



Lehrstuhl für Industrielogistik

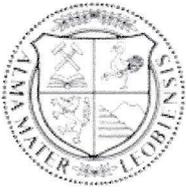
Masterarbeit



Dekarbonisierung des
Straßengüterverkehrs in Österreich:
Systematische Analyse einer zukünftigen
Flottenzusammensetzung

Nadine Olipp, BSc

April 2023



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 20.04.2023

Olipp Nadine

Unterschrift Verfasser/in

Nadine Olipp

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, welche mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Philipp Miklautsch und Herrn Priv.-Doz. Dr. Manuel Woschank, die diese Arbeit betreut haben. Ich bedanke mich für die fachliche und organisatorische Unterstützung.

Ich bedanke mich ebenfalls bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Helmut Zsifkovits für die Ermöglichung des Verfassens dieser Arbeit am Lehrstuhl Industrielogistik.

Kurzfassung

Die Folgen des Klimawandels sind bereits bemerkbar. Immer mehr Menschen setzen sich für den Klimaschutz ein und in der Politik rückt der Klimaschutz in den Fokus der Regierungsaktivitäten. Für eine ganzheitliche Dekarbonisierung ist es wesentlich, dass sich Unternehmen - unter anderem im Transportwesen - mit dem Thema auseinandersetzen. Um die Einhaltung der Klimaziele der EU zu gewährleisten, stehen viele Transportunternehmen vor einer großen Herausforderung. Der Verkehrssektor und vor allem der Schwerlastgüterverkehr stellen einen Bereich dar, indem Verbesserungen, in Bezug auf CO₂-Emissionen, schwierig zu erzielen sind. Beispielsweise ist in Österreich die Straße der hauptsächlichste Transportweg für den Güterverkehr. Eine Möglichkeit für eine Reduzierung der Treibhausgase (THG) für Schwerlastfahrzeuge bietet der Einsatz von alternativen Technologien und Energieträgern. Für eine Umsetzung und Einführung von alternativen Energieträgern im Schwerlastverkehr bis zu den Jahren 2030 und 2050 braucht es einerseits konkrete Gesetzesvorgaben und andererseits auch Vorzeigeunternehmen, die Strategien für eine Umsetzung ihrer Flotte ausarbeiten und umsetzen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Empfehlung für eine zukünftige Flottenzusammensetzung für die Jahre 2030 und 2050 für Österreich abzugeben. Deshalb wird im ersten Schritt die Struktur des Straßengüterverkehrs betrachtet und welche Möglichkeiten zur Dekarbonisierung im Güterverkehr zielführend sind. Eine systematische Literaturrecherche wird in der Datenbank Scopus durchgeführt, um den aktuellen Stand der Literatur zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs zu untersuchen. Durch das Analysieren der Titel und Abstracts und das Anwenden der Ein- und Ausschlusskriterien konnten für das Forschungsthema relevante Studien identifiziert werden. Darauffolgend werden anhand der systematischen Literaturrecherche unterschiedliche Szenarien für die Ausbreitung alternativer Antriebstechnologien und Energieträger Europas analysiert. Infolgedessen werden die Szenarien kritisch auf ihre Aussagekraft für Österreich gefiltert. Dadurch können für die österreichische Gesetzgebung, Forschungslandschaft sowie Transportbranche Handlungsempfehlungen bezüglich der Fahrzeugflotte der Jahre 2030 und 2050 abgegeben werden.

Abstract

The consequences of climate change are already noticeable. More and more people are campaigning for climate protection and in politics, climate protection is moving into the focus of government activities. For holistic decarbonization, it is essential that companies in the transportation sector, among others, address the issue. To ensure compliance with the EU's climate targets, many transport companies face a major challenge. The transport sector and especially heavy goods transport is an area where improvements in CO₂ emissions are difficult to achieve. In Austria, for example, the road is the main mode of transport for freight traffic. One possibility for a reduction of greenhouse gases (GHG) for heavy-duty vehicles is the use of alternative technologies and energy sources. For the implementation and introduction of alternative energy sources in heavy-duty transport by the years 2030 and 2050, concrete legislative requirements are needed on the one hand and on the other hand also showcase companies that develop and implement strategies for the implementation of their fleet.

This work aims to make a recommendation for a future fleet composition for the years 2030 and 2050 for Austria. Therefore, in the first step, the structure of road freight transport is considered and which possibilities for decarbonization in freight transport are target-oriented. A systematic literature search is conducted in the Scopus database to investigate the current state of the literature on the decarbonization of road freight transport. By analyzing the titles and abstracts and applying the inclusion and exclusion criteria, relevant studies were identified for the research topic. Subsequently, the systematic literature review is used to analyze different scenarios for the spread of alternative propulsion technologies and energy sources in Europe. As a result, the scenarios are critically filtered for their informative value for Austria. Thereby, recommendations for the Austrian legislation, research landscape, and transport industry regarding the vehicle fleet of the years 2030 and 2050 can be given.

Inhaltsverzeichnis

Gleichheitsgrundsatz.....	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung.....	12
1.1 Abgrenzung des Untersuchungsobjektes	13
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	14
1.3 Aufbau der Arbeit	14
2 Struktur des europäischen Straßengüterverkehrs.....	17
2.1 Darstellung des Straßengüterverkehrs.....	17
2.2 Transportintensive Branchen in Österreich	22
2.2.1 Eigenschaften der Speditionsbranche	24
2.2.2 Zusätzliche Parteien neben der Spedition.....	25
2.3 Marktstruktur.....	27
2.4 Einfluss von Krisen auf den Transport	28
3 Theoretische Grundlagen von Dekarbonisierung im Güterverkehr	31
3.1 Relevanz der Dekarbonisierung im Güterverkehr.....	31
3.2 Strategien zur Dekarbonisierung des Verkehrs.....	33
3.3 Alternative Antriebstechnologien für Schwerlastfahrzeuge	35
3.3.1 Elektroantrieb.....	37
3.3.2 Verbrennungsmotor	41
3.3.3 Hybrid.....	41
3.4 Alternative Energieträger für Schwerlastfahrzeuge	42

3.4.1	Dieselmkraftstoff	43
3.4.2	Biokraftstoffe	43
3.4.3	LNG	44
3.4.4	Synthetische Kraftstoffe	45
3.4.5	Wasserstoff	47
3.4.6	Elektrizität	48
3.5	Barrieren und Motivatoren für den aktuellen Einsatz alternativer Optionen für Transportunternehmen	49
3.6	Maßnahmen der Verkehrspolitik in der EU	52
3.7	Maßnahmen der Politik in Österreich	54
3.7.1	CO ₂ -Bepreisung	55
3.7.2	Kraftfahrzeugsteuer	56
3.7.3	Novelle der Kraftstoffverordnung	56
3.7.4	Maut	56
4	Methodik der systematischen Literaturrecherche	58
4.1	Explorative Recherche zur Vorbereitung auf die systematische Literaturrecherche	58
4.2	Durchführung der systematischen Literaturrecherche	59
4.3	Analyse der gefundenen Literatur	63
4.3.1	Deskriptive Analyse	63
4.3.2	Inhaltliche Analyse	66
5	Bezug zu Österreich	81
5.1	Methodische Vorgehensweise	81
5.2	Zusammenfassung der Strategiepapire	82
5.3	Filterkriterien	84
5.4	Ergebnisse	86
6	Conclusion	92
6.1	Handlungsempfehlungen	92

6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse	94
6.3	Diskussion	95
	Literaturverzeichnis	98
	Anhang.....	109

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen 2021	23
Tabelle 2: Mögliche Technologien für Schwerlastfahrzeuge.....	36
Tabelle 3: Suchstring	61
Tabelle 4: Ein- und Ausschlusskriterien	62
Tabelle 5: Cluster-Szenarien.....	73
Tabelle 6: Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe	74
Tabelle 7: Energieträger-Strategiepapier	84
Tabelle 8: Anhang: PRISMA Checkliste	109
Tabelle 9: Anhang: Cluster-Szenarien	111
Tabelle 10: Anhang: Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe.....	112
Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	16
Abbildung 2: Klassifikation des Güterverkehrssystems	18
Abbildung 3: Modal Split.....	19
Abbildung 4: Gütertransporteure und Spediteure in Österreich nach Umsatz 2020/2021	24
Abbildung 5: Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in Österreich von 1990 bis 2020.....	33
Abbildung 6: Dynamische Energieversorgung (von links: Oberleitung, Stromschiene und Induktion)	38
Abbildung 7: SLR-Vorgehensweise	60
Abbildung 8: PRISMA Selektionsprozess	63
Abbildung 9: Studien pro Dokumententyp	64
Abbildung 10: Studien pro Jahr	64
Abbildung 11: Geografische Lage der Studien.....	65
Abbildung 12: Studien pro Herausgeber/Zeitschrift	66
Abbildung 13: Anteil Neuzulassungen 2030	75
Abbildung 14: Anteil Neuzulassungen 2050	76
Abbildung 15: Energiebedarf 2030.....	77

Abbildung 16: Energiebedarf 2050.....	78
Abbildung 17: Energieverbrauch 2030	79
Abbildung 18: Energieverbrauch 2050	79
Abbildung 19: Methodische Vorgehensweise.....	82
Abbildung 20: NZES 2030 und 2050.....	86
Abbildung 21: STPS 2030 und 2050	87
Abbildung 22: NZES 2030 Boxplot.....	89
Abbildung 23: NZES 2050 Boxplot.....	90

Abkürzungsverzeichnis

ASI	Avoid, Shift, Improve
BEV	Battery electric vehicle
CBG	Compressed biogas
CCS	Carbon Capture and Storage
CNG	Compressed natural gas
DME	Dimethylether
ERS	Electric road system
FAME	Fettsäuremethylester
FCEV	Fuel cell electric vehicle
GHG	Greenhouse gases
HEV	Hybrid electric vehicle
HFT	Schwerlastkraftwagen
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
ICE	Internal combustion engine
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change-Bericht
Ktoe	Kilotonne Öleinheit
LBG	Liquid biogas
LCV	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied natural gas
MFT	Mittelschwere Nutzfahrzeuge
Mt CO ₂ e	Megatonne CO ₂ Äquivalent
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PtL	Power -to-Liquids
SLR	Systematic Literature Review (Systematische Literaturrecherche)

THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
Tkm	Tausend Kilometer

1 Einleitung

Laut dem aktuellen Weltklimabericht des IPCC lag die Oberflächentemperatur der Erde im Zeitraum 2011-2020 um etwa 1,1°C über dem Wert von 1850-1990. Die beobachtete Erwärmung ist vom Menschen verursacht, wobei die Erwärmung durch die Treibhausgase (THG) CO₂ und CH₄ teilweise durch die Abkühlung von Aerosolen überdeckt wird. Der Klimawandel ist die Folge von mehr als einem Jahrhundert THG-Emissionen aus der Nutzung von Energie, Flächen, dem Lebensstil und dem Konsumverhalten. Beispielsweise stammt ein Teil der CO₂-Emissionen aus der Entwaldung. Die derzeitige Reduzierung von CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und industriellen Prozessen durch beispielsweise Verbesserungen der Kohlenstoffintensität der Energie, ist geringer als der Anstieg an Emissionen wegen der weltweit steigenden Aktivitäten von Verkehr, Industrie und der Energieversorgung. Bemerkbar macht sich der Klimawandel vor allem durch die Wetter- und Klimaextreme in allen Gebieten der Welt.¹ Beispielsweise ist in Österreich eine deutliche Erwärmung durch die schmelzenden Gletscher- und Permafrostflächen, Dürreperioden aber auch Unwettern mit Überflutungen in Folge von Starkregen zu erkennen.²

Parallelen bestehen zwischen dem Klimawandel und der Corona-Pandemie. Es handelt sich bei einer Pandemie als auch bei einem Klimawandel um einen physischen Schock. Die Pandemie hat der Bevölkerung bereits einen Vorgeschmack gegeben, was eine ausgewachsene Klimakrise in Bezug auf exogene Schocks für Angebot und Nachfrage, Unterbrechung der Versorgungsketten und globale Übertragungs- und Verstärkungsmechanismen mit sich bringen könnte. Dennoch gibt es Unterschiede zwischen Klimawandel und Pandemien. Pandemien können Wochen, Monate und Jahre andauern. Hingegen sind Klimagefahren auf globaler Ebene eher träge und müssen in einer Zeitspanne von bis zu mehreren Jahrhunderten betrachtet werden. Daraus lässt sich schließen, dass der Eintritt einer Klimakrise, viel länger anhält und schwerwiegende Folgen mit sich bringt.³

Obwohl sich während der Pandemie die lokalen Schadstoffe reduziert haben, stiegen die CO₂-Werte weiter an. Aus diesem Grund ist eine gezielte und direkte Politik, zur

¹Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), S. 6ff.

²Vgl. Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/klima/klimawandel> (Zugriff: 23.03.2023).

³Vgl. Pinner, D. et al. (2020), <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/addressing-climate-change-in-a-post-pandemic-world#/> (Zugriff: 23.03.2023).

Reduzierung der THG-Emissionen dringend erforderlich.⁴ Das eine umweltfreundliche Ausrichtung möglich ist, wird von der EU mit dem Klimapaket „Fit for 55“ gezeigt, dass einen wesentlichen Schritt zur Erreichung des Klimaziels der EU beitragen kann.⁵

1.1 Abgrenzung des Untersuchungsobjektes

Um mehr zum Klimaschutz beizutragen, braucht es in allen Sektoren Gesetzesvorschriften und private Initiativen, in denen eine Verbesserung in Richtung Klimaneutralität vorgenommen wird. Hierbei stellt der Verkehrssektor einen wesentlichen Handlungspunkt zur THG-Reduzierung dar. Denn, um die Klimaziele zu erreichen, ist eine klimaneutrale Transformation des Verkehrssektors erforderlich.⁶ Vor allem in Österreich hat sich das Transportaufkommen im Straßengüterverkehr in den letzten Jahren erhöht. Der Straßengüterverkehr stellt neben dem Schienenverkehr, Luftverkehr und der Schifffahrt die Mehrheit am Transportaufkommen dar.⁷ Dadurch ergibt sich auch eine Erhöhung der Emissionen.⁸ Aus diesem Grund ist es auch wesentlich, Möglichkeiten im Straßengüterverkehr zu analysieren, die zu einer CO₂-Reduzierung in diesem Bereich beitragen können. Eine Möglichkeit stellt die Vermeidungs-, Verlagerungs- und Verbesserungsstrategie dar.⁹ Da die Literatur im Straßengüterverkehr die Möglichkeit alternativer und effizienter Antriebstechnologien in den Fokus stellt, liegt das Augenmerk in dieser Arbeit auf dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen und Technologien für den Schwerlastverkehr. Folgend sind Transportunternehmen großen Herausforderungen für die Jahre 2030 und 2050 gegenübergestellt, damit die Klimaziele erreicht werden können.

Aktuell ist sich die Politik und Wissenschaft noch uneinig über die schlussendliche Antriebstechnologie oder die bestmögliche Kombination von Antriebstechnologien für Schwerlastfahrzeuge. Zudem gibt es keine klare Weichenstellung und keinen deutlichen Fokus der Investitionen auf die Entwicklung alternativer, klimaschonender und energieeffizienter Antriebe und Kraftstoffe, weshalb diese noch nicht wettbewerbsfähig sind. Da österreichische Transportunternehmen von der Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr betroffen sind, wird in dieser Arbeit auf die

⁴Vgl. Chiamonti, D.; Talluri, G. (2021), S. 4.

⁵Vgl. Europäischer Rat, <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (Zugriff: 23.03.2023).

⁶Vgl. Albrecht, F. G.; Nguyen, T. V. (2020), S. 1.

⁷Vgl. WKO (2022), S. 37.

⁸Vgl. Zechmeister, A. et al. (2022 b), S. 5.

⁹Vgl. Zhu, Y. et al. (2023), S. 1.

Transportbranche eingegangen und Handlungsempfehlungen werden für alternative Energieträger und Technologien für die Jahre 2030 und 2050 abgegeben.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Für diese Arbeit gilt es nun, verschiedene Szenarien von unterschiedlichen Autoren zu alternativen Energieträgern und Antrieben für die Jahre 2030 und 2050 im Schwerlastverkehr zu analysieren und deren Ergebnisse zu synthetisieren. Daraus sollen eine klarere Richtung des Einsatzes alternativer Kraftstoffe und Technologien für Schwerlastfahrzeuge aufgezeigt werden und somit Handlungsempfehlungen für die Zukunft von österreichischen Transportunternehmen abgeleitet werden.

Ein wünschenswertes Ergebnis dieser Arbeit wäre, eine klar definierte alternative Antriebstechnologie für die Jahre 2030 und 2050 zu erhalten. Da dieses Ziel voraussichtlich nicht so eindeutig erreichbar ist, werden folgende Forschungsfragen definiert:

- Welche verschiedenen Entwicklungspfade alternativer Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr werden in der Literatur vorgestellt?
- Welchen Pfad schlägt die österreichische Transportbranche aus heutiger Sicht ein und was bedeutet dies für die zukünftige Flottenzusammensetzung der Schwerlastfahrzeuge?

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit wird in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Um die Ziele der Arbeit zu erreichen, wird im zweiten Kapitel eine Übersicht über die Struktur des europäischen Straßengüterverkehrs gegeben. Hierbei wird auf die Entfernungsklassen des Straßengüterverkehrs sowie auf transportintensive Branchen in Österreich eingegangen. Zusätzlich wird die Marktstruktur des Straßengüterverkehrs betrachtet und der Einfluss von Krisen auf den Transport dargestellt. Erarbeitet wird dieses Kapitel mittels einer explorativen Literaturrecherche.

Im anschließenden Kapitel drei werden die Grundlagen der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs vorgestellt. Dabei wird auf Möglichkeiten zur Dekarbonisierung eingegangen und alternative Antriebstechnologien und Energieträger für Schwerlastfahrzeuge werden aufgezeigt, auf welche sich die Arbeit im weiteren Verlauf fokussiert. Zusätzlich werden Barrieren als auch Motivatoren für den aktuellen Einsatz alternativer Optionen für Flottenbetreiber gegenübergestellt und Maßnahmen

der Politik betrachtet. Die Erarbeitung dieses theoretischen Kapitels erfolgt ebenfalls mittels explorativer Literaturrecherche.

Das Kapitel vier stützt sich auf die Grundlagen aus dem zweiten und dritten Kapitel und präsentiert die Durchführung einer systematischen Literaturrecherche (SLR). Die SLR gibt den aktuellen Stand der Forschung zur Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr wieder. Zur Sicherung der Forschungsqualität wird die SLR nach der durch PRISMA vorgeschlagenen Vorgehensweise durchgeführt. Die recherchierte Literatur wird nach Szenarien für die Zukunft in Bezug auf alternative Antriebstechnologien und Energieträger analysiert und eine deskriptive und inhaltliche Analyse wird vollzogen. Zudem werden die gefundenen Szenarien geclustert. Als Ausgangspunkt für das Clustering werden die drei im World Energy Outlook der International Energy Agency (IEA) verwendeten Szenarien herangezogen, um die Analyse der Studien konform eines gängigen und weit verbreiteten Standards durchzuführen. Danach folgt eine Darstellung der Zuteilung der Szenarien zu den IEA-Szenarien für die Jahre 2030 und 2050. Hierbei erfolgt eine anschauliche Darstellung der zukünftig verwendeten alternativen Energieträger.

Um eine Handlungsempfehlung für österreichische Unternehmen abzuleiten, wird im fünften Kapitel ein Bezug zu österreichischen Strategien und Szenarien für die Verwendung von zukünftigen Antrieben und Kraftstoffen für die Jahre 2030 und 2050 hergestellt. Dazu wird eine explorative Literaturrecherche durchgeführt, um österreichische Strategiepapiere zu den Themen zu finden. Durch Diskussionen mit Wissenschaftlern werden Filterkriterien für die Szenarien erstellt. Danach wird aus den im Kapitel vier erstellten Darstellungen eine detaillierte Aussage für Österreich abgeleitet und die Forschungsfrage, „welchen Pfad Österreich aus heutiger Sicht einschlägt und was dies für die zukünftige Flottenzusammensetzung der Schwerlastfahrzeuge bedeutet“, wird beantwortet.

Das Kapitel sechs schließt die Arbeit mit einer Conclusion ab. In der Conclusion werden Handlungsempfehlungen für österreichische Transportunternehmen, die Politik und die Wissenschaft abgegeben und es erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und eine Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse.

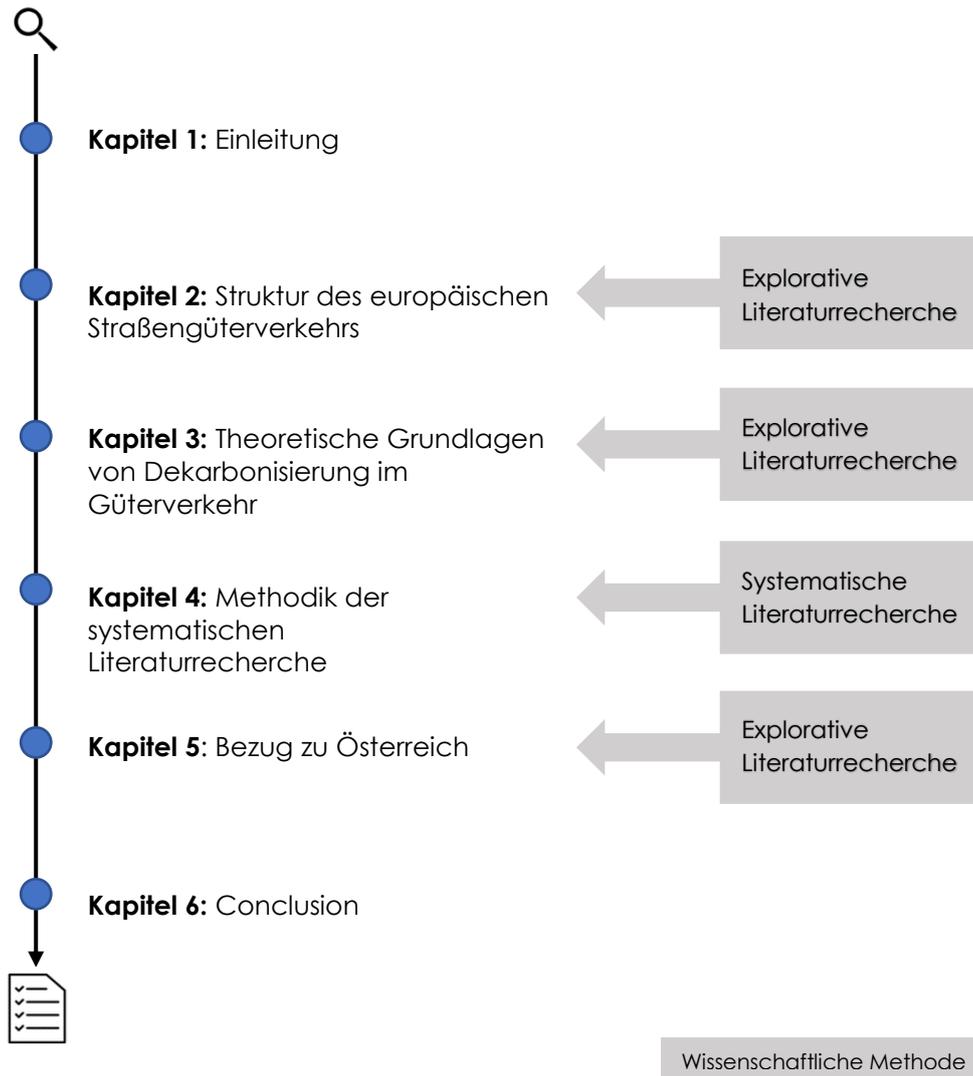


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit¹⁰

¹⁰Eigene Darstellung.

2 Struktur des europäischen Straßengüterverkehrs

Der Straßengüterverkehr ist ein wesentlicher Wirtschaftszweig in der EU. Er beinhaltet mehr als 570.000 Unternehmen und beschäftigt 3,3 Millionen Menschen. Zudem muss sich der Sektor mit einer großen Anzahl von Herausforderungen und Problemen auseinandersetzen.¹¹ Im folgenden Kapitel wird auf die Struktur des europäischen Straßengüterverkehrs eingegangen. Dabei sollen Daten, Fakten und die Entwicklung des Straßengüterverkehrs der letzten Jahre dargestellt werden. Zudem wird der Einfluss der aktuellen Krisen auf den Transport sowie die Zusammensetzung der Marktstruktur umrissen.

2.1 Darstellung des Straßengüterverkehrs

Der Gütertransport und die Güterverteilung stehen zwischen der Gütererzeugung und dem Güterverbrauch. Der Transport und die Verteilung der Güter werden hauptsächlich von Verkehrsbetrieben und dem Handel vollzogen. Hierbei werden Leistungen erbracht, um Rohmaterialien, Halbfertig- und Fertigprodukte von einer Quelle zu einer Senke zu befördern.¹² Unter dem Begriff Transport wird eine Ortsveränderung und Raumüberbrückung von Transportgütern anhand von Transportmitteln verstanden.¹³ Zu den Hauptfunktionen des Transports zählen die Beförderungsfunktionen und die Umschlagsfunktion. Zu den sekundären Eigenschaften zählen das Vorhalten sowie das Herstellen von Verkehrswegen. Jegliches Transportsystem besteht also aus Transportgütern, Transportmitteln und Transportprozessen.¹⁴ Die Verkehrsmittel lassen sich zu den Verkehrsträgern, welche unbewegliche Geräte sind, die dem Güter -oder Personenverkehr dienen, folgendermaßen zuordnen: Der Lastkraftwagen (LKW) ordnet sich dem Straßengüterverkehr zu, die Bahn dem Schienengüterverkehr, das Schiff der Binnenschifffahrt und die Pipeline zählt zum Rohrleitungsverkehr. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Komponenten des Güterverkehrssystems.¹⁵ Bei dem Güterverkehrssystem wird zwischen Land-, Luft- und Wasserverkehr unterschieden. Daraufhin wird eine Unterteilung der Transportmittel vollzogen.¹⁶

¹¹Vgl. De Smedt, L.; De Wispelaere, F. (2020), S. 2.

¹²Vgl. Jünemann, R.; Schmidt, T. (1999), S. 311.

¹³Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 169.

¹⁴Vgl. Zsifkovits, H. E. (2013), S. 215.

¹⁵Vgl. Zsifkovits, H. E. (2013), S. 217.

¹⁶Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 174.

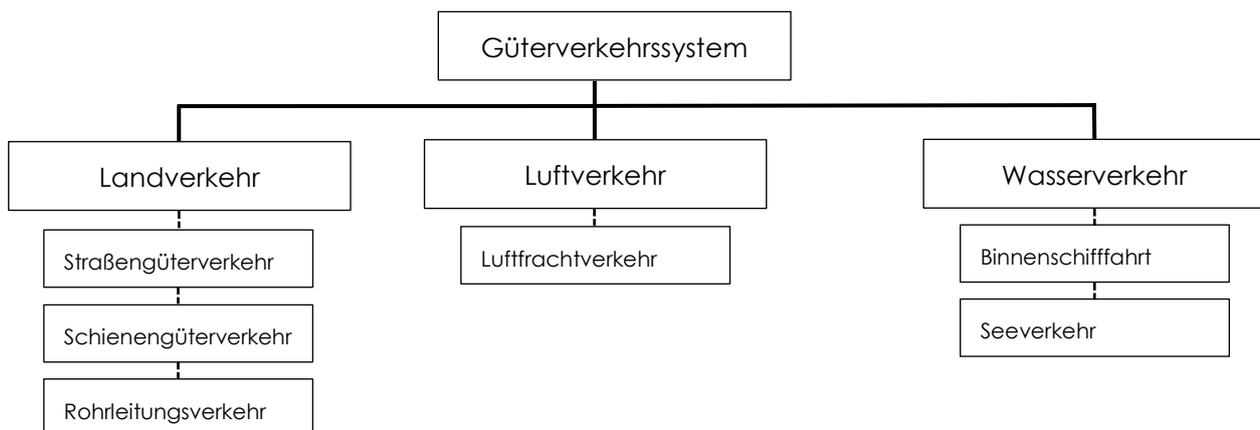


Abbildung 2: Klassifikation des Güterverkehrssystems¹⁷

Der Straßengüterverkehr stellt eine Dienstleistung dar, wobei Güter von A nach B transportiert werden und ist im europäischen Kontinentalverkehr der bedeutendste Verkehrsträger. Durchgeführt wird dieser vorwiegend mit verschiedenen Arten von LKW.¹⁸ Zu den Vorteilen des Lkw zählen die Zeit- und Kostenvorteile im Nah- und Flächenverkehr, als auch die Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Transportbedürfnisse.¹⁹ Daraus folgt, dass der LKW das vorwiegende Verkehrsmittel im Straßengüterverkehr ist. Der Einsatz eines LKW kann als Lastzug oder Solofahrzeug stattfinden. Nach der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung StVZO und der Typengenehmigungsrichtlinie EG-Norm sind die Abmessungen in der Höhe auf 4m, in der Breite auf 2,55m und in der Länge, gegliedert nach Solofahrzeugen, auf 12m, Zugmaschinen mit Sattelaufleger auf 16,40m und LKW mit Anhänger auf 18,75m, beschränkt. Das Gesamtgewicht bezieht sich bei zweiachsigen LKW ohne Anhänger auf 17t, dreiachsigen LKW auf 24t und für LKW mit Anhänger auf 40t.²⁰ Der Straßengüterverkehr bildet seine Infrastruktur durch Verkehrswege und Knotenpunkte, die wesentlich für die Verbindung mit anderen Verkehrsträgern sind. Der LKW besitzt im Vergleich zu der Schiene oder dem Binnenschiff ein dichtmaschiges Wegenetz und hat daher auch einen wesentlichen Stellenwert bei der Infrastruktur.²¹

Im Jahr 2020 waren 10 Mio. Personen in der EU-27 im Sektor Transport- und Lagerdienstleistung beschäftigt. Davon arbeiteten 53% im Landverkehr, zu welchem

¹⁷Vgl. Eigene Darstellung in Anlehnung an Pfohl, H. C. (2018), S. 176.

¹⁸Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 727.

¹⁹Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 178.

²⁰Vgl. Jünemann, R.; Schmidt, T. (1999), S. 315.

²¹Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 371.

Straßen-, Schienen- und Rohrleitungsverkehr zählen. Die gesamte Güterverkehrstätigkeit wurde im Jahr 2020, in der EU-27, auf 3.272 Mrd. tkm vermutet. Diese Zahl beinhaltet nur den Verkehr innerhalb der EU. Hierzu erfolgt die Darstellung des Modal Split in Abbildung 3. Der Modal Split wurde mittels der Transportleistung gemessen und verdeutlicht die Relevanz des Straßenverkehrs, da dieser 53,3% der gesamten innereuropäischen Transportleistung abgewickelt hat. Auf die Seeschifffahrt entfielen dabei 28,8%, der Schienengüterverkehr wickelte 11,5% ab, die Binnenschifffahrt 4%, die Rohrleitungen 2,8% und die Luftfahrt 0,1%.²²

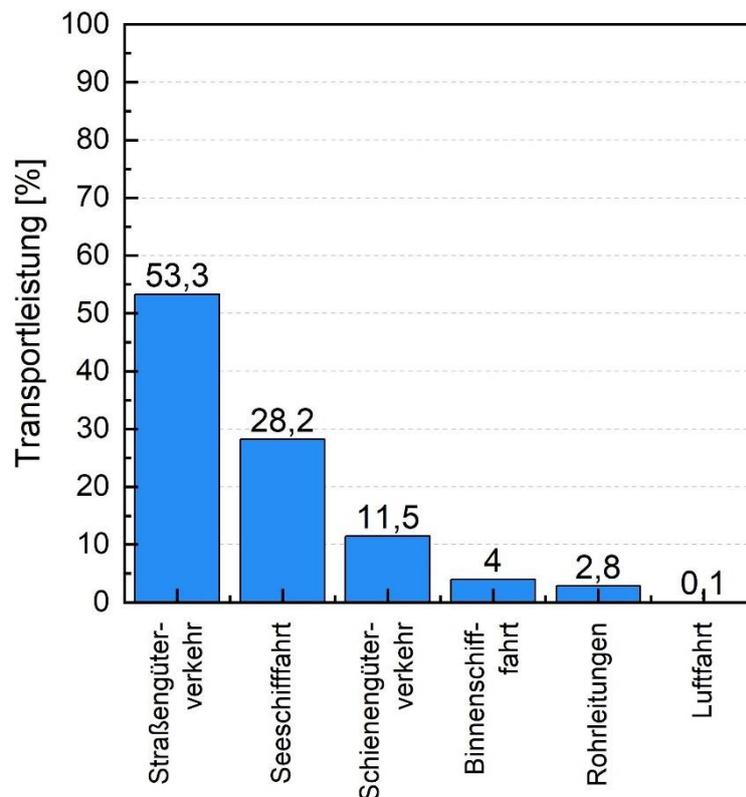


Abbildung 3: Modal Split²³

Nach dem International Transport Forum wird sich die globale Verkehrsnachfrage mehr als verdoppeln. Unter den derzeitigen politischen Rahmenbedingungen wird sich der Güterverkehr im Zeitraum von 2015 bis 2050 von 134 Billionen tkm auf 344 Billionen tkm erhöhen.²⁴

²²Vgl. European Union (2022), S. 19 und S. 36.

²³Vgl. European Union (2022), S. 36, (Darstellung leicht modifiziert).

²⁴Vgl. International Transport Forum (2021), S. 7.

