:~:text=Brennstoffzellen%2DProduktion%20ben%C3%B6tigt%20Platin&text=Die%20Brennstoffzelle%20erm%C3%B6glicht%20eine%20Reaktion,Katalysator%20und%20beschleunigt%20die%20Reaktion.>
57. Sven Bennühr. Wasserstoff-Lkw sind auf dem Weg. DVZ [cited 2023 Apr 5]. Available from: URL: <https://www.dvz.de/rubriken/test-technik/alternative-antriebe/detail/news/h2-lkw-sind-auf-dem-weg.html>.
58. Nicole Hery-Moßmann. Wasserstoff: So weit ist der Tankstellen-Ausbau fortgeschritten; 2022. Available from: URL: https://efahrer.chip.de/ewissen/wasserstoff-so-weit-ist-der-tankstellen-ausbau-fortgeschritten_103561#:~:text=noch%20nicht%20aufgegeben.-,Wie%20viel%20kostet%20ein%20Kilogramm%20Wasserstoff%3F,von%20r und%20100%20km%20zur%C3%BCcklegen.
59. catf.us. Drei potenzielle Vorteile des Wasserstoff-Lkw-Verkehrs - und was nötig ist, um sie zu nutzen: 2. Wasserstoffbetriebene Schwerlastkraftwagen könnten mehr Platz für Ladung haben; 14.032023 [cited 2023 Mar 17].

Available from: URL: <https://www.catf.us/de/2023/03/three-potential-benefits-of-hydrogen-trucking-and-what-it-will-take-to-tap-into-them/>.

60. Clean Air Task Force. Drei potenzielle Vorteile des Wasserstoff-Lkw-Verkehrs - und was nötig ist, um sie zu nutzen; 2023 [cited 2023 Apr 5]. Available from: URL: <https://www.catf.us/de/2023/03/three-potential-benefits-of-hydrogen-trucking-and-what-it-will-take-to-tap-into-them/>.

61. Brockhaus. Wasserstoffantrieb [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/wasserstoffantrieb>.

62. Christiane Köllner. H2-Motor und Brennstoffzellenantrieb im Systemvergleich; 2021 [cited 2023 Jan 14]. Available from: URL: <https://www.springerprofessional.de/wasserstoff/schwere-lkw/h2-motor-und-brennstoffzellenantrieb-im-systemvergleich/19547688>.

63. Rathmann M. Wasserstoff-Offensive: 200 H2-Tankstellen für Lkw [cited 2023 Mar 18]. Available from: URL: <https://www.eurotransport.de/artikel/wasserstoff-offensive-200-h2-tankstellen-fuer-lkw-11203158.html>.

64. Schatzmann M. Wasserstoff-Praxistest: Auf dem Weg zur weissen Fahne: An der Tankstelle. NZZ 2021 [cited 2023 Mar 22]. Available from: URL: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/wasserstoff-in-der-praxis-mit-dem-brennstoffzellen-lkw-unterwegs-ld.1608126>.

65. h2 live. H2 tanken Wasserstoffmobilität beginnt jetzt [cited 2023 Apr 5]. Available from: URL: <https://h2.live/>.

66. H2 Mobility. H2 MOBILITY SERVICES [cited 2023 Apr 8]. Available from: URL: <https://h2-mobility.de/wasserstofftankstellen-projektentwicklung-errichtung-betrieb/#1>.

67. BMDV. BMDV fördert öffentliche Wasserstofftankstellen für Nutzfahrzeuge [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderung-oeffentliche-wasserstofftankstellen-nutzfahrzeuge.html?nn=12830>.

68. elrinklinger. ElringKlinger AG übernimmt Mehrheit am Brennstoffzellen-Spezialisten New Enerday; 2014 [cited 2023 Feb 22]. Available from: URL:

<https://www.elringklinger.de/de/investor-relations/mitteilungen/pressemitteilungen/01-07-2014>.

69. MAN Truck and Bus. Wasserstoff meets Lkw – MAN baut erste Prototypen; 2021 [cited 2023 Feb 24]. Available from: URL: <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/wasserstoff-meets-lkw-man-baut-erste-prototypen.html>.

