HOCHSCHULE RUHR WEST
BWL – INTERNATIONALES HANDELSMANAGEMENT UND LOGSITIK
MÜLHEIM A. D. RUHR

Bachelorarbeit

Ökonomische und ökologische Bewertung von alternativen Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr im Zuge des ganzheitlichen Ansatzes der „Green Logistics“

Yvonne Weselmann
Matrikelnr.10009469

Erstprüferin: Prof. Dr. Sonja Schade
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Richard Gräßler

Bochum, 07.08.2022

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **II**

Abbildungsverzeichnis ..... **IV**

Tabellenverzeichnis ..... **V**

Abkürzungsverzeichnis ..... **VI**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.2 Methodik und Vorgehensweise 3

2 Grundlagen und begriffliche Abgrenzungen **4**

2.1 Bedeutung der Logistik 4

2.2 Entstehung „Green Logistics“ 5

2.3 Green Logistics-Framework 7

3 Bedeutung nachhaltiger Transportkonzepte **9**

3.1 Emissionen 9

3.2 Steigende Erdölpreise 10

3.3 Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt 11

3.4 Regulierung des Staates 11

4 Alternative Antriebstechnologien **13**

4.1 Verbrennungsmotor 13

4.1.1 Konventioneller Diesel-Antrieb 13

4.1.2 Liquefied Natural Gas (LNG) 14

4.1.3 Bio-Treibstoff 15

4.2 Elektroantriebe 16

4.2.1 Wasserstoff- und Brennzellentechnologie 16

4.2.2 Elektro LKW 17

4.2.3 Oberleitungs-LKW 17

5 Marktanalyse alternativer Antriebe **19**

6 Gegenüberstellung alternativer Antriebstechnologien **23**

6.1 Nutzwertanalyse 23

6.1.1 Ziel der Analyse 23

6.1.2 Funktions- und Vorgehensweise 24

6.2 Durchführung der Nutzwertanalyse 26
6.2.1 Festlegung Messkriterien 26
6.2.2 Gewichtung der Entscheidungskriterien 27
6.2.3 LNG 29
6.2.4 Wasserstoff- und Brennzellentechnologie 32
6.2.5 Elektro LKW 35
6.2.6 Oberleitungs-LKW 38
6.2.7 Bio-Treibstoff 40
6.2.8 Vergleich der Antriebstechnologien 42

7 Zusammenfassung und Ausblick 46

8 Fazit 50

9 Literaturverzeichnis 52

Anhang 64

Erklärung 65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beförderte Gütermenge Straßengüterverkehr Deutschland 4
Abbildung 2: Entwicklungsverlauf von Logistikprozessen 6
Abbildung 3: Green Logistics Framework 8
Abbildung 4: Spezifische Emissionen LKW 9
Abbildung 5: Geräuschemission schwere Nutzfahrzeuge 1970-2004 14
Abbildung 6: Aufgaben der Nutzwertanalyse 24
Abbildung 7: Diesel versus LNG 29
Abbildung 8: Diesel versus Wasserstoff/Brennstoffzelle 32
Abbildung 9: Diesel versus Elektroantrieb 35
Abbildung 10: Diesel versus O-LKW 38
Abbildung 11: Diesel versus Bio-Treibstoff 40
Abbildung 12: Vergleich alternative Antriebstechnologien nach Nutzwerten 43
Abbildung 13: Fahrplan Antriebstechnologie des BMVI 48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ablauf Nutzwertanalyse 24
Tabelle 2: Bewertungsskalen Netzwerkanalyse 25
Tabelle 3: Gewichtung der Messkriterien zur Nutzwertanalyse 27
Tabelle 4: Kostenvergleich Diesel und LNG 31
Tabelle 5: Kostenvergleich Diesel und Wasserstoff 34
Tabelle 6: Kostenvergleich Diesel und Elektroantrieb 37
Tabelle 7: Kostenvergleich Diesel und Biodiesel 42
Tabelle 8: Rangfolge der alternativen Antriebsformen nach Nutzwerten 45