Der EU Außenhandel hat im Jahr 2020 bei dem Wert von den Exporten einen Anteil im Straßenverkehr von 26,4% und bei den Importen 20,7%. Das Straßennetz der EU beträgt 4.467,0 Tkm und der Fahrzeugbestand an Frachtfahrzeugen zählt 35.5 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2020. Hierbei beträgt der Unterschied zu 2019 im Fahrzeugbestand +0,9% zu 2020.²⁵ Generell ist das Wachstum des Straßengüterverkehrs auf die Verbilligung des Transports über die Straße zurückzuführen.²⁶

Entfernungsklassen des Straßengüterverkehrs

Die Abwicklung der Güterbeförderung ist auf verschiedenste Weise möglich. Wichtige Parameter für die Wahl der Abwicklungsform sind beispielsweise die Transportentfernung, die Maße der Ladung, Frequenz der Beförderung, Qualitätsanforderungen, zusätzliche Leistungen und Terminvorgaben. Die Maße der Ladung und die Entfernung des Transports entscheiden, ob der Transport als „Full Truck Load“ (FTL) oder „Less Than Truck Load“ (LTL) durchgeführt wird. Der Ladungsverkehr (FTL) unterscheidet sich insofern zum Stückgutverkehr (LTL), als dass keine zusätzlichen Beiladungen transportiert werden, da die Ladekapazität ausgeschöpft ist. Es findet kein Umschlag der Ladung statt. Im Gegensatz dazu kann der Stückguttransport mehrere Ladungen von verschiedenen Absendern oder für unterschiedliche Empfänger transportieren. Um die Auslastung des Stückguttransports optimal zu gestalten, werden in Vorläufen Güter bei den Absendern zusammengefasst beziehungsweise in Nachläufen auf die Empfänger ausgegeben. Wenn der Vorlauf abgeschlossen ist, kommt es zum Hauptlauf. Hier kann das Gut zu den Versandpediteuren zu Sammelladungen zusammengefügt werden und den Frachtführern zum Transport zu den Empfangspediteuren weitergegeben werden. Im Nachlauf geschieht beim Empfangspediteur eine Aufteilung der Ladungen. Diese Organisation gibt es auch bei Express-, Paket- und Kurierdiensten.²⁷

Des Weiteren werden verschiedene Verkehrsformen beschrieben. Eine dieser Verkehrsformen stellt der Nah- und Fernverkehr dar. Von Nahverkehr ist die Rede, wenn das Einsatzgebiet einen Radius unter 150 km um den Standort des Unternehmens aufweist. Eine Entfernung über 150 km gilt als Fernverkehr. Bei dem Fernverkehr erfolgt der Transport einer Komplettladung von der Quelle zur Senke. Meist erfolgt der

²⁵Vgl. International Transport Forum (2021), S. 33 und S. 89.

²⁶Vgl. Wieland, B. (2010), S. 50.

²⁷Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 731.

Transport im Hauptlauf zwischen zwei Umschlagstationen. Die Aufgabe des Nahverkehrs besteht darin, im Nachlauf die Verteilung auf die Fläche zu erledigen und im Vorlauf die Sammlung durchzuführen. Da der Ausbau des Straßennetzes für den Nahverkehr sehr gut ist, gibt es nur für eine kleine Anzahl von Transportgüter und -arten alternative Möglichkeiten zum Straßengüterverkehr. Beispielsweise können für kleine und leichte Güter im städtischen Bereich Fahrradkuriere eingesetzt werden.²⁸ Zusätzlich können auch für zukünftige Lieferungen Drohnen und Zustellroboter zum Einsatz kommen. Allerdings ist für diese Technologien noch Entwicklungsarbeit zu leisten.²⁹ Anders sieht es im Fernverkehr aus. Hier ist der Einsatz der Bahn möglich, da im Schienengüterverkehr höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten als im Straßengüterverkehr erreicht werden können. Jedoch wird dieser Vorteil durch notwendige Umschlagvorgänge zwischen den Verkehrsträgern teilweise kompensiert.³⁰ Beispielsweise wird im österreichischen Straßengüterverkehr der Hauptteil der Güterbeförderung auf einer Weglänge von bis zu 80 km befördert. 2021 dominiert daher im Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen der Inlandverkehr.³¹

Bei den nächsten Verkehrsformen handelt es sich um den Werkverkehr und den gewerblichen Verkehr. Die Verkehrsarten unterscheiden sich dadurch, dass der Werkverkehr lediglich einer Meldepflicht unterliegt und der gewerbliche Verkehr genehmigungs- oder erlaubnispflichtig ist. Die Voraussetzung für eine Genehmigung des Fuhrgewerbes ist die persönliche Zuverlässigkeit, die finanzielle Lage und das fachliche Können.³² Im Kalenderjahr 2021 fanden im Inland 54% des Transportaufkommens und 65% der Transportleistung im gewerblichen Verkehr statt. Im österreichischen Inlandverkehr finden 84,6% des Transportaufkommens bei einer Weglänge zwischen 0-80 km statt. Bei mehr als 300 km steigt der Anteil des Fuhrgewerbes auf 73,7%. Bei den Entfernungsstufen ist es zu Rückgängen gekommen, beispielsweise war der größte Rückgang bei den Entfernungen von 251-300 km und über 300 km um 2,7%. Ein minimaler Rückgang war bei der Entfernungsstufe 0-80 km um 0,1% zu sehen.³³ Ein Grund für den minimalen Rückgang von 0,1% könnte die

²⁸Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 730.

²⁹Vgl. Pils, M. (2020), S. 9.

³⁰Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 730.

³¹Vgl. WKO (2022), S. 38f.

³²Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 173.

³³Vgl. WKO (2022), S. 42.

Schwierigkeit der Verlagerung des Transportes von der Straße auf diverse Verkehrsträger sein.³⁴

Unter dem Begriff Werkverkehr wird der Güterverkehr für interne Aufträge des Unternehmens verstanden. Der Werkverkehr kommt beispielsweise in Handels-, Baustoff- oder dem verarbeitenden Gewerbe vor. Hauptsächlich wird ein Werkverkehr aus Qualitäts-, Service- und Imagegründen abgewickelt.³⁵ Um Werkverkehre durchführen zu dürfen, müssen die transportierten Güter im Besitz des Werkunternehmens sein, die Schwerlastfahrzeuge müssen auf den Namen des Unternehmens zugelassen sein und vom eigenen Personal genutzt werden.³⁶ Vorteile des Werkverkehrs stellen sich beispielsweise bei dem direkten Kundenkontakt und bei flexiblen Reaktionen heraus. Zudem wird auch bei Spitzenlasten auf den Werkverkehr Bezug genommen. Der Werkverkehr wird bevorzugt im Regional- und Nahbereich eingesetzt, stattdessen führt der gewerbliche Güterverkehr den Fernverkehr durch. Heutzutage ist eine Abnahme des Werkverkehrs zu verzeichnen, da bereits Spediteure die Anforderungen der Unternehmen erfüllen. Lediglich im Bereich Handel und der verarbeitenden Branche ist der Werkverkehr vorherrschend.³⁷

2.2 Transportintensive Branchen in Österreich

Gemessen am Transportaufkommen in Österreich, ist die Straße der hauptsächliche Transportweg im Güterverkehr. Für das Transportaufkommen sind die österreichischen Straßengüterunternehmen für mehr als zwei Drittel verantwortlich.³⁸ Im Jahr 2021 gibt es insgesamt 3.287 Unternehmen in Österreich, die einen fuhrgewerblichen Straßengüterverkehr führen. Hierbei liegt die Menge an Lastkraftwägen bei 16.892 Fahrzeugen, die eine Nutzlastkapazität von 200.408 t aufweisen.³⁹ Die Transportleistung hat sich im Jahr 2021 um 4% gegenüber 2020 erhöht. Das Transportaufkommen weist 2021 im Inlandverkehr 375,7 Mio. Tonnen auf und die Transportleistung 17,3 Mrd. tkm. Der höhere Anteil des Inlandverkehrs beim Transportaufkommen gegenüber der Transportleistung lässt sich durch die kurzen Wegstrecken in den Bundesgebieten erklären. Im Transit und dem Auslandsverkehr spielt der Straßengüterverkehr bezüglich

³⁴Vgl. Statistik Austria (2022), S. 36.

³⁵Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 731.

³⁶Vgl. Jünemann, R.; Schmidt, T. (1999), S. 339.

³⁷Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 731.

³⁸Vgl. WKO (2022), S. 37.

³⁹Vgl. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/288254/umfrage/unternehmen-im-strassengueterverkehrs-in-oesterreich/> (Zugriff:05.12.2022).

der Höhe des Transportaufkommens eine irrelevante Rolle – dies wird in Tabelle 1 verdeutlicht.⁴⁰

Tabelle 1: Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen 2021⁴¹

	Transportaufkommen		Transportleistung (Inland)	
	in 1.000 t	Anteil %	in Mio. tkm	Anteil %
Inland	375.670	93,1	17.347	88,7
grenzüberschr. Empfang	10.882	2,7	985	5,0
grenzüberschr. Versand	10.317	2,6	1.076	5,5
Transit	1.161	0,3	156	0,8
sonst. Auslandsverkehr	5.468	1,4	-	-

Unternehmen in dem Bereich Transport und Verkehr haben im Jahr 2019 Erlöse und Erträge im Wert von 51,2 Mio. EUR erwirtschaftet, was eine Steigerung um 2,9% zum Vorjahr bedeutet. Die Speditionen erwirtschaften mit rund 13,8 Mio. EUR die größten Erlöse und Erträge. Im Vergleich dazu erzielt das Güterbeförderungsgewerbe 11,8 Mio. EUR und das Schienenbahngewerbe 7,7 Mio. EUR. Darauf folgt die Luftfahrtunternehmung mit 4,6 Mio. EUR an Erlösen und Erträgen. Die folgende Abbildung 4 stellt die wesentlichsten zehn Gütertransporteure und Spediteure in Österreich nach ihrem Umsatz im Jahr 2020/2021 dar.⁴²

⁴⁰Vgl. WKO (2022), S. 39.

⁴¹Vgl. Statistik Austria, <https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/gueterverkehr/gueterverkehr-strasse> (Zugriff: 22.12.2022), (Darstellung leicht modifiziert).

⁴²Vgl. WKO (2022), S. 37ff.

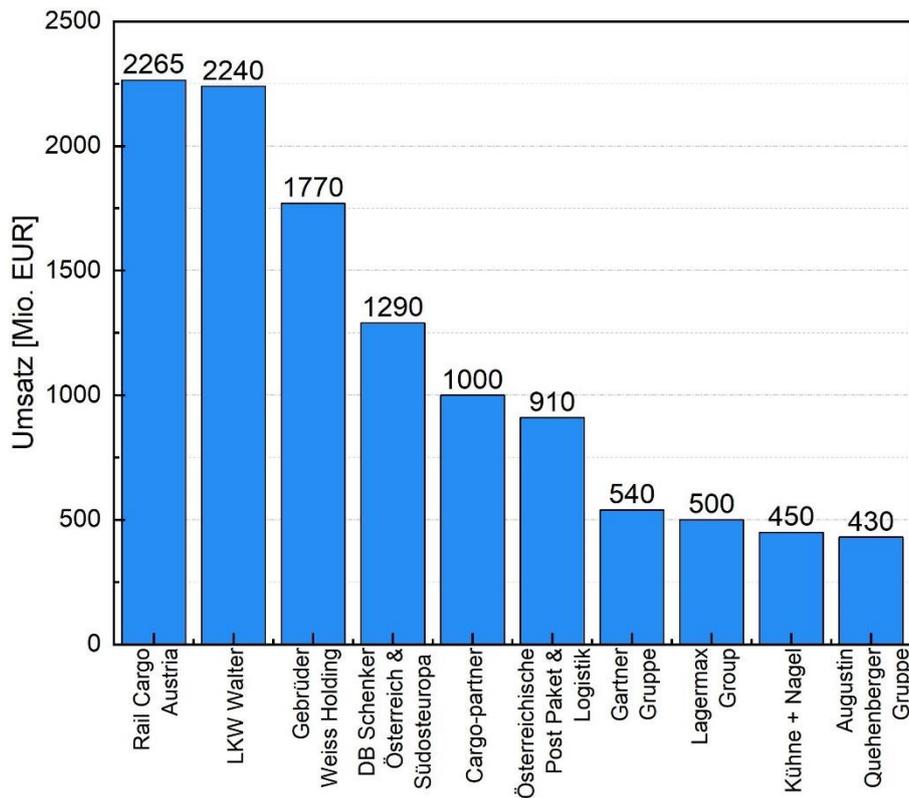


Abbildung 4: Gütertransporteure und Spediteure in Österreich nach Umsatz 2020/2021⁴³

Die Spediteure liegen bei dem Ranking der Transportbranche, wenn sich die Erlöse und Erträge je Beschäftigten im Jahr 2019 angesehen werden, an erster Stelle. Das Luftunternehmen folgt der Spedition.⁴⁴

2.2.1 Eigenschaften der Speditionsbranche

Im Folgenden wird nun näher auf die Speditionsbranche eingegangen. Ein Spediteur organisiert den Transport von Gütern für Dritte. Zu den Aufgaben des Spediteurs zählt die Gewährleistung der Schadensersatzansprüche des Versenders und die Auswahl des Beförderungsmittels. Zu diesem Zweck werden Verträge beispielsweise mit Verpackern oder Frachtführern im eigenen Namen oder im Namen des Versenders, falls der Spediteur die Bevollmächtigung hat, abgeschlossen. Wenn es gewisse Vereinbarungen gibt, zählen zum Beispiel zu den Aufgaben des Spediteurs besondere Leistungen, bezogen auf die Beförderung oder auch Kommissionierungen und

⁴³Vgl. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/899828/umfrage/guetertransporteure-und-spediteure-in-oesterreich-nach-umsatz/> Zugriff (22.12.2022), (Darstellung leicht modifiziert).

⁴⁴Vgl. WKO (2022), S. 21.

Lagerungen von Gütern. Das Arbeitsfeld von Spediteuren reicht in der Praxis von Nebenleistungen bis hin zu den gesamten logistischen Dienstleistungen. Speditionen bieten Logistikunternehmen ganze Dienstleistungspakete an.⁴⁵ Anhand der gesetzlichen Grundlagen gilt der Speditionsvertrag als ein Dienstleistungsvertrag nach BGB §§61ff. Weitere konkrete Pflichten der Spediteure sind in unterschiedlichen Verträgen, die die Leistung von Spediteuren konkretisieren, erläutert.⁴⁶

Es gibt zwei Möglichkeiten, wie die Spedition ihre Angebote realisieren kann. Die erste Möglichkeit ist, dass sie sich auf ihre wesentlichen Tätigkeiten, wie der Organisation, Planung und Steuerung des Informations- und Güterflusses beschränken kann oder andere Unternehmen, wie zum Beispiel Transport-, Umschlags-, Lager-, oder Verpackungsunternehmen dafür beauftragt. Die zweite Möglichkeit ist, dass die Spedition die Tätigkeiten eigenhändig durchführt. Da dies bei kleinen Transporten schnell unrentabel ist, wird in der Regel auf Subunternehmen zurückgegriffen. Für logistische Dienstleistungen gibt es eine Speditionspyramide, an deren Spitze Speditionen mit integrierten Systemlogistikdiensten stehen, sich in der Mitte Zulieferer logistischer Teilsysteme befinden und am Boden der Pyramide die Komponentenspeditionen liegen. Zudem spezialisieren sich Speditionen häufig in Bereichen wie den Transportmitteln, den Gütergruppen, auf gewisse Transportrelationen oder auf Inlands-, Grenz-, oder internationale Transporte, als auch auf diverse Funktionsbereiche.⁴⁷

2.2.2 Zusätzliche Parteien neben der Spedition

Im Folgenden wird auf zusätzliche Parteien neben den Speditionen eingegangen. Hierbei gibt es beispielsweise den Frachtvermittler. Dessen Aufgabe ist die Vermittlung von Vertragsabschlüssen zwischen Transportunternehmen und Verloader. Der Hauptfokus liegt hierbei auf den See- und Luftverkehren. Logistische Dienstleistungen werden von den Frachtvermittlern nicht selbst erstellt.⁴⁸ Vermittler leiten Befrachtungs-, Agentur-, Klarierungs- und An- und Verkaufsgeschäfte. Eine neue Form ist die elektronische Frachtbörse, dabei geschieht die Vermittlung der Aufträge über das Internet. Das wesentliche Ziel ist, die Vermittlung von verfügbaren Kapazitäten, sodass

⁴⁵Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 308.

⁴⁶Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 734.

⁴⁷Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 308f.

⁴⁸Vgl. Jünemann, R.; Schmidt, T. (1999), S. 336.

Leerfahrten vermieden werden. Zudem wird bei dem Vermittler eine Unterteilung zwischen Agenten und Makler vollzogen. Der Agent gleicht den Handelsvertreter und der Makler vermittelt Fracht für Gelegenheitsverkehre als Raum- und Zeitfrachtverträge.⁴⁹

Eine weitere Institution, ist der Verlader. Der Verlader gibt Logistikdienstleistungen bei einem Logistikdienstleister in Auftrag.⁵⁰ Dazu zählen alle Handels-, Industrie- und Dienstleistungsunternehmen, die als Auftraggeber für logistische Dienstleistungen tätig sind. Hier kommt der Lieferant als auch der Kunde eines bestimmten Produkts in Frage - abhängig von der Vertragsgestaltung. Im Hinblick auf die Transportleistung ist es bei Lieferungen ab Werk der Empfänger, bei Lieferungen frei Haus der Lieferant.⁵¹ Für Transport- und Logistikleistungen bewähren sich für Verlader elektronische Marktplätze. Wenn ein Dienstleister einen langfristigen Vertrag mit einem Verlader abschließt, wird eine Planungssicherheit garantiert und möglicherweise auch kosteneffizientere Preise. Zu den Vorteilen der Verlader zählen beispielsweise die Verlagerung des unternehmerischen Risikos des eigenen Unternehmens, auf das Unternehmen des Dienstleisters und durch die Fremdvergabe an ein externes Unternehmen kann der Eintritt in neue Märkte gewährleistet werden.⁵²

Eine zusätzliche Partei stellt der Frachtführer dar. Ein Frachtführer betreibt verschiedene Transportmittel, welche in Abbildung 2 ersichtlich sind. Der Frachtführer ist verpflichtet, ein bestimmtes Produkt von einer bestimmten Quelle zu einer bestimmten Senke zu befördern und dieses dem Empfänger zuzustellen. Zudem ist der Frachtführer verpflichtet einen LKW zu verwenden, der betriebssicher und Transportfähig ist. Ein wesentlicher Grundsatz des Frachtführers ist, dass diese für die Betriebssicherheit der Verladung verantwortlich sind und der Auftraggeber trägt die Verantwortung für die Verladung.⁵³ Zu den Funktionen des Frachtführers zählt die Dispositionsfunktion mit der Aufgabe, Frachtverträge abzuschließen. Des Weiteren gehört auch die Beförderungsfunktion im Nah- und Fernverkehr dazu. Zu den Ergänzungs- und Komplementärfunktionen zählen die Umschlags-, Sammel-, Manipulations- und

⁴⁹Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 309.

⁵⁰Vgl. Forschungs-Informations-System, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/98631/> (Zugriff: 01.03.2023).

⁵¹Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 301.

⁵²Vgl. Winter, K. (2018), S. 84ff.

⁵³Vgl. Arnold, D. et al. (2008), S. 734f.

Informationsfunktion. Außerdem gibt es noch Sonderfunktionen, zu denen Verkaufsförderungs- und Kundendienstfunktionen zählen.⁵⁴

2.3 Marktstruktur

In den letzten Jahren verzeichnet der Straßengüterverkehr ein starkes Wachstum, trotz eines Mangels an Fahrer. Dieses Wachstum ist in Westeuropa als auch in den osteuropäischen Staaten spürbar geworden.⁵⁵ Der Wettbewerb im Straßenverkehrssektor basiert stark auf Kostenfaktoren und daraus resultierend auf den Preiswettbewerb. Zudem bringt die Preisempfindlichkeit des Sektors und sein arbeitsintensiver Charakter bestimmte unerwünschte Effekte, wie grenzüberschreitenden Sozialbetrug, mit sich.⁵⁶ Des Weiteren reduziert sich der Marktanteil der deutschen und westeuropäischen Straßengüterverkehrsunternehmen, da die osteuropäischen Länder billigere Angebote haben.⁵⁷ Die Nachfrage nach billigen Waren führt einerseits zu geringen Preisen, aber andererseits zu einem ständigen Druck auf die Löhne, zur Unattraktivität der Arbeit, zur Gründung von Tochtergesellschaften im Ausland und zur Anwendung illegaler Vorgehensweisen.⁵⁸ Gerade die verschiedenen Löhne sind ein Grund des wirtschaftlichen Austauschs in einem Wettbewerbsbereich.⁵⁹ Ein wesentlicher Punkt im Straßenverkehr ist die Harmonisierung der Wettbewerbsbedingungen, in den Bereichen Arbeitsbedingungen, Sicherheit, Steuern, Abgaben und Wegentgelte. Seit 1992 gibt es Mindeststeuersätze bei KFZ- und Mineralölsteuer, aber keine einheitlichen Steuersätze bei den EU-Mitgliedsstaaten. Mittels Maut werden, beispielsweise in Deutschland, in- und ausländische LKW in einer wettbewerbsneutralen Weise herangezogen, kilometerbezogene Gebühren zur Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur zu zahlen.⁶⁰ Für die Marktstruktur und den Wettbewerb im Straßengüterverkehr sind die Entsende- und die Kabotageregulungen ein zentraler Baustein, denn sie prägen das Laderaumvolumen und die Fahrerkapazität auf den nationalen Märkten.⁶¹

⁵⁴Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 295.

⁵⁵Vgl. Eisenkopf, A.; Knorr, A. (2020), S. 201.

⁵⁶Vgl. De Smedt, L.; De Wispelaere, F. (2020), S. 2.

⁵⁷Vgl. Eisenkopf, A.; Knorr, A. (2020), S. 201.

⁵⁸Vgl. De Smedt, L.; De Wispelaere, F. (2020), S. 2.

⁵⁹Vgl. Eisenkopf, A.; Knorr, A. (2020), S. 204.

⁶⁰Vgl. Wieland, B. (2010), S. 48.

⁶¹Vgl. Eisenkopf, A.; Knorr, A. (2020), S. 204.

Die Anbieterstruktur im Straßengüterverkehr beinhaltet internationale Speditionen, als auch kleine Selbstfahrer. Große Speditionen, sowie Express-, Kurier-, und Paketdienste, ziehen für den Transportvorgang meist kleine Unternehmen als Subunternehmer heran, da die Tätigkeit der großen Unternehmen in den Bereichen der Organisation und Koordination von Gütertransporten liegt. Die Frachtführer konkurrieren intern rein über den Preis und bieten so Speditionen ein durchaus einheitliches Produkt an. Die Marktstruktur kommt in diesem Teilbereich dem Modell des ganzheitlichen Wettbewerbs sehr nahe. Hierbei sind Unternehmen Preisnehmer. Preissenkungen sind zu akzeptieren oder der Markt muss verlassen werden. Zudem gibt es billige Anbieter in den Ost-EU-Ländern, welche wiederum durch günstige Angebote, Preissenkungen am Markt hervorrufen. Große Speditionen gründen beispielsweise in osteuropäischen Ländern Niederlassungen, kleine Unternehmen hingegen können sich zum Beispiel in einer Branche spezialisieren. Kostenseitig ist die Lage des Straßengüterverkehrs sehr angespannt. Dies ist auf hohe Treibstoffkosten und die LKW-Maut zurückzuführen. In einer weitaus besseren Lage befinden sich die internationalen Logistikkonzerne, die ihr Angebot auf Basis großer internationaler Netzwerke ausführen. Durch den ständigen Zukauf in- und ausländischer Unternehmen, wird das Netzwerk kontinuierlich vergrößert, was wiederum Größenvorteile schafft. Aus diesem Grund ist es möglich, dass sich der Fokus auf den Aufbau internationale Netzwerke verstärkt.⁶²

2.4 Einfluss von Krisen auf den Transport

Die heutigen akuten Spannungen auf den Märkten lassen sich mit den schwersten Energiezusammenbrüchen in der modernen Energiegeschichte vergleichen. Häufig wird die Energiekrise mit den Ölschocks in den 1970er Jahren verglichen. Damals wie heute gibt es starke geopolitische Gründe für den Preisanstieg, der zu hoher Inflation und wirtschaftlichen Schäden führt. Die Krisen bringen einige Schwachstellen und Abhängigkeiten im Energiesystem an die Oberfläche. Die hohen Preise schaffen starke wirtschaftliche Anreize zum Handeln und werden mittels Erwägungen der Wirtschafts- und Energiesicherheit verstärkt. Die momentane Energiekrise besteht aus mehreren Dimensionen. Dazu zählen Erdgas, Öl, Kohle, Strom, Ernährungssicherheit und Klima. Hierbei geht es um die Veränderung des gesamten Energiesystems, wobei die

⁶²Vgl. Wieland, B. (2010), S. 49.

Beibehaltung einer preiswerten und sicheren Bereitstellung von Energiedienstleistungen sichergestellt wird.⁶³

Die COVID-19-Pandemie und der Krieg Russlands gegen die Ukraine haben den Energiesektor und die Weltwirtschaft beeinflusst. Die langfristigen Auswirkungen dieser Krisen, auf eine kohlenstoffarme Energiewende und die Eindämmung des Klimawandels, sind noch ungewiss. Der Einmarsch der Russischen Föderation in die Ukraine konfrontiert die Welt mit Energiepreiserhöhungen und Problemen der Energiesicherheit. Zudem wirkt sich der Krieg direkt auf die Energieproduktion, die Energieversorgung und den Handel aus.⁶⁴ Obwohl es sich um eine globale Krise handelt, ist Europa am stärksten von der Verfügbarkeit und dem Preis von Erdgas abhängig. Russland verschafft sich mittels Rückhalts der Gaslieferung ein politisches Druckmittel. Im September 2022 verzeichnete die EU bereits einen Rückgang von 80% der Gaslieferung im Vergleich zu den letzten Jahren. Dadurch erhöhte sich auch der Druck auf die globalen und europäischen Gasbilanzen. Der Druck auf die Märkte war bereits vor Februar 2022 spürbar aber der Katalysator der Krise ist der Einmarsch Russlands in die Ukraine. Die Hauptursache für die Krise ist aber die schnelle wirtschaftliche Erholung nach dem pandemiebedingten Einbruch im Jahr 2020. Unter diesen Einbruch fallen alle Arten von Versorgungsketten, unter anderem die Kraftstoffversorgung. Das wesentlichste Ungleichgewicht bezieht sich auf Investitionen - einerseits in die Energiewende und andererseits in fossile Brennstoffe. Eine Einführung von sauberen Energiequellen und -technologien hätte die Verbraucher geschützt und die steigenden Kraftstoffpreise hätten gemildert werden können. Die Explosion der Energiepreise zählt zu den sichtbarsten folgen der Krise. Zudem sind auch die hohen Brennstoffpreise wesentlich für den Anstieg der hohen globalen Strompreise.⁶⁵

Während der Corona-Krise war der Energiesektor von den ständigen Abschaltungen im Jahr 2020 stark betroffen. Dadurch verlangsamte sich der Transport, Handel und die Wirtschaftstätigkeiten auf der ganzen Welt, wodurch der Energieverbrauch um 4% zurückging.⁶⁶ Während die Nachfrage des Güterverkehrs in der Krise zurückgegangen ist, werden die Triebkräfte für den Güterverkehr von angebots- als auch von nachfrageseitigen Faktoren bestimmt und von der Notwendigkeit, wesentliche

⁶³Vgl. International Energy Agency (2022), S. 32.

⁶⁴Vgl. Zakeri, B. et al. (2022), S. 1ff.

⁶⁵Vgl. International Energy Agency (2022), S. 33ff.

⁶⁶Vgl. International Energy Agency, <https://www.iea.org/topics/covid-19> (Zugriff:06.12.2022).

Dienstleistungen aufrechtzuerhalten.⁶⁷ Auch in Österreich wurde durch die Pandemie ein Rückgang der THG-Emissionen des Straßenverkehrs um 13,5% sichtbar. Jedoch hat sich die Wirtschaft schnell erholt und der Rebound-Effekt 2021 ließ die Emissionen wieder um 4,3% steigen. Ein Hauptgrund für die Zunahme war die Aufhebung der Corona-Maßnahmen, wie zum Beispiel „Lockdowns“, die den Verkehr stark einschränkten.⁶⁸

Ereignisse wie die COVID-19-Pandemie zeigen, dass der Güterverkehr schnell und flexibel sein muss. Zudem ist es wesentlich, kurzfristige Handlungen durchzuführen und die langfristige Wiederherstellung zu beachten. Außerdem muss die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren der verschiedenen Wirtschaftssektoren garantiert sein.⁶⁹

⁶⁷Vgl. International Energy Agency, <https://www.iea.org/articles/changes-in-transport-behaviour-during-the-covid-19-crisis> (Zugriff:06.12.2022).

⁶⁸Vgl. Zechmeister, A. et al. (2022 a), S. 8.

⁶⁹Vgl. Gonzalez, J. N. et. al. (2022), S. 1.

3 Theoretische Grundlagen von Dekarbonisierung im Güterverkehr

Für die Einhaltung des Pariser Klimaziels und der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 entsteht für die Bevölkerung im europäischen Raum ein Druck zum Handeln. Deshalb ist auch eine Reduzierung der Emissionen im wachsenden Straßengüterverkehr zwingend notwendig.⁷⁰ Ein Großteil der Energie unseres Wirtschaftssystems wird aus fossilen Brennstoffen, wie Erdgas, Erdöl und Kohle, gewonnen. Diese Energiequellen sind nicht erneuerbar und verschmutzen Luft, Wasser und Boden mit Treibhausgasen⁷¹ wie zum Beispiel Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O).⁷² Dadurch tragen sie mit ihrer Gewinnung, ihrem Transport, ihrer Raffinierung und ihrer Nutzung zur globalen Erwärmung bei. Der Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare, saubere Energieformen ist von wesentlicher Bedeutung für die Schaffung einer nachhaltigen Zukunft. Außerdem wird dadurch auch eine Grundlage für globale politische Stabilität und Wohlstand geschaffen.⁷³

3.1 Relevanz der Dekarbonisierung im Güterverkehr

Politik, Gesellschaft und Industrie stehen großen Schwierigkeiten gegenüber, um die Klimaziele der kommenden Jahre zu erzielen. Hierfür ist eine Mobilitäts- als auch Antriebswende notwendig.⁷⁴ Mit der Mobilitätswende lässt sich eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors erzielen, ohne dass die Mobilität beeinträchtigt wird. Das Verkehrsangebot vergrößert sich mittels technologischer Entwicklungen und das multimodale Verkehrsverhalten wird entlastet. Im Gegensatz dazu ist die Antriebswende im Verkehr eine technische Herausforderung, die politische Unterstützung und Förderung benötigt. Der Zweck darin ist, dass der Verkehr mit klimaneutralen Antriebsenergien versorgt wird und diese sparsam und effizient verwendet werden.⁷⁵ Weltweit wird die Energie im Straßenverkehr von etwa 90% an Erdölprodukten bereitgestellt, während Biokraftstoffe und Erdgas fast die gesamte verbleibende Nachfrage abdecken. Der Anteil der Elektrizität an der Nachfrage im Straßenverkehr lag 2021 bei weniger als 1%.⁷⁶

⁷⁰Vgl. Helms, H.; Jöhrens, J. (2021), S. 1.

⁷¹Vgl. Ramos, J. L. et. al. (2022), S. 1026.

⁷²Vgl. Neubauer, S. C. (2021), S. 2080.

⁷³Vgl. Ramos, J. L. et. al. (2022), S. 1026.

⁷⁴Vgl. Kasten, P. (2022), S. 22.

⁷⁵Vgl. Agora Verkehrswende (2017), S. 14f.

⁷⁶Vgl. International Energy Agency (2022), S. 148.

Nach dem aktuellen Klimaschutzgesetz der EU müssen die THG-Emissionen im Sektor Straßenverkehr, im Vergleich zu den derzeitigen Emissionen um 96% sinken.⁷⁷ Der globale Verkehrssektor benötigt derzeit ein Viertel des gesamten Endenergieverbrauchs und verursacht fast 40% der Emissionen aus den Endverbrauchssektoren.⁷⁸ Der Endenergieverbrauch im Sektor Transport beträgt in den EU-27 Ländern, im Jahr 2020, 28%. Hierbei trägt der Straßenverkehr 27% bei, der Rest stammt überwiegend vom Schienenverkehr.⁷⁹ Erdöl dominiert mit einem Anteil von 90% am Verbrauch im Verkehrssektor. Die steigende Nachfrage der Personen- und Gütermobilität, im Zeitraum von 2010 bis 2019 führte dazu, dass die Emissionen des Verkehrssektors die schnellwachsendsten aller Endverbrauchssektoren waren.⁸⁰

In Österreich haben sich die Emissionen 2021 gegenüber 2020 um 4,3% bzw. 0,9 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent (CO₂-e) erhöht.⁸¹ CO₂-Äquivalent ist das Maß für den Vergleich der Emissionen verschiedener Treibhausgase auf der Grundlage ihres globalen Erwärmungspotenzials.⁸² Es ist klar ersichtlich, dass sich auch die THG-Emissionen in Österreich stark erhöht haben. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der THG-Emissionen des Sektors Verkehr in Österreich im Zeitraum 1990 bis 2020. In diesem Zeitraum haben sich die THG-Emissionen im Güterverkehr verdoppelt und zwar von 4.134 Tonnen CO₂-e auf 8.263 Tonnen CO₂-e.⁸³ Zwischen 2005 und 2015 ist ein deutlicher Rückgang der Emissionen zu erkennen. Gründe dafür sind die zusätzliche Verwendung von Biokraftstoffen, ein reduzierter Kraftstoffabsatz aufgrund erhöhter Kraftstoffpreise und ein beschränkter Kraftstoffexport.⁸⁴

⁷⁷Vgl. Kasten, P. (2022), S. 22.

⁷⁸Vgl. International Energy Agency (2022), S. 146.

⁷⁹Vgl. European Union (2022), S. 120.

⁸⁰Vgl. International Energy Agency (2022), S. 146.

⁸¹Vgl. Zechmeister, A. et al. (2022 a), S. 5.

⁸²Vgl. Turner, L. K., Collins, F. G. (2013), S. 125.

⁸³Vgl. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/962273/umfrage/treibhausgas-emissionen-des-sektors-verkehr-in-oesterreich-nach-verursacher/> (Zugriff: 13.02.2023).

⁸⁴Vgl. Zechmeister, A. et al. (2022 b), S. 135.