70. Sterniak a. Bahnbrechender Brennstoffzellen-Lkw mit überraschender Reichweite. In diesem Land geht emissionsfreier Transport an den Start. Lesen Sie mehr unter: <https://trans.info/de/bahnbrechender-brennstoffzellen-lkw-mit-ueberraschender-reichweite-in-dem-alpenland-geht-emissionsfreier-transport-an-den-start-191551> [cited 2023 Feb 15]. Available from: URL: <https://trans.info/de/bahnbrechender-brennstoffzellen-lkw-mit-ueberraschender-reichweite-in-dem-alpenland-geht-emissionsfreier-transport-an-den-start-191551>.

71. Schaal S. Hyundai liefert erste H2-Lkw in die Schweiz; 2020. Available from: URL: <https://www.electrive.net/2020/07/06/hyundai-liefert-erste-h2-lkw-in-die-schweiz/>.

72. Hochwarth D. REWE schickt ersten Wasserstoff-LKW auf die Straße; 2023 [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/logistik/rewe-schickt-ersten-wasserstoff-lkw-auf-die-strasse/>.

73. Ecomento. Hyundai's schwere Wasserstoff-Lkw XCient Fuel Cell legen 5 Millionen Kilometer zurück [cited 2023 Mar 11]. Available from: URL: <https://ecomento.de/2022/10/31/hyundais-schwere-wasserstoff-lkw-xcient-fuel-cell-legen-5-millionen-kilometer-zurueck/>.

74. Hyundai. Hyundai bringt Wasserstoff-Lkw XCIENT Fuel Cell nach Deutschland [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://www.hyundai.news/de/articles/press-releases/hyundai-bringt-wasserstoff-lkw-xcient-fuel-cell-nach-deutschland.html>.

75. Statista Research Department. Anzahl der Lastkraftwagen mit alternativen Antrieben in Deutschland in den Jahren 2020 bis 2022: Lkw-Bestand mit alternativen Antrieben in Deutschland 2022; 2022 [cited 2023 Apr 5]. Available

- from: URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/259803/umfrage/lkw-bestand-mit-alternativen-antrieben-in-deutschland/>.
76. Volvo Trucks. Häufig gestellte Fragen zu elektrisch angetriebenen Lkw: Gesellschaft/Nachhaltigkeit [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/elektro-lkw/faq.html>.
77. Volvo Trucks. Purpose-built electric trucks for demanding jobs: Elektromobilität [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.volvotrucks.de/de-de/news/magazine-online/2023/feb/purpose-built-electric-trucks-for-demanding-jobs.html>.
78. Scania Deutschland. Elektro-Lkw [cited 20.03.2023]. Available from: URL: <https://www.scania.com/de/de/home/products/trucks/battery-electric-truck.html#:~:text=Elektro%2D%E2%80%8BLkw%20von%20Scania&text=Der%20vollkommen%20elektrische%20Nebenantrieb%20erm%C3%B6glicht,mittellange%20Routen%20100%20%25%20elektrisch%20bew%C3%A4ltigen>.
79. Scania Deutschland. Elektro-Lkw: Energie-ge-laden in den regio-nalen Trans-port [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.scania.com/de/de/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>.
80. Volvo Trucks. Volvo FH Electric: Der Volvo FH Electric. [cited 2023 Mar 22]. Available from: URL: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-electric.html>.
81. emobilität.online. Volvo FE Electric für Münchener Müllentsorger; 2020 [cited 2023 Mar 5]. Available from: URL: <https://emobilitaet.online/news/produkte-und-dienstleistungen/7032-volvo-fe-electric-abfallwirtschaftsbetrieb-muenchen-elektrofahrzeug>.
82. abendzeitung-muenchen. Münchens erstes E-Müllauto in Dienst gestellt 2020 [cited 2023 Mar 3]. Available from: URL: <https://www.abendzeitung-muenchen.de/muenchen/muenchens-erstes-e-muellauto-in-dienst-gestellt-art-686032>.