Abkürzungsverzeichnis

Lastkraftwagen	LKW
Beispielsweise	bspw.
Liquefied Natural Gas	LNG
Nutzfahrzeug	NFZ
Schweres Nutzfahrzeug	SNF
Nutzwertanalyse	NWA
Kilometer	km
Oberleitungslastkraftwagen	O-LKW
Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug)	FCEV
Treibhausgas	THG
Bundesministerium für Digitales und Verkehr	BMVI
Stickstoffoxide	No_x
Flüchtige Organische Verbindungen	NMVOC
Kohlendioxid	CO_2
Schwefeldioxid	SO_2
Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.	UFOP
Autobahn 1	A1
Tonnen	t
Beziehungsweise	bzw.
Beispielsweise	bspw.
Das heißt	d.h.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

„Der Güterverkehr in Deutschland wird bis 2030 um 18 % Aufkommen und 38 % Transportleistung ansteigen – davon gehen die Experten der Verkehrsprognose 2030 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMVI) aus. Dabei wird auch künftig der weitaus größte Anteil des Güterverkehrs über die Straße rollen.“ (DSLV Bundesverband Spedition und Logistik e. V. 2014)

„Der Straßengüterverkehr ist für rund ein Viertel des CO_2-Ausstoßes verantwortlich. Trotzdem sind die Kraftstoffverbräuche von Lkw in den letzten zwei Jahrzehnten kaum oder gar nicht gesunken.“ (NABU – (Naturschutzbund Deutschland) e.V.)

Unter dem Aspekt der stetig wachsenden Weltwirtschaft und der damit verbundenen Globalisierung kommt es in den letzten Jahren zu einer deutlichen Veränderung der Rahmenbedingungen für Wirtschaft, Unternehmen und Privatpersonen hinsichtlich des Transports von Gütern.
Schnell wechselnde Trends und Konsumentenwünsche führen zu einer Erhöhung des jährlichen Transportvolumen und der Transportleistung in Deutschland. Durch die Prognose, welche weitere Erhöhungen vorhersagt, werden deshalb Alternativen zur konventionellen Wahl des Transportmittels notwendig. (vgl. Wittenbrink 2014, S. 21ff.; DSLV Bundesverband Spedition und Logistik e. V. 2014)

Insbesondere im Straßengüterverkehr ist ein stetiges Wachstum zu verzeichnen, welches deutliche Folgen hat. Lärm, Unfälle und auch Umweltverschmutzung führen zu Beeinträchtigung von Mensch und auch Umwelt.
Aufgrund seiner Flexibilität und einer hohen Netzdichte wird im Straßengüterverkehr hauptsächlich der Diesel-Lastkraftwagen (LKW) eingesetzt, welcher eine Haus-zu-Haus Anlieferung ohne zusätzlichen Umschlag der Ware ermöglicht. Zudem kommen LKW auch für den Vor- und Nachtransport bei anderen Transportmitteln wie dem Seeschiff oder dem Flugzeug zum Einsatz. (vgl. Sternad et al. 2020, S. 224; vgl. Eckey und Stock 2000, S. 28)

2021 werden in Deutschland 85,2 % des Transportvolumen im Landverkehr durch LKW-Transporte abgewickelt (vgl. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2021, S. 59). Bei einem LKW-Transport ist die Belastung der Luft bei gleicher Transportmenge achtmal höher als bei einem Eisenbahn-Transport. (Allianz pro Schiene e.V. 2020)

Umso wichtiger sind daher neue Antriebstechnologien, welche dazu beitragen die Luftverschmutzung im Straßengüterverkehr zu reduzieren.

Neben den ökologischen Nachteilen durch konventionelle Diesel-LKW, treten ökonomische Probleme des fossilen Treibstoffs auf. Durch die Verknappung kommt es zu Preisanstiegen bei der Beschaffung, wodurch auch monetäre Probleme für Unternehmen und Endverbraucher immer deutlicher werden.