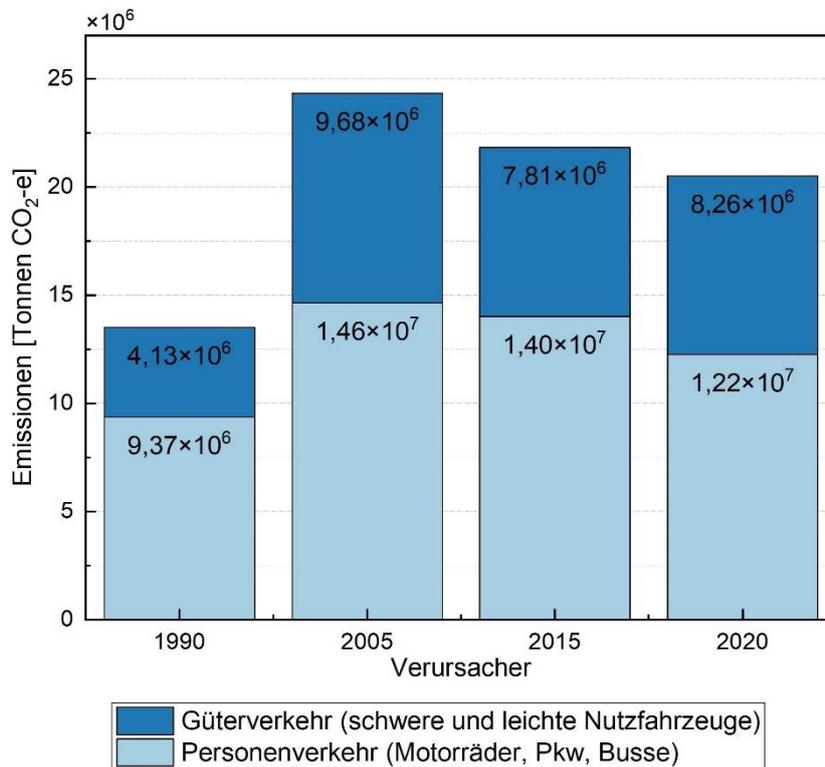


Abbildung 5: Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in Österreich von 1990 bis 2020⁸⁵

3.2 Strategien zur Dekarbonisierung des Verkehrs

Die wesentlichsten Stellhebel zur Reduzierung der künftigen Energienachfrage und des Emissionswachstums umfassen drei Bereiche. Der erste Bereich ist die Systemverbesserung. Dieser Bereich beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung der Funktionsweise des gesamten Straßengüterverkehrssystems, mit Schwerpunkt auf der Reduzierung der Straßenverkehrsleistung. Der zweite Bereich ist die Verbesserung der Fahrzeugeffizienz. Mittels der Fahrzeugeffizienz soll eine Reduzierung des Energieverbrauchs des LKW erreicht werden. Das dritte Thema umfasst die Verwendung alternativer Kraftstoffe. Hierbei soll eine Umstellung von erdölbasierten Kraftstoffen auf andere Kraftstoffe wie Erdgas, Biokraftstoffe, Strom oder Wasserstoff geschehen.⁸⁶ Dabei ergibt sich das größte Potenzial zur Verringerung der CO₂-Emissionen im Straßengüterfernverkehr, insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen wegen ihrer hohen Kilometerleistung, ihres Gewichts und ihres Kraftstoffverbrauchs.⁸⁷

⁸⁵Vgl. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/962273/umfrage/treibhausgas-emissionen-des-sektors-verkehr-in-oesterreich-nach-verursacher/> (Zugriff: 13.02.2023), (Darstellung leicht modifiziert).

⁸⁶Vgl. International Energy Agency (2017), S. 55.

⁸⁷Vgl. Kluschke, P. et al. (2019), S. 1010.

Obwohl viele verschiedene technologische Lösungen für die Energiewende im Straßenverkehr, wie zum Beispiel Elektrofahrzeuge zur Verfügung stehen, herrscht Uneinigkeit über die beste(n) Option(en).⁸⁸ Infolgedessen wird auf Möglichkeiten eingegangen, wie eine CO₂-Reduktion erzielt werden kann und welche möglichen Antriebstechnologien und alternativen Kraftstoffe für Schwerlastfahrzeuge verwendet werden können.

Die bekannteste Strategie zur Verringerung der CO₂-Emissionen im Güterverkehr ist „Avoid-Shift-Improve“ (ASI). Die Dimension „Avoid“ beschreibt die Vermeidung oder Anpassung des Transportbedarfs. Der Begriff „Shift“ stellt die Verlagerung der Transportnachfrage auf den effizientesten oder saubersten Verkehrsträger dar und „Improve“ beschreibt die Verbesserung der Technologie, um Fahrzeuge und Kraftstoffe energieeffizienter bzw. weniger kohlenstoffintensiv zu gestalten.⁸⁹ Der ASI-Ansatz fokussiert sich auf nachfrageseitige Maßnahmen für einen nachhaltigen Verkehr und bietet unter Nachhaltigkeitsaspekten einen ganzheitlichen Rahmen für eine Gesamtoptimierung des Verkehrssystems.⁹⁰ Im Straßengüterverkehr ist ein wesentlicher Schritt die Vermeidung und Verlagerung des Transportes. Dafür ist es notwendig, dass Transporte mit Binnenschiff und Bahn erhöht werden.⁹¹ Das Ziel bei der Vermeidung des Verkehrs ist, die Auslastung der LKW zu erhöhen oder die Verkehrswege mittels verbesserten Siedlungs- und Produktionsstrukturen zu reduzieren. Der Fokus liegt hierbei auf einer erhöhten Mobilität mit verringertem Verkehr. Wesentlich ist, dass wirtschaftliche Anreize vorhanden sind, die das Ziel einer Verhaltensänderung und Verkehrsplanung verfolgen, mit dem Schwerpunkt auf der Verkehrsvermeidung und umweltfreundlichen Verkehrsträgern.⁹² Obwohl das Potential der Verkehrsverlagerung auf Bahn und Binnenschiff für die Umwelt hoch ist, stellt die Infrastruktur als auch der Wettbewerb erhebliche Probleme dar. Zu den Problemen gehören zum einen die langen Lieferzeiten und zum anderen die geringe Lieferflexibilität. Wenn der Fokus auf der Verwendung von umweltfreundlichen Transportmitteln liegt, ist beispielsweise eine Verminderung der Nachteile des Wettbewerbs von Binnenschiff und Bahn erforderlich. Des Weiteren ist eine staatliche

⁸⁸Vgl. Wanitschke, A.; Hoffman, S. (2020), S. 509.

⁸⁹Vgl. Zhu, Y. et al. (2023), S. 1.

⁹⁰Vgl. Pfoser, S. (2022), S. 31.

⁹¹Vgl. Sailer, M. et al. (2014), S. 10.

⁹²Vgl. Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/mehr-mobilitaet-weniger-verkehr> (Zugriff: 01.03.2023).

Förderung der Verbesserung der Transportmittel wichtig, um einen Erfolg in Richtung Klimaneutralität zu erzielen. Hierbei können Öko-Steuern auf Kraftstoffe zu Investitionen in umweltfreundliche Transportmittel führen.⁹³

Einen weiteren wesentlichen Ansatzpunkt stellen effiziente und alternative Antriebstechnologien dar, die geringeren Lärm, geringere Schadstoffe und mehr Klimaschutz bieten.⁹⁴ Die Literatur ist sich einig, dass es auf lange Sicht keine andere Option gibt, um auf diese umzusteigen, weshalb diese im Fokus dieser Arbeit stehen und im Folgenden erläutert werden.

3.3 Alternative Antriebstechnologien für Schwerlastfahrzeuge

Neben Maßnahmen, welche die Mobilität und Fahrzeuge betreffen, wie zum Beispiel die Verlagerung auf die Schiene und Effizienzverbesserung, ist es wesentlich, Strom aus erneuerbaren Quellen gezielt einzusetzen. Denn erneuerbare Energiequellen werden in Zukunft nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. Beispielsweise werden in Deutschland unterschiedliche strombasierte Antriebstechnologien betrachtet, jedoch variiert die Energieeffizienz dieser Konzepte. Batterieelektrische LKW, unter 26t zulässiges Gesamtgewicht, sind für den regionalen und lokalen Bereich bereits zulässig. Sattel- und schwere Lastzüge tragen jedoch mit 75% zu den THG-Emissionen im Straßengüterverkehr bei. Aus diesem Grund ist es wesentlich, in diesem Segment alternative Antriebstechnologien zu entwickeln, um die Klimaziele zu erreichen. Zu den Alternativen des herkömmlichen Dieselmotors in LKW mit Verbrennungsmotor zählen:

- Brennstoffzellen-LKW (FCEV)
- Batterieelektrische-LKW (BEV)
- Oberleitungs-LKW (ERS) als Diesel Hybrid (HEV) oder Batterieelektrisch
- Synthetische Kraftstoffe in Verbrenner-LKW

Jedes dieser Konzepte beinhaltet erneuerbaren Strom. Jedoch unterscheiden sie sich in der Effizienz der Energienutzung. Den höchsten Gesamtwirkungsgrad von 73% erreichen die Oberleitungs- und Batterie-LKW. Der Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellen-LKW liegt hierbei bei 31%. Bei der Verwendung synthetischer

⁹³Vgl. Sauren, R. (2012), S. 138f.

⁹⁴Vgl. Sailer, M. et al. (2014), S. 11.

Kraftstoffe erfordert die gesamte Prozesskette die 3,5-fache Energie verglichen mit den direktelektrischen Antrieben. Hier entspricht der Gesamtwirkungsgrad 21%. Batterie- und Oberleitungs-LKW können bereits 2030, auch wenn der Strommix noch teilweise fossil ist, die Klimabilanz gegenüber Diesel-LKW um 40-60% verbessern. Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen und Wasserstoff werden erneuerbare Energien benötigt, um einen Klimaschutzbeitrag leisten zu können. Bis dahin sollten synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff in denjenigen Bereichen verwendet werden, in denen es keine Alternativen gibt, wie beispielsweise dem Luftverkehr oder der Industrie. Allerdings stehen im Straßengüterverkehr direktelektrische Alternativen, mit Vorteilen der Klimabilanz und technischer Machbarkeit, zur Verfügung.⁹⁵ Die folgende Tabelle gibt eine kurze Übersicht der alternativen Technologien mit einer Erläuterung von verwendetem Motor und Technik.

Tabelle 2: Mögliche Technologien für Schwerlastfahrzeuge⁹⁶

	BEV-LKW	FCEV-LKW	ERS-LKW	Verbrenner-LKW
Motor	Elektromotor	Elektromotor	Elektromotor und zusätzlicher Verbrennungsmotor	Angepasster Verbrennungsmotor
Energie-speicher	Batterie	Wasserstoff	Batterie (bzw. Strom aus Oberleitung), fossile Kraftstoffe	Synthetische Kraftstoffe
Umwandlungs-schritt	Direktnutzung	Brennstoffzelle	Direktnutzung	Direktnutzung
Heraus-forderung	Reichweite, Ladedauer	Umwandlungs-verluste, Infrastrukturaufbau, Kraftstoffkosten	Annahme und Fusion in Logistikprozesse, Infrastrukturaufbau	Reduktion der Kosten bei Kraftstoffherstellung, Umwandlungs-verluste

Im nächsten Schritt wird genauer auf den Elektroantrieb, Verbrennungsmotor und Hybrid eingegangen, da diese Antriebe in der Literatur als eine alternative Möglichkeit für Schwerlastfahrzeuge gesehen werden.

⁹⁵Vgl. Helms, H.; Jöhrens, J. (2021), S. 1ff.

⁹⁶Vgl. Plötz, P. et al. (2018), S. 6, (Darstellung leicht modifiziert).

3.3.1 Elektroantrieb

3.3.1.1 Energie aus Batterie

Während die Elektrifizierung von Personenkraftwagen in vollem Gange ist, gibt es bei der Dekarbonisierung von schweren Nutzfahrzeugen noch diverse Herausforderungen. Insbesondere der hohe Energieverbrauch in Kombination mit den hohen täglichen Reichweiten macht den batterieelektrischen Betrieb bei schweren Nutzfahrzeugen deutlich schwieriger als den bei Personenkraftwagen.⁹⁷ BEV speichern die elektrische Energie in bordeigenen Akkus, die an Ladestationen konduktiv oder induktiv aufgeladen werden können.⁹⁸ Wie bei Elektroautos sind auch die wichtigsten Leistungsaspekte für Batterien bei LKW die gravimetrische und volumetrische Energiedichte, die spezifische Leistung, die Lebensdauer und die Anzahl der Entladezyklen, die eine Batterie durchlaufen kann, bevor sie zu viel Kapazität verliert. Zudem zählen auch die Anforderungen an das Temperaturmanagement und die Sicherheit zu den wesentlichen Leistungsaspekten der Batterien.⁹⁹ Zusätzliche Herausforderungen bei der Elektrifizierung der Schwerlastkraftwagen (HFT) stellen die Kosten für große Batterien dar. Hierbei ist es wesentlich, den Batteriebedarf durch die Stromversorgung der Fahrzeuge während der Fahrt zu reduzieren.¹⁰⁰ Des Weiteren kann auch die derzeit begrenzte Auswahl an Fahrzeugtypen die Marktdurchdringung bis 2030 beeinträchtigen.¹⁰¹ Für schwere Nutzfahrzeuge sind größere und schwerere Batterien erforderlich, welches zu folgenden Einschränkungen führt:

- Nutzlastverluste
- Erhöhte Achslast
- Mehr Investitionskosten
- Extrem hohe Ladeleistung und lange Ladedauer der Batterie

Mit diesen Einschränkungen kommt es in Folge zu weiteren Problemen. Beispielsweise kommt es durch den Verlust der Nutzlast durch weniger Fracht pro Transportfahrzeug zu höheren Transportkosten, da das Transportgewicht nicht überschritten werden darf.¹⁰² Es ist ersichtlich, dass die Hürden für die Elektrifizierung für LKW mit einem

⁹⁷Vgl. Speth, D.; Funke, S. A. (2021), S. 1.

⁹⁸Vgl. Kluschke, P. et al. (2019), S. 1012.

⁹⁹Vgl. International Energy Agency (2017), S. 93.

¹⁰⁰Vgl. Helms, H.; Jöhrens, J. (2021). S. 3.

¹⁰¹Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität AG 2 (2021), S. 25.

¹⁰²Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 81.

geringeren zulässigen Gesamtgewicht und einer geringeren jährlichen Fahrleistung niedriger sind als für schwere Nutzfahrzeuge. Plug-in und batterieelektrische leichte Nutzfahrzeuge (LCV) und mittelschwere Lastkraftwagen (MFT) treten bereits im städtischen Kontext, in die frühe Einführungsphase ein. Der größte Teil des Ölverbrauchs bezieht sich auf Langstreckentransporte ihr Anteil am gesamten Straßengüterverkehr und auch am Energieverbrauch, nimmt kontinuierlich zu. Aus diesem Grund wurden auch für Schwelastfahrzeuge Demonstrationsprojekte gestartet.¹⁰³ Der Hauptvorteil des BEV ist die Möglichkeit des Nischenbetriebs, während die Ladeinfrastruktur noch in der Entwicklung ist.¹⁰⁴

3.3.1.2 Energie aus Oberleitung

Oberleitungsfahrzeuge könne eine Alternative im Straßengüterverkehr für schwere Nutzfahrzeuge sein.¹⁰⁵ Elektrische Straßensysteme (ERS) basieren auf Fahrzeugen, die Strom von Stromübertragungsanlagen entlang der Straße beziehen können.¹⁰⁶ Mit einer dynamischen Zufuhr des Stroms wird eine unbeschränkte Reichweite innerhalb des Infrastrukturnetzes gewährleistet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten wie die Energie dynamisch zugeführt werden kann. Zu diesen konduktiven Systemen zählt eine Oberleitung, eine in der Fahrbahn eingebaute Stromschiene und eine induktive Energieübertragung.¹⁰⁷ In Abbildung 6 sind die Möglichkeiten der Energieversorgung dargestellt.

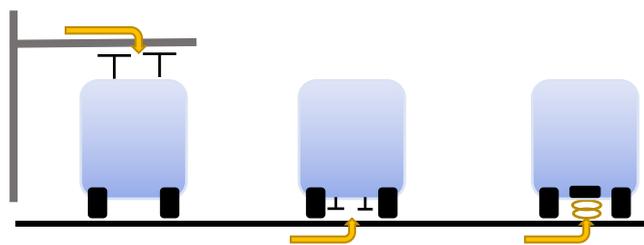


Abbildung 6: Dynamische Energieversorgung (von links: Oberleitung, Stromschiene und Induktion)¹⁰⁸

¹⁰³Vgl. International Energy Agency (2017), S. 93.

¹⁰⁴Vgl. Speth, D.; Funke, S. A. (2021), S. 10.

¹⁰⁵Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 78.

¹⁰⁶Vgl. International Energy Agency (2017), S. 94.

¹⁰⁷Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 82.

¹⁰⁸Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 82, (Darstellung leicht modifiziert).

Die Versorgungsinfrastruktur ist bei den drei Varianten ähnlich. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich das Übertragungssystem zum Fahrzeug in manchen Punkten. In dieser Arbeit wird nur auf die Oberleitung eingegangen, da es die am weitesten entwickelte Variante ist. Das System der Oberleitung setzt sich aus zwei Fahrdrähten zusammen. Diese sind ober den Fahrzeugen an den Masten in Richtung der Fahrt befestigt. Am Fahrzeug sind zwei Pantographen angebracht, wodurch eine Energieübertragung bei direktem Kontakt mit dem Fahrdraht entsteht.¹⁰⁹ Bei den ERS-Fahrzeugen kann es sich um Hybrid-, Batterie-, Elektro- oder Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge handeln. Zudem können normale Fahrvorgänge durchgeführt werden, wie zum Beispiel Überholvorgänge und autonomes Fahren außerhalb der Straßen mit ERS.¹¹⁰ Obwohl eine bestimmte Strecke abseits der Autobahn mit Dieselmotor bewerkstelligt werden muss, ergibt sich ein Reduktionspotential von 45% im Vergleich zu einem reinen Verbrenner.¹¹¹

Oberleitungssysteme befinden sich bereits in Pilotphasen, zum Beispiel wurde in Deutschland die erste Strecke im Jahr 2019 eröffnet.¹¹² Jedoch stellen die hohen Investitionen eine Herausforderung für den Aufbau von Oberleitungen für Oberleitungsfahrzeuge dar. Zusätzlich müssen diese auch intensiv verwendet werden, um die Kilometerkosten zu senken. In diesem Bereich ist kein Nischenbetrieb möglich. Allerdings, wenn eine hohe Auslastung der Oberleitungen erreicht wird, können mit dieser Technologie die niedrigsten Gesamtkosten erzielt werden.¹¹³

3.3.1.3 Energie aus Brennstoffzelle

Eine Option zur Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs können Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) sein. Sie haben keine direkten Emissionen und würden zur Verringerung der Verwendung fossiler Kraftstoffe beitragen.¹¹⁴ FCEV verwenden Wasserstoffspeicher an Board, wobei mit dem Wasserstoff in einer Brennstoffzelle Strom erzeugt wird. Der Wasserstoff wird in einem Tank bei 350 bis 700 bar gespeichert.¹¹⁵ Der Antrieb im FCEV gleicht vom technischen Aufbau batterieelektrischen Fahrzeugen. Zudem können sie auch als Hybridfahrzeuge eingesetzt werden. Hierbei wird eine

¹⁰⁹Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 82.

¹¹⁰Vgl. International Energy Agency (2017), S. 94.

¹¹¹Vgl. Helms, H.; Jöhrens, J. (2021), S. 3.

¹¹²Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 82.

¹¹³Vgl. Speth, D.; Funke, S. A. (2021), S. 10.

¹¹⁴Vgl. Çabukoglu et al. (2019), S. 36.

¹¹⁵Vgl. Kluschke, P. et al. (2019), S. 1012f.

Batterie zur Speicherung der Leistungshöhepunkte verwendet, um im Fahrzeug eine kleinere Brennstoffzelle zu verbauen.¹¹⁶ Möglichkeiten für die Anwendung sind:

- Die Verbrennung von Wasserstoff in einem dementsprechend angepassten konventionellen Verbrennungsmotor.
- Die Verwendung von Brennstoffzellen-Systemen zur Wandlung von Wasserstoff in elektrische Energie.

Die erste Möglichkeit hat bis dato keine wesentliche Verwendung erlangt und wird im Kapitel 3.4 kurz betrachtet.¹¹⁷

Eine Herausforderung des Wasserstoffes ist aufgrund der minimalen volumetrischen Energiedichte, die platzsparende Pufferung des Energieträgers. Es gibt bereits unterschiedliche Konzepte zur Speicherung. Gegenüber der direkten Stromnutzung enthalten Brennstoffzellen-LKW eine kleinere Well-to-Wheel-Energieeffizienz.¹¹⁸ Wasserstoff kann für FCEV gasförmig, flüssig und flüssig-tiefgekühlt im LKW gespeichert werden.¹¹⁹

Derzeit sind noch keine FCEV mit hoher Reichweite am Markt verfügbar. Gleich wie bei der Infrastruktur der batterieelektrischen Fahrzeuge besteht auch bei der Wasserstoffinfrastruktur ein Problem.¹²⁰ Dennoch ist Wasserstoff technisch gesehen ein sehr attraktives Mittel zur Dekarbonisierung von schweren Nutzfahrzeugen, obwohl hohe Investitionen erforderlich sein könnten, um zu gewährleisten, dass die Wasserstoffproduktion wirklich aus erneuerbaren Energien gewonnen wird und die Fahrzeuge tagsüber ausreichend Zugang zu benötigter Energie haben.¹²¹ Wenn der aktuelle Stand der Technik betrachtet wird, erfüllen FCEV die Anforderungen der Emissionsfreiheit. Hingegen bieten BEV ökonomisch gesehen keine sinnvolle Lösung für den transnationalen Transport von Gütern in Hinsicht auf Antriebsstrangvolumen und -geschwindigkeit.¹²²

¹¹⁶Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 80.

¹¹⁷Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität AG 6 (2021), S. 10.

¹¹⁸Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 80.

¹¹⁹Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität AG 2 (2021), S. 10.

¹²⁰Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 80.

¹²¹Vgl. Çabukoglu et al. (2019), S. 35.

¹²²Vgl. Dorda, A. et al. (2020), S. 131.

3.3.2 Verbrennungsmotor

3.3.2.1 Flüssigkraftstoff

Dieselmotoren zählen aktuell noch zu den führenden Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr. Die hohe Technologiereife mit einer sehr guten Zuverlässigkeit und guten Servicenetzwerk zeichnet diese Antriebstechnologie aus. Näheres zu den Flüssigkraftstoffen in Verbrennungsmotoren wird in Kapitel 3.4 erläutert.¹²³

3.3.2.2 Gasförmiger Kraftstoff

Eine alternative zum konventionellen Dieselmotor stellen Erdgasantriebe dar. Diese weisen reduzierte Luftschadstoffemissionen und CO₂-Emissionen auf. Damit große Reichweiten erzielt werden können, muss Erdgas auf Grund seiner geringen Energiedichte komprimiert oder verflüssigt werden. Für Pkw kann komprimiertes Erdgas (CNG) eingesetzt werden und für LKW wird verflüssigtes Erdgas (LNG) häufiger verwendet. Bei der Herstellung wird LNG mittels Kühlung verflüssigt und zeigt ein Sechshundertstel des Volumens von gasförmigem Erdgas auf. Anhand der geringen Energiepreise der LNG-LKW, entsteht ein Kostenvorteil im Vergleich zu konventionellen Diesel-LKW.¹²⁴ Es erfolgt eine genauere Beschreibung von LNG in Kapitel 3.4. CNG wird nicht behandelt, da es hauptsächlich bei PKW zum Einsatz kommt und nicht bei HFT.

3.3.3 Hybrid

Hybridelektrofahrzeuge (HEV) kombinieren Antriebstechnologien in einem Fahrzeug.¹²⁵ HEV verwenden zwei Antriebssträngen und werden als Zwischenstufe zwischen dem dieselbetriebenen Verbrennungsmotor und der batterieelektrischen Technologie eingestuft. Es gibt zwei Arten der Hybrid-Technologien und zwar mit oder ohne bordeigene Ladegeräte. Ohne die Ausrüstung lädt das Hybridelektrofahrzeug nur durch Rekuperation von Energie während der Fahrt.¹²⁶ Die Hybridisierung mit externer Nachladeoption (PHEV) ist für den urbanen Verkehr mit geringen Wegstrecken und vielen Möglichkeiten zum Aufladen wesentlich, hingegen nicht für den Fernverkehr.¹²⁷ Die Hybridisierung stellt eine Übergangsphase bei der Elektrifizierung von Güterverkehrsflotten dar. Es ist schwierig, verallgemeinernde

¹²³Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 79.

¹²⁴Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 79.

¹²⁵Vgl. Breuer, J. L. (2022), S. 2.

¹²⁶Vgl. Kluschke, P. et al. (2019), S. 1012.

¹²⁷Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 80.

Aussagen über die CO₂-Reduzierung durch Hybridisierung zu treffen, da sie mehrere unterschiedliche Technologien umfasst. Volvo hat bereits Versuche mit Hybrid-LKW auf Langstreckenzyklen durchgeführt und CO₂-Einsparungen erzielen können.¹²⁸

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass obwohl mittels der Fahrzeugtechnologien Einsparungen an klimarelevanten Gasen erzielt werden können, dies nicht ausreichen wird, um die Klimaziele zu erreichen. Es ist absehbar, dass eine Elektrifizierung des Verkehrssektors auf Basis erneuerbarer Energien notwendig sein wird. Die Verwendung der E-Fahrzeuge ist in Bezug auf den Wirkungsgrad der Energienutzung die günstigste Variante, da keine Wandlungsverluste entstehen, dennoch zeigt sie ökonomische und technische Einsatzgrenzen auf. Ebenso ist die Verwendung von Wasserstoff technologisch positiv zu sehen. Es ist derzeit noch unklar, welche Elektrifizierung den Ansprüchen des Verkehrssektors genügen.¹²⁹ Obwohl der Anteil der emissionsfreien Fahrzeuge an den Neufahrzeugverkäufen in allen Nutzfahrzeugsegmenten in Europa derzeit gering ist, haben eine Reihe von Marktentwicklungen die Abkehr von dieser kohlenstoffintensiven Realität signalisiert.¹³⁰

3.4 Alternative Energieträger für Schwerlastfahrzeuge

Welche Art von alternativem Kraftstoff sich auf dem europäischen Markt durchsetzen wird ist noch nicht absehbar. Die Rentabilität alternativer Kraftstoffe hängt von ihren technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Merkmalen sowie von den politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen ab.¹³¹ Alternative Kraftstoffe sind ein Mittel zur Bewältigung der zahlreichen kurz- und langfristigen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Probleme, die sich aus der Abhängigkeit des Straßenverkehrs und besonders der schweren Nutzfahrzeuge, vom Erdöl ergeben. Die Diversifizierung des derzeitigen Kraftstoff- und Fahrzeugmixes unter Verwendung von Alternativen wie zum Beispiel Erdgas, Biokraftstoffe oder Elektrizität würden Möglichkeiten zur Dekarbonisierung bieten.¹³²

¹²⁸Vgl. McKinnon, A. (2018), S. 169.

¹²⁹Vgl. Scheelhaase, H. et al. (2018), S. 663.

¹³⁰Vgl. Noll, B. et al. (2022), S. 16.

¹³¹Vgl. Albrecht, F.G.; Nguyen, T. (2020), S. 1.

¹³²Vgl. Mulholland, E. et al. (2018), S. 685.

3.4.1 Dieselkraftstoff

Der geringe Kraftstoffverbrauch und der niedrige Kraftstoffpreis haben dazu geführt, dass sich der Dieselmotor zu einem Hauptantrieb für Schwerlastfahrzeuge entwickelt hat.¹³³ Obwohl der Kraftstoff eine hohe Technologiereife besitzt, gibt es einige zentrale Nachteile. Die Herstellung des Kraftstoffes erfolgt aus fossilen Ressourcen und bei der Verbrennung entstehen THG-Emissionen als auch Luftschadstoffemissionen. Zudem haben Dieselmotoren einen maximalen Wirkungsgrad von 38-46% und die Effizienzpotentiale sind beschränkt. Eine Reduzierung der CO₂-Emissionen kann zum Beispiel durch eine Beimischung von Biodiesel erreicht werden. Ein Einsatz von synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel Biodiesel könnte positiv zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen.¹³⁴ Nach Helgeson und Peter (2020) wird die benötigte Menge an Diesel im Straßenverkehrssektor um 60% zwischen 2020 und 2030 sinken.¹³⁵

3.4.2 Biokraftstoffe

Es gibt verschiedene Biokraftstoffe, die das Potenzial haben, den Verbrauch von Erdölprodukten im schweren Straßenverkehr zu ersetzen und eine Dekarbonisierung in diesem Sektor hervorbringen können.¹³⁶ Der Einsatz von Biokraftstoffen kann vor allem in Ländern mit hohem Biomassepotential dominieren.¹³⁷ Die Argumente für Biokraftstoffe werden durch ihre hohe Energiedichte und ihre Kompatibilität mit den bestehenden Fahrzeugflotten und Kraftstoffverteilungsinfrastrukturen bestärkt. Die Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen sind bereits technisch ausgefreit. Es gibt eine Vielzahl an Biokraftstoffoptionen, die das Potenzial haben, den Verbrauch von Erdölprodukten im Straßengüterverkehr zu ersetzen.¹³⁸ Folgend werden die vielversprechendsten Energieträger dargestellt:

- Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) ist ein auf Biomasse basierender Dieselkraftstoff. In Österreich als auch in Deutschland kann FAME zu 7% dem Diesel untergemischt werden. Nach den gesetzlichen Regelungen kann FAME in Europa zu 20%, 30% und 100% zu dem konventionellen Diesel

¹³³Vgl. Gruden, D. (2008), S. 206.

¹³⁴Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 79.

¹³⁵Vgl. Helgeson, B.; Peter, J. (2020), S. 8.

¹³⁶Vgl. Mulholland, E. (2018), S. 685.

¹³⁷Vgl. Albrecht, F. G.; Nguyen, T. (2020), S. 1.

¹³⁸Vgl. International Energy Agency (2017), S. 86.

beigemischt werden. Jedoch muss die Mischung von dem Fahrzeughersteller genehmigt sein.^{139, 140}

- Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) sind Kohlenwasserstoffe die in CO-Hydrieranlagen aus tierischen oder pflanzlichen Fetten oder Ölen erzeugt werden.¹⁴¹ HVO kann ohne technische Änderungen an Dieselmotoren von HFT eingesetzt werden und zudem kann HVO auch an der Betankungsinfrastruktur unvermischt (HVO100) genutzt werden. Jedoch werden vorwiegend Mischungen von 20%-30% HVO mit fossilem Diesel verwendet.¹⁴² HVO ist auch heute schon zu geringen Anteilen im klassischen B7 untergemischt.

Ein fundamentales Hindernis für die Einführung von Biokraftstoffen ist ihre langfristige wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit im Verhältnis zu den stark schwankenden Ölpreisen. Auch wenn bestimmte Biokraftstoffpfade wirtschaftlich rentabel sein sollten, wird es in Hinsicht auf das Klima und die Nachhaltigkeit wahrscheinlich nur eine begrenzte Menge an Rohstoffen geben, die die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln, Land, Wasser und Bodenressourcen nicht gefährden. Trotz der Hindernisse werden fortschrittliche und kohlenstoffarme Biokraftstoffe in den kommenden Jahrzehnten als Brücke vom Übergang von fossilen Brennstoffen zu extrem emissionsarmen und emissionsfreien Energieträger gesehen wie beispielsweise Wasserstoff, Strom und PtX Kraftstoffe.¹⁴³ Da zum Beispiel HVO den konventionellen Diesel vollständig ersetzen kann, wurde in der Studie von Navas-Anguita et al. (2020) angenommen, dass HVO im Jahr 2050 10% der derzeit mit Diesel betriebenen Fahrzeuge in Spanien ausmachen könnte.¹⁴⁴

3.4.3 LNG

LNG-LKW reduzieren wegen des geringen Kohlenstoffgehalts im Kraftstoff die THG-Emissionen im Vergleich zu den Diesel-LKW. Jedoch liegt der Gesamtwirkungsgrad von LNG-LKW auf Grund der verbrennungsmotorischen Technologie im Bereich von Diesel-LKW. Um klimaneutral zu sein, wäre der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen aus

¹³⁹Vgl. Breuer, J. L. (2022), S. 26.

¹⁴⁰Vgl. Fachverband der Chemischen Industrie Österreichs, <https://www.biokraft-austria.at/> (Zugriff:02.03.2023).

¹⁴¹Vgl. Aichmayer, S. et al. (2021), S. 16.

¹⁴²Vgl. International Energy Agency (2017), S. 86.

¹⁴³Vgl. Mulholland, E. (2018), S. 685ff.

¹⁴⁴Vgl. Navas-Anguita, Z. et al. (2020), S. 3.

erneuerbaren Energien wesentlich.¹⁴⁵ Ein wesentlicher Vorteil des LNG ist beispielsweise die Mautbefreiung in Deutschland bis Ende 2030. Des Weiteren sind die Leistungs- und Fahreigenschaften ähnlich zu den Diesel-LKW und die Klimabilanz kann verbessert werden.¹⁴⁶ Vor allem durch den günstigeren Kraftstoffpreis können LNG-LKW mit dem konventionellen Diesel-LKW konkurrieren.¹⁴⁷

LNG-LKW sind bereits am Markt verfügbar, aber werden in der Praxis wenig verwendet.¹⁴⁸ Zum Beispiel werden LNG-LKW von Volvo mit Dieselmotoren im Dual-Fuel-Betrieb mit 5%-10% Diesel eingesetzt.¹⁴⁹ Ein wesentliches Problem stellt aktuell die Tankstelleninfrastruktur dar, da eine kleine Anzahl an Tankstellen zugelassen ist und kein flächendeckender Bedarf herrscht. Des Weiteren gibt es auch Bedenken bezüglich der Wartungskosten und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge.¹⁵⁰

3.4.4 Synthetische Kraftstoffe

Es gibt unterschiedliche Bezeichnungen für E-Fuels, diese werden auch als strombasierte Kraftstoffe, als stromgenerierte Kraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe bezeichnet.¹⁵¹ Es ist wesentlich, zwischen den Begriffen „synthetische Kraftstoffe“ und „Elektrokraftstoffe“ zu unterscheiden, da sie sich im Hinblick auf den Produktionsprozess differenzieren. In der Studie von Ridjan et al. (2016) wird ersichtlich, dass die Literatur sehr uneinheitlich ist, welches Verfahren für die Herstellung von diesen Kraftstoffen verwendet wird. Der Begriff synthetischer Kraftstoff wird zur Beschreibung von Kraftstoffen verwendet, die aus Kohle-, Gas- und Biomasse unter anderem mit der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden. Der Begriff Elektrokraftstoffe wird herangezogen, wenn es zu einer Umwandlung von Elektrizität als chemische Energie in Form von flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen kommt.¹⁵²

Für Langstrecken-Schwerlastfahrzeuge werden leichte und energiereiche Kraftstoffe wie synthetisch hergestellte Kraftstoffe aus Power-to-X-Pfaden benötigt, um den

¹⁴⁵Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 79.

¹⁴⁶Vgl. Volvo, <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/lng-lkw.html> (Zugriff: 15.02.2023).

¹⁴⁷Vgl. Askin, A. C. et al. (2015), S. 1.

¹⁴⁸Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 79.

¹⁴⁹Vgl. Breuer, J. L. et al. (2022), S. 42.