83. Manfred Nelles. Erster Volvo FE Electric für München. 2020 [cited 2023 Mar 18]. Available from: URL: <https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2020/nov/erster-elektro-lkw-volvo-fe-electric-fuer-muenchen.html>.
84. Domenico Sciurti. IAA Transportation: Die wichtigsten E-Lkw-Premieren im Überblick; 2022 [cited 2023 Mar 18]. Available from: URL: <https://www.electrive.net/2022/09/27/iaa-transportation-die-wichtigsten-e-lkw-premierer-im-ueberblick/>.
85. Leicht L. Elektro-Kipplaster für die Langstrecke; 2022 [cited 2023 Mar 14]. Available from: URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/mercedes-e-actros-long-haul-elektro-lkw-fuer-den-fernverkehr/#:~:text=M%C3%B6glich%20und%20vor%20allem%20attraktiv,und%20400%20kW%20Dauerleistung%20liefern.>
86. Schaal S. DB Schenker will auf Mercedes eActros LongHaul setzen [cited 2023 Apr 10]. Available from: URL: <https://www.electrive.net/2023/04/03/db-schenker-will-auf-mercedes-eactros-longhaul-setzen/>.
87. Schaal S. DB Schenker will auf Mercedes eActros LongHaul setzen [cited 2023 Apr 10]. Available from: URL: <https://www.electrive.net/2023/04/03/db-schenker-will-auf-mercedes-eactros-longhaul-setzen/>.
88. Mercedes-Benz-Trucks. EMOBILITÄT AUF DER IAA.: Unsere Highlights auf der IAA Transportation 2022 [cited 0204.2023]. Available from: URL: https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/brand/actions-and-events/iaa-2022/iaa2022-bev.html#content/headline_1927821295.
89. MAN Deutschland. WILLKOMMEN IN DER ÄRA DER eTRUCKS [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://www.man.eu/de/de/lkw/emobilitaet-im-truck/emobilitaet-im-truck.html#:~:text=Der%20MAN%20eTGM%20verf%C3%BCgt%20%C3%BCber,alle%20Anforderungen%20im%20praktischen%20Einsatz.>
90. MAN Deutschland. [Duplikat] WILLKOMMEN IN DER ÄRA DER eTRUCKS [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://www.man.eu/de/de/lkw/emobilitaet-im-truck/emobilitaet-im-truck.html#:~:text=Der%20MAN%20eTGM%20verf%C3%BCgt%20%C3%BCber,alle%20Anforderungen%20im%20praktischen%20Einsatz.>

91. MAN Deutschland. WILLKOMMEN IN DER ÄRA DER eTRUCKS [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://www.man.eu/de/de/lkw/emobilitaet-im-truck/emobilitaet-im-truck.html#:~:text=Der%20MAN%20eTGM%20verf%C3%BCgt%20%C3%BCber,alle%20Anforderungen%20im%20praktischen%20Einsatz.>
92. Toyota. Elektro-Lkw: Seit 2019 rollen erste Elektro-LKW mit Stromabnehmer [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.toyota.de/entdecke-toyota/ratgeber/elektro-lkw.>
93. Neißendorfer M. Volvo Trucks verkauft ab 2021 komplette Elektro-Lkw-Modellpalette auf europäischem Markt; 2020 [cited 10.03023]. Available from: URL: <https://www.elektroauto-news.net/2020/volvo-trucks-verkauft-ab-2021-komplette-elektro-lkw-modellpalette-europa.>
94. Schaal S. Iveco und Nikola eröffnen E-Lkw-Fertigung in Ulm; 2021 [cited 2023 Feb 10]. Available from: URL: [https://www.electrive.net/2021/09/15/iveco-und-nikola-eroeffnen-e-lkw-fertigung-in-ulm/.](https://www.electrive.net/2021/09/15/iveco-und-nikola-eroeffnen-e-lkw-fertigung-in-ulm/)
95. Bundesamt für Logistik und Mobilität. FAQ zum Fördergegenstand Klimaschonende Nutzfahrzeuge (KsN) im Förderprogramm KsNI: Wie hoch ist der Zuschuss? [cited 2023 Apr 5]. [Seite 10] Available from: URL: https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Foerderprogramme/KsNI/2_Foerderaeruf/KsNI_FAQ_Foedergegenstand_KsN.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
96. Handelswerkskammer Wiesbaden. Der Weg zum Klimaziel: Förderprogramm startet [cited 2023 Mar 14]. Available from: URL: <https://www.hwk-wiesbaden.de/artikel/foerderprogramm-startet-44,0,3864.html.>
97. Peter Kasten, Lukas Minnich, Joelle Randrianarisoa, David Ritter. Szenarien und regulatorische Herausforderungen für den Aufbau der Ladeinfrastruktur für elektrische Pkw und Lkw. Berlin; 2022 Jul 22 [cited 2023 Apr 1]. Available from: URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/ENSURE-II_Ladeinfrastruktur.pdf. [Seite 25]