Durch immer stärkere Auswirkungen des Klimawandels verabschiedete die Bundesregierung bereits im November 2016 den Klimaschutzplan 2050 und ist damit eines der ersten Länder welches dem Pariser Abkommen nachkommt eine Klimaschutzlangzeitstrategie zu erarbeiten. Ziel dieses Klimaschutzplanes ist es bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral zu werden. Treibhausgasneutralität bezeichnet die gänzliche Vermeidung von Ausstoß schädlicher Emissionen in die Außenluft bzw. die vollständige Kompensation von Treibhausgasen (THG), sodass diese keine Auswirkungen auf das Klima nehmen. (Umwelt Bundesamt 2021a) Das mittelfristige Ziel ist es bereits bis 2030 die Treibhausgasemission in Deutschland um 55 % gegenüber dem Jahr 1990 zu senken. Um diese Ziele einzuhalten, müssen zukünftig Emissionen im Verkehrswesen reduziert werden. Dies wird nur möglich sein, sofern der Diesel-LKW ökonomisch und ökologisch günstigeren Alternativen weicht. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV))

Das Ziel dieser Abschlussarbeit ist es, eine Übersicht über die bereits existierenden alternativen Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr zu geben und diese nach ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu bewerten. Dabei werden unterschiedliche Faktoren in die Analyse eingebracht, welche dazu dienen den Nutzen der einzelnen Antriebsformen bestmöglich bewerten zu können.

Um dem Leser die Grundbegrifflichkeiten zum Thema „Green Logistics“ zu vermitteln werden im theoretischen Teil dieser Arbeit grundlegende Definitionen zum fundierten Verständnis des Themas erörtert. Darauf aufbauend werden die bereits existierenden Alternativen vorgestellt und im Analyseteil Bewertungskriterien erarbeitet, welche mit Hilfe einer Nutzwertanalyse ausgewertet und interpretiert werden.

Aus den im vorangehenden Teil genannten Problemstellungen ergibt sich die folgende Forschungsfrage dieser Arbeit:

Welche erneuerbare Antriebstechnologie kann zukünftig den konventionellen Dieselantrieb ablösen, um unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten eine Verbesserung für Unternehmen und Umwelt darzustellen?

1.2 Methodik und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen Analyseteil.

Der Theorieteil vermittelt dem Leser die begrifflichen Grundlagen, welche im weiteren Verlauf der Arbeit für das Verständnis notwendig ist.

Er gibt dem Lesenden einen Einblick in die Grundlagen der Logistik und die Entstehung der „Grünen Logistik“. Innerhalb dieser Arbeit wird weitestgehend darauf verzichtet technische, physikalische und chemische Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik zu erläutern, da diese nicht zum Verständnis beitragen.

Um einen aktuellen Einblick in die Marktlage zu schaffen, wird nach dem einleitenden Teil eine kurze Marktanalyse und ein Ausblick auf die Logistikbranche vorgenommen. In diesem sollen die Anforderungen und aktuellen Forschungsstände prägnant zusammengefasst werden. Dieses Kapitel trägt dazu bei im Analyseteil die richtigen Erkenntnisse zu ziehen und die alternativen Antriebstechnologien in das Marktgeschehen einzuordnen.

Als Analysetool wird die Nutzwertanalyse (NWA) verwendet. Diese wird zu Beginn des Analyseteils erläutert und die Vorgehensweise vorgestellt.

Daraufhin werden geeignete Entscheidungskriterien formuliert, welche dazu beitragen die eingangs beschriebene Leitfrage dieser Arbeit zu beantworten. Im Anschluss erfolgt eine Gewichtung der Entscheidungskriterien, um die Signifikanz dieser festzulegen.

Da die neuen Antriebstechnologien gerade für Logistikunternehmen von enormer Tragweite sind, wird die NWA aus Sicht eines solchen durchgeführt. Betrachtet werden dabei schwere Nutzfahrzeuge (SNF), da es für diese zum aktuellen Zeitpunkt nur wenig Alternativen zum konventionellen Dieselantrieb gibt. Der Fokus dieser Arbeit wird deshalb auf SNF über 12 Tonnen (t) liegen, insofern es hier das größte Potential für eine Alternativtechnologie gibt.

Zur Ermittlung der geeignetsten Antriebstechnologie für SNF wird jede Antriebstechnologie zuerst mit dem konventionellen Dieselantrieb gegenübergestellt. Anforderung an eine neue Technologie ist es, die Vorteile des Dieselantriebs mit weiteren Vorteilen aus dem „Green Logistics“ Bereich zu ergänzen.

Zum Ende der Analyse werden alle alternativen Antriebe gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung wird sich die Rangfolge der Alternativtechnologien entnehmen lassen.

Um die Ergebnisse der NWA einzuordnen, wird anschließend eine Zusammenfassung mit Ausblick auf die zukünftige Entwicklung folgen.