¹⁵⁰Vgl. Hacker, F. et al. (2020), S. 79.

¹⁵¹Vgl. Umweltbundesamt,

<https://www.umweltbundesamt.at/mobilitaet/technologie/synthetische-verbrennungskraftstoffe> (Zugriff: 16.02.2023).

¹⁵²Vgl. Ridjan, I. et al. (2016), S. 3717.

Übergang zu erneuerbaren Energien voranzutreiben.¹⁵³ Der Herstellungsprozess beginnt bei erneuerbarem Strom und Wasser, woraus mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt wird. Die Weiterverarbeitung des Wasserstoffes geschieht entweder mit einer katalytischen Synthese - mit Kohlendioxid zu Methan oder über die Fischer-Tropsch Synthese. Die Endprodukte der Synthese werden wiederum zu hochwertigen Kraftstoffen veredelt. Solche Kraftstoffe benötigen keine Anpassung der Infrastruktur, da der Kraftstoff in herkömmlichen Verbrennungsmotoren und Tankstelleninfrastrukturen verwendet werden kann.¹⁵⁴

Insbesondere PtX-Kraftstoffe kommen ab 2040, laut aktuellen Studien, im Bereich der HFT zum Einsatz. Zunächst als Flüssiggasgemisch und dann zusammen mit PtX-Flüssigwasserstoff (PtX LH₂) und PtX-Diesel.¹⁵⁵ Vor allem spielen sie in Ländern mit erheblichen Wind- und Solarpotenzial für erneuerbaren Strom eine wesentliche Rolle.¹⁵⁶ Bezüglich der Studien werden im Jahr 2050 mehr als 55% der an den europäischen Straßenverkehr verkauften PtX-Kraftstoffe von schweren Nutzfahrzeugen verbraucht. Insgesamt soll der Anteil von PtX-Kraftstoffen im europäischen Straßenverkehrssektor bis 2050 etwa 27% erreichen. Laut Helgeson und Peter (2020) sollen zu diesem Zeitpunkt sowohl fossile Kraftstoffe als auch Biogasbenzin und Biodiesel vollständig aus dem Kraftstoffmix ausgeschlossen werden.¹⁵⁷ Synthetische Kraftstoffe sind herstellungsseitig die teuerste Variante, aber es können die derzeitig verwendeten Verbrennungsmotoren weiterverwendet werden.¹⁵⁸

3.4.4.1 Dimethylether

Die Herstellung von Dimethylether (DME) auf CO₂-Basis erfolgt in einem zweistufigen Verfahren, das auf der trockenen Reformierung von Methan und CO₂ zu Synthesegas und der anschließenden Direktsynthese von DME basiert. Das Dekarbonisierungspotenzial von Kraftstoffen auf CO₂-Basis ist jedoch umstritten, da CO₂ bei der Verbrennung des Kraftstoffs wieder in die Atmosphäre abgegeben wird.¹⁵⁹

¹⁵³Vgl. Kany, M. S. et al. (2022), S. 2.

¹⁵⁴Vgl. Umweltbundesamt,

<https://www.umweltbundesamt.at/mobilitaet/technologie/synthetische-verbrennungskraftstoffe> (Zugriff: 16.02.2023).

¹⁵⁵Vgl. Helgeson, B.; Peter, J. (2020), S. 8.

¹⁵⁶Vgl. Albrecht, F.G.; Nguyen, T. (2020), S. 2.

¹⁵⁷Vgl. Helgeson, B.; Peter, J. (2020), S. 8.

¹⁵⁸Vgl. Scheelhaase, H. et al (2019), S. 663.

¹⁵⁹Vgl. Fernández-Dacosta, C. et al. (2019), S. 590ff.

DME auf CO₂-Basis hat eine begrenzte praktische Bedeutung, da es keine günstige Kombination von Kosten und Umweltverträglichkeit gibt.¹⁶⁰

3.4.5 Wasserstoff

Die Herstellung von Wasserstoff als Kraftstoff kann unterschiedliche Umweltauswirkungen haben, da verschiedene Wege und Technologien zur Herstellung eingesetzt werden können.¹⁶¹ Es gibt unterschiedliche Techniken zur kohlenstoffarmen Wasserstofferzeugung. Die Produktionsmethode des resultierenden Wasserstoffes wird mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet. Folgend werden die Farbkennzeichnungen und die allgemeinen Definitionen erläutert:^{162, 163}

- **Grüner Wasserstoff:** Wird mit Elektrolyseuren produziert, die mit erneuerbarem Strom betrieben werden. Bei der Herstellung entstehen keine CO₂-Emissionen.
- **Blauer Wasserstoff:** Wird unter der Verwendung von fossilen Brennstoffen und der Carbon Capture and Storage- (CCS)-Technologie erzeugt. Durch die CCS-Technik, kommt es auch bei dem blauen Wasserstoff zu keinen CO₂-Emissionen.
- **Türkiser Wasserstoff:** Wird durch Pyrolyse hergestellt, wobei fester Kohlenstoff anstelle von CO₂ gewonnen wird. Die Voraussetzung bei der Herstellung, dass keine CO₂-Emissionen entstehen ist, dass der Kohlenstoff durchgehend gebunden bleibt und auch nicht bei der weiteren Verarbeitung verbrannt wird.
- **Grauer Wasserstoff:** Wird entweder durch Dampfreformierung fossiler Brennstoffe wie Kohle oder Erdgas hergestellt oder es wird kein erneuerbarer Strom zur Elektrolyse von Wasserstoff verwendet. Hierbei entstehen CO₂-Emissionen.

Zudem zählt die Methan-Dampfreformierung zu der ausgereiftesten Technologie zur Herstellung von Wasserstoff. Hierbei wird Erdgas als Ausgangsstoff verwendet. Jedoch ist es für die Etablierung von Wasserstoff als Verkehrskraftstoff erforderlich, dass H₂ als sauberer Kraftstoff eingestuft wird, der wirksam zur Dekarbonisierung des Verkehrssystems beiträgt. Um sauberen Wasserstoff zu erzeugen wurde die Wasserelektrolyse als wichtigste und saubere Technologie für die

¹⁶⁰Vgl. Fernández-Dacosta, C. et al. (2019), S. 605.

¹⁶¹Vgl. Breuer, J.L. et al. (2022), S.35f.

¹⁶²Vgl. Kotze, R. et al. (2021), S. 2.

¹⁶³Vgl. EWE, <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/die-farben-des-wasserstoffs> (Zugriff: 07.03.2023).

Wasserstoffherzeugung ermittelt.¹⁶⁴ Anhand der Integration von erneuerbarem Strom werden insbesondere die Technologien und Verfahren der Wasserelektrolyse als eine Form der Wasserstoffherzeugung im Kontext zukünftiger alternativer Kraftstoffe betrachtet. Zudem wurden bei der elektrolytischen Wasserstoffherzeugung im Vergleich zur fossilen Referenz etwa ein Drittel niedrigere Werte für Feinstaub festgestellt. Außerdem bestätigen Studien, dass der Einsatz von erneuerbaren Energien für den Elektrolysebetrieb, im Vergleich zum Betrieb mit dem Strommix, eine Verringerung der Umweltauswirkungen bewirkt.¹⁶⁵

Die Speicherung von Wasserstoff in Fahrzeugen erfolgt in speziellen Tanks, mit einem Druck von 350 bar bis 700 bar. Da 700 bar Tanks eine viel höhere Reichweite pro Volumeneinheit ermöglichen, müssen Hochdrucktanks für LKW eingesetzt werden. Im Vergleich zu Diesel-LKW benötigt die Wasserstoffspeicherung viermal mehr Platz, um die gleiche Reichweite zu erzielen.¹⁶⁶

Ergebnisse zeigen, dass auf der einen Seite die Erzeugung von Wasserstoff mittels Methandampfreformierung die wirtschaftlichere Variante darstellt und auf der anderen Seite ist die Erzeugung des Wasserstoffes durch Elektrolyse aus erneuerbaren Energien die umweltschonendere Option.¹⁶⁷

3.4.6 Elektrizität

Bei der Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen kann eine Treibhausgasreduzierung von 95% im Vergleich zu fossilen Brennstoffen erreicht werden.¹⁶⁸ Die Dekarbonisierung der Stromerzeugung ist das Herzstück aller Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels. Bis 2050 muss der Großteil der weltweiten Stromerzeugung kohlenstofffrei sein, um das in der 21. Weltklimakonferenz (COP21) gesetzte Ziel zu erreichen und den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis zum Jahr 2100 deutlich unter 2°C zu halten. Dies wird zum Teil durch die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien erreicht. Der Kohlenstoffgehalt der Elektrizität sinkt bereits weltweit, aber um das Ziel für 2050 zu erreichen, geschieht die Reduktion aus heutiger Sicht zu langsam. Allerdings kann der

¹⁶⁴Vgl. Navas-Anguita, Z. et al. (2020), S. 6f.

¹⁶⁵Vgl. Breuer, J. L. et al. (2022), S.35.

¹⁶⁶Vgl. International Energy Agency (2017), S. 98.

¹⁶⁷Vgl. Fernandez-Dacosta, C. et al. (2019), S. 590.

¹⁶⁸Vgl. Albrecht, F. G.; Nguyen, T. (2020), S. 1.

Rückgang der Kosten für Solar- und Windenergie die Umstellung auf erneuerbare Energien beschleunigen. Derzeit unterscheidet sich die Abnahme der durchschnittlichen Kohlenstoffintensität der Elektrizität und der Geschwindigkeit von Land zu Land. Die Stromversorgungsbranche wird einen Dekarbonisierungspfad einschwenken müssen, um bis 2050 kohlenstoffarme Elektrizität zu liefern. Für die Gütertransporte, die derzeit auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe im Fahrzeug angewiesen sind, wird der Übergang zu kohlenstoffarmer/kohlenstofffreier Elektrizität schwieriger und kostspieliger sein, als beispielsweise im Schienenverkehr.¹⁶⁹ Zudem soll der Anteil an Elektrizität laut Helgeson und Peter (2020) im Jahr 2050 im europäischen Straßenverkehrssektor 37% erreichen.¹⁷⁰ Außerdem deuten Ergebnisse der Studie von Navas-Anguita et al. (2020) darauf hin, dass ein zusätzlicher Strombedarf im Zusammenhang mit der Verbreitung von Elektrofahrzeugen benötigt wird und dabei werden Wind- und Solartechnologien eine Schlüsselrolle bei der Deckung dieses Bedarfs spielen.¹⁷¹

Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch die Herstellung der vielversprechenden alternativen Kraftstoffe, Potenziale zur Reduzierung der Umweltauswirkungen hervorgerufen werden. Bei der Herstellung alternativer Kraftstoffe kann eine erhebliche Verringerung des Treibhauspotenzials im Vergleich zu fossilen Referenzkraftstoffen erreicht werden. Die Produktion aller vielversprechenden Kraftstoffe könnte nahezu null THG-Emissionen erreichen. Außerdem hängen strombasierte Kraftstoffe stark davon ab, inwieweit sie für CO₂-Reduktionsziele in Frage kommen.¹⁷² Wesentlich ist, dass alternative Kraftstoffe durch Technologien auf der Grundlage erneuerbarer Energien erzeugt werden.¹⁷³

3.5 Barrieren und Motivatoren für den aktuellen Einsatz alternativer Optionen für Transportunternehmen

In diesem Abschnitt werden motivierende und einschränkende Faktoren für den Einsatz alternativer Optionen in Transportunternehmen erläutert.

Die meisten Unternehmen in der Logistikbranche haben im Bereich alternative Energieträger hauptsächlich Erfahrungen mit Biokraftstoffen und Erdgas. Dennoch

¹⁶⁹Vgl. McKinnon, A. (2018), S. 186.

¹⁷⁰Vgl. Helgeson, B.; Peter, J. (2020), S. 1.

¹⁷¹Vgl. Navas-Anguita, Z. et al. (2020), S. 1.

¹⁷²Vgl. Breuer, J. L. et al. (2022), S. 48.

¹⁷³Vgl. Navas-Anguita, Z. et al. (2020), S. 9.

sehen die meisten Transportunternehmen die Nutzung von Wasserstoff-LKW für das Jahr 2030 als eine Möglichkeit. Demgegenüber wird der Einsatz von batterieelektrischen-LKW und Oberleitungs-LKW teilweise skeptisch gesehen.¹⁷⁴ Obwohl bereits viele Lösungen für alternative Kraftstoffe und Antriebsstrangtechnologien identifiziert wurden, ist die Zahl der beteiligten Erstausrüster bisher begrenzt. Aktuell sind alternative Kraftstoffe und Antriebe für die Öffentlichkeit und Unternehmen nicht sehr attraktiv. Die Verbesserung bestehender Technologien ist entweder nur begrenzt leistungsfähig oder mit hohen Betriebskosten verbunden.¹⁷⁵

Auf der einen Seite gibt es viele Barrieren und Faktoren, die den Einsatz von alternativen Optionen erschweren oder als nicht empfehlenswert einstufen. Ein wesentliches Hindernis des alternativen Einsatzes von beispielsweise E-LKW ist die erforderliche Tagesreichweite. Für Unternehmen ist dieser Einsatz für den Nah- und Regionalverkehr vorstellbar, da die Reichweite hierfür genügt. Jedoch könnte es zu Problemen bei der Reichweite für den Fernverkehr kommen.¹⁷⁶ Weitere Kriterien, die gegen eine Entscheidung für alternative Energieträger stehen, sind Sicherheitsprobleme, unannehmbare finanzielle Kosten oder die erhöhte betriebliche Komplexität aufgrund unzureichender Betankungs- und Ladeinfrastrukturen. Wenn sich ein Unternehmen auf eine bestimmte Kraftstoffoption festgelegt hat, in der Regel ist dies mit einer großen Investition in Betankungs-/Tankanlagen verbunden, lehnt es möglicherweise alle anderen alternativen Kraftstoffoptionen ab. Eine Ausnahme stellen kleinere Flotten dar, die ihre Kraftstoffoptionen diversifizieren möchten. Eine weitere wesentliche Barriere, warum gewisse alternative Energieträger nicht verwendet werden ist, dass die dafür benötigten Fahrzeuge teilweise nicht am Markt verfügbar sind.¹⁷⁷ Für gewisse Hürden ist die Politik verantwortlich, in dem zu wenig Anreize für die Umstellung auf alternative Technologien bestehen. Den Transportunternehmen fehlen langfristige Entwicklungsentscheidungen, damit sie eine Planungssicherheit in Bezug auf die zukünftigen Fahrzeugtechnologien haben. Des Weiteren fehlt es an Praxistauglichkeit der alternativen Antriebstechnologien, aus diesem Grund können Unternehmen der Branche Schwerlast- und Fernverkehr nicht

¹⁷⁴Vgl. Göckeler, K. et al. (2022), S. 7.

¹⁷⁵Vgl. Serra, A. et al. (2020), S. 8f.

¹⁷⁶Vgl. Göckeler, K. et al. (2022), S. 40ff.

¹⁷⁷Vgl. Bae, Y. et al. (2022), S. 18.

auf zum Beispiel E-Fahrzeuge umsteigen und nicht von den Förderanreizen der Politik profitieren. Ein weiterer Punkt stellt die fehlende Infrastruktur dar, hierbei muss die Politik einen Ausbau von Lade- und Tankmöglichkeiten schaffen.¹⁷⁸

Auf der anderen Seite gibt es verschiedene Motivatoren, die Unternehmen überzeugen, eine alternative Option zu dem herkömmlichen Dieselmotor zu nehmen. Die Studie von Bae et al. (2022) hat verschiedene motivierende Faktoren dargestellt, die einen Ansatz für die Entscheidung über die Einführung von alternativen Energieträgern für schwere Nutzfahrzeuge bewertet. Zu den technologischen Eigenschaften, vor allem in Bezug auf die funktionale Eignung, sind die monetären Kosten, die Kraftstoffinfrastrukturen und die Zuverlässigkeit sowie Sicherheit der Fahrzeuge und Motoren zu zählen. Starke Motivatoren für die Bewältigung wesentlicher Hindernisse, wie zum Beispiel die finanziellen Hindernisse, sind die unternehmenseigenen Werte, wie soziale Verantwortung, Umweltbewusstsein in Bezug auf fortschrittliche Bemühungen bei der Demonstration neuer Technologien sowie unternehmensstrategische Motive, wie Verträge mit Kommunen. Zusätzlich motivieren auch finanzielle Anreize die Etablierung von alternativen Antrieben in Unternehmen.¹⁷⁹ Wesentlich ist, dass die Fahrzeuge mit den alternativen Energieträgern zu den Einsatzmustern der herkömmlichen Dieselmotoren passen, denn diese werden als vielversprechende Alternative bis zum Jahr 2030 gesehen.¹⁸⁰ Um die Entscheidungsträger zum Handeln zu bewegen und sie von den Vorteilen zu überzeugen, die jede Kraftstoffalternative für das gesamte Verkehrssystem bringen kann, müssen geeignete Informationen einschließlich der Vor- und Nachteile der einzelnen Kraftstoffalternativen übermittelt werden. Auf diese Weise ist es wahrscheinlich, dass gut informierte Entscheidungen getroffen werden können.¹⁸¹

Zurzeit ist es noch nicht genau absehbar, welche Antriebs- und Energieträgeroptionen sich im Schwerlastverkehr durchsetzen werden. Denn es bestehen aktuell noch Unsicherheiten in den Bereichen der technologischen Entwicklung, wie werden die politischen Rahmenbedingungen aussehen und wie wird die Verfügbarkeit der Infrastruktur sein. Auf der einen Seite sind viele Akteure der Meinung, dass E-Fuels eine Kraftstoffoption sind und wahrscheinlich auch Bestandteil des zukünftigen

¹⁷⁸Vgl. Göckeler, K. et al. (2022), S. 57f.

¹⁷⁹Vgl. Bae, Y. et al. (2022), S. 18.

¹⁸⁰Vgl. Göckeler, K. et al. (2022), S. 62.

¹⁸¹Vgl. Serra, A. et al. (2020), S. 16.

Energiegemischs sein werden. Auf der anderen Seite sind Akteure der Umweltverbände der Ansicht, dass Antriebsoptionen mit höherer Energieeffizienz, wie zum Beispiel Batterieelektrische-LKW, Brennstoffzellen-LKW und Oberleitungs-LKW, einen Vorteil gegenüber E-Fuels in Verbrennungsmotoren haben. Zudem sind sich Forscher über Biokraftstoffe im Einklang, dass die nachhaltig erzeugte Biomasse an Mengenpotential limitiert ist. Dennoch ist der Biokraftstoff für die Erreichung der Klimaziele wesentlich. Die Zahlungsbereitschaft von Verbrauchern für einen teureren Energieträger wird sich in Grenzen halten.¹⁸² Außerdem können Unternehmen als wichtige Akteure einen großen Beitrag bezüglich der Reduzierung von Emissionen leisten.¹⁸³

3.6 Maßnahmen der Verkehrspolitik in der EU

Mit dem europäischen Klimagesetz wird die Umsetzung, die Emissionen der EU bis 2030 um rund 55% zu reduzieren, zu einer rechtlichen Pflicht. Dazu wird an aktuellen Rechtsvorschriften gearbeitet, um die Ziele zu realisieren und die EU bis 2050 klimafreundlich zu gestalten.¹⁸⁴ Für die Volkswirtschaft hat die Verkehrsinfrastruktur eine wesentliche Bedeutung. Diese stellt für den Transport von Gütern zwischen den Unternehmen eine wichtige Rolle dar. Zudem sind aber die Verkehrswege in Hinsicht auf die Belastung der Umwelt zu regulieren.¹⁸⁵

Die Verkehrspolitik der EU steht im Bereich Nachhaltigkeit vor großen Herausforderungen. Im Jahr 2001 wurde ein Weißbuch eingeführt, welches Maßnahmen beinhaltet, die das Wirtschaftswachstum und den Anstieg des Verkehrsaufkommens voneinander trennen sollten. Die Maßnahmen sollten den Schienenverkehr und den Seeverkehr fördern und eine Verbindung aller Verkehrsträger erzielen. Bereits 2011 wurde im Weißbuch zusammengefasst, dass es eine Treibhausgasreduzierung im Zeitraum von 2008-2030 um 20% und im Zeitraum von 1990 bis 2050 um 60% geben muss. 2015 wurde bei der Weltklimakonferenz beschlossen, dass das Ziel einer Reduktion bis 2030 um 20% zu gering ist. Aus diesem Grund hat sich der europäische Green Deal entwickelt, der über die allgemeingültigen Ziele hinausreicht und auch die Ziele des Klimagesetzes umfasst.

¹⁸²Vgl. Kasten, P.; Kühnel, S. (2019), S. 10ff.

¹⁸³Vgl. Agora Verkehrswende, Öko-Institut, Stiftung KlimaWirtschaft (2023), S. 7.

¹⁸⁴Vgl. Europäischer Rat, <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (Zugriff: 27.02.2023).

¹⁸⁵Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 381ff.

Eine drastische Reduzierung der THG-Emissionen bedeutet für den Verkehrssektor, den Einsatz umweltfreundlicher Energien und die Verwendung einer modernen Infrastruktur.¹⁸⁶

Zu den verkehrspolitischen Maßnahmen zählen die vom Staat ergriffenen Regulierungen der Verkehrswirtschaft. Dazu zählen Preisregulierungen, staatlich reglementierte Preise, Tarifbildungsprozesse und Tarifformen. Zudem gehören auch Marktzugangs- und Kapazitätsregulierungen zu den Vorschriften der höchstzulässigen Gewichte und Maße im Güterverkehr. Ein wesentliches Ziel der Verkehrspolitik der Europäischen Union ist, die Gleichstellung der Verkehrsträger und die Handlungsfreiheit der Verkehrsanbieter- und Nutzer.¹⁸⁷ Im Dezember 2020 wurde eine Strategie der Kommission für intelligente und nachhaltige Mobilität vorgestellt. Der Plan besteht aus zehn Leitinitiativen, die Europa helfen sollen, einem nachhaltigen Weg zu folgen. Mit diesen Maßnahmen soll eine Treibhausgasreduktion bis 2030 von 90% erlangt werden. Um die Ziele der EU-Politik zu erreichen, findet das Vorgehen in mehreren Etappen statt. Zudem wurden im Jahr 2021 Verbesserungen in dem Bereich des Emissionshandelssystems, der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, der intelligenten Verkehrssysteme und im Bereich der CO₂-Emissionsnormen vorgenommen. Zu den weiteren Zielen gehören auch die Überprüfung der transeuropäischen Verkehrsnetze und die Verbesserung des Post-Euro-6-Emissionsstandard für Pkw, Kleinlastwagen und LKW.¹⁸⁸ Zusätzlich wurden Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen von HFT eingeführt. Diese Verordnung leistet einen Beitrag zur Erfüllung der Verpflichtungen der EU im Rahmen des Pariser Abkommens, senkt die Kosten des Kraftstoffverbrauchs für Verkehrsunternehmen - vor allem für kleine und mittlere Unternehmen - und trägt dazu bei, dass die technologische Führungsrolle der Hersteller und Zulieferer in der EU erhalten bleibt. Vorteile, die dadurch erreicht werden können, sind die Reduzierung von 54 Mio. Tonnen CO₂ im Zeitraum von 2020 bis 2030, Einsparungen an den Tankstellen durch neue Fahrzeuge und Erdöleinsparungen von circa 170 Mio. Tonnen Öl im Zeitintervall 2020 bis 2040. Ab 2025 müssen LKW-Hersteller die Zielvorgaben für die CO₂-Emissionen der neu zugelassenen LKW erfüllen. Ab 2025 ist die Zielvorgabe eine Reduzierung um 15% zu

¹⁸⁶Vgl. Pernice, D. (2022), S. 2f.

¹⁸⁷Vgl. Pfohl, H. C. (2018), S. 355ff.

¹⁸⁸Vgl. Pernice, D. (2022), S. 4f.

erreichen. Die Ziele werden 2030 auf 30% Reduzierung erhöht.¹⁸⁹ Außerdem wird das Paket „Fit for 55“, welches 2021 von dem Rat vorgelegt wurde, laufend in unterschiedlichsten politischen Bereichen bearbeitet. Hierbei werden Vorschläge abgegeben, um die EU-Rechtsvorschriften zu aktualisieren. Zudem werden neue Initiativen betrachtet, die sicherstellen sollen, dass die Maßnahmen der EU für die Erreichung der Klimaziele genügen. Zu den wichtigsten Gesetzgebungsvorschlägen im Transportsektor zählen folgende Bereiche:

- Emissionshandelssystem der EU (EU emissions trading system, EU ETS)
- Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (Alternative Fuels Infrastructure, AFIR)
- Klima-Sozialfonds (Social climate fund)
- CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)
- Initiativen „ReFuelEU Aviation“ und „FuelEU Maritime“
- CO₂-Emissionsnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (CO₂ Emission Standard for Cars and Vans)
- Besteuerung der Energie (Energy Taxation)
- Erneuerbare Energie (Renewable Energy)
- Energieeffizienz (Energy Efficiency)

Anhand dieser Aspekte will die EU die Emissionen ihrer 27 Mitgliedstaaten bis 2023 zumindest um 55% reduzieren und somit das Klimaziel erreichen.¹⁹⁰ Primär ist, dass die Verantwortung bei der Politik liegt, die Diffusion und Weiterentwicklung von Innovationen, die die Emissionen im Verkehrssektor reduzieren, zu unterstützen.¹⁹¹

3.7 Maßnahmen der Politik in Österreich

Für Österreich wurde durch die Einführung des Gesetzgebungspaket „Fit for 55“ klar, dass es die Ziele bis 2030 gegenüber dem Jahr 2005 um -48%, in den Sektoren abseits des EU-Emissionshandelssystems, erhöhen muss. Die österreichische Bundesregierung hat sich im Regierungsübereinkommen für die Jahre 2020 bis 2024 zur Zielerreichung der Klimaneutralität auf das Jahr 2040 geeinigt. Für Österreich bedeutet das eine Kompensation, der THG-Emissionen und deren Gewinnung durch Kohlenstoffsinken

¹⁸⁹Vgl. European Commission, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en (Zugriff: 23.02.2023).

¹⁹⁰Vgl. Europäischer Rat, <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (Zugriff: 27.02.2023).

¹⁹¹Vgl. Scheelhaase, H. et al. (2018) S. 663.

nach nationaler THG-Inventur bis 2040. Emissionen, die bis 2040 nicht reduziert werden können, sollen durch Speicherung von CO₂ ausgeglichen werden.¹⁹² Für die Klimaneutralität in Österreich im Jahr 2040 sind noch zahlreiche Transformationsschritte erforderlich, um die Verwendung fossiler Energieträger zu vermeiden.¹⁹³

3.7.1 CO₂-Bepreisung

Die Politik hat die Aufgabe, eine klimaneutrale Wirtschaft zu errichten. Aus diesem Grund wurde in Österreich im Jahr 2022 eine ökosoziale Steuerreform im Bundesrat beschlossen. Der Fokus liegt hierbei einerseits auf der Einführung einer CO₂-Bepreisung mit Ausgleichszahlungen und andererseits auf einer Reduzierung der Abgabenbelastung. Durch die CO₂-Bepreisung sollen alternative Kraftstoffe attraktiver werden. Zudem besteht die CO₂-Bepreisung aus zwei Teilen. Der erste Teil bezieht sich auf den Zeitraum von 2022 bis 2025 und beschreibt eine Fixpreisphase mit Preisstabilitätsmechanismus. Der zweite Teil beginnt 2026 und stellt eine Marktphase mit einem nationalen CO₂-Zertifikatshandelssystem dar.¹⁹⁴ Durch den Preisstabilitätsmechanismus kann es bei Energiepreisveränderungen zu einem raschen oder zögernden Anstieg kommen. Die CO₂-Bepreisung wird vor allem bei den Treibstoff- und Heizkosten bemerkbar. Österreich richtet sich bei der Höhe und bei der Steigerung der CO₂-Bepreisung an Deutschland. Jahr für Jahr soll die CO₂-Bepreisung steigen und zwar im Jahr 2023 35 EUR pro Tonne, im Jahr 2024 45 EUR pro Tonne und bis 2025 stufenweise auf 55 EUR pro Tonne.¹⁹⁵ Zudem sei zu erwähnen, dass die CO₂-Bepreisung wie eine Mineralölsteuer-Erhöhung (MöSt) wirkt. Die MöSt wird sich zu der zusätzlichen Erhöhung der CO₂-Bepreisung um 2,5 EUR je Tonne also um 0,6 Cent je Liter Benzin und Diesel im Jahr 2023 erhöhen.¹⁹⁶

¹⁹²Vgl. [oesterreich.gv.at](https://www.oesterreich.gv.at), https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000310.html (Zugriff: 27.02.2023).

¹⁹³Vgl. Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.at/klima/treibhausgase> (Zugriff: 27.02.2023).

¹⁹⁴Vgl. Zechmeister, A. et al. (2022 b), S. 68.

¹⁹⁵Vgl. WKO, <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/co2-bepreisung.html> (Zugriff: 27.02.2023).

¹⁹⁶Vgl. Öamtc, <https://www.oeamtc.at/thema/verkehr/mineraloelsteuer-co2-bepreisung-17914742> (Zugriff: 01.03.2023).

3.7.2 Kraftfahrzeugsteuer

Auch bei der Kraftfahrzeugsteuer gibt es in Österreich gewisse Ausnahmen. Fahrzeuge, die rein elektrisch betrieben sind, müssen keine Kraftfahrzeugsteuer zahlen. FCEV und Wasserstoffverbrennungsmotoren sind von dieser Ausnahme nicht betroffen. Zudem gibt es auch eine Steuerbefreiung für den kombinierten Verkehr. Dennoch gibt es hier für den Vor- und Nachlauf des kombinierten Verkehrs Schiene/Straße gewisse Voraussetzungen wie zum Beispiel, dass das Kraftfahrzeug ein Gesamtgewicht von über 3,5t haben muss.¹⁹⁷

3.7.3 Novelle der Kraftstoffverordnung

Durch die Novellierung der KVO 2023 wurden die THG-Reduktionsziele für Inverkehrbringer von Kraftstoffen mit höheren Strafzahlungen versehen. Für diese wird zukünftig interessanter, die in Elektrofahrzeugen verbrauchte Energie zu kaufen und für ihre Klimazielerreichung zu verwenden, da diese vierfach auf die Reduktion des CO₂-Ziels anrechenbar sind. Im Zuge dessen wird der ökonomische Anreiz für Nutzer der elektrischen Technologie höher, da sie den Kraftstoff-Inverkehrbringern die Zertifikate für die verbrauchten Strommengen verkaufen können. Zudem sind auch alternative Energieträger wie Wasserstoff oder E-Fuels vierfach auf die CO₂-Reduktionsziele anführbar. Dadurch wird Österreich zu einem Pionier für die Verwendung von strombasierten Energieträgern. Laut dieser Verordnung soll in diesem Jahr 2023, 700.000 Tonnen CO₂ im Straßengüterverkehr eingespart werden.¹⁹⁸

3.7.4 Maut

In den europäischen Ländern existieren unterschiedliche Mautsysteme. Grundsätzlich kann zwischen zwei Systemen differenziert werden - dem zeitabhängigen System und dem fahrleistungsabhängigen System. Bei dem zeitabhängigen System handelt es sich um die Vignette, Eurovignette oder City-Maut. Zu dem fahrleistungsabhängigen System zählen Mautstationen, Mikrowellen- oder Satellitensysteme. Kraftfahrzeuge müssen in Österreich für die Nutzung jeglicher Autobahnen und Schnellstraßen

¹⁹⁷Vgl. WKO, https://www.wko.at/service/steuern/Die_Kraftfahrzeugsteuer.html (Zugriff:01.03.2023).

¹⁹⁸Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/20221218_kraftstoffverordnung.html (Zugriff: 01.03.2023).

Gebühren zahlen. Fahrzeuge bis zu 3,5t höchstzulässiges Gesamtgewicht fallen in die Kategorie zeitabhängiges System und Fahrzeuge über 3,5t höchstzulässiges Gesamtgewicht beziehen sich auf das fahrleistungsabhängige System.¹⁹⁹ Die Kosten für die Maut beziehen sich auf die Achsenlasten, der Abgasklasse des Motors sowie der Tageszeit, wobei die Nachtzeit zwischen 22 Uhr und 5 Uhr und die bewältigte Strecke zu beachten ist. Die Mautsätze für LKW mit Elektroantrieb sind im Vergleich zu konventionellen Verbrenner-LKW günstiger, wie zum Beispiel die Tarifgruppe Elektro/Wasserstoff für dreiachsige LKW zur Tageszeit 7,273 Cent je km kostet, beträgt der Mautsatz für Euro 6 dreiachsige LKW zur Tageszeit 29,631 Cent je km.²⁰⁰ Hierbei wird ersichtlich, dass die LKW-Maut für den Straßengüterverkehr ein wesentlicher Stellhebel für den Klimaschutz ist.²⁰¹

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die klimarelevanten Emissionen im Verkehrssektor rasch reduziert werden müssen, um die europäischen Klimaziele zu erreichen. Es besteht eine breite Palette an technologischen Innovationen, um die Emissionen zu reduzieren. Jedoch unterscheiden sich die Technologien in ihrer Wirtschaftlichkeit und Marktreife. Wie beispielsweise der Wasserstoff, welcher Grundlagenforschung und den Aufbau einer geeigneten Infrastruktur benötigt. Wesentlich ist auch die Berücksichtigung des Rebound-Effekts. Dieser Effekt kann daraus entstehen, dass mittels der Kostensenkung der neuen Innovation die Nachfrage wesentlich ansteigen kann und das eine daraus resultierende erhöhte Verkehrsleistung zu steigenden Emissionen führt.²⁰² Bezüglich der politischen Maßnahmen ist es notwendig, gegenüber den ökonomischen und ökologischen Maßnahmen und Tempolimits Rahmenbedingungen zu schaffen, die klimaneutrale und effiziente Technologien ermöglichen.²⁰³

¹⁹⁹Vgl. WKO (2022), S. 57.

²⁰⁰Vgl. WKO, <https://www.wko.at/service/verkehr-betriebsstandort/LKW-Maut-Oesterreich-GO-Box.html> (Zugriff: 27.02.2023).

²⁰¹Vgl. Kasten, P. (2022), S. 27.

²⁰²Vgl. Scheelhaase, H. et al. (2018), S. 663.

²⁰³Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022 a), S. 34.