98. traton. TRATON GROUP, Daimler Truck und Volvo Group geben Startschuss für Joint-Venture für europäisches Hochleistungs-Ladenetz. Available from: URL: <https://traton.com/de/newsroom/pressemitteilungen/traton-group-daimler-truck-volvo-group-geben-startschuss-fuer-joint-venture-fuer-europaeisches-hochleistungs-ladenetz.html>.
99. EnBW. Mehr E-Mobilität im Lastverkehr: Lkw-Ladestationen; 2022 [cited 2023 Mar 17]. Available from: URL: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/e-lkw-ladestationen.html>.
100. WEDOLO. e-Highway: Oberleitungs-Lkw im Test [cited 2023 Apr 5]. Available from: URL: <https://www.wedolo.de/blog/e-highway-oberleitungs-lkw-im-test>.
101. Köllner C. Pro und Contra Oberleitungs-Lkw; 2020 [cited 2023 Mar 22]. Available from: URL: <https://www.springerprofessional.de/schwere-lkw/emissionen/pro-und-contra-oberleitungs-lkw/17781332>.
102. Köllner C. Pro und Contra Oberleitungs-Lkw; 2020 [cited 2023 Apr 6]. Available from: URL: <https://www.springerprofessional.de/schwere-lkw/emissionen/pro-und-contra-oberleitungs-lkw/17781332>.
103. infineon. Chancen und Möglichkeiten durch E-Nutzfahrzeuge: Herausforderung Langstrecken-Lkw; 2021 [cited 2023 Mar 19]. Available from: URL: <https://www.infineon.com/cms/de/discoveries/elektro-nutzfahrzeuge/>.
104. WEDOLO. e-Highway: Oberleitungs-Lkw im Test [cited 2023 Apr 5]. Available from: URL: <https://www.wedolo.de/blog/e-highway-oberleitungs-lkw-im-test>.
105. Reichel J. Conti und Siemens kooperieren für eHighway-Stromabnehmer; 2021 [cited 2023 Mar 24]. Available from: URL: <https://vision-mobility.de/news/conti-und-siemens-kooperieren-fuer-ehighway-stromabnehmer-92433.html>.
106. Bundesanstalt für Straßenwesen. Oberleitungs-Lkw: Pilotstrecken zum e-Highway [cited 2023 Mar 21]. Available from: URL: <https://www.bast.de/Forschungsplanung/DE/Mobilitaet/Beitr%C3%A4ge/Lkw.html>.

107. Siemens Mobility. eHighway: Infrastruktur für dynamisches Laden [cited 2023 Mar 18]. Available from: URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/strasse/ehighway.html>.
108. Siemens. Infrastruktur für dynamisches Laden [cited 2023 Mar 22]. Available from: URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/strasse/ehighway.html>.
109. Volvo Trucks. I-Shift-Getriebetechnologie von Volvo Trucks ist nach 20 Jahren immer noch bahnbrechende Innovation; 2021 [cited 2023 Mar 12]. Available from: URL: <https://www.volvotrucks.at/de-at/news/press-releases/2021/mar/i-shift-getriebetechnologie-nach-20-jahren-immer-noch-bahnbrechende-innovation.html>.
110. fahrschule-online. Mercedes-Benz: Start-Stopp im Lkw kommt gut an; 2009 [cited 2023 Mar 17]. Available from: URL: <https://www.fahrschule-online.de/nachrichten/mercedes-benz-start-stopp-im-lkw-kommt-gut-an-2607981>.
111. Wittenbrink P. Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler; 2014. (Lehrbuch).;[Tabelle 7.9]
112. Lenz Barbara, Lischke Andreas, Gunnar Knitschky, Jörg Adolf, Felix Balthasar. Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Hamburg; 2010 [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: https://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/shell_lkw_studie/shell_truck_study_2030.pdf.;[Seite 26]
113. Michelin. MICHELIN X® LINE™ ENERGY: GRÜNDE FÜR DIESEN REIFEN [cited 2023 Mar 17]. Available from: URL: <https://business.michelin.de/reifen/michelin-x-line-energy-f-z-d-t-22-5>.
114. Stefan Rodt BG. CO2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Umweltbundesamt [cited 2023 Oct 10]. Available from: URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf>.;[Seite 53]