Final zusammengefasst werden die die Ergebnisse der Analyse im Fazit.

2 Grundlagen und begriffliche Abgrenzungen

2.1 Bedeutung der Logistik

Als drittgrößter deutscher Wirtschaftsbereich neben der Automobilwirtschaft und dem Handel hat der Logistikbereich eine große Rolle bei der Erstellung von Wirtschaftsleistung. Hocheffiziente Logistikstrukturen sorgen für einen hohen Grad an internationaler Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit in Deutschland. (Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. 2022)

Hochkomplexe Logistikstrukturen führen zu einem kontinuierlichen Wachstum und einem enormen Umfang der Logistik. Die beförderte Menge im Jahr 2020 im Straßengüterverkehr in Deutschland betrug 2.419,526 Mio.t. Damit liegt der Wert leicht unter dem des Vorjahres 2019. Dies ist jedoch durch den Effekt der Pandemie ab Quartal 2 2020 zu erklären. Wie in dem nachfolgenden Diagramm zu erkennen ist, ist seit 1995 ein kontinuierlicher Anstieg der beförderten Gütermenge zu verzeichnen.

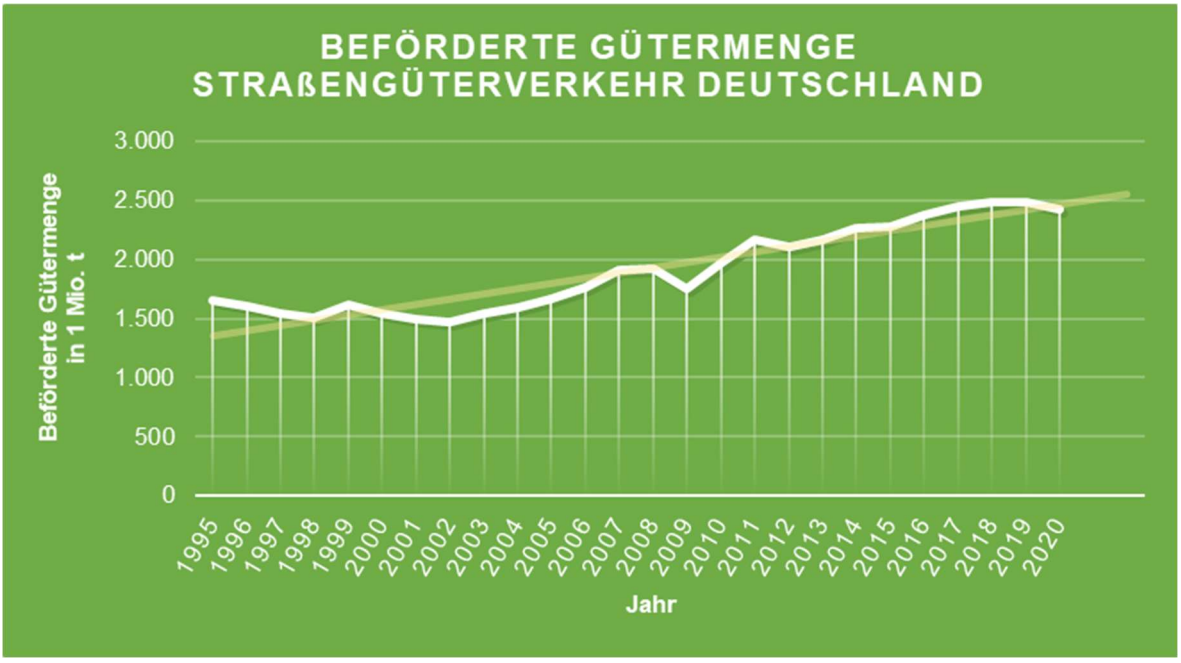

Abbildung 1: Beförderte Gütermenge Straßengüterverkehr Deutschland in Anlehnung an (Statistisches Bundesamt 2022)

Dadurch hat die Logistik teils erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt, welche dem Verursacher angelastet werden. Um diese Umweltkosten zu Internalisieren gibt es politische Maßnahmen, welche der Umlage auf die Logistikdienstleister und Verbraucher dienen. Dazu gehören:

- Steuern und Abgaben
- Standards
- Zertifikate
- Auflagen

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen gibt es in der gesamten Branche einen erheblichen Druck die Umweltorientierung weiter voranzutreiben. Als ökologische logistische Konzepte, haben sich die Begriffe „Green Logistics“ und City-Logistik über die letzten Jahrzehnte etabliert und werden stetig weiterentwickelt. (vgl. Deckert 2016, S. 18; Wehking 2020)

Welche elementare Notwendigkeit das Zusammenspiel aller Akteure der Lieferketten innerhalb der Logistik für die deutsche Wirtschaft und die Warenverfügbarkeit und Preise der Waren hat, wird uns durch Einflüsse wie der aktuellen Corona Pandemie, dem Ukraine Krieg sowie den damit verbundenen steigenden Energiekosten nur noch einmal verdeutlicht. Steigende Energiekosten für Treibstoffe und akuter Fahrermangel müssen mit Preissteigerungen von den Unternehmen kompensiert werden, sodass Waren auch für den Endverbraucher verteuert angeboten werden müssen (Deutsche Industrie- und Handelskammertag (DIHK) 2022).

2.2 Entstehung „Green Logistics“

Über die letzten Jahrzehnte hat sich die Logistik stetig weiterentwickelt. Die Abhängigkeiten von funktionierenden Wertschöpfungsketten werden von Jahr zu Jahr komplexer. Die Spezialisierung in der Produktion von Ländern auf einige wenige Warengruppen sorgt dafür, dass ein großer Teil der Kosten im Transport der Güter verankert ist. Umso wichtiger ist es daher Transporte nachhaltiger und vor allem auf Grund der bereits genannten Problematiken grüner zu gestalten. Wie sich die Logistik in den vorangegangenen Jahrzehnten entwickelt hat, lässt sich anhand der Abbildung 2 erkennen.