4 Methodik der systematischen Literaturrecherche

Um eine genaue Aussage über die zukünftigen Szenarien für Antriebstechnologien und alternative Kraftstoffe der Schwerlastfahrzeuge für österreichische Unternehmen für die Jahre 2030 und 2050 treffen zu können, wird eine systematische Literaturrecherche (SLR) durchgeführt. Damit sollen alle relevanten Artikel in der Literatur der letzten fünf Jahre ermittelt und analysiert werden. Des Weiteren wurde eine explorative Literaturrecherche durchgeführt. Dadurch wurden Keywords für die SLR erkennbar und erste Erfahrungen mit dem Thema gesammelt. Das Vorgehen der SLR wird in Abbildung 7 dargestellt. Dabei erfolgt die Unterteilung in explorative Literaturrecherche, systematische Literatursuche und Literaturevaluierung. Zudem wird auch eine Kontrolle mit der Checkliste von PRISMA durchgeführt.²⁰⁴ Diese Checkliste umfasst 27 Punkte für die Abschnitte Einleitung, Methoden, Ergebnisse und Diskussion eines Berichts über eine systematische Überprüfung.²⁰⁵ Die Punkte der Checkliste wurden durchgegangen und erfüllt und zeigen, dass bei der SLR entsprechend der Richtlinien vorgegangen wurde. Eine detaillierte Aufschlüsselung ist im Anhang-A zu finden. Das Ziel dieses Kapitels ist, einen Überblick und eine klare Aussage treffen zu können, welche zukünftigen Antriebstechnologien und alternative Kraftstoffe für Schwerlastfahrzeuge für österreichische Unternehmen für die Jahre 2030 und 2050 in Betracht gezogen werden können.

4.1 Explorative Recherche zur Vorbereitung auf die systematische Literaturrecherche

Zu Beginn der Literatursuche wurde vom letzten Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC) das Kapitel „Transport“ durchgearbeitet, um Klarheit über den aktuellen Stand der Dekarbonisierung des Transportsektors zu schaffen.²⁰⁶ Darauf wurde eine explorative Literaturrecherche zu den Begriffen Straßengüterverkehr und Szenarien und Dekarbonisierung durchgeführt. Dadurch ergab sich eine weitere Übersicht über die Definitionen und Themenbereiche des Straßengüterverkehrs und der Dekarbonisierung. Darauf folgt, als bereits ein Überblick über diese Begriffe vorhanden war, dasselbe für die Begriffe transportintensive Branchen in Österreich, alternative Antriebstechnologien und alternative Energieträger. Danach wurde eine

²⁰⁴Vgl. vom Brocke, J. et al. (2009).

²⁰⁵Vgl. PRISMA, <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/Checklist> (Zugriff: 06.03.2023).

²⁰⁶Vgl. Jaramillo, P. et al. (2022).

Suchwortliste zusammengestellt, die folgende Wörter beinhaltet: Schwerlastverkehr, Straßengüterverkehr, Dekarbonisierung, österreichische Transportunternehmen, THG-Emissionen, alternative Antriebstechnologien und alternative Energieträger. Diese Suchwörter wurden auch mit englischen Begriffen ermittelt. Für die Literatursuche wurden Datenbanken, Onlinekataloge und die Hauptbibliothek der Montanuniversität Leoben herangezogen. Die Datenbanken und Onlinekataloge, welche gewählt wurden, sind: Google Scholar, Springer Link, Scopus, Science Direct und Research Gate.

Das Ziel der explorativen Literaturrecherche war es, Literatur zu finden, die die Begriffe Straßengüterverkehr, Szenarien 2030/2050 und Dekarbonisierung beschreibt und einen Bezug zu österreichischen Transportunternehmen und zukünftigen alternativen Energieträger und Technologien für den Transportsektor darstellt.

4.2 Durchführung der systematischen Literaturrecherche

Eine systematische Literaturrecherche wurde in der Datenbank Scopus durchgeführt, um den aktuellen Stand der Literatur zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs zu untersuchen. Hierbei wurde der Zeitraum von 2017 bis 2022 betrachtet. Die betrachteten Kategorien sind Economy, Engineering, Business, Energy und Environment. Zudem wurden auch Ein- und Ausschlusskriterien gebildet, welche in Tabelle 4 aufgelistet sind. Durch das Analysieren der Titel und Abstracts und das Anwenden der Ein- und Ausschlusskriterien konnten die für das Forschungsthema relevanten Artikel identifiziert und somit das Ausgangsmaterial der Literaturanalyse definiert werden.

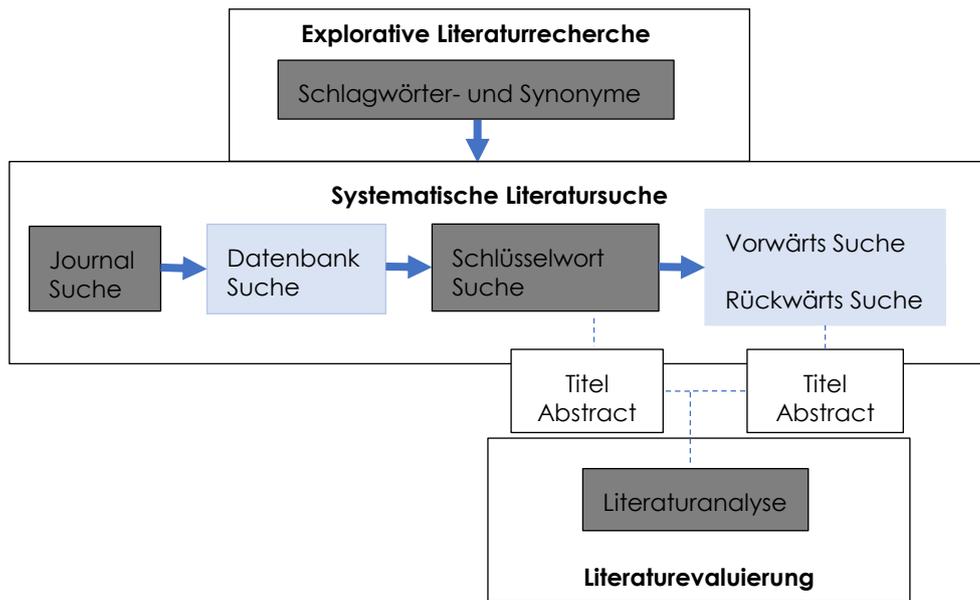


Abbildung 7: SLR-Vorgehensweise²⁰⁷

Die Entwicklung der Schlagwörter als auch die Ergebnisse der Suchläufe in der Datenbank Scopus sind in der Tabelle 3 angeführt. Bei der Formulierung der Suchstrings wurde einerseits extrem viel Literatur und andererseits sehr wenig Literatur gefunden. Aus diesem Grund wurden bei dem finalen vierten Suchlauf Verneinungen miteinbezogen.

²⁰⁷Vgl. vom Brocke et al. (2009), (Darstellung leicht modifiziert).

Tabelle 3: Suchstring²⁰⁸

Nummer	Suchstring	Ergebnisse
1	(TITLE-ABS-KEY(scenarios)) AND (TITLE-ABS-KEY("road transport") OR TITLE-ABS-KEY("transport sector") OR TITLE-ABS-KEY("heavy duty transport")) AND (TITLE-ABS-KEY(decarbonisation) OR TITLE-ABS-KEY(decarbonization) OR TITLE-ABS-KEY(decarbonise) OR TITLE-ABS-KEY(decarbonize)) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "ch")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA , "ECON") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENVI")) AND (PUBYEAR > 2016) AND LANGUAGE(english)	119
2	(TITLE-ABS-KEY(scenarios) OR TITLE-ABS-KEY(pathways)) AND (TITLE-ABS-KEY("road transport") OR TITLE-ABS-KEY("road freight transport") OR TITLE-ABS-KEY("heavy duty transport")) AND (TITLE-ABS-KEY(decarbonisation) OR TITLE-ABS-KEY(decarbonization) OR TITLE-ABS-KEY(decarbonise) OR TITLE-ABS-KEY(decarbonize)) AND (TITLE-ABS-KEY("greenhouse gas emissions")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "ch")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA , "ECON") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENVI")) AND (PUBYEAR > 2016) AND LANGUAGE(english)	9
3	(TITLE-ABS-KEY(scenarios) OR TITLE-ABS-KEY(pathways) OR TITLE-ABS-KEY(route)) AND (TITLE-ABS-KEY("freight transport") OR TITLE-ABS-KEY("heavy duty") OR TITLE-ABS-KEY("cargo traffic") OR TITLE-ABS-KEY("long haul duty") OR TITLE-ABS-KEY("road haulage")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "ch")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA , "ECON") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO(SUBJAREA , "ENVI")) AND (PUBYEAR > 2016) AND LANGUAGE(english)	804
4	(TITLE-ABS-KEY (low-carbon) OR TITLE-ABS-KEY (decarbon*) OR TITLE-ABS-KEY (defossil*)) AND (TITLE-ABS-KEY (powerdrive) OR TITLE-ABS-KEY (powertrain) OR TITLE-ABS-KEY (fuel)) AND (TITLE-ABS-KEY ("heavy duty") OR TITLE-ABS-KEY ("light duty") OR TITLE-ABS-KEY ("heavy-duty") OR TITLE-ABS-KEY ("light-duty") OR TITLE-ABS-KEY ("road transport")) AND NOT (TITLE-ABS-KEY ("life-cycle") OR TITLE-ABS-KEY ("life cycle")) AND (PUBYEAR > 2016) AND LANGUAGE (english) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ECON") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI")))	269

Der finale Suchstring beinhaltet 269 Artikel. Diese Artikel wurden mit „zutreffend“, „nichtzutreffend“, „eventuell zutreffend“ für das Thema der Arbeit bewertet. Anhaltspunkt für die Analyse waren dabei die Ein- und Ausschlusskriterien in Tabelle 4.

²⁰⁸Eigene Darstellung.

Tabelle 4: Ein- und Ausschlusskriterien²⁰⁹

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Verkehrssektor-Straßengüterverkehr	Automobilhersteller, Personenwagen, öffentliche Verkehrsmittel
alternative Kraftstoffe, alternative Technologien	nicht CO ₂ neutrale Kraftstoffe
Dekarbonisierung des europäischen Straßengüterverkehr, Reduzierung der CO ₂ -Emissionen	Betankungs- und Ladeinfrastruktur
Handlungsempfehlung österreichische Unternehmen	Die Rolle des Menschen bei der Reduzierung von GHG-Emissionen (im Transportsektor, Fahrverhalten), öffentliche Gesundheit
Politik-gesetzliche und klimaneutrale Änderungen	Technische Details
Europa, Nordamerika	Asien, Afrika, Australien, Südamerika

Eventuell zutreffend wurde anschließend nochmals analysiert und mit einem Wissenschaftler diskutiert. Es wurden hierbei 20 Artikel mit „zutreffend“ bewertet, 28 mit „eventuell“ und die restlichen mit „nichtzutreffend“. Durch die Diskussion der mit „eventuell zutreffend“ bewerteten Artikel mit dem Wissenschaftler wurden noch weitere neun Artikel mit „zutreffend“ bewertet. Abbildung 8 veranschaulicht den gesamten Vorgang der SLR. Insgesamt wurden für die weitere Analyse 29 Artikel verwendet, die inhaltlich betrachtet wurden. Dabei wurde gleichzeitig eine Backward-Search durchgeführt. Bei der Backward-Search wurden 20 Artikel gefunden, die auch analysiert wurden.

Von den 29 Artikel der Hauptsuche und den 20 Artikel der Backward-Search wurde die Anzahl auf 12 Artikel reduziert, da beispielsweise der Zugriff, bei den Quellen die anhand der Backward-Search gefunden wurden, nicht bei jedem Artikel gewährleistet war oder bei der Volltextanalyse bemerkt wurde, dass der Artikel nicht passend ist. Nach der Volltextanalyse wurden 12 Artikel als zutreffend klassifiziert. In Tabelle 5 gibt es einen kleinen Ausschnitt der final verwendeten Literatur, genaueres ist im Anhang-B zu finden. Anhand des PRISMA Selektionsprozess, Abbildung 8, wird der Prozess der verwendeten Literatur nochmals deutlich dargestellt und zeigt, dass für die weitere Arbeit 12 Literaturquellen verwendet werden.

²⁰⁹Eigene Darstellung.

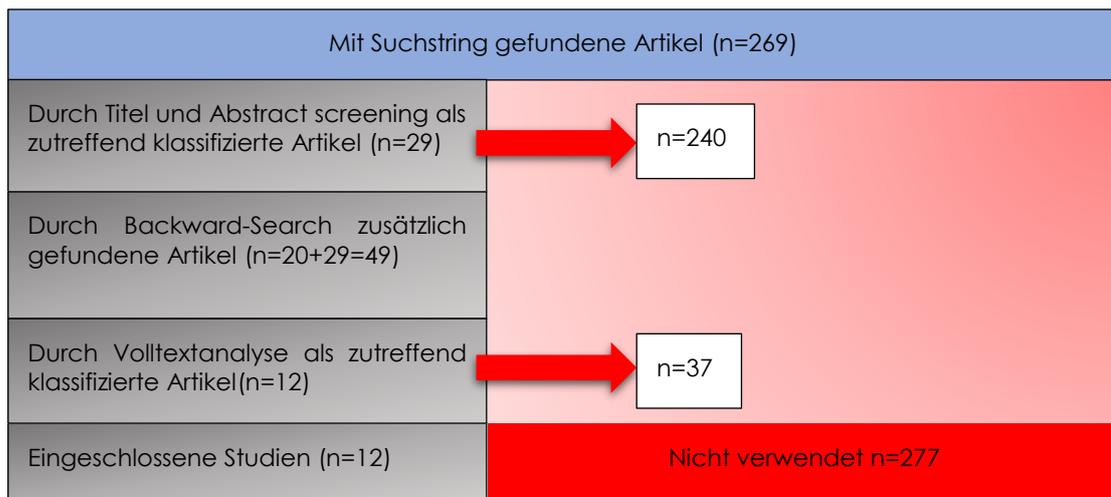


Abbildung 8: PRISMA Selektionsprozess²¹⁰

4.3 Analyse der gefundenen Literatur

In diesem Kapitel erfolgt eine deskriptive und inhaltliche Analyse der 12 Studien.

4.3.1 Deskriptive Analyse

Bei der deskriptiven Analyse werden die Studien hinsichtlich folgender Aspekte untersucht:

- Anzahl der Studien pro Dokumententyp
- Anzahl der Studien pro Jahr
- Anzahl der Studien pro Herausgeber/Zeitschrift
- Geografische Lage der Untersuchung

Das Ergebnis der Untersuchung des Dokumententyps ergab, dass es sich um sieben Berichte und fünf wissenschaftliche Artikel handelt, wie in Abbildung 9 ersichtlich. Die Methoden der wissenschaftlichen Artikel sind:

- Helgeson, B.; Peter, J. (2020) – „Strommarktmodell DIMENSION“
- Keller, V. et al. (2019) – „Open Source Energy Modelling System“
- Krause, J. et al. (2020) – „DIONE fleet impact model“
- Plötz, P. et al. (2019) – „ALADIN“ und „PERSEUS-EU“
- Siegmund, S. et al. (2017) – Keine Angabe

²¹⁰Vgl. Kaiblinger, A; Woschank, M. (2022), S. 3, (Darstellung leicht modifiziert).

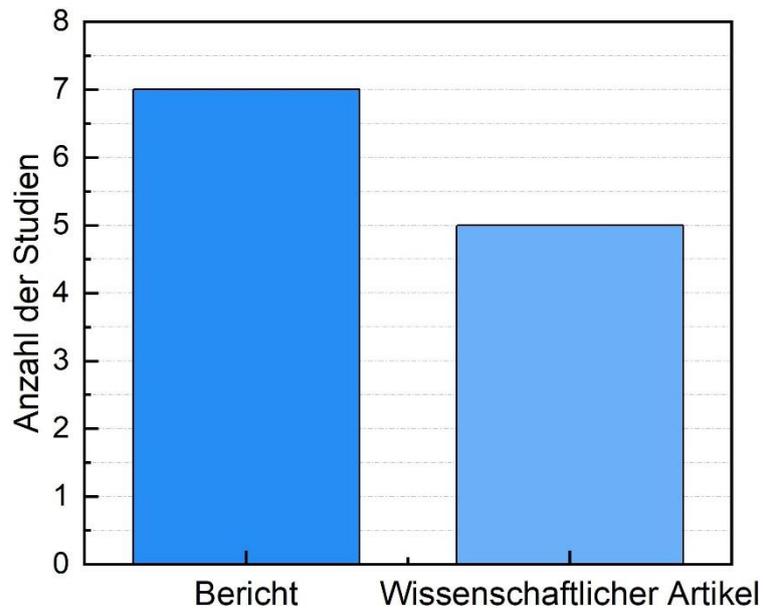


Abbildung 9: Studien pro Dokumententyp²¹¹

Des Weiteren werden die Studien pro Jahr betrachtet. Es ist ersichtlich, dass die meisten Studien zu diesem Thema im Zeitraum 2019-2020 gemacht wurden. Jedoch ist es erstaunlich, dass bereits 2014 erste Studien zu alternativen Energieträgern und Antriebstechnologien erschienen sind (siehe Abbildung 10).

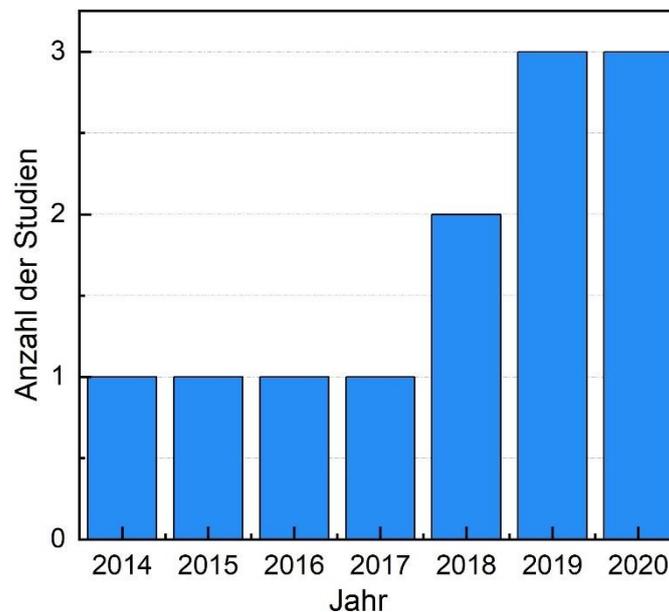


Abbildung 10: Studien pro Jahr²¹²

²¹¹Eigene Darstellung.

²¹²Eigene Darstellung.

Die nächste Analyse bezog sich auf die geografische Lage der Studien. Manche Studien führen eine länderspezifische Untersuchung durch, der Großteil aber war allgemein gehalten. Aus diesem Grund sind sechs Studien (50%) Europa zugewiesen, vier Studien (33,3%) beziehen sich auf Deutschland und jeweils eine Studie (8,3%) bezieht sich auf Kanada und Dänemark (siehe Abbildung 11).

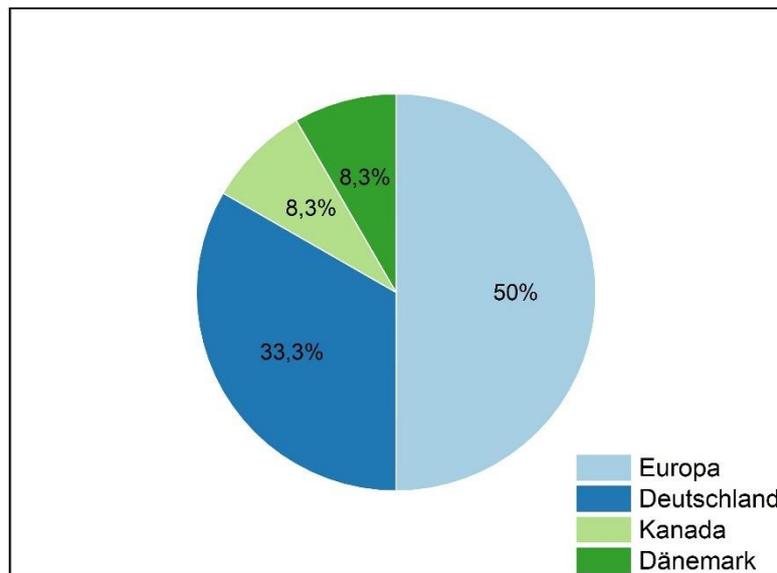


Abbildung 11: Geografische Lage der Studien²¹³

Eine weitere Analyse betrachtet die Herausgeber und Zeitschriften. Zwei der wissenschaftlichen Literaturquellen wurden in Energy Policy- und jeweils eine in Energy und Applied Energy publiziert. Zwei Berichte stammen von dena (Deutsche Energie-Agentur), die restlichen hatten jeweils andere Herausgeber, wie in Abbildung 12 dargestellt.

²¹³Eigene Darstellung.

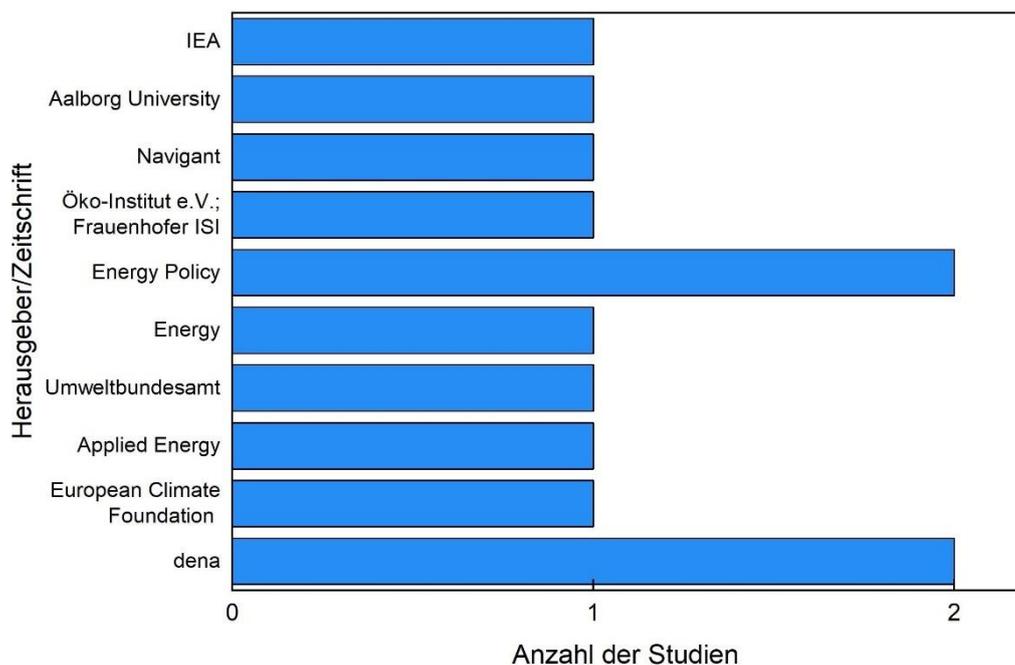


Abbildung 12: Studien pro Herausgeber/Zeitschrift²¹⁴

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die inhaltliche Analyse der 12 Literaturquellen eingegangen.

4.3.2 Inhaltliche Analyse

In diesem Kapitel werden die analysierten Studien und deren Szenarien kurz zusammengefasst, sowie deren Clustering vorgestellt. Als Ausgangspunkt für das Clustering werden die drei im World Energy Outlook der International Energy Agency (IEA) verwendeten Szenarien herangezogen, um die Analyse der Studien konform gängiger und weit verbreiteter Standards durchzuführen.

4.3.2.1 Zusammenfassung der Studien

Bründlinger, T. et al. (2018) legen den Fokus auf die deutsche Energiewende und bezieht die Dekarbonisierung des nationalen Verkehrssektors mit ein. Es werden verschiedene Verkehrsmittel berücksichtigt, einschließlich schwerer Straßengüterfahrzeuge. Zusätzlich zu einem Referenzszenario betrachten Bründlinger, T. et al. (2018) zwei weitere Gruppen, das „Elektrifizierungsszenario“ (EL 80 und 95) und das „Technologiemixszenario“ (TM 80 und TM 95). Die 80/95-Prozent bei den Szenarien bedeuten, dass eine Treibhausgasreduzierung im Vergleich zu 1990 um 80%

²¹⁴Eigene Darstellung.

beziehungsweise 95% erzielt werden soll. Bei dem Elektrifizierungsszenario mit 80/95-Prozent-Klimaziel wird von einer Steigerung der Energieeffizienz und einer breiten Elektrifizierung in allen Sektoren ausgegangen. Das Technologiemieszenario mit 80/95-Prozent-Klimaziel nimmt ebenfalls eine Steigerung der Energieeffizienz an, lässt jedoch bewusst eine breitere Variation bei den eingesetzten Technologien und Energieträgern zu. CNG-, LNG- und Wasserstoff-Antriebe gewinnen im Straßengüterverkehr deutlich an Marktanteil.²¹⁵

In dem Bericht von Cambridge Econometrics (2018) werden wirtschaftliche Kosten und Vorteile der Dekarbonisierung schwerer Nutzfahrzeuge in Europa bewertet. Es wurde ein Szenario-Ansatz entwickelt, um verschiedene mögliche Fahrzeugtechnologien für die Zukunft zu untersuchen, dabei wurde der Zeithorizont jeweils bis 2030 und bis 2050 in drei Szenarien betrachtet. Im „Tech BEV“ Szenario wird davon ausgegangen, dass ab 2025 überwiegend BEV verwendet werden und ab 2040 den Absatzmix dominieren. Im „Tech ERS“ Szenario wird behauptet, dass bis 2040 der Einsatz von PHEV-ERS-Fahrzeugen dominiert. Danach beginnt sich der Absatz von BEV-ERS zu beschleunigen und erreicht bis 2050 70% der Verkäufe. Jedoch ist die Entwicklung ERS-fähiger Fahrzeuge von einer geeigneten Infrastruktur abhängig. Das „Tech FCEV“ Szenario geht davon aus, dass der Einsatz von FCEV bei Neuwagenverkäufen bis 2030 langsam vorangehen wird aber ab 2040 und 2050 im Verkaufsmix dominiert.²¹⁶

Helgeson, B. und Peter, J. (2020) zeigen mit der „Single Scenario Analysis“, dass bis 2050 der Kraftstoffanteil von Strom im EU-Straßenverkehrssektor 37% und von Power-to-X-Kraftstoffen 27% erreichen wird. Zudem verursacht der Straßenverkehr eine zusätzliche Stromnachfrage von 1200 TWh im Jahr 2050. Es wird untersucht, wie der Straßenverkehrssektor und Energieumwandlungstechnologien in ein Strommarktmodell integriert werden können. Des Weiteren werden die wichtigsten Wechselwirkungen zwischen den Sektoren und Technologien erforscht und analysiert, wie diese zur Dekarbonisierung beitragen können. Zudem wird der Nutzen der Modellierung des Straßen- Strom- und Energiesektors dargestellt.²¹⁷

²¹⁵Vgl. Bründlinger, T. (2018).

²¹⁶Vgl. Cambridge Econometrics. (2018).

²¹⁷Vgl. Helgeson, B.; Peter, J. (2020).

Die International Energy Agency (2020) präsentiert ein „Net Zero Emission Szenario“. Hier wird gezeigt, welche Entwicklungen notwendig sind, damit der globale Energiesektor bis 2050 eine Netto-Null an CO₂-Emissionen erreicht. Dafür müssten alle Regierungen ihre Ambitionen gegenüber den derzeitigen national festgelegten Beiträgen und Net-Zero-Zusagen erhöhen.²¹⁸

Kasten, P. et al. (2016) beschreiben Energieszenarien für das Jahr 2050, um Handlungsempfehlungen für eine langfristige Energieversorgungsstrategie im Verkehr abzuleiten. Die THG-Neutralität im Jahr 2050 ist der zentrale Parameter in der Herleitung der Szenarien. In dieser Studie werden vier Szenarien behandelt.

- Das „Fl+ Szenario“ entspricht dem Referenzszenario mit konventionellen Kraftstoffen, wie Benzin und Diesel. Es findet bis zum Jahr 2050 keine Strukturänderung statt und es werden zu 100% Flüssigkraftstoff-LKW eingesetzt.
- Bei dem „E+ Szenario“ stellt die elektrische Energie die zentrale THG-freie Energieträgeroption dar. Für das Jahr 2050 wird der Großteil des Straßengüterverkehr elektrisch betrieben sein. Jedoch wird ein kleiner Anteil aus Flüssigkraftstoffen bestehen.
- Das „CH₄+ Szenario“ betrachtet PtG-CH₄ als zentrale THG-freie Energieträgeroption. 2050 sollen mehr als 50% des Energiebedarfs durch CH₄ hervorgerufen werden.
- Das „H₂+ Szenario“ sieht PTG-H₂ als zentrale THG-freie Energieträgeroption. In diesem Szenario wird berücksichtigt, dass die Entwicklung von H₂-betriebenen Fahrzeugen hinter denen, die Strom oder CH₄ als Antriebsenergie nutzen, steht. Aus diesem Grund findet die Einführung von H₂ als Energieträger fünf bis zehn Jahre nach den anderen Alternativen statt.²¹⁹

Die Studie von Keller, V. et al. (2019) vergleicht alternative Wege zur Dekarbonisierung des Strom- und Schwerlasttransportsektors bis 2060. Es wird ein „BEV-Szenario“ mit batterieelektrischen Fahrzeugen mit drei alternativen Ladeprofilen (BEV-N, (BEV-B, BEV-D) und ein „FCEV-Szenario“ mit 0 und 150 \$/tCO₂ Kohlenstoffsteuer gegenübergestellt. Bei den drei alternativen Ladeprofilen handelt es sich um das Laden nur in der Nacht (BEV-N), das Laden bei konstantem Bedarf am Tag (BEV-B) und das Laden nur

²¹⁸Vgl. International Energy Agency (2020).

²¹⁹Vgl. Kasten, P. et al. (2016).

während der Zeit mit Sonneneinstrahlung (BEV-D). Zudem wird auch noch ein Referenzszenario mit fossilen Kraftstoffen betrachtet.²²⁰

Krause, J. et al. (2020) definieren drei verschiedene Szenarien, um die Auswirkungen von Maßnahmen auf die Fahrzeugeffizienz, die Verkehrseffizienz und die Aktivität sowie die Elektrifizierung der Straßenfahrzeugflotte bis 2050 zu untersuchen. Das erste Szenario „Fleet Composition Szenario HE (High Electrification)“ beschreibt eine Situation mit einer maximalen Marktdurchdringung von Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeugen (PHEV) und batterieelektrischen Fahrzeugen. Das zweite Szenario „Fleet Composition Szenario HEH (High Electrification plus Hydrogen)“ umfasst Brennstoffzellen-Hybrid-Elektrofahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden. Das dritte Szenario „Fleet Composition Szenario Mix (Mixed Scenario)“ geht von einer wesentlich geringeren Elektrifizierung der Flotte aus, bei der der Verbrennungsantrieb in den meisten Fahrzeugsegmenten dominiert. In diesem Szenario werden keine FCHEV berücksichtigt. Der Anteil der BEV ist relativ gering und der Anteil der PHEV und der konventionellen Fahrzeuge ist im Vergleich zu den ersten beiden Szenarien relativ hoch.²²¹

Plötz, P. et al. (2019) analysieren eine europäische Marktdiffusion von Oberleitungsfahrzeugen und deren Auswirkungen auf das Stromsystem und die CO₂-Emissionen. Im „optimistischen Szenario“ wird eine starke Dekarbonisierung des Energiesystems beschrieben, einschließlich einer schnellen Verbreitung von Plug-in-electric-vehicle (PEV). 2040 soll der Anteil der Oberleitungsfahrzeuge an den HFT 50% ausmachen. Das „pessimistische Szenario“ berücksichtigt eine geringere PEV-Verbreitung und niedrigere Kraftstoff- und CO₂-Zertifikatspreispafe. Dabei soll der Anteil an Oberleitungs-HFT 2040 40% betragen.²²²

Die Grundlage der Szenarien von Repenning, J. et al. (2015) bildet das System von Zielvorgaben für Deutschland, das mit dem Energiekonzept 2010/2011 auf die energie- und klimapolitische Agenda gesetzt worden ist. Diese Studie behandelt drei Szenarien. Bei dem „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario“ (AMS) werden Maßnahmen betrachtet, die bis 2012 angekündigt worden sind und bis 2050 weitergeführt werden. Das „Klimaschutzszenario 80“ (KS 80) strebt die Erreichung der Treibhausgasemissionsziele,

²²⁰Vgl. Keller, V. et al. (2019).

²²¹Vgl. Krause, J. et al. (2020).

²²²Vgl. Plötz, P. et al. (2019).

erneuerbare Energien und Energieeffizienz an. Laut der Studie reduzieren sich die Neuzulassungen von Schwerlastfahrzeugen im Zeitraum 2010 bis 2050 um 40%. Das „Klimaschutzszenario 95“ (KS 95) strebt eine Treibhausgasreduzierung von 95% bis 2050 an. Bei diesen drei Szenarien ist der Energiebedarf des Verkehrssektors im KS 95 am geringsten.²²³

Siegmund, S. et al. (2017) vergleichen die Investitionen und den Energiebedarf verschiedener Technologien im Verkehrssektor der EU. In der Studie werden drei Szenarien definiert: „Power-to-Liquid“, „Power-to-Gas“ und „E-Drive“ (direkte Elektrifizierung). Das E-Drive und PTG-Szenario können eine Treibhausgasreduzierung von jeweils 95% im Jahr 2050 erreichen, wobei das PTL-Szenario eine Reduzierung von 80% im Jahr 2050 erzielen kann.²²⁴

Terlouw, W. et al. (2019) untersuchen durch den Vergleich eines "Minimalgas-Szenarios" mit einem "optimierten Gas-Szenario" die Rolle und den Wert von erneuerbarem und kohlenstoffarmen Gas in der bestehenden Gasinfrastruktur. Im optimierten Gas-Szenario ist Wasserstoff für das Jahr 2050 Hauptenergieträger, wohingegen im Minimalgas-Szenarios Biodiesel eine wichtige Rolle spielt.²²⁵

Das Forschungsziel der Studie von Vad Mathiesen, B. et al. (2014) ist die Entwicklung von Szenarien für erneuerbare Energien im Verkehrssektor. In der Studie werden drei Szenarien behandelt. Das „Recommendable Szenario“ basiert auf der Grundlage einer ausgewogenen Bewertung realistischer und erreichbarer technologischer Verbesserungen. Für das Jahr 2050 ist es wiederum vorrangig, so viel direkte Elektrifizierung wie möglich im Verkehrssektor einzusetzen. Das „Ideal Szenario“ basiert auf Technologien, die sich derzeit in der Entwicklungsphase befinden. Es wird besonders auf die Technologie Elektrolyseure gesetzt. Das „Conservative Szenario“ setzt auf vorhandene Technologien. Es werden nur Technologien verwendet, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit entwickeln werden.²²⁶

4.3.2.2 Clustering

Die im World Energy Outlook der IEA verwendeten Szenarien bieten eine Darstellung der Energiezukunft, zeigen aber nicht wie die Zukunft tatsächlich aussehen wird. Jedes

²²³Vgl. Repenning, J. et al. (2015).