115. CargoCap. Was ist CargoCap?; 2023. Available from: URL: <http://www.cargocap.de/content/was-ist-cargocap>.
116. visaplan. CargoCap Informationsfilm: Visualisierung einer Revolution im Transportwesen [cited 2023 Mar 3]. Available from: URL: <http://www.visaplan.com/cargocap-informationsfilm>.
117. CargoCap. CargoCap-Technik [cited 2023 Apr 2]. Available from: URL: <http://www.cargocap.de/content/technik>.
118. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Cargo Cap [cited 2023 Apr 3]. Available from: URL: <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Smart-City-Navigator/Video/cargo-cap/cargo-cap.html>.
119. Erl J. SAE und ISO passen Stufen des autonomen Fahrens an; 2021 [cited 2023 Apr 10]. Available from: URL: <https://the-decoder.de/sae-und-iso-passen-stufen-des-autonomen-fahrens-an/>.
120. Jeffery A. Digitalisierung in der Transportlogistik: Herausforderungen und Potenziale: Fahrerlos und autonom: Die Lkw-Flotten der Zukunft; 2022 [cited 2023 Mar 28]. Available from: URL: <https://knowhow.distrelec.com/de/transportwesen/digitalisierung-in-der-transportlogistik-herausforderungen-und-potenziale/>.
121. Hoberg F. Autonome Lkw: Sind sie die Rettung für den Fahrermangel?; 2022 [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/autonome-lkw/>.
122. Hoffmann J. Atlas-L4-Projekt mit MAN: Autonome Lkw ab 2025 [cited 2023 Apr 2]. Available from: URL: <https://www.eurotransport.de/artikel/atlas-l4-projekt-mit-man-autonome-lkw-ab-2025-11203182.html>.
123. atlas-l4. ATLAS-L4: Förderprojekt für autonome Trucks [cited 2023 Apr 10]. Available from: URL: <https://www.atlas-l4.com/>.
124. Fraunhofer Aisec. Förderprojekt ATLAS-L4: Fahrerlos von Hub zu Hub; 2022 [cited 2023 Apr 10]. Available from: URL: <https://www.aisec.fraunhofer.de/de/presse-und->

veranstaltungen/pressemitteilungen/2022/foerderprojekt-atlas-l4--fahrerlos-von-hub-zu-hub.html.

125. anit.digital. ANITA: Autonome Innovation im Terminal Ablauf [cited 2023 Apr 7]. Available from: URL: <https://www.anita.digital/index.html>.

126. MAN Truck and Bus. TERMINAL 4.0: TESTLAUF MIT AUTOMATISIERTEM LKW; 2021 [cited 2023 Mar 26]. Available from: URL: <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/terminal-40-testlauf-mit-automatisiertem-lkw.html>.

127. Reichel J. MAN ANITA: Autonome Terminal-Truck als Schlüssel der Verkehrswende; 2022 [cited 2023 Mar 30]. Available from: URL: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-man-anita-autonomer-terminal-truck-als-schluessel-der-verkehrswende-162023.html#:~:text=Das%20Projekt%20%E2%80%9EAutonome%20Innovation%20im,flexibler%20und%20effizienter%20zu%20gestalten>.

128. Reichel J. MAN ANITA: Autonome Terminal-Truck als Schlüssel der Verkehrswende: Software und Sensorik als Schlüssel; 2022 [cited 2023 Apr 1]. Available from: URL: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-man-anita-autonomer-terminal-truck-als-schluessel-der-verkehrswende-162023.html#:~:text=Das%20Projekt%20%E2%80%9EAutonome%20Innovation%20im,flexibler%20und%20effizienter%20zu%20gestalten>.