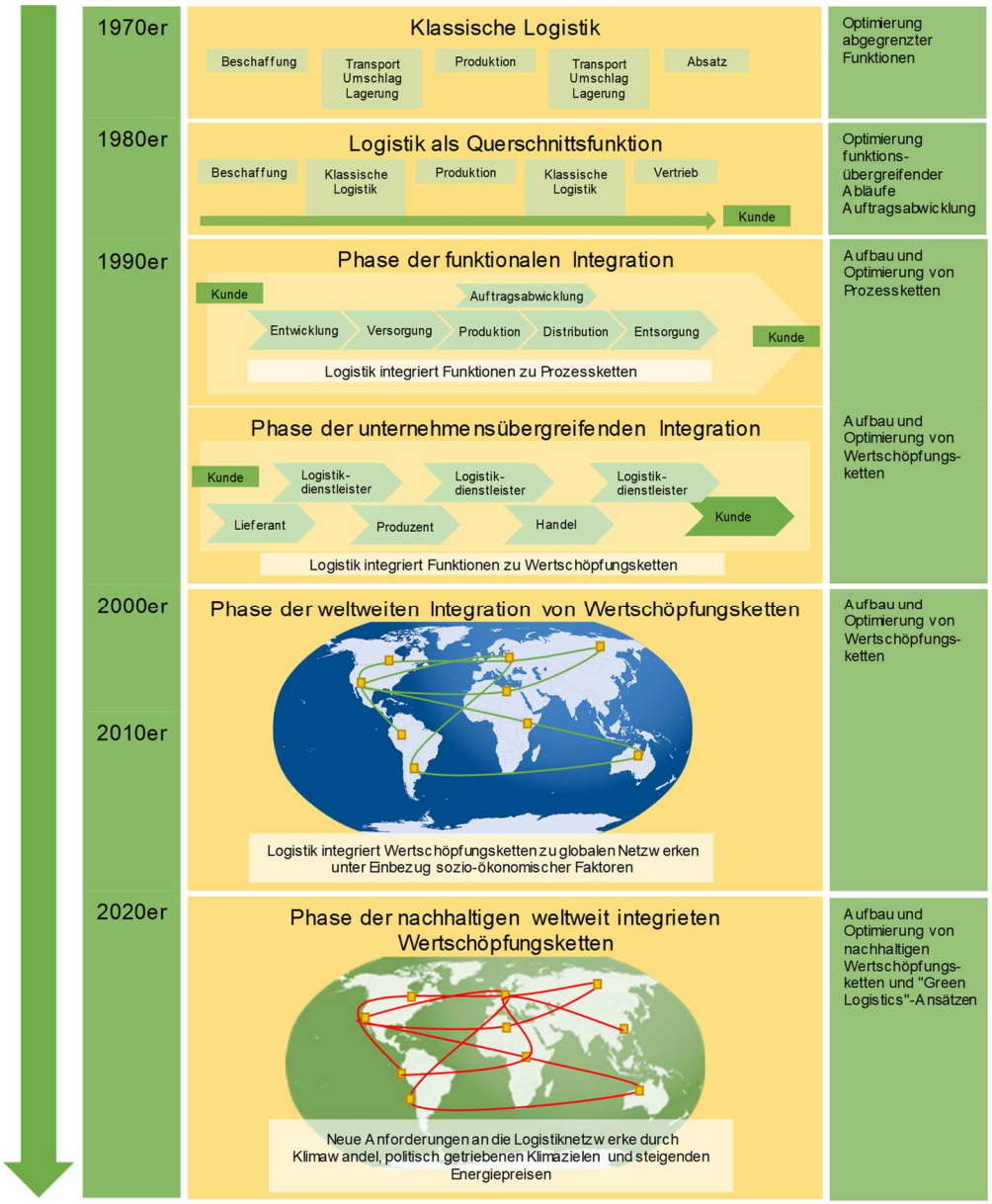

Abbildung 2: Entwicklungsverlauf von Logistikprozessen in Anlehnung an (Baumgarten 2008), S.14

In den letzten 50 Jahren wurden die Logistikstrukturen immer verflochtener, sodass diese heute nur dann fließend funktionieren, wenn alle Akteure zuverlässig liefern. Seit einigen Jahren hat auch die Nachhaltigkeit in der Logistikbranche einen höheren Stellenwert erlangt. Klimaziele der EU sorgen dafür, dass nach Alternativen zu den herkömmlichen Dieselantrieben gesucht werden muss, um hohe CO_2 Abgaben und Steuern zu vermeiden.

Auch wenn die grüne Logistik in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen hat, liegt noch keine allgemeingültige Definition vor welche Maßnahmen diese umschreibt. Das, was heute als „Green Logistics“ bezeichnet wird, entstand im Zuge

unterschiedlicher Forschungsansätze, welche in den letzten 40 Jahren untersucht wurden.

Laut Deckert definiert sich Green Logistics als *„Ausrichtung der Logistikfunktionen an den Zielen der ökologischen Nachhaltigkeit“* (Deckert 2016, S. 24).

Wittenbrink ergänzt diesen Ansatz, indem er ebenfalls die Emissionen mit in seine Definition einfließen lässt:

“Green Logistics ist ein nachhaltiger und systematischer Prozess zur Erfassung und Reduzierung der Ressourcenverbräuche und Emissionen, die aus Transport- und Logistikprozessen in und zwischen Unternehmen resultieren.“ (Wittenbrink 2015, S. 1)

„Green Logistics“ dient demnach dazu schädliche Emissionen im Transportablauf zu vermeiden, verlagern und zu vermindern.

Aufgrund des immer weiter steigenden Transportvolumens weltweit, fällt auch im Straßengüterverkehr immer mehr Emission an wie bereits in Abbildung 1: Beförderte Gütermenge Straßengüterverkehr Deutschland in Anlehnung an (Statistisches Bundesamt 2022) deutlich wird. Die immer effizienteren Dieselmotoren vermögen diesen Trend seit langem nicht mehr auszugleichen. Aus diesem Grund werden alternativen zum konventionellen Dieselantrieb benötigt. Nur so kann die gesamte Transportkette „grün“ gestaltet werden.

2.3 Green Logistics-Framework

An dieser Stelle erfolgt zunächst eine Abgrenzung des Themas anhand des „Green Logistics“-Framework. Aufgrund seiner Komplexität kann „Green Logistics“ auf unterschiedliche Art und Weise interpretiert werden. In der nachfolgenden Abbildung 3: Green Logistics Framework in Anlehnung an (Deckert und Fröhlich 2014, S. 15) wird deutlich gemacht wie die klassischen Logistikfunktionen, Transport, Verpackung und Lagerung, an den ökologischen, nachhaltigen und umweltorientierten Zielen ausgerichtet werden.