²²⁴Vgl. Siegmund, S. et al (2017).

²²⁵Vgl. Terlouw, W. et al. (2019).

²²⁶Vgl. Vad Mathiesen, B. et al. (2014).

Szenario des IEA-Berichts stellt die derzeitige Energiekrise anders dar. Die Szenarien wurden in einem dynamischen Modellierungsrahmen erstellt, der alle Brennstoffe und Technologien abdeckt. Zudem wird das reale Zusammenspiel zwischen Politik, Kosten und Investitionsentscheidungen widergespiegelt. Bei diesen Szenarien des IEA Outlook handelt es sich um:²²⁷

- **Stated Policies Scenario (STPS):** Dieses Szenario handelt von den tatsächlich gesetzten Maßnahmen der Regierungen, um die von ihnen gesetzten Ziele zu erreichen. Das Szenario basiert auf einer detaillierten sektoralen Überprüfung der Politiken und Maßnahmen, die in einer Vielzahl von Bereichen tatsächlich vorhanden sind oder entwickelt werden. Bei dieser Analyse werden die relevanten regulatorischen, marktbezogenen, infrastrukturellen und finanziellen Zwänge bewertet. Das STPS spiegelt eine pragmatische Erkundung der aktuellen politischen Situation wider und zeigt, wohin sich das Energiesystem ohne spezifische neue politische Initiativen entwickeln könnte. Mit dem STPS-Szenario erreichen die Emissionen nicht den Netto-Nullpunkt und der Anstieg der Durchschnittstemperaturen liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% bei etwa 2,5°C im Jahr 2100.
- **Announced Pledges Scenario (APS):** Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass die Regierungen alle von ihnen angekündigten klimabezogenen Verpflichtungen, einschließlich der längerfristigen Netto-Null-Emissionsziele und der Zusagen zu den Pariser Klimaabkommen sowie der Verpflichtungen in verwandten Bereichen wie dem Energiezugang, vollständig und rechtzeitig erfüllen. Dies gilt unabhängig davon, ob diese Verpflichtungen durch spezifische Maßnahmen zu ihrer Umsetzung untermauert werden oder nicht. Auch Zusagen, die in internationalen Foren und Initiativen von Unternehmen und anderen Nichtregierungsorganisationen gemacht werden, werden berücksichtigt, wenn sie die Ambitionen der Regierungen ergänzen. Die Analyse betrachtet auch die Auswirkungen auf Länder, die keine ehrgeizigen langfristigen Zusagen gemacht haben, aber in diesem Szenario dennoch von den beschleunigten Kostensenkungen für eine Reihe von sauberen Energietechnologien profitieren. Der Temperaturanstieg von 1,7°C im APS im Jahr 2100 hat eine Wahrscheinlichkeit von 50%.

²²⁷Vgl. International Energy Agency (2022) S. 105ff.

- **Net Zero Emission Scenario (NZES):** Mit diesem normativen Szenario wird ein Weg zur Stabilisierung der globalen Durchschnittstemperaturen bei 1,5°C gezeigt. Damit das Ziel, bis 2050 weltweit Net-Zero-CO₂-Emissionen zu erreichen gelingt, bedarf es großen Anstrengungen. Das NZE-Szenario geht davon aus, das Ziel ohne andere Emissionsreduktionen außerhalb des Energiesektors zu erreichen. Das NZE-Szenario erfüllt die wichtigsten energiebezogenen Ziele für nachhaltige Entwicklungen der Vereinten Nationen. Hierbei soll bis 2030 ein allgemeiner Zugang zu Energie geschaffen werden und erhebliche Verbesserungen der Luftqualität sichergestellt werden. Die Ergebnisse für das NZE-Szenario werden auf globaler Ebene dargestellt, mit einigen separaten Indikatoren für fortgeschrittene Länder als auch für Schwellen- und Entwicklungsländer.

Die Szenarien der durch die SLR gefundenen Artikel wurden diesen drei Hauptszenarien zugeteilt. Anschließend fand eine detaillierte Klassifizierung der Literatur statt. Tabelle 5 bildet einen Ausschnitt des Clusterings ab. Hierbei wurde die Literatur auf Anzahl Szenarien analysiert. Die beschriebenen Szenarien in der jeweiligen Literatur wurden zu den drei Hauptszenarien STPS, APS und NZES zugeteilt. Zudem wurde die Literatur auf die Methode, die Region, den betrachtete Zeithorizont und Kraftstoff untersucht.

Tabelle 5: Cluster-Szenarien²²⁸

Quelle	STPS	APS	NZES	Region	Kraftstoff	Zeitintervall
Bründlinger, T. et al. (2018)	1		2	Deutschland	Alternative Kraftstoffe	2030-2050
Cambridge Econometrics (2018)			3	EU	Electric vehicle	2030-2050
Helgeson, B.; Peter, J. (2020)			1	EU, Norwegen, Schweiz	E-Fuels	2015-2050
IEA (2020)			1	EU	Alternative Kraftstoffe	2030,2050
Kasten, P. et al. (2016)			4	Deutschland	E-Fuels	2010-2050
Keller, V. et al. (2019)	1	2		Kanada	Electric Vehicle	2030, 2050, 2060
Krause, J. et al. (2020)			3	EU	Electric Vehicle	2050
Plötz, P. et al. (2019)	1		1	EU	ERS	2020-2040
Repenning, J. et al. (2015)	1		2	Deutschland	Alternative Kraftstoffe	2010-2050
Siegmund, S. et al. (2017)	1		2	Deutschland	FCEV	2010-2050
Terlouw, W. et al. (2019)			2	EU	E-Fuels	2050
Vad Mathiesen, B. et al. (2014)			3	Dänemark	Renewable	2010-2050

4.3.2.3 Analyse der Cluster 2030 & 2050

Für die weitere Arbeit mit den 12 relevanten Literaturquellen wurden diese nun auf gewisse Daten für die Jahre 2030 und 2050 untersucht. Bei diesen Daten handelt es sich, um Angaben zu den Kraftstoffen, dem Anteil der Technologien an den Neuzulassungen, dem Energiebedarf und dem Energieverbrauch. Zu Beginn wurde eine Einteilung von Kraftstoffen durchgeführt, die in den jeweiligen Szenarien der Literaturquellen beschrieben wurden. Es erfolgte eine Unterteilung in „Vehicle Technology“ und „Fuels“, die in Tabelle 6 und im Anhang-C detaillierter beschrieben wird. Bei „Vehicle Technology“ erfolgt eine Unterteilung in die jeweilige Antriebstechnologie. Bei „Fuels“ werden die Kraftstoffe kategorisiert. Zudem wurde bei jeder Technologie und bei jedem Kraftstoff ein Symbol, wie zum Beispiel Kreis festgelegt. Diese Symbole sind für die Erstellung der Grafiken im weiteren Verlauf der Arbeit notwendig.

²²⁸Eigene Darstellung.

Tabelle 6: Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe²²⁹

Vehicle Technologie		
Electric vehicle	BEV	Kreis
	FCEV	
	ERS	
ICE	Gas & Diesel	Rechteck
Hybrid	EV/ICE-Hybrid	Dreieck (nach unten)
	BEV/FCEV/ERS-Hybrid	
Fuels		
Biomass	BG(C+LBG)	Dreieck (nach oben)
	Bio-Diesel	
Fossil fuel	NG	Stern
	Gasoline	
	Diesel	
Hydrogen	diverse Produktionspfade	Viereck
Electrofuel + Synthetic fuel	Methanol	Pentagon
	Dimethylether	
	PtX	
	Methan	
Electricity	Renewable	Oktagon

Nach der Bestimmung der jeweiligen Kraftstoffe wurden die Datenanalyse durchgeführt. Der Schwerpunkt der Datenanalyse lag auf dem Anteil der Neuzulassungen von Schwerlastfahrzeugen, auf dem Energiebedarf und Energieverbrauch. Hierbei war es wesentlich, dass die jeweilige Literatur eine detaillierte Angabe der verwendeten Kraftstoffe für schwere Nutzfahrzeuge, für den Energiebedarf in TWh sowie für den Energieverbrauch in kWh/km für die Jahre 2030 und 2050 beinhaltet. Es wurde der Energieverbrauch (kWh/km) als auch der Energiebedarf (TWh) herangezogen, um darzustellen, wie sich der Verbrauch an Energie pro Kilometer und der Bedarf an Energie in einer Stunde bei Schwerlastfahrzeugen in den Jahren 2030 und 2050 entwickeln wird.

Die Verfügbarkeit der Daten der verwendeten Literaturen war in manchen Darstellungen nicht vorhanden oder detailliert beschrieben. Aus diesem Grund wurden die jeweiligen Autoren kontaktiert. Die nicht vorhandenen Daten wurden mit dem Programm „Digitizelt“ aus den vorhandenen Grafiken abgelesen. Durch die

²²⁹Eigene Darstellung.

Rückmeldung eines Autors konnten die ermittelten Werte aus „Digitizelt“ mit den Werten des Autors verglichen werden. Dabei lag die Abweichung bei 0,05%-1% und somit wurden die Daten, die mit dem Programm analysiert wurden, auch verwendet.

Für die Darstellung der Vorhersagen der Autoren, wurde das Programm „Origin“ verwendet. Der Anteil der Neuzulassungen, Energiebedarf und Energieverbrauch werden dargestellt und unterteilen sich in die drei Hauptszenarien: STPS, APS und NZES sowie die Jahre 2030 und 2050. Anhand der davor gebildeten Cluster wurden die Daten der Szenarien zugeteilt. Zudem fand die Unterteilung der Kraftstoffe in „Fossil fuel“, „Hydrogen“, „Electric vehicle“, „E-Fuel & Syn. fuel“ und „Biomass“ statt, da diese in den Szenarien am häufigsten erwähnt wurden. Der Anteil verschiedener Technologien an Neuzulassungen der Jahre 2030 und 2050 ist in Abbildung 13 und 14 ersichtlich.

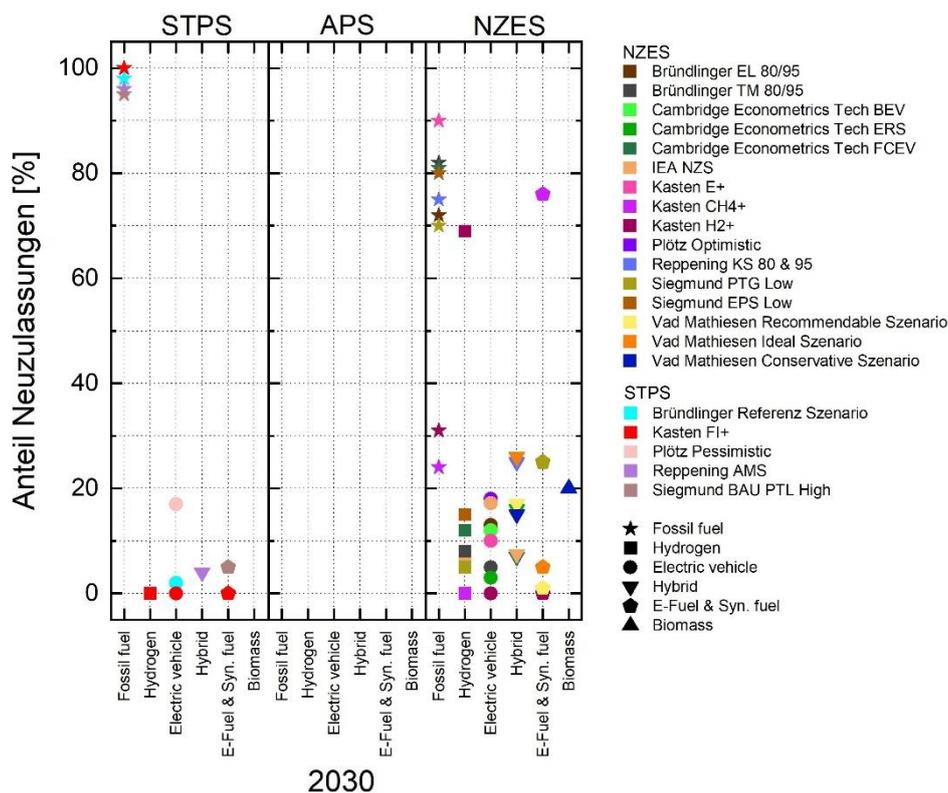


Abbildung 13: Anteil Neuzulassungen 2030²³⁰

²³⁰Eigene Darstellung.

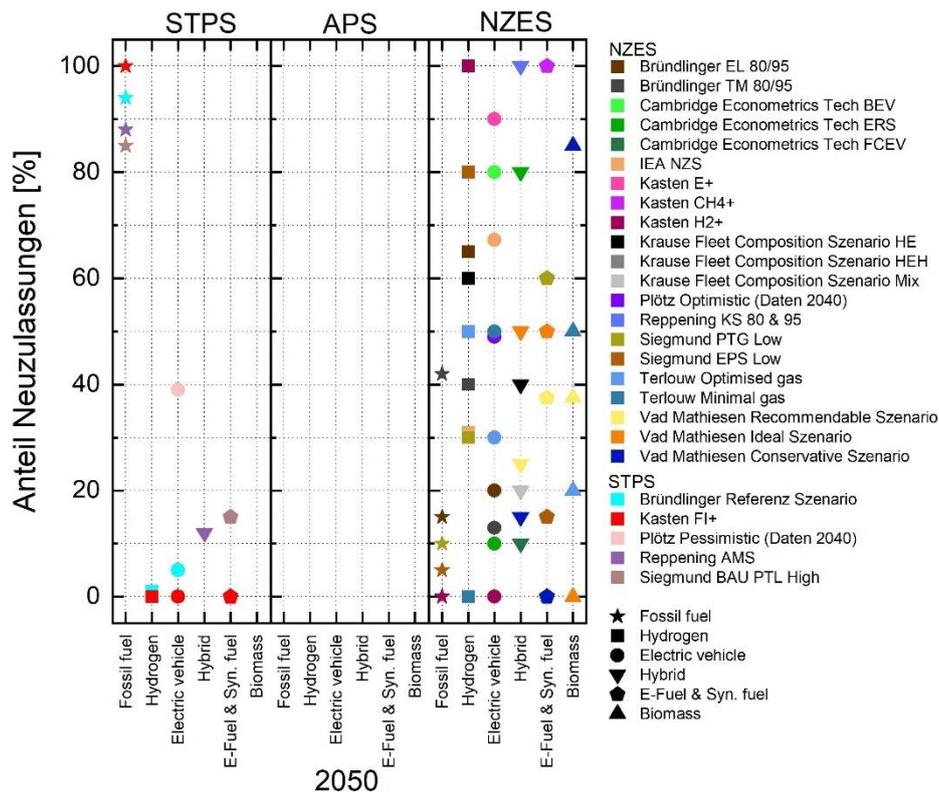


Abbildung 14: Anteil Neuzulassungen 2050²³¹

Es ist ersichtlich, dass 2030 als auch 2050 keine Szenarien zu den APS zugeteilt wurden. Das NZES dominiert in beiden Jahren. Im Jahr 2030 dominieren im STPS die fossilen Treibstoffe - hingegen ist im NZES ein minimaler Rückgang der fossilen Treibstoffe zu erkennen. Es ist schwer festzustellen, welche alternativen Treibstoffe sich im NZES im Jahr 2030 durchsetzen werden. E-Fuels als auch Hydrogen weisen eine erhöhte Verwendung auf. Im Jahr 2050 sieht das STPS ähnlich wie das STPS im Jahr 2030 aus. Jedoch ist im NZES im Jahr 2050 ein deutlicher Rückgang der fossilen Kraftstoffe zu erkennen. Eine mögliche Verwendung für das Jahr 2050 stellen Hydrogen, Hybrid und E-Fuels im NZES dar.

Im weiteren Verlauf folgt die Abbildung der gesamten benötigten Energie der schweren Nutzfahrzeuge für die Jahre 2030 und 2050 in TWh (siehe Abbildung 15 und 16). Zudem fand bei dieser Darstellung eine Abbildung der Länder, anhand von den Symbolen statt, um den Energiebedarf in gewissen geografischen Bereichen

²³¹Eigene Darstellung.

abzubilden. Da ein Szenario „Electricity“ behandelt, wird der Kraftstoff zusätzlich an der y-Achse abgebildet.

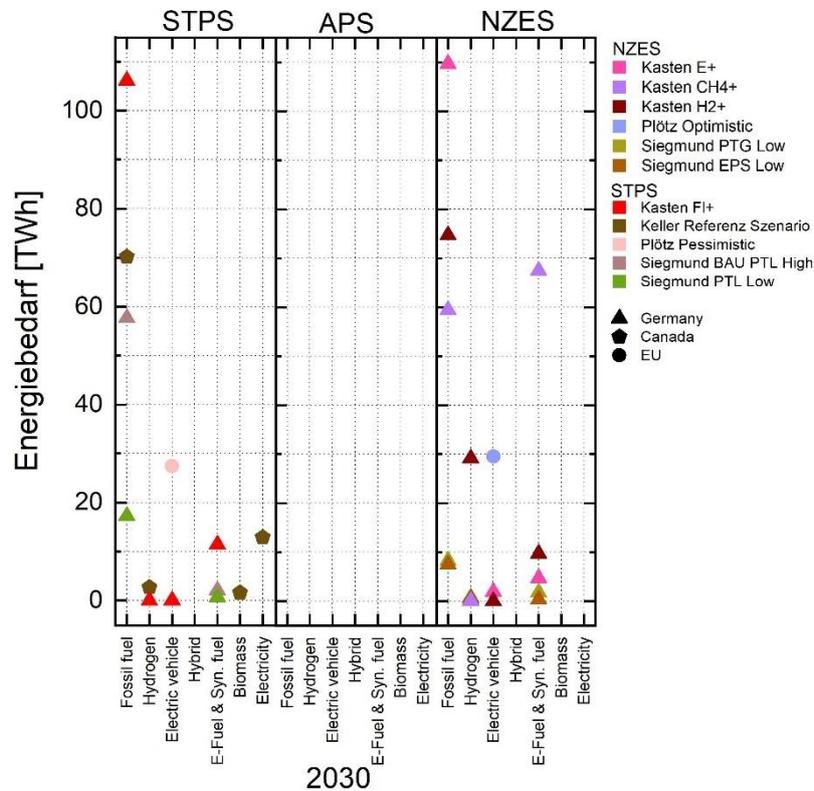


Abbildung 15: Energiebedarf 2030²³²

²³²Eigene Darstellung.

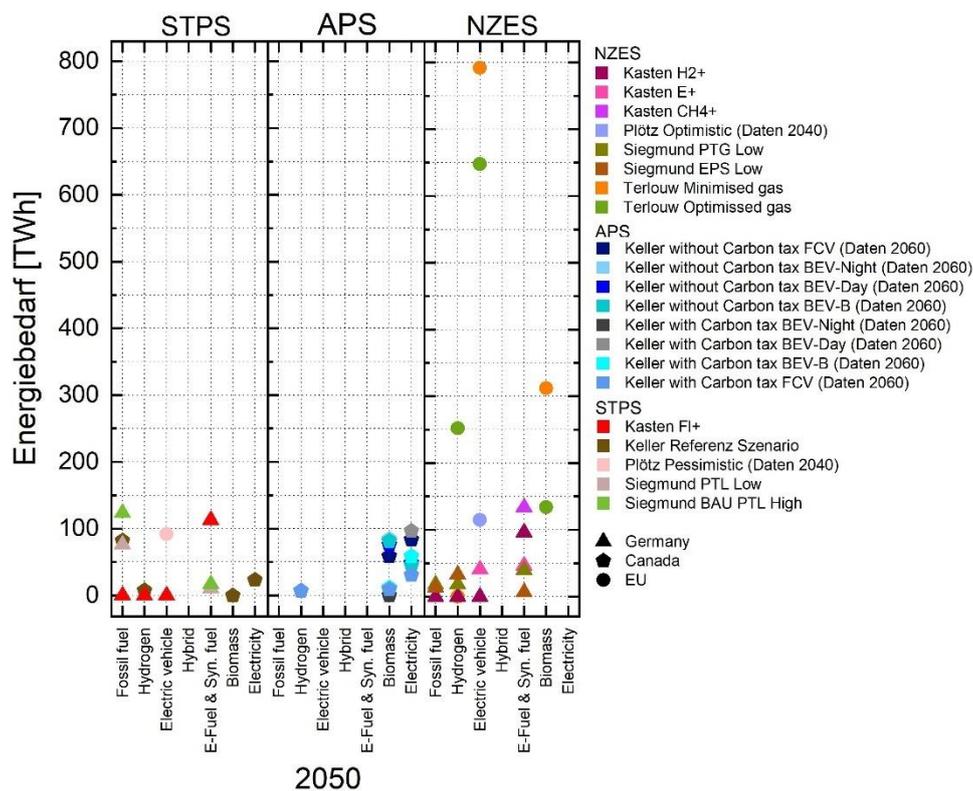


Abbildung 16: Energiebedarf 2050²³³

Des Weiteren erfolgt eine Darstellung der Jahre 2030 und 2050 zu dem Energieverbrauch in kWh/km (siehe Abbildung 17 und 18). Die Regionen EU, Kanada und Deutschland werden jeweils abgebildet, um den Verbrauch an Energie pro km in den Gebieten zu erkennen. Die y-Achse der Abbildung 17 und 18 unterscheiden sich dadurch, dass im Jahr 2050 die Verwendung von „Biomass“ herangezogen wird, jedoch im Jahr 2030 nicht.

²³³Eigene Darstellung.

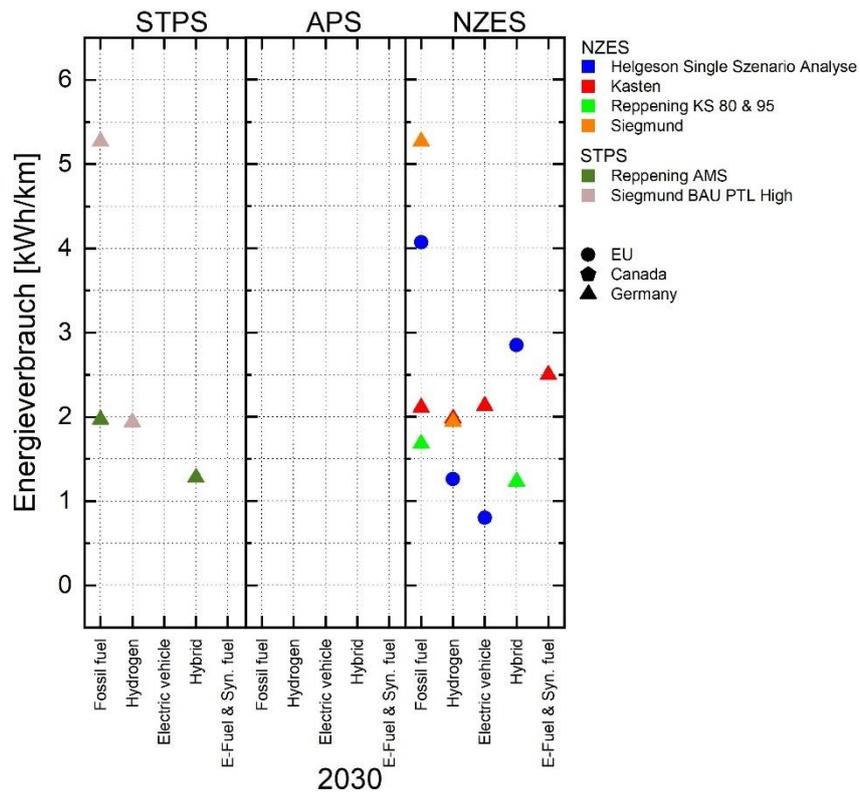


Abbildung 17: Energieverbrauch 2030²³⁴

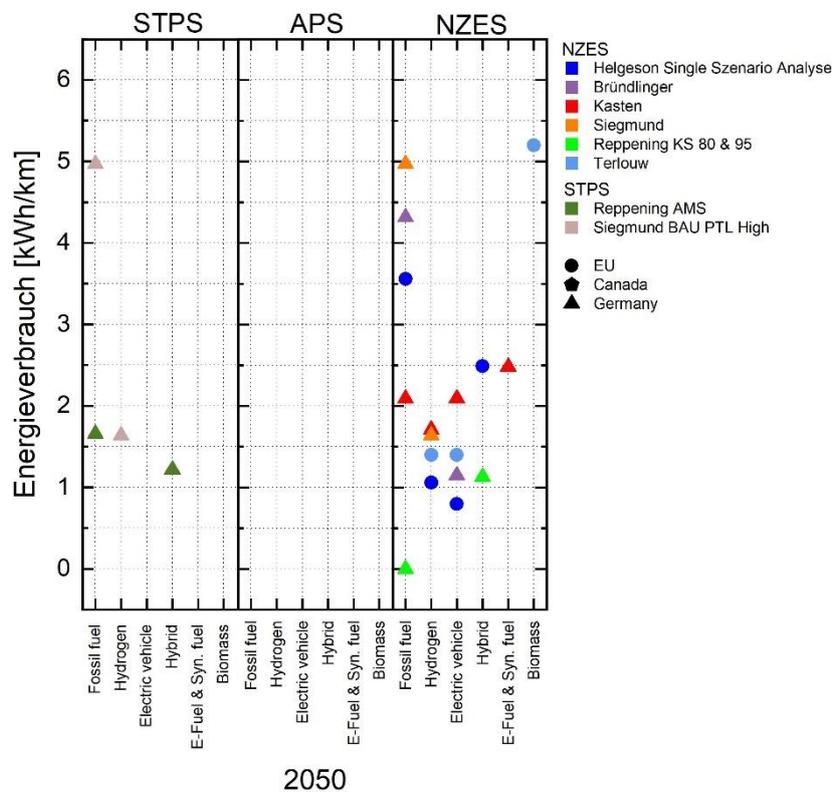


Abbildung 18: Energieverbrauch 2050²³⁵

²³⁴Eigene Darstellung.

²³⁵Eigene Darstellung.

Anhand der Abbildung 13 bis Abbildung 18 kann ein guter Überblick gegeben werden, wie eine mögliche zukünftige Entwicklung alternativer Energieträger und Technologien im Schwerverkehrssektor aussehen könnte. Deutlich ist zu erkennen, dass das NZES 2030/2050 dominiert und nur eine Literatur dem APS 2050 zugeteilt wurde. Da die Prognosen in diesem Szenario noch stark variieren, werden die Szenarien im nächsten Kapitel für die österreichische Perspektive gefiltert und somit versucht, eine spezifische Aussage zu treffen.

5 Bezug zu Österreich

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, konnte bis dato noch keine klare Aussage getroffen werden, welche Szenarien für Österreich und österreichische Unternehmen eintreffen könnten. Aus diesem Grund wurden Strategiepapiere für den österreichischen Straßengüterverkehr für die Jahre 2030 und 2050 recherchiert, um eine Aussage über die zukünftigen Antriebe und Kraftstoffe in Österreich zu tätigen. Zudem soll eine detaillierte Aussage der Darstellungen in Kapitel 4 (Abbildung 13 und 14) erreicht werden. Das Ziel dieses Kapitel ist, die Frage „welchen Pfad Österreich aus heutiger Sicht einschlägt und was dies für die zukünftige Flottenzusammensetzung der Schwerlastfahrzeuge bedeutet“, zu beantworten.

5.1 Methodische Vorgehensweise

Damit eine genaue Aussage über den zukünftigen österreichischen Pfad getroffen werden kann, wurden Strategiepapiere für die Jahre 2030 und 2050 recherchiert. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 19 ersichtlich. Hierbei wurde eine explorative Literaturrecherche durchgeführt. Für die Suche wurden die Datenbanken und Onlinekataloge Google Scholar, Springer Link und Research Gate herangezogen. Es entwickelte sich ein Kreislauf der Literatursuche, der Diskussion mit Wissenschaftlern und der Aufstellung von Filterkriterien, bis sich die Filterkriterien nicht mehr geändert haben. Bei der Recherche wurden vier wesentliche Strategieblätter gefunden. Die Studien wurden auf ihre Prognosen für die Jahre 2030 und 2050 analysiert, mit dem Fokus auf den erwähnten Kraftstoffen für Österreich. Für die Einteilung der Kraftstoffe wurden die bereits in den vorherigen Kapiteln diskutierten und in den Abbildungen 13-18 dargestellten Kraftstoffe herangezogen. Die vier Literaturquellen wurden anhand der Kraftstoffe analysiert und beschrieben. Die Diskussion mit Wissenschaftlern befasste sich mit der Unterteilung der Kraftstoffe, wie und welche Darstellung aus dem Kapitel 4 detailliert dargestellt werden kann und welche Filterkriterien gebildet werden. Im nachfolgenden werden die Quellen kurz beschrieben, die Filterkriterien und Ergebnisse dargestellt.

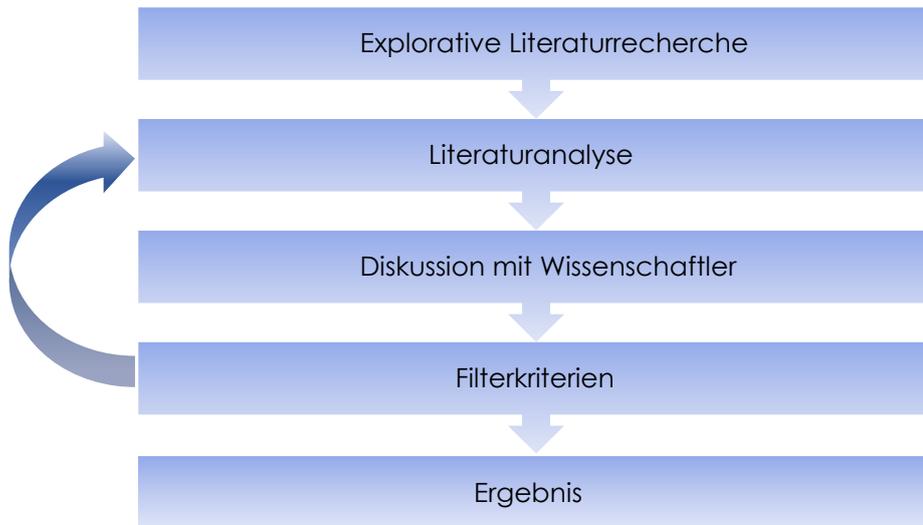


Abbildung 19: Methodische Vorgehensweise²³⁶

5.2 Zusammenfassung der Strategiepapiere

Die erste Studie „Mobilitätsplan 2030“ ist vom österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Die Grundannahme des Mobilitätsmasterplans ist, einen sinnvollen Mix aus Verkehrsvermeidung, -verlagerung und Effizienzsteigerung der Verkehrsträger zu erreichen. Im Straßengüterverkehr mit Tagesfahrleistungen bis zu 300 Kilometer ist das BEV aus Sicht der Energie- und Kosten die effizienteste Technologie am Markt. Zudem kommen für den Fern- und Schwerlastverkehr zusätzlich FCEV in Frage, da sie gewissen Anforderungen wie zum Beispiel große Reichweiten mit hohem Transportgewicht und geringen Betankungszeiten erfüllen. Laut dem Masterplan müssen in Österreich bis 2030 Rahmenbedingungen für Projekte, die die Ausführung von Batterie- und Wasserstoff-Flotten vorantreiben, gesetzt werden. Ein weiteres Ziel ist, den Fernverkehr in technologischer Hinsicht bis 2040 klimaneutral durchzuführen. Dabei kommen Technologien, die derzeit noch in der Entwicklungsphase sind in Frage, beispielsweise BEV, FCEV mit Wasserstoffbetankung oder Hybridfahrzeuge in Kombination mit ERS.²³⁷

Das nächste Studienblatt „Verkehrsclub Österreich-Mobilität mit Zukunft“ (VCÖ) behandelt BEV, FCEV, ERS und synthetische Kraftstoffe. Es wird behauptet, dass der Technologie-Pfad von der Energieeffizienz entschieden wird. Hierbei wird der

²³⁶Eigene Darstellung.

²³⁷Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2021).

Wirkungsgrad der jeweiligen Technologie gegenübergestellt. Der Wirkungsgrad eines E-LKW ist doppelt so hoch wie der eines FCEV und dreimal so effizient wie der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen. Laut VCÖ wird bei dem Einsatz von E-LKW im Gegensatz zu den anderen Antrieben sparsam mit erneuerbaren Energiequellen umgegangen und eine Dekarbonisierung kann erreicht werden. Zusätzlich wurde im März 2021 ein Forschungsprojekt „EnergyRoads“ bezüglich Oberleitungen für E-LKW in Österreich durchgeführt. Erkenntnisse daraus haben gezeigt, dass etwa drei Viertel der österreichischen Schnellstraßen und Autobahnen in Frage kommen. Die Oberleitungsfahrzeuge sind kombinierbar mit BEV, H₂ oder Diesel. VCÖ behauptet, dass Wasserstoff hauptsächlich in Ausnahmefällen verwendet wird, da die Herstellung frühestens Ende des Jahrzehnts gestartet wird. Des Weiteren erreichen E-LKW im Technologie-Vergleich die besten Werte und sind aus ökonomischer Sicht für 2030 erste Wahl.²³⁸

Das dritte österreichische Studienblatt ist von dem „Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie“ und dem „Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort“ und geht davon aus, dass aus heutiger Sicht FCEV und BEV für den Güterverkehr eingesetzt werden können. Laut der Studie können für den Transit-Schwerverkehr bis 2040 BEV, FCEV, ERS und Hybridtechnologien zum Einsatz kommen, jedoch hängt der Einsatz von der jeweiligen Entwicklungsstufe ab. Für den Zeitraum bis 2025 sollen hauptsächlich BEV hergestellt und genutzt werden, FCEV werden erst in der zweiten Hälfte der Dekade bis 2030 auf den Markt kommen.²³⁹

Die „H₂-Mobility Austria“ möchte einen flächendeckenden Aufbau einer H₂-Infrastruktur bis 2025 schaffen und bis 2030 2.000 H₂-Schwerlastfahrzeuge im Einsatz haben. Hierbei soll entlang der Wertschöpfungskette alles in Österreich hergestellt werden, wie zum Beispiel Technologieanbieter für Transport und Lager. Zudem sollen Wasserstoff-LKW in Österreich produziert werden. Ab 2023 sollen 500t grüner Wasserstoff für 65 Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Ab 2026 bis 2030 sieht H₂-Mobility Austria eine Serienverfügbarkeit von Volvo- oder Daimler-Schwerlastfahrzeugen vor und eine Erreichung des Break-Even-Punktes gegenüber beispielsweise Diesel, BEV und Bio-Diesel.²⁴⁰

²³⁸Vgl. VCÖ-Mobilität mit Zukunft (2022).

²³⁹Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (2022 b).

²⁴⁰Vgl. H₂-Mobility Austria (2022).

5.3 Filterkriterien

Zu Beginn wurden die Kraftstoffe der Strategieblätter analysiert und den bereits in Kapitel 4 verwendeten Kraftstoffen zugeteilt. In den Strategiepapieren wurden nur „Hydrogen“, „Electric vehicle“, „Hybrid“, „Eelectric fuel“ (E-Fuel) und „Synthetic fuel“ (Syn. fuel) erwähnt. Die Ausprägung dieser Energieträger in den Strategiepapieren Österreichs wird in Tabelle 7 beschrieben.

Tabelle 7: Energieträger-Strategiepapier²⁴¹

Strategiepapier / Technologien	Hydrogen	Electric vehicle	Hybrid	E-Fuel & Syn. fuel
Mobilitäts-masterplan	Hohe Reichweite, kurze Betankungszeit, Bis 2030 Wasserstoff-Flottenprojekt, >500 km Tagesleistung, Effizienz ~26%	Bis 300km Kosten- und Energieeffizient, Bis 2030 BEV-Flottenprojekt, ≤ 300 km Tagesleistung, Effizienz ~69-81%	In Entwicklungsphase, ≤ 500km Tagesleistung, Effizienz ~73%	
VCÖ-Mobilität mit Zukunft	Nischenbereich, Wirkungsgrad 33%, Markthochlauf Ende 2030	Beste Energieeffizienz, 2030 am Markt, 2030 Reichweite von 1.000 km, Wirkungsgrad 77%	Oberleitung kombiniert mit BEV, H ₂ oder Diesel	Nischenbereich, Wirkungsgrad 23%
H₂-Mobility Austria	Hohe Reichweite, Regionalisierung von Treibstoffwertschöpfung, Verringerung THG-Emissionen bis 2030 um 35%, Ergänzung zu BEV, Grüner Wasserstoff			
Bundesministerium – Wasserstoffstrategie	Hohe Reichweite, kurze Betankungszeit, Einsatz im Fern- und Schwerlastverkehr, Nullemissionen- Technologie, Ende 2030 auf dem Markt, Grüner Wasserstoff	Hohe Gesamtsystemeffizienz, NZE-Technologie, 2025 auf dem Markt	In Entwicklungsphase	
Zusammenfassung	Hohe Reichweite, kurze Betankungszeit, Markthochlauf Ende 2030	Hohe Energieeffizienz, 2030 hohe Reichweite	In Entwicklungsphase	Nischenbereich

In den Strategiepapieren wurde „Biomass“ oder „Fossil fuel“ für Schwerlastfahrzeuge für die Jahr 2030 und 2050 nicht erwähnt. Es ist klar ersichtlich, dass vorrangig „Hydrogen“, „Electric vehicle“ und „Hybrid“ in den Fokus genommen werden. Nur eine Literatur hat „E-Fuel“ und „Syn. fuel“ erwähnt. Anhand der Beschreibung, in Tabelle 7 wurde mit Wissenschaftlern ein Vergleich mit den Abbildungen 13 und 14 gemacht. Die Darstellung „Anteil Neuzulassungen“ für 2030 und 2050 wurde herangezogen, da sie einen Hinweis auf die zukünftige Verbreitung der Technologien

²⁴¹Eigene Darstellung.

liefern und mit den Informationen aus den Studienpapieren konnten diese Daten gefiltert werden. Die Abbildung „Energiebedarf“ und „Energieverbrauch“ wurden nicht betrachtet, da die Strategiepapiere wenig Rückschluss auf diese Daten erlauben.

Die Energieträger „Hydrogen“, „Electric vehicle“ und „Hybrid“ wurden für die weitere Arbeit betrachtet, da in Gegenüberstellung mit den vorherigen Ergebnissen der Abbildung „Anteil Neuzulassungen“ und den Analysen der Strategiepapiere, diese drei Kraftstoffe potenzielle Möglichkeiten für die Zukunft darstellen. Mit weiteren Analysen und Filterkriterien werden die potenziellen Möglichkeiten noch sorgfältiger ausgearbeitet. Obwohl „Fossil fuel“ in den Strategiepapieren für die Jahre 2030 oder 2050 nicht vorgesehen ist, wurde der konventionelle Kraftstoff in die Analyse miteinbezogen, da es wesentlich zu Wissen ist, wann diese Technologie vollständig ersetzt wird und wie lang Verbrenner noch auf dem Markt sein werden. Im Gegensatz dazu werden Szenarien ausgeschlossen, die Biomasse eine große Rolle zusprechen, da es in den Abbildungen 13 und 14 im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen nur von zwei Autoren in den Szenarien erwähnt wird und in den Strategiepapieren für Schwerlastfahrzeuge nicht betrachtet wird. Obwohl „E-Fuel“ und „Syn. fuel“ von „VCÖ-Mobilität mit Zukunft“ genannt wurde, aber dieser Kraftstoff nur in Ausnahmefällen herangezogen wird und auch im Vergleich bei Abbildung 13 und 14 zu den anderen Energieträgern nur gering behandelt wird, wird der Kraftstoff in der weiteren Arbeit nicht berücksichtigt.

Ein weiteres Ausschlusskriterium für mögliche österreichische Szenarien ist die Angabe von Null Neuzulassungen bei Technologien, die bereits heute im Einsatz sind, oder denen in den Strategiepapieren eine relevante Rolle zugesprochen wird. Zudem wird auch das APS nicht weiter betrachtet, da keine Szenarien abgebildet sind.

Zusammenfassend wurden durch die folgenden Ausschlusskriterien für das Jahr 2030 elf Szenarien und für das Jahr 2050 13 Szenarien aus den durch die SLR identifizierten möglichen Szenarien für den Fall Österreich ausgeschlossen:

- Szenarien, die „Biomass“, E-Fuel“ und „Syn. fuel“ wichtige Rollen zusprechen
- Szenarien, die bereits im Einsatz befindlichen Technologien keine Neuzulassungen zusprechen
- Szenarien im APS Cluster

5.4 Ergebnisse

Nach dem Vorgehen und Abarbeiten der Filterkriterien sind für die Darstellung „Anteil an Neuzulassungen“ für 2030 im NZES die Szenarien von Kasten, P. et al. (2016), Siegmund, S. et al. (2017) und Vad Mathiesen, B et al. (2014) weggefallen. Für das Jahr 2050 wurden die Szenarien von Kasten, P. et al. (2016), Vad Mathiesen, B et al. (2014), Terlouw, W. et al. (2019), Repenning, J. et al. (2015) und Siegmund, S et al. (2017) ausgeschlossen, siehe Abbildung 20.

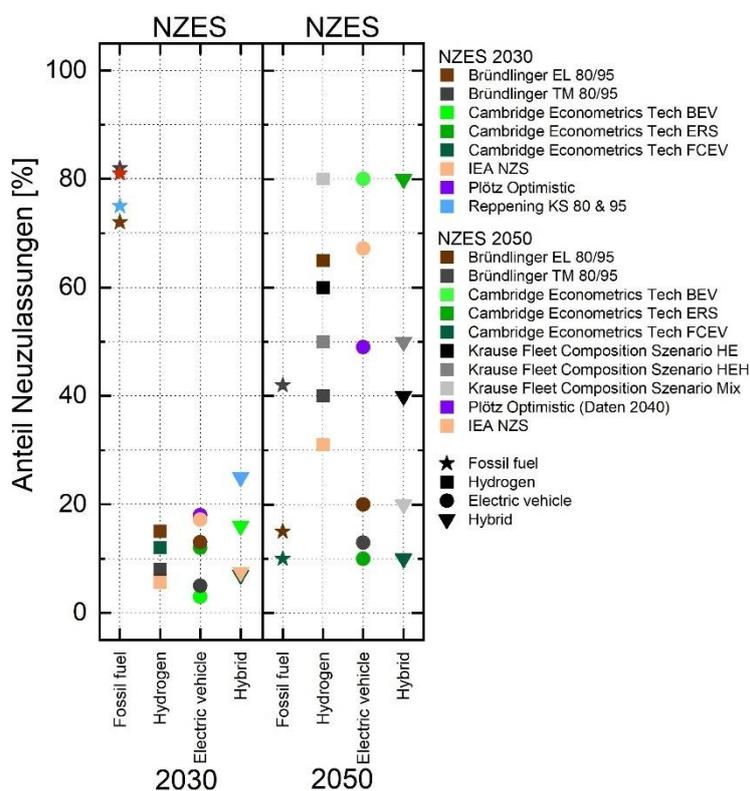


Abbildung 20: NZES 2030 und 2050²⁴²

Im Jahr 2030 kann im NZES noch keine deutliche Aussage zu den zukünftigen Kraftstoffen getroffen werden. In den Prognosen dieses Jahres dominieren fossile Kraftstoffe, gefolgt von „Hybrid“, „Electric vehicle“ und „Hydrogen“. Im Gegensatz dazu ist im Jahr 2050 ein deutlicher Rückgang der fossilen Kraftstoffe zu erkennen. Szenarien zeigen ähnliche Werte für „Hybrid“, „Electric vehicle“ und „Hydrogen“. Hierbei liegt der Wert nach dem Anteil an Neuzulassungen bei 80%. Jedoch erwähnen im Vergleich sechs Szenarien „Electric vehicle“ und jeweils fünf Szenarien „Hydrogen“ und „Hybrid“.

²⁴²Eigene Darstellung.

Ein ähnliches Ergebnis, wie im NZES 2030 kann im STPS im Jahr 2030 bei den fossilen Kraftstoffen erkannt werden, siehe Abbildung 21.

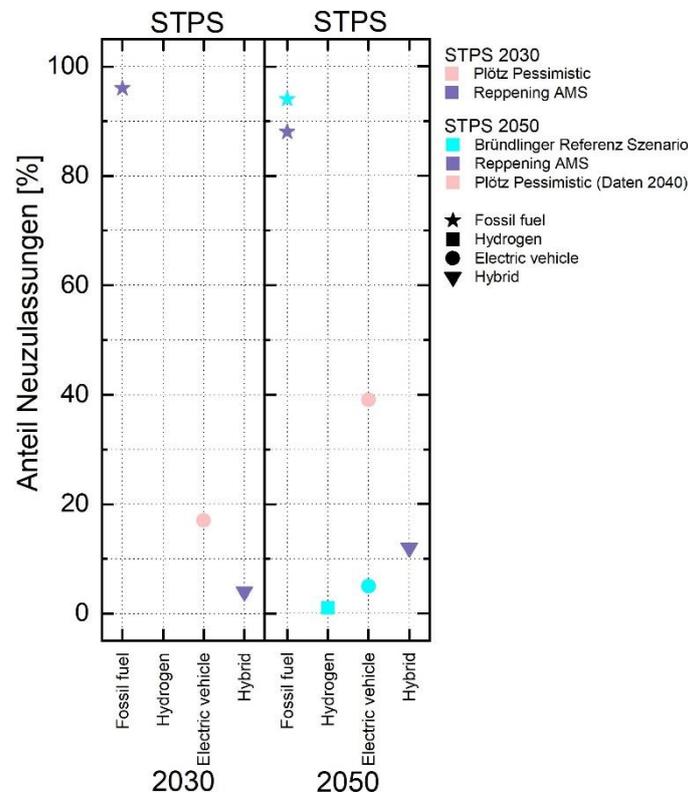


Abbildung 21: STPS 2030 und 2050²⁴³

Zwei Szenarien geben eine Prognose für das Jahr 2030 ab, wobei „Fossil fuel“ den höchsten Anteil an Neuzulassungen hat. Im Jahr 2050 dominiert noch immer der fossile Kraftstoff, gefolgt von „Electric vehicle“ und „Hybrid“. Obwohl wenige Daten vorhanden sind, ist es dennoch beunruhigend zu sehen, dass mit den derzeit angekündigten Maßnahmen im Jahr 2050 fossile Kraftstoffe noch immer den höchsten Anteil an Neuzulassungen haben werden. Mit diesem Szenario kann keine Treibhausgasreduzierung erreicht werden und ohne neue politische Initiativen kann sich das Energiesystem auch nicht ändern.

Aus diesem Grund wird nun näher auf die Boxplot Darstellung für das NZES für die Jahre 2030 und 2050 in Abbildung 22 und 23 eingegangen. Die genauen Bezeichnungen der Szenarien sind im Anhang-B zu finden. Für die Darstellung wurden Boxplots der Studien für den Anteil an Neuzulassung für die Jahre 2030 und 2050 gewählt. Die Whisker zeigen das Minimum und Maximum aller Ergebnisse, während die Box alle Werte zwischen

²⁴³Eigene Darstellung.

dem oberen und unteren Quartil enthält. Die durchgezogene Linie in der Box stellt den Median dar und das kleine Viereck im Boxplot ist der Mittelwert.

Bründlinger, T. et al. (2018), Cambridge Econometrics (2018) und Repenning, J. et al. (2015) haben jeweils ein Szenario bei dem NZES 2030, mit der Verwendung von fossilen Kraftstoffen (siehe Abbildung 22). Hierbei liegt der Median bei 81%. Hingegen beträgt der Median 10% bei „Hydrogen“, 12,5% bei „Electric vehicle“ und 7,5% bei „Hybrid“. Zudem sieht Bründlinger, T. et al. (2018) einen Marktanteil von 15% für das Jahr 2030 bei „Hydrogen“. Des Weiteren geht Plötz, P. et al. (2019) von einem Marktanteil bei „Electric vehicle“ von 18% aus und Repenning, J. et al. (2015) zieht einen Marktanteil von 25% bei „Hybrid“ in Betracht. Zudem kann der Mittelwert herangezogen werden, da es hier keine Ausreißer gibt. „Fossil fuel“ hat einen Mittelwert von 79%, „Hydrogen“ von, 10% „Electric vehicle“ von, 11% und „Hybrid“ von 13%. Daraus lässt sich schließen, dass bis 2030 die Mehrheit an schweren Nutzfahrzeugen mit fossilen Kraftstoffen betrieben wird, aber vor allem ein Potential bei „Electric vehicle“ und „Hydrogen“ zu finden ist.

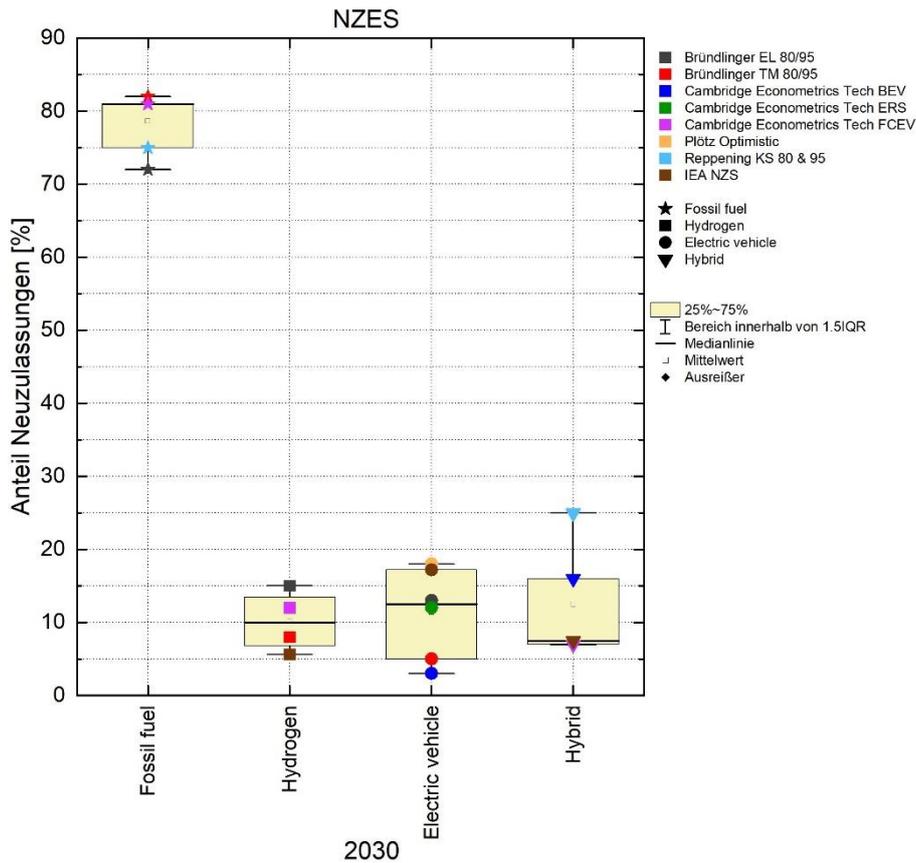


Abbildung 22: NZES 2030 Boxplot²⁴⁴

Im Vergleich dazu erfolgt das NZES für das Jahr 2050 (siehe Abbildung 23). In der Abbildung 23 kann keine eindeutige Aussage über „Fossil fuel“ in einem Boxplot getroffen werden, da zu wenig Daten für eine Aussage zur Verfügung stehen. Dennoch ist dies positiv zu sehen, denn die Ergebnisse zeigen einen starken Rückgang von „Fossil fuel“ auf. Der Fokus liegt nun auf alternativen Kraftstoffen. „Hydrogen“ weist einen Median von 60% auf und einen Maximalwert von 80% Marktanteil, der jeweils von Cambridge Econometrics (2018) und Krause, J. et al. (2020) festgelegt wurde. Der Median von „Electric vehicle“ liegt 2050 bei 34,5%, wobei ein Ausreißer der Studie von Cambridge Econometrics (2018) im Tech BEV Szenario einen Anteil von 80% Neuzulassungen angibt. Einen weitaus niedrigeren Median weist „Hybrid“ auf, der sich bei 30% befindet. Hierbei gibt es wieder einen Ausreißer des Cambridge Econometrics (2018) Tech ERS Szenario, der wieder einen Anteil von 80% Neuzulassungen vorhersagt. Zur Vollständigkeit wird zusätzlich zum Median der Mittelwert angegeben. Obwohl der Median in diesem Fall eine präzisere Angabe gewährleistet, da der Mittelwert von den

²⁴⁴Eigene Darstellung.

Ausreißern beeinflusst wird. Der Mittelwert von „Hydrogen“ liegt bei 58% Marktanteil, bei „Electric vehicle“ liegt der Mittelwert bei 40% und „Hybrid“ bei 35%. Aus dieser Grafik lässt sich ableiten, dass „Hydrogen“ als auch „Electric vehicle“ potenzielle Antriebe für die Jahre 2050 darstellen und höchstwahrscheinlich eine Kombination aus diesen Antrieben verwendet wird.

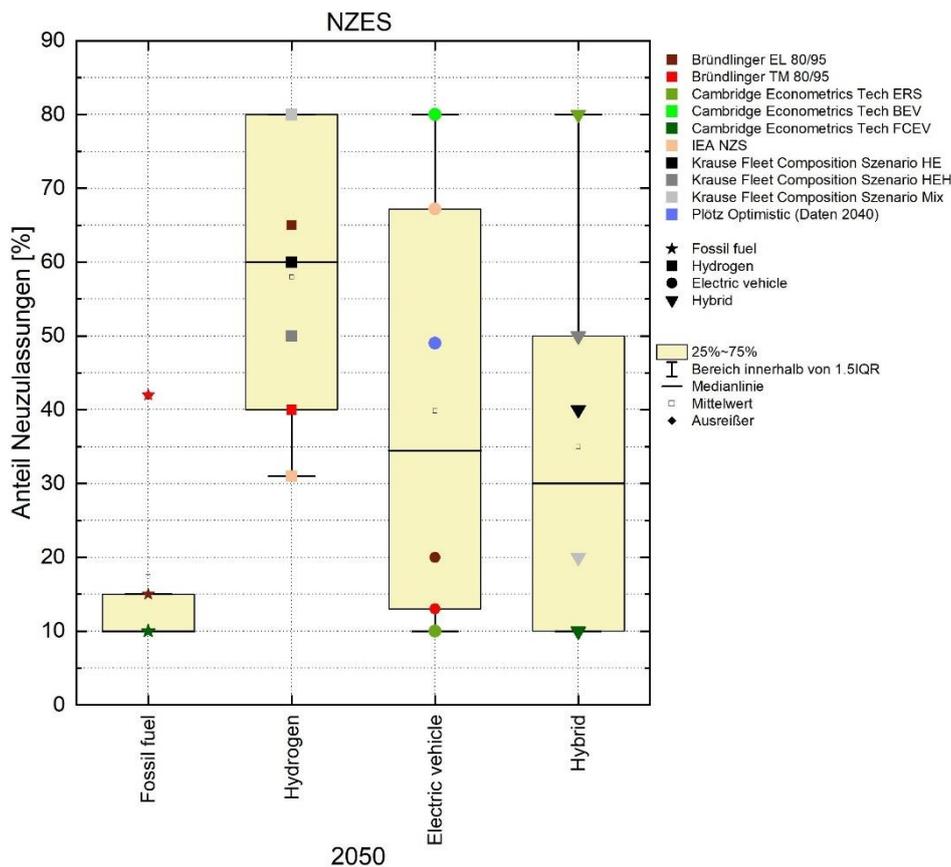


Abbildung 23: NZES 2050 Boxplot²⁴⁵

Sowohl das NZES für das Jahr 2030 als auch für das Jahr 2050 ist auf geografischer Ebene konsistent. Das bedeutet, dass die Marktdurchdringung in der EU ähnlich erfolgen wird. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der Hauptteil der Studien alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien in den Szenarien bevorzugt. Lediglich Bründlinger, T. et al. (2018), Repenning, J. et al. (2015) und Cambridge Econometrics (2018) stellen Marktanteile für fossile Kraftstoffe in ihren Szenarien dar.

Aus den Abbildungen 20 bis 23 kann festgestellt werden, dass es höchstwahrscheinlich nicht nur eine Technologie geben wird, sondern eine Technologiekombination

²⁴⁵Eigene Darstellung.

zukunftsweisend ist. Diese Kombination wird höchstwahrscheinlich aus „Electric vehicle“ und „Hydrogen“ bestehen. Für Flottenunternehmen ist zu empfehlen, dass sie die nächsten drei Jahre abwarten, bis ein genauer Pfad der EU vorgeschlagen wird. Bis 2030 wird der Großteil der Schwerlastfahrzeuge konventionell betrieben sein. Aber es können bereits Strategien für eine Umsetzung auf „Hydrogen“ und „Electric vehicle“ bis zum Jahr 2050 entwickelt werden. Außerdem kann die Entwicklung durch die Politik vorangetrieben werden, indem Maßnahmen vorbereitet werden, um gleichzeitig die Energieeffizienz im Verkehr zu verbessern und die Einführung nachhaltiger Kraftstoffe zu beschleunigen.²⁴⁶

Im nachfolgenden Kapitel wird kurz auf die wesentlichsten Ergebnisse eingegangen und Empfehlungen werden abgegeben.

²⁴⁶Vgl. Siegmund, S. et al. (2017), S. 117.

6 Conclusion

6.1 Handlungsempfehlungen

Obwohl noch immer kein Konsens darüber besteht, welche Technologie sich wirklich durchsetzen wird, wird versucht, aus der umfassenden Analyse von Studien Handlungsempfehlungen für Flottenbetreiber, Politik und Wissenschaft abzugeben

Folgend werden Empfehlungen für Transportunternehmen abgegeben:

- Die verwendete Literatur stellt dar, dass bis 2030 der Großteil von Schwerlastfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren betrieben wird. Aus diesem Grund ist ein Abwarten für Flottenbetreiber der nächsten Jahre zu empfehlen. Denn im Zeitraum 2024-2026 muss auf europäischer Ebene eine Entscheidung getroffen werden, welcher Pfad eingeschlagen wird. Hierbei kann es sich um eine oder mehrerer Technologien handeln,²⁴⁷ wie auch die Ergebnisse der Abbildungen 22 und 23 zeigen.
- Wenn schwere Lasten über große Distanzen transportiert werden sollen, dann ist wiederum ein Abwarten zu empfehlen, da es unklar ist, ob Wasserstoff, Hybrid-Antriebe oder BEV herangezogen werden. Derzeit sind FCEV wegen ihrer hohen Reichweite für schwere Nutzfahrzeuge gegenüber BEV die bevorzugte Wahl.²⁴⁸
- Wenn das Ziel eines THG-Emissionsfreien Verkehrssektor im Unternehmen verfolgt wird, ist die Nutzung von Strom die bevorzugte Energieversorgungsstrategie.²⁴⁹
- Wenn Transportunternehmen zu einem aktiven Marktteilnehmer werden wollen, dann muss bedacht werden, woher der Strom bezogen wird oder ob selbst Strom erzeugt werden kann. Denn der Verkehrssektor muss unabhängig von dem zukünftigen Pfad der Antriebstechnologien einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien erreichen.^{250, 251}

²⁴⁷Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (2022), S. 28.

²⁴⁸Vgl. Bründlinger, T. (2018), S. 126.

²⁴⁹Vgl. Kasten, P. et al. (2016), S. 84.

²⁵⁰Vgl. Siegmund, S. et al. (2017), S. 111.

²⁵¹Vgl. Plötz, P. et al. (2019), S. 36.

- Wenn sich Transportunternehmen schrittweise für eine mögliche Nutzung von „Hydrogen“ und „Electric vehicle“ für das Jahr 2050 vorbereiten möchten, ist eine Erarbeitung einer Strategie erforderlich.

Des Weiteren zeigen die Studien auf, dass von Seiten der Politik klare Regelungen und Pläne für die Zukunft kommen müssen, damit sich Unternehmen auf die neue Situation einstellen und vorbereiten können. Folgend sind Empfehlungen für die Politik angeführt:

- Die Politik sollte einen Rahmen gestalten, der auf die Vermeidung von CO₂-Emissionen ausgerichtet ist und Planungssicherheit für die Investitionen der Industrien schafft.
- Eine Weiterentwicklung der Energieeffizienz über Sektoren, Wertschöpfungsketten und Energieträger ist empfehlenswert, CO₂-Flottenziele sollen auf EU-Ebene unterstützt werden und die Infrastruktur für alternative Antriebe muss entwickelt und aufgebaut werden.²⁵²

Obwohl eine Elektrifizierung der Schwerlastfahrzeuge wahrscheinlich eintreffen wird, ist es nach Keller, V. et al. (2019) wesentlich, dass zusätzliche politische Maßnahmen gesetzt werden, um die Kohlenstoffintensität des Elektrizitätssystems zu senken und so eine erhebliche Emissionsreduzierung zu erreichen.²⁵³

- Beispielsweise kann die Politik bei dem Nutzen von Hydrogen einen Druck auf die Verwendung von grünem Wasserstoff anstatt von blauem Wasserstoff ausüben.²⁵⁴
- Die Attraktivität zukünftiger alternativer Kraftstoffe kann mittels der Unterstützung der Politik verbessert werden, indem zum Beispiel ein leistbares Preisniveau für zukünftige Kraftstoffe entsteht.²⁵⁵
- Des Weiteren kann eine höhere Entlastung von emissionsarmen LKW bei der Maut Flottenunternehmen zugutekommen.²⁵⁶

Zusätzlich werden Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft abgeleitet. Es wurde an der Vielzahl an gefundenen Literaturen bei der SLR ersichtlich, dass sich die Forschung stark mit dem Thema alternative Kraftstoffe und Technologien

²⁵²Vgl. Bründlinger, T. (2018), S. 22ff.

²⁵³Vgl. Keller, V. et al. (2019), S. 748.

²⁵⁴Vgl. Terlouw, W. et al. (2019), S. 91.

²⁵⁵Vgl. Terlouw, W. et al. (2019), S. 208.

²⁵⁶Vgl. Bründlinger, T. (2018), S. 40.

auseinandersetzt. Es wäre von Vorteil, wenn nicht nur Vorschläge für Regionen gemacht werden, sondern beispielsweise für ganz Europa. Zudem wäre es sinnvoll, mehr Empfehlungen für betroffene Unternehmen, wie zum Beispiel Transportunternehmen abzugeben und nicht nur für die Politik. Des Weiteren wird auch keine Strategie oder kein Vorgehen für eine Zusammenstellung des Straßengüterverkehrs in Hinsicht auf Klimaneutralität beschrieben. Es ist wesentlich, dass die Wissenschaft eine Datenbasis zur Entscheidungsunterstützung zur Verfügung stellt – beispielsweise fundierte Aussagen darüber, wann welche alternativen Technologien voraussichtlich in welchen Bereichen und Nischen bereit für die Praxis sein werden, damit sich Unternehmen vorbereiten können.

6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Zielsetzung dieser Arbeit war, mögliche Pfade der Dekarbonisierung des österreichischen Straßengüterverkehrs aufzuzeigen und diesbezüglich eine Handlungsempfehlung für österreichische Transportunternehmen abzugeben.

Für die Erreichung der Zielsetzung wird im zweiten Kapitel anhand einer explorativen Literaturrecherche der Straßengüterverkehr dargestellt und in Entfernungsklassen eingeteilt. Zusätzlich werden transportintensive Branchen analysiert, um ein Indiz dafür zu erhalten, welche Branchen stark von einem Einsatz alternativer Kraftstoffe abhängig sein werden. Mittels der Betrachtung der Marktstruktur des Straßengüterverkehrs wurde ersichtlich, dass in den letzten Jahren ein starkes Wachstum verzeichnet wurde und somit auch eine Erhöhung der THG-Emissionen zu erkennen ist. Eine Analyse der Krisen in den vergangenen Jahren zeigt, dass beispielsweise durch den Krieg zwischen Russland und der Ukraine die Abhängigkeit der Transportbranche von fossilen Kraftstoffen sichtbar wurde.

Im dritten Kapitel wird auf Möglichkeiten der Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr eingegangen. Aus diesem Kapitel ist ersichtlich, dass eine Reduzierung der THG-Emissionen im Straßengüterverkehr wesentlich ist und es unterschiedliche Möglichkeiten gibt, wie Emissionen reduziert werden können. Zudem werden alternative Antriebstechnologien und alternative Energieträger für Schwerlastfahrzeuge dargestellt, welche für das Verständnis und weitere Vorgehen in der Arbeit dienen sollen. Zusätzlich werden Barrieren und Motivatoren für den aktuellen Einsatz alternativer Optionen für Transportunternehmen diskutiert und Maßnahmen der Verkehrspolitik der EU aufgezeigt. Die behandelten Themen im dritten Kapitel sind für

die weitere Vorgehensweise im vierten Kapitel wesentlich, um anhand einer systematische Literaturrecherche in der Literatur Szenarien zu identifizieren, welche alternativen Energieträger und Antriebstechnologien für die Jahre 2030 und 2050 entwickelt werden könnten.

Im vierten Kapitel wird die Literatur analysiert und nach Szenarien geclustert. Es folgt eine deskriptive Analyse, in der ausgewählte Aspekte der Literatur behandelt werden. Des Weiteren wird die Literatur der SLR inhaltlich und in Bezug auf alternative Energieträger und Antriebstechnologien in Hinsicht auf Szenarien untersucht. Darauf fand das Clustering statt, wobei drei Hauptszenarien des World Energy Outlook der International Energy Agency als Basis herangezogen wurden. Im Prozess des Clustering wurden die Szenarien der Literatur den Hauptszenarien und den jeweiligen Kraftstoffen zugeteilt. Bei der Analyse der Cluster wurden die erwähnten Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe in Gruppen unterteilt und geeignete Daten für die Darstellung der Szenarien für die Jahre 2030 und 2050 vorbereitet.

Damit geeignete Aussagen für die Zukunft gewährleistet werden und die Frage, "Welchen Pfad schlägt Österreich ein?" beantwortet werden kann, wurden die Szenarien im Detail analysiert. Dazu wurden, im fünften Kapitel, österreichische Strategiepapiere hinsichtlich der gefundenen Technologien analysiert. Durch eine Diskussion mit zwei weiteren Forschern konnten aus diesen Papieren Filterkriterien für die gefundenen Szenarien definiert werden. Somit wurden diejenigen Szenarien, die am ehesten die zukünftige österreichische Entwicklung für die Jahre 2030 und 2050 beschreiben, identifiziert. Das Ergebnis dieses Kapitels ist, dass bis 2030 die Mehrheit an Schwerlastfahrzeugen mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden und alternative Technologien nur schleppend an Bedeutung in diesem Sektor gewinnen. Jedoch ist im Jahr 2050 ein deutlicher Unterschied bei den fossilen Kraftstoffen zu erkennen. Die Neuzulassung von Schwerlastfahrzeugen mit fossilen Kraftstoffen und der fossile Kraftstoffverbrauch zeigt einen deutlichen Rückgang auf und der Fokus liegt auf „Hydrogen“ und „Electric vehicle“.

6.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass eine Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs sehr träge und schwierig ist, aber eine Einführung von alternativen Technologien und Kraftstoffen ein Schritt zur Reduzierung der THG-Emissionen sein kann.

Die Entwicklung alternativer Technologien und Kraftstoffe ist derzeit sehr schnelllebig, weshalb eine präzise Aussage über die Verfügbarkeit einer Technologie für die Jahre 2030 und 2050 schwierig ist. Aktuell wird der Straßengüterverkehr hauptsächlich mit fossilen Kraftstoffen betrieben, da zum Teil lange Reichweiten mit hohem Beladungsgewicht absolviert werden müssen. Studien belegen aber, dass eine Umstellung von fossilen Kraftstoffen auf Alternativen wie Biokraftstoffe, Strom oder Wasserstoff große Potenziale zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Straßengüterfernverkehr haben. Durch mögliche Maßnahmen, wie zum Beispiel dem Avoid-Shift-Improve ist es auch ersichtlich, dass die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs eng mit der Effizienzverbesserung und den Energiesektor zusammenhängt. Wesentlich ist, dass der verwendete Strom für die Herstellung und Verwendung von alternativen Technologien und Kraftstoffen aus erneuerbaren Energiequellen herangezogen wird. Eine rasche Möglichkeit, um die Klimabilanz bereits 2030 neben den verschiedenen Technologiekombinationen zu verbessern ist der Einsatz von Oberleitungs- und Batterie-LKW.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass in Österreich im Jahr 2030 fossile Kraftstoffe noch immer einen sehr hohen Marktanteil haben werden, was darauf schließen lässt, dass sich für Transportunternehmen in Österreich bis 2030 nicht viel im Bereich Antrieb der Transportmittel ändern wird. Es können lediglich die Maßnahmen der Politik verfolgt und abgewartet werden, bis ein konkreter Pfad beschlossen wird. Zur Überbrückung, bis eine konkrete Technologie bestimmt wird, können konventionelle Verbrenner durch eine Beimischung von Biodiesel bereits eine Reduzierung der CO₂-Emissionen erreichen.

Vielversprechender sieht es im NZES 2050 aus. Fossile Kraftstoffe zeigen in den für Österreich passenden Szenarien einen deutlichen Rückgang und es stellt sich eine Kombination von „Hydrogen“ und „Electric vehicle“ ein, da diesen hohe Marktanteile prognostiziert werden. Das NZES lässt erkennen, wohin der Trend in den nächsten Jahren gehen wird, wenn sich die Politik auf eine strikte Zero-Emission Strategie einigt. Wesentlich ist aber, dass sich die Politik schnell über Richtungsentscheidungen einigt wird, da viele Technologien in der Entwicklungs- beziehungsweise Weiterentwicklungsphase stecken und die Entscheidungen der Politik und Gesetzgebung einen hohen Einfluss darauf haben.

Für österreichische Transportunternehmen ist festzuhalten, dass sie für das Jahr 2030 auf Maßnahmen der Gesetzgeber warten müssen, die im Jahr 2024-2026 beschlossen werden sollen. In der Zwischenzeit ist eine Beimengung von Biodiesel zu dem konventionellen Diesel empfehlenswert. Des Weiteren sollte für 2050 eine Strategie zur Nutzung von „Hydrogen“ und „Electric vehicle“ erarbeitet werden, um sich auf eine wahrscheinliche Verbreitung der Technologien schrittweise vorzubereiten.

Literaturverzeichnis

- Albrecht, F. G.; Nguyen, T. (2020): Prospects of electrofuels to defossilize transportation in Denmark – A techno-economic and ecological analysis. In: *Energy* 192, S. 116511.
- Agora Verkehrswende (2017): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf (Zugriff: 13.02.2023).
- Agora Verkehrswende Öko-Institut, Stiftung KlimaWirtschaft (2023): Unternehmensmobilität nachhaltig gestalten. Handlungsempfehlungen für mehr Klimaschutz und Effizienz im Flottenmanagement und auf Arbeitswege. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Compan-e_Abschlusspapier.pdf (Zugriff: 05.03.2023).
- Aichmayer, S.; Mitterhuemer, R.; Winter, R. (2021): Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2021. URL: https://www.biokraft-austria.at/media/18119/biokraftstoffbericht_2021.pdf (Zugriff: 01.03.2023).
- Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (2008): *Handbuch Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-72928-0.
- Askin, A. C.; Barter, G. E.; West, T. H.; Manley, D. K. (2015): The heavy-duty vehicle future in the United States: A parametric analysis of technology and policy tradeoffs. In: *Energy Policy* 81. S. 1-13.
- Bae, Y.; Kumar Mitar, S.; Rindt, C. R.; Ritchie, S. G. (2022): Factors influencing alternative fuel adoption decisions in heavy-duty vehicle fleets. In: *Transport Research Part D* 102, S.103150.
- Breuer, J. L.; Scholter, J.; Koj, J. C.; Schorn, F.; Fiebrandt, M.; Can Samsun, R.; Albus, R.; Görner, K.; Stolter, D.; Peters, R. (2022): An Overview of Promising Alternative Fuels for Road, Rail, Air, and Inland Waterway Transport in Germany. In: *Energies* 15, S. 1443.
- Bründlinger, T., Elizalde-König, J., Frank, O., Gründig, D., Jugel, C., Kraft, P., et al. (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, Teil A und Teil B. Berlin. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf (Zugriff: 03.03.2023).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2021) (Hrsg.): *Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich*. Wien.

- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hrsg.) (2022 a): Fortschrittsbericht 2022 nach § 6 Klimaschutzgesetz. Wien.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (Hrsg.) (2022 b): Wasserstoffstrategie für Österreich. Wien.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022): Novelle der Kraftstoffverordnung. URL: https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/20221218_kraftstoffverordnung.html (Zugriff: 01.03.2023).
- Çabukoglu, E.; Georges, G.; Küng, L.; Pareschi, G.; Boulouchos, K. (2019). „Fuel cell electric vehicles: An option to decarbonize heavy duty transport? Results from a Swiss case-study“. In: Transportation Research Part D 70, S. 35–48.
- Cambridge Econometrics (2018): Trucking into a Greener Future: the economic impact of decarbonizing goods vehicles in Europe. URL: <https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2019/11/6-09-2019-trucking-into-a-greener-future-technical-report.pdf> (Zugriff: 13.03.2023).
- Chiaromonti, D.; Talluri, G. (2021): The future of Sustainable Biofuels towards the 2°C target: forecasting process, technologies and sector demands. In: E2S Web of Conferences 238, S. 08002 .
- Serra, A.; Magallon, I.; Messagie, M.; Berecibar, M.; Lozano, M.; Munoz, I.; Lebrato, J. (2020): Overcoming the barriers to the development of the European Alternative Fuels market. URL: http://colhdproject.eu/wp-content/uploads/2019/04/COLHD_BarriersReport.pdf (Zugriff: 05.03.2023).
- De Smedt, L.; De Wispelaere, F. (2020): Road freight transport in the European Union. In search of a balance between the economic and social dimension of the internal market. A quantitative sectoral analysis. URL: https://transfair-project.eu/wp-content/uploads/2021/03/TRANSFAIR_Quant_Dimension_Transport_EU_EDITED_Feb2021.pdf (Zugriff: 06.12.2022)
- Dorda, A.; Kastberger, K.; Wolfbeisser, A.; Mauritsch, W.; Raimann, P. (2020): Fahrzeugtechnologien in und aus Österreich. Forschung und Entwicklung für eine innovative und nachhaltige Mobilität der Zukunft URL: https://www.ffg.at/sites/default/files/downloads/Fahrzeugtechnologien-in-und-aus-Oesterreich_2020.pdf (Zugriff: 04.03.2023).
- Eisenkopf, A.; Knorr, A. (2020): Straßengüterverkehr: geplantes EU-Entsenderecht-ein protektionistischer Affront? In: Wirtschaftsdienst, 2020, Jg.100, Nr. 3, S.201-207.

- European Union (2022): EU TRANSPORT in figures. Luxembourg: Publications Office of the European Union. URL: <https://www.reroad.at/files/771e44cdfd5549f5bf016f5a1392a28d/> (Zugriff: 20.02.2023).
- European Commission (k. A.): Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en (Zugriff: 23.02.2023).
- Europäischer Rat (2023): Fit für 55. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (Zugriff: 27.02.2023).
- EWE (k.A): Die Farben des Wasserstoffs. URL: <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/die-farben-des-wasserstoffs> (Zugriff: 07.03.2023).
- Fachverband der Chemischen Industrie Österreichs (2023): Biokraftstoffe. URL: <https://www.biokraft-austria.at/> (Zugriff: 02.03.2023).
- Fernández-Dacosta, C.; Shen, L.; Schakel, W.; Ramirez, W.; Kramer, G. J. (2019): Potential and challenges of low-carbon energy options: Comparative assessment of alternative fuels for the transport sector. In: Applied Energy 236, S. 590-606.
- Forschungs-Informationssystem (2012): Mobilität und Verkehr. URL: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/98631/> (Zugriff: 01.03.2023).
- Gonzalez, J. N.; Camerero-Orive, A.; González-Cancelas, N.; Guzman, A. F. (2022): Impact of the COVID-19 pandemic on road freight transportation – A Columbian case study. In: Research in Transportation Business & Management 43, S. 100802.
- Göckeler, K.; Hacker, F.; Ziegler, L.; Heinzelmann, J.; Lesemann, L.; Bernecker, T. (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht_2-Befragung_Logistikbranche.pdf (Zugriff: 04.03.2023).
- Gruden, D. (2008): Umweltschutz in der Automobilindustrie. Motor, Kraftstoffe, Recycling. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. ISBN 978-3-8348-0404-4.

- Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W.; Bernecker, T.; Speiser, J.; Röckle, F.; Schubert, M.; Nebauer, G. (2020): StratON. Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf> (Zugriff: 03.03.2023).
- Helgeson, B.; Peter, J. (2020): The role of electricity in decarbonizing European road transport-Development and assessment of an integrated multi-sectoral model. In: Applied Energy 262, S. 114365.
- Helms, H.; Jöhrens, J. (2021): Erfolgsfaktoren für einen effektiven Klimaschutz im Straßengüterverkehr. URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2022/BOLD_policy_summary_umwelt_03.pdf (Zugriff: 20.02.2023).
- H₂-Mobility Austria (Hrsg) (2022): 2.000 H₂-Lkw auf Österreichs Straßen bis 2030. Wien.
- International Energy Agency (2017): The Future of Trucks. Implications for energy and the environment. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a4710daf-9cd2-4bdc-b5cf-5141bf9020d1/TheFutureofTrucksImplicationsforEnergyandtheEnvironment.pdf> (Zugriff: 20.02.2023).
- International Energy Agency (2020): Changes in transport behavior during the COVID-19 crisis. URL: <https://www.iea.org/articles/changes-in-transport-behaviour-during-the-covid-19-crisis> (Zugriff: 06.12.2022).
- International Energy Agency (2020): Net Zero by 2050. A Roadmap for Global Energy Sector. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (Zugriff: 06.03.2023).
- International Energy Agency (2021): COVID-19 Topics. URL: <https://www.iea.org/topics/covid-19> (Zugriff: 06.12.2022).
- International Energy Agency (2022): World Energy Outlook 2022. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (Zugriff: 13.03.2023).
- International Transport Forum (2021): The ITF Transport Outlook 2021. Reshaping mobility in the wake of Covid-19. URL: https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/1_SSWA_ITF%20Transport%20Outlook%202021_Day1.pdf (Zugriff: 20.02.2023).

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2023): AR6 Synthesis Report, Climate Change 2023. URL: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf (Zugriff:23.03.2023).
- Jaramillo, P.; Kahn Ribeiro, S.; Newman, P.; Dhar, S.; Diemuodeke, O.E.; Kajino, T.; Lee, D.S.; Nugroho, S.B; Ou, X.; Hammer Strømman, A.; Whitehead, J. (2022): Transport. In: IPCC, 2022 (Hrsg.): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.0
- Jünemann, R.; Schmidt, T. (1999): Materialflußsysteme. Systemtechnische Grundlagen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. ISBN: 3-540-65076-8.
- Kany, M. S.; Vad Mathiesen, B.; Skov, I. R.; Korberg, A. D.; Thellufsen, J. Z.; Lund, H.; Sorknæs, P.; Chang, M. (2022): Energy efficient decarbonisation strategy for the Danish transport sector by 2045. In: Smart Energy 5, S. 100063.
- Kaiblinger, A.; Woschank, M. (2022): State of the Art and Future Directions of Digital Twins for Production Logistics: A Systematic Literature Review. In: Applied Sciences 12, S. 669.
- Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, C.; Schmied, M.; Wüthrich, P. (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf (Zugriff: 13.03.2023).
- Kasten, P.; Kühnel, S. (2019): Positionen zur Nutzung strombasierter Flüssigkraftstoffe (efuels) im Verkehr. Darstellung von Positionen verschiedener Akteure zum Einsatz von efuels im Verkehr. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stakeholder-Positionen-e-fuels.pdf> (Zugriff: 05.03.2023).
- Kasten, P. (2022): Klimaschutz im Verkehrssektor. In: Wirtschaftsdienst, Jg.102, S. 22-28.
- Keller, V.; Lyseng, B.; Wade, C.; Scholtysik, S.; Fowler, M.; Donald, J.; Palmer-Wilson, K.; Robertson, B.; Wild, P.; Rowe, A. (2019): Electricity system and emission impact of direct and indirect electrification of heavy-duty transportation. In: Energy 172, S. 740-751.
- Kluschke, P.; Gnann, T.; Plötz, P.; Wietschel, M. (2019): Market diffusion of alternative fuel and powertrains in heavy-duty vehicles: A literature review. In: Energy Reports 5, S.1010-1024.

- Kotze, R.; Brent, A.C.; Musango, J.; de Kock, I.; Malczynski, L.A. (2021): Investigating the Investments Required to Transition New Zealand's Heavy-Duty Vehicles to Hydrogen. In: *Energies* 14, S.1646.
- Krause, J.; Thiel, C.; Tsokolis, D.; Samaras, Z.; Rota, C.; Ward, A.; Prensinger, P.; Coosemans, T.; Neugebauer, S.; Verhoeve, W. (2020): EU road vehicle energy consumption and CO₂ emissions by 2050-Expert-based scenarios. In: *Energy Policy* 138, S.111224.
- McKinnon, A. (2018): *Decarbonizing Logistics, Distributing goods in a low – carbon world. Great Britain and United States: Kogan Page Limited. ISBN: 978-0-7494-8047-9.*
- Mulholland, E.; Teter, J.; Cazzola, P.; McDonald, Z.; O Gallachoir, B. P. (2018): The long haul towards decarbonising road freight – A global assessment to 2050“. In: *Applied Energy* 216, S. 678–693.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität AG 2 (2021): Roadmap – Markthochläufe alternativer Antriebe und Kraftstoffe aus technologischer Perspektive. AG 2-Bericht. URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG2_Technologie_Roadmap.pdf (Zugriff: 03.03.2023)
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität AG 6 (2021): Schwere Nutzfahrzeuge- Standards und Normen für alternative Antriebe. AG 6-Bericht. URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/11/NPM_AG6_SchwereNutzfahrzeuge.pdf (Zugriff: 03.03.2023).
- Navas-Anguita, Z.; García-Gusano, D.; Iribarren, D. (2020): Long-term production technology mix of alternative fuels for road transport: A focus on Spain. In: *Energy Conversion and Management* 226, S.113498.
- Neubauer, S. C. (2021): Global Warming Potential Is Not an Ecosystem Property. In: *Ecosystems*, Jg. 24, S. 2079-2089.
- Noll, B.; del Val, S.; Schmidt, T. S.; Steffen, B. (2022): Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe. In: *Applied Energy* 306. S. 118079.
- oesterreich.gv.at (2023): Die österreichische Klimaschutzstrategie/Politik. URL: https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000310.html (Zugriff: 27.02.2023).

- Öamtc (2023): Mineralölsteuer & CO₂-Bepreisung. URL: <https://www.oeamtc.at/thema/verkehr/mineraloelsteuer-co2-bepreisung-17914742> (Zugriff: 01.03.2023).
- Pinner, D.; Rogers, M.; Samandari, H. (2020): Addressing climate change in a post-pandemic world. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/addressing-climate-change-in-a-post-pandemic-world#/> (Zugriff: 23.03.2023).
- Pernice, D. (2022): Gemeinsame Verkehrspolitik: Überblick. URL: https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU_3.4.1.pdf (Zugriff:03.01.2023).
- Pfohl, H. C. (2018): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-56227-7.
- Pfoser, S. (2022): Decarbonizing Freight Transport. Acceptance and Policy Implications. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN: 978-3-658-37102-9.
- Pils, M. (2020): Last Mile. In: Höller, J.; Illetits-Motta, T.; Küll, S.; Niederländer, U.; Stabauer, M. (Hrsg.): Digital Business für Verkehr und Mobilität, Ist die Zukunft autonom oder digital? Johannes Kepler Universität: Institut für Digital Business. ISBN: 978-3-9504630-4-0, S.1-32.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Wietschel, M.; Kluschke, P.; Doll, C.; Hacker, F.; Blanck, R.; Kühnel, S.; Jöhrens, J. Helms, H.; Lambrecht, U. Dünnebeil, F. (2018): Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr-Handlungsempfehlungen für Deutschland. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Thesen-Zukunft-StrGueterverkehr.pdf> (Zugriff: 01.03.2023).
- Plötz, P., Gnann, T., Jochem, P., Ümitcan Yilmaz, H., Kaschub, T. (2019): Impact of electric trucks on the European electricity system and CO₂ emissions. In: Energy Policy 130, S.32-40.
- PRISMA (2023): PRISMA 2020 Checklist. URL: <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/Checklist> (Zugriff: 20.03.2023).
- Ramos, J., L.; Pakuts, P.; Godoy, P.; Gracia-Franco, A.; Duque, E. (2022): Adressing the energy crisis: using microbes to make biofuels. In: Microbial Biotechnology, Jg.15, S. 1026-1030.
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Henneberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C. et al. (2015): klimaschutzszenario 2050. URL: <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> (Zugriff: 13.03.2023).

- Ridjan, I.; Vad Mathiesen, B.; Connolly, D. (2016): Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review. In: Journal of Cleaner Production 112, S. 3709-3720.
- Sailer, M.; Bleher, D.; Menge, K. (2014): Verkehr und Klimaschutz. Wie gelingt nachhaltige Mobilität. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/e-paper/2014/ecoatwork_03_2014.pdf (Zugriff: 01.03.2023).
- Sauren, R. (2012): Ökologisch und ökonomisch nachhaltige Gestaltung logistischer Systeme. In: Corsten, H.; Roth, S. (Hrsg.): Nachhaltigkeit. Unternehmerisches Handeln in globaler Verantwortung. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN: 978-3-8349-3179-5, S.133-151.
- Scheelhaase, J.; O'Sullivan, M.; Naegler, T.; Kugler, U.; Scheier, B.; Standfuß, T.; Grimme, W. (2018): Klimaschutz im Verkehrssektor – aktuelle Beispiele aus der Verkehrsforschung. In: Wirtschaftsdienst 2018, Jg. 98, Nr. 9, S.655-663.
- Siegmund, S.; Trommler, M.; Kolb, O.; Zinnecker, V.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Raksha, T.; Zerhusen, J. (2017): The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9219_E-FUELS-STUDY_The_potential_of_electricity_based_fuels_for_low_emission_transport_in_the_EU.pdf (Zugriff: 13.03.2023).
- Speth, D.; Funke, S. A. (2021): Comparing Options to Electrify Heavy-Duty Vehicles: Findings of German Pilot Projects, In: World Electric Vehicle Journal12, S.67.
- Statista (2021): Anzahl der Arbeitsstätten im fuhrgewerblichen Straßengüterverkehr in Österreich von 2011 bis 2021. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/288254/umfrage/unternehmen-im-strassengueterverkehrs-in-oesterreich/> (Zugriff.05.12.2022).
- Statista (2021): Gütertransporteure und Spediteure in Österreich nach Umsatz 2020/21. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/899828/umfrage/guetertransporteure-und-spediteure-in-oesterreich-nach-umsatz/> Zugriff (22.12.2022)
- Statista (2022): Treibhausgas-Emissionen des Sektors Straßenverkehr in Österreich nach Verursacher von 1990 bis 2020. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/962273/umfrage/treibhausgas-emissionen-des-sektors-verkehr-in-oesterreich-nach-verursacher/> Zugriff: 13.02.2023).

- Statistik Austria (2021): Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen: Transportaufkommen und -leistung nach Verkehrsbereichen für das Jahr 2021. URL: <https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/gueterverkehr/gueterverkehr-strasse> (Zugriff: 22.12.2022)
- Statistik Austria (2022): Verkehrsstatistik. URL: <https://www.statistik.at/fileadmin/publications/Verkehrsstatistik-2021.pdf> (Zugriff:01.03.2023).
- Terlouw, W.; Peters, D.; van Tilburs, J.; Schimmel, M.; Berg, T.; Cihlar, J.; Mir, G. U. R; Spöttle, M.; Staats, M.; Lejarettta, A. V.; Buseman, M.; Schenkel, M.; van Hoorn, I.; Wassmer, C.; Kamensek, E.; Fichter, T. (2019): Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emission energy system. URL: <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/03/Navigant-Gas-for-Climate-The-optimal-role-for-gas-in-a-net-zero-emissions-energy-system-March-2019.pdf> (Zugriff: 13.03.2023).
- Turner, L. K.; Collins, F. G. (2013): Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. In: Construction and Building Materials 43, S. 125-130.
- Umweltbundesamt (2019): Nachhaltige Mobilität. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/mehr-mobilitaet-weniger-verkehr> (Zugriff: 01.03.2023).
- Umweltbundesamt (2023): Synthetische Verbrennungskraftstoffe. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/mobilitaet/technologie/synthetische-verbrennungskraftstoffe> (Zugriff: 16.02.2023).
- Umweltbundesamt (2023): Treibhausgase. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/klima/treibhausgase>. (Zugriff: 27.02.2023).
- Umweltbundesamt (2023): Klimawandelanpassung. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/klima/klimawandel> (Zugriff: 23.03.2023).
- Vad Mathiesen, B.; Lund, H.; Connolly, D.; Nielsen, M. P.; Schaltz, E.; Wenzel, H.; Bentsen, N. S.; Felby, C.; Kaspersen, P.; Ridjan, I.; Hansen, K. (2014): CEESA 100% Renewable Energy Transport Scenarios towards 2050. In: Technical Background Report Part 2. Department of Development and Planning, Aalborg University.

- VCÖ-Mobilität mit Zukunft (2022): Infrastruktur für erdölfreien Lkw-Verkehr planen. URL: <https://vcoe.at/files/vcoe/uploads/News/VCOe-Factsheets/2022/Infrastruktur%20f%C3%BCr%20erd%C3%B6lfreien%20Lkw-Verkehr%20planen/VC%C3%96-Factsheet%20Infrastrukturen%20f%C3%BCr%20erd%C3%B6lfreien%20Lkw-Verkehr%20planen.pdf> (Zugriff: 13.03.2023).
- Volvo (2023): Lkw mit Gasantrieb. URL: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/lng-lkw.html> (Zugriff: 15.02.2023).
- vom Brocke, J.; Niehaves, B.; Plattfaut, R.; Riemer, K. (2009). Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. URL: https://www.researchgate.net/publication/259440652_Reconstructing_the_Giant_On_the_Importance_of_Rigour_in_Documenting_the_Literature_Search_Process (Zugriff: 06.03.2023).
- Wanitschke, A.; Hoffmann, S. (2020): Are battery electric vehicle the future? An uncertainty comparison with hydrogen and combustion engines. In: Environmental Innovation and Societal Transitions 35, S.509-523.
- Wieland, B. (2010): Europäische Verkehrspolitik und der Wettbewerb im Eisenbahnwesen und im Straßengüterverkehr. In: Wirtschaftsdienst 2010, Jg. 90, Nr. 13, S.43-50.
- Winter, K. (2013): Logistikoutsourcing. In: Clausen, U.; Geiger, C. (Hrsg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-34298-4.
- WKO (2022): Die Österreichische Verkehrswirtschaft. Daten und Fakten 2022. URL: <https://www.wko.at/branchen/transport-verkehr/die-oesterreichische-verkehrswirtschaft-2022.pdf> (Zugriff. 22.12.2022)
- WKO (2022): Die Kraftfahrzeugsteuer. Bestimmungen auf einen Blick. URL: https://www.wko.at/service/steuern/Die_Kraftfahrzeugsteuer.html (Zugriff: 01.03.2023).
- WKO (2023): CO2-Bepreisung. URL: <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/co2-bepreisung.html> (Zugriff: 27.02.2023).
- WKO (2023): Lkw- und Bus-Maut in Österreich. URL: <https://www.wko.at/service/verkehr-betriebsstandort/LKW-Maut-Oesterreich-GO-Box.html> (Zugriff: 27.02.2023).

- Zakeri, B.; Paulavets, K.; Baretto-Gomez, L.; Echeverri, L. G.; Pachauri, S.; Boza-Kiss, B.; Zimm, C.; Rogeli, J.; Creutzig, F.; Ürge-Vorsatz, D.; Victor, D. G.; Bazilian, M. D.; Fritz, S.; Gielen, D.; McCollum, D. L.; Srivastava, L.; Hunt, J. D.; Pouya, S. (2022): Pandemic, War, and Global Energy Transitions. In: *Energies* 2022, 15, S. 6114.
- Zechmeister, A.; Anderl, M.; Haider, S.; Purzner, M.; Wieser, M.; Pazdernik, K.; Poupa, S. (2022 a): Nahzeitprognose der österreichischen Treibhausgas-Emissionen für 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0819.pdf> (Zugriff: 20.12.2022)
- Zechmeister, A.; Anderl, M.; Bartel, A.; Frei, E.; Gugele, B. et al. (2022 b): Klimaschutzbericht 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0816.pdf> (Zugriff: 27.02.2023).
- Zhu, Y.; Ma, H.; Sha, C.; Yang, Y.; Sun, H.; Ming, F. (2023): Which strategy among avoid, shift, or improve is the best to reduce CO₂ emissions from sand and gravel aggregate transportation? In: *Journal of Clear Production* 391, S. 136089.
- Zsifkovits, H. E. (2013): *Logistik*. Konstanz und München: UVK Verlagsgesellschaft mbH. ISBN 978-3-8252-3673-1.

Anhang

A. PRISMA Checkliste

Tabelle 8: Anhang: PRISMA Checkliste²⁵⁷

		Reporting Item	Page Number
Title			
Title	#1	Identify the report as a systematic review	1
Abstract			
Abstract	#2	Report an abstract addressing each item in the PRISMA 2020 for Abstracts checklist	III-IV
Introduction			
Background/rationale	#3	Describe the rationale for the review in the context of existing knowledge	15-19
Objectives	#4	Provide an explicit statement of the objective(s) or question(s) the review addresses	15-19
Methods			
Eligibility criteria	#5	Specify the inclusion and exclusion criteria for the review and how studies were grouped for the syntheses	63-67
Information sources	#6	Specify all databases, registers, websites, organisations, reference lists, and other sources searched or consulted to identify studies. Specify the date when each source was last searched or consulted	63-67
Search strategy	#7	Present the full search strategies for all databases, registers, and websites, including any filters and limits used	63-67; 86-87
Selection process	#8	Specify the methods used to decide whether a study met the inclusion criteria of the review, including how many reviewers screened each record and each report retrieved, whether they worked independently, and, if applicable, details of automation tools used in the process	63-77; 86-90
Data collection process	#9	Specify the methods used to collect data from reports, including how many reviewers collected data from each report, whether they worked independently, any processes for obtaining or confirming data from study investigators, and, if applicable, details of automation tools used in the process	63-77
Data items	#10a	List and define all outcomes for which data were sought. Specify whether all results that were compatible with each outcome domain in each study were sought (for example, for all measures, time points, analyses), and, if not, the methods used to decide which results to collect	63-77; 86-90
Data items	#10b	List and define all other variables for which data were sought (such as participant and intervention characteristics, funding sources). Describe any assumptions made about any missing or unclear information	63-77
Study risk of bias assessment	#11	Specify the methods used to assess risk of bias in the included studies, including details of the tool(s) used, how many reviewers assessed each study and whether they worked independently, and, if applicable, details of automation tools used in the process	-
Effect measures	#12	Specify for each outcome the effect measure(s) (such as risk ratio, mean difference) used in the synthesis or presentation of results	-
Synthesis methods	#13a	Describe the processes used to decide which studies were eligible for each synthesis (such as tabulating the study intervention characteristics and comparing against the planned groups for each synthesis (item #5))	63-77
Synthesis methods	#13b	Describe any methods required to prepare the data for presentation or synthesis, such as handling of missing summary statistics or data conversions	63-85
Synthesis methods	#13c	Describe any methods used to tabulate or visually display results of individual studies and syntheses	63-85; 86-90
Synthesis methods	#13d	Describe any methods used to synthesise results and provide a rationale for the choice(s). If meta-analysis was performed, describe the model(s), method(s) to identify the presence and extent of statistical heterogeneity, and software package(s) used	-
Synthesis methods	#13e	Describe any methods used to explore possible causes of heterogeneity among study results (such as subgroup analysis, meta-regression)	63-85
Synthesis methods	#13f	Describe any sensitivity analyses conducted to assess robustness of the synthesised results	-
Reporting bias assessment	#14	Describe any methods used to assess risk of bias due to missing results in a synthesis (arising from reporting biases)	86-90
Certainty assessment	#15	Describe any methods used to assess certainty (or confidence) in the body of evidence for an outcome	63-91
Results			

²⁵⁷Vgl. PRISMA, <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/Checklist> (Zugriff: 06.03.2023), (Darstellung leicht modifiziert).

Study selection	#16a	Describe the results of the search and selection process, from the number of records identified in the search to the number of studies included in the review, ideally using a flow diagram (http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/FlowDiagram)	63-77
Study selection	#16b	Cite studies that might appear to meet the inclusion criteria, but which were excluded, and explain why they were excluded	63-77
Study characteristics	#17	Cite each included study and present its characteristics	63-77
Risk of bias in studies	#18	Present assessments of risk of bias for each included study	-
Results of individual studies	#19	For all outcomes, present for each study (a) summary statistics for each group (where appropriate) and (b) an effect estimate and its precision (such as confidence/credible interval), ideally using structured tables or plots	-
Results of syntheses	#20a	For each synthesis, briefly summarise the characteristics and risk of bias among contributing studies	-
Results of syntheses	#20b	Present results of all statistical syntheses conducted. If meta-analysis was done, present for each the summary estimate and its precision (such as confidence/credible interval) and measures of statistical heterogeneity. If comparing groups, describe the direction of the effect	-
Results of syntheses	#20c	Present results of all investigations of possible causes of heterogeneity among study results	80-85; 91-97
Results of syntheses	#20d	Present results of all sensitivity analyses conducted to assess the robustness of the synthesised results	-
Risk of reporting biases in syntheses	#21	Present assessments of risk of bias due to missing results (arising from reporting biases) for each synthesis assessed	-
Certainty of evidence	#22	Present assessments of certainty (or confidence) in the body of evidence for each outcome assessed	-
Discussion			
Results in context	#23a	Provide a general interpretation of the results in the context of other evidence	102-103
Limitations of included studies	#23b	Discuss any limitations of the evidence included in the review	-
Limitations of the review methods	#23c	Discuss any limitations of the review processes used	-
Implications	#23d	Discuss implications of the results for practice, policy, and future research	98-100
Other information			
Registration and protocol	#24a	Provide registration information for the review, including register name and registration number, or state that the review was not registered	-
Registration and protocol	#24b	Indicate where the review protocol can be accessed, or state that a protocol was not prepared	-
Registration and protocol	#24c	Describe and explain any amendments to information provided at registration or in the protocol	-
Support	#25	Describe sources of financial or non-financial support for the review, and the role of the funders or sponsors in the review	-
Competing interests	#26	Declare any competing interests of review authors	-
Availability of data, code, and other materials	#27	Report which of the following are publicly available and where they can be found: template data collection forms; data extracted from included studies; data used for all analyses; analytic code; any other materials used in the review	-

B. Cluster-Szenarien

Tabelle 9: Anhang: Cluster-Szenarien²⁵⁸

Quelle	Anzahl Szenarien	Szenarien			Methodology/Model	Region	Kraftstoff	Zeitintervall
		STPS	APS	NZES				
Bründlinger, T. et al. (2018)	3	Referenz Szenario		Elektrifizierungsszenario EL80/95; Technologiemic TM80/95	Quell- und Verursachungsprinzip	Deutschland	Alternative Kraftstoffe	2030-2050
Cambridge Econometrics (2018)	3			Tech-ERS; Tech-BEV; Tech-FCEV	Vehicle stock model; E3ME	EU	Electric vehicle	2030-2050
Helgeson, B.; Peter, J. (2020)	1			Single Scenario Analyse	Strommarktmodell DIMENSION	EU; Norwegen; Schweiz	E-Fuels	2015-2050
IEA.2020	1			Net Zero Emission Szenario	Analyse mit International Monetary Fund und International Institute for Applied Systems Analysis		Alternative Kraftstoffe	2030; 2050
Kasten, P. et al. (2016)	4	Scenario FI+		Scenario E+; Scenario CH ₄ +; Scenario H ₂ +	TEMPS	Deutschland	E-Fuels	2010-2050
Keller, V. et al. (2019)	3	Referenz Szenario	AFV Szenario without Carbon tax; AFV Szenario with Carbon tax;		Open Source Energy Modelling System	Canada	Electric Vehicle	2030; 2050; 2060
Krause, J. et al. (2020)	3			Fleet composition scenarios HE; Fleet composition scenarios HEH; Fleet composition scenarios Mix	DIONE fleet impact model	EU	Electric Vehicle	2050
Plötz, P. et al. (2019)	2	Pessimistic Szenario		Optimistic Szenario	ALADIN & PERSEUS-EU	EU	ERS	2020-2040
Repenning, J. et al. (2015)	3	Aktuelle Maßnahmen Szenario		Klimaschutzszenario 80; Klimaschutzszenario 95	TIMES; ASTRA-D	Deutschland	Alternative Kraftstoffe	2010-2050
Siegmund, S. et al. (2017)	3	Business as usual PTL High		PTG-dominated Szenario (low); Electric powertrain szenario (low)	Keine Angabe	Deutschland	FCEV	2010-2050
Terlouw, W. et al. (2019)	2			Optimised gas szenario; Minimal gas szenario	Keine Angabe	EU	E-Fuels	2050
Vad Mathiesen, B. et al (2014)	3			Conservative Szenario; Ideal Szenario; Recommendable Szenario	Transport plan	Dänemark	Renewable	2010-2050

²⁵⁸Eigene Darstellung.

C. Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe

Tabelle 10: Anhang: Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe²⁵⁹

Quelle	Vehicle Technology						Fuels											
	Electric Vehicle			ICE	Hybrid		Biomass		Fossil fuels			Hydrogen	Electrofuel + Synthetic fuels				Electricity	
	BEV	FCEV	ERS	Gas & Diesel	EV/ICE hybrid	BEV/FCEV/ERS hybrid	BG (C+LBG)	Bio-diesel	NG	Gasoline	Diesel	diverse Produktionspfade	Methanol	Dimethyl-ether	Methan	Power-to-X	Renewable Energy	
Zeichen	Kreis			Rechteck	Dreieck (nach unten)			Dreieck (nach oben)	Stern			Viereck	Pentagon				Oktagon	
Bründlinger, T. et al. (2018)	+	+		+							+		+				+	
Cambridge Econometrics (2018)																		
Helgeson, B.; Peter, J. (2020)	+	+		+	+		-	-	+		+	+					+	
IEA.2020		+	+	+	+				+		+							
Kasten, P. et al. (2016)		+	+	+								+	+				+	+
Keller, V. et al. (2019)	+	+		+	+				+		+	+						+
Krause, J. et al. (2020)				+	+	+			+		+							
Plötz, P. et al. (2019)			+															
Repenning, J. et al. (2015)	-			+	+	+	+		+		+							
Siegmund, S. et al (2017)																		
Terlouw, W. et al. (2019)	+	+					+	+				+						
Vad Mathiesen, B. et al (2014)				+	+	+	+				+		+	+				

+	Mindestens in einem Szenario enthalten
-	Explizit Ausgeschlossen
	Unklar

²⁵⁹Eigene Darstellung.