129. MAN Truck and Bus. TERMINAL 4.0: TESTLAUF MIT AUTOMATISIERTEM LKW: 2/7 360-Grad Blick; 2021 [cited 2023 Mar 26]. Available from: URL: <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/terminal-40-testlauf-mit-automatisiertem-lkw.html>.

130. DB Cargo. Forschungsprojekt ANITA geht bei der Erprobung von automatisierter Containerlogistik in nächste Phase.: Auf dem Weg zum Terminal 4.0 [cited 2023 Apr 3]. Available from: URL: <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/logistik-news/auf-dem-Weg-zum-terminal-4-0-anita-7694354>.

131. Wittenbrink P. Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe.[Seite 342]

132. Wittenbrink P. Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe.;[Tabelle 7.11]
133. Forschungs-Informationssystem. Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien; 2023 [cited 2023 Mar 27]. Available from: URL: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/>.
134. Wittenbrink P. Transportmanagement: Vermindern.[Seite 342]
135. KBA. Inlandsverkehr 2021: Zahlen, Daten, Fakten [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_Inlandsverkehr/vd_inlandsverkehr_node.html.
136. Timocom. Warum Leerfahrten heute nicht mehr sein müssen: Kurzfristig Aufträge für Rücktouren finden [cited 2023 Mar 15]. Available from: URL: <https://www.timocom.de/blog/co2-leerfahrten-vermeiden-kosten-sparen-230958>.
137. Timocom. Warum Leerfahrten heute nicht mehr sein müssen; 2020 [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.timocom.de/blog/co2-leerfahrten-vermeiden-kosten-sparen-230958>.
138. chep. WEPA reduziert Leerkilometer und CO2-Emissionen dank der Collaborative Transportation Solutions von CHEP: Transportkollaborationen helfen, Lieferketten zu dekarbonisieren [cited 2023 Feb 18]. Available from: URL: <https://www.chep.com/de/de/wepa-reduziert-leerkilometer-und-co2-emissionen-dank-der-collaborative-transportation-solutions-von>.
139. chep. WEPA reduziert Leerkilometer und CO2-Emissionen dank der Collaborative Transportation Solutions von CHEP; 2022 [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.chep.com/ch/de/wepa-reduziert-leerkilometer-und-co2-emissionen-dank-der-collaborative-transportation-solutions-von>.
140. Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. Lang-LKW [cited 2023 Mar 9]. Available from: URL: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/mobilitaet-verkehr/lkw/lang-lkw/>.
141. Timocom. Was ist ein Lkw-Routenplaner und welche Vorteile bietet er? [cited 2023 Mar 14]. Available from: URL: <https://www.timocom.de/smart->

150. Kraftfahrzeugsteuergesetz 2002 (KraftStG 2002) § 3 Ausnahmen von der Besteuerung: § 3 9 Ausnahmen von der Besteuerung Artikel 9b [cited 2023 Apr 2]. Available from: URL: http://www.gesetze-im-internet.de/kraftstg/_3.html.

151. Bussgeldkatalog. Kombiniertes Verkehr: auf Straße und Schiene ans Ziel: Kombiniertes Verkehr: Vorteile für Verkehr, Wirtschaft und Umwelt; 2023 [cited 2023 Apr 3]. Available from: URL: <https://www.bussgeldkatalog.org/kombinierter-verkehr/>.

152. IVECO. Die Zukunft der Mobilität gemeinsam gestalten: Nikola TRE - der erste Schritt zum Brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeug [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://magazin.iveco.de/ivecoyou/1-2020/cnh-industrial-nikola-motor-uhl>.

153. IVECO. Nikola Tre: eine einzigartige modulare Plattform für Batterie- und Brennstoffzelle [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/iaa-2022-iveco-und-nikola-pr%C3%A4sentieren-europ%C3%A4ische-version-der-batterieelektrischen-sattelzugmaschine-nikola-tre-bev.aspx#:~:text=Die%20Nikola%20Tre%20BEV%204x2,bis%20zu%20500%20Kilometern%20erm%C3%B6glichen>.

154. IVECO. EUROPÄISCHE VERSION DER BATTERIEELEKTRISCHEN SATTELZUGMASCHINE NIKOLA TRE BEV: Nikola Tre BEV: lokal emissionsfreier Regionalverkehr ist Realität [cited 2023 Mar 10]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/iaa-2022-iveco-und-nikola-pr%C3%A4sentieren-europ%C3%A4ische-version-der-batterieelektrischen-sattelzugmaschine-nikola-tre-bev.aspx#:~:text=Die%20Nikola%20Tre%20BEV%204x2,bis%20zu%20500%20Kilometern%20erm%C3%B6glichen>.

155. Europäische Version der batterieelektrischen Sattelzugmaschine Nikola Tre BEV. IAA TRANSPORTATION 2022: IVECO und Nikola präsentieren europäische Version der batterieelektrischen Sattelzugmaschine Nikola Tre BEV; 2022 [cited 2023 Mar 26]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/iaa-2022-iveco-und-nikola-pr%C3%A4sentieren-europ%C3%A4ische-version-der-batterieelektrischen-sattelzugmaschine-nikola-tre-bev.aspx>.

156. Knoll S. Nikola zeigt den Tre FCEV Lesen Sie mehr unter: <https://trans.info/de/nikola-iaa-305732>; 2022 [cited 2023 Mar 19]. Available from: URL: <https://trans.info/de/nikola-iaa-305732>.

157. Schuhmacher S. Iveco und Nikola stellen neuen E-Truck vor; 2022 [cited 2023 Mar 17]. Available from: URL: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/nfz-fuhrpark/iveco-und-nikola-stellen-neuen-e-truck-vor-3234757>.

158. IVECO. EUROPÄISCHE VERSION DER BATTERIEELEKTRISCHEN SATTELZUGMASCHINE NIKOLA TRE BEV: Nikola Tre FCEV: Ausblick auf den elektrischen Antrieb für den Fernverkehr [cited 2023 Mar 14]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/iaa-2022-iveco-und-nikola-pr%C3%A4sentieren-europ%C3%A4ische-version-der-batterieelektrischen-sattelzugmaschine-nikola-tre-bev.aspx#:~:text=Die%20Nikola%20Tre%20BEV%204x2,bis%20zu%20500%20Kilometern%20erm%C3%B6glichen>.

159. Europäische Version der batterieelektrischen Sattelzugmaschine Nikola Tre BEV. IAA TRANSPORTATION 2022: IVECO und Nikola präsentieren europäische Version der batterieelektrischen Sattelzugmaschine Nikola Tre BEV; 2022 [cited 2023 Mar 26]. Available from: URL: <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/iaa-2022-iveco-und-nikola-pr%C3%A4sentieren-europ%C3%A4ische-version-der-batterieelektrischen-sattelzugmaschine-nikola-tre-bev.aspx>.

160. Nebenwerte. NIKOLA ist derzeit einfach weiter als Daimler Trucks und andere. 100 Brennstoffzellen-LKW in Deutschland verkauft. Produktion in Ulm.; 2023 [cited 2023 Mar 28]. Available from: URL: <https://www.nebenwerte-magazin.com/nikola-ist-derzeit-einfach-weiter-als-daimler-trucks-und-andere-100-brennstoffzellen-lkw-in-deutschland-verkauft-produktion-in-ulm/>.

161. dena. LNG-Taskforce und Initiative Erdgasmobilität: Das ist die Herausforderung: [cited 2023 Mar 28]. Available from: URL: <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/Ing-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet>.

162. mecalux. Die Auswirkungen von elektrischen Lkw auf die Logistik: Anwendungen von elektrischen Lkw in der Logistik; 2022 [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.mecalux.de/blog/elektrischer-lkw>.

163. mecalux. Die Auswirkungen von elektrischen Lkw auf die Logistik: Anwendungen von elektrischen Lkw in der Logistik; 2022 [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.mecalux.de/blog/elektrischer-lkw>.

164. carboncare. Transport und Logistik in der Verantwortung [cited 2023 Mar 25]. Available from: URL: <https://www.carboncare.org/klima-wandel.html>.

165. unfccc. The Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change and Call to Action; 2015 [cited 2023 Apr 10]. Available from: URL: <https://unfccc.int/news/the-paris-declaration-on-electro-mobility-and-climate-change-and-call-to-action#:~:text=The%20Paris%20Declaration%20on%20Electro%2DMobility%20and%20Climate%20Change%20%26%20Call,%2Dthan%202%2Ddegree%20pathway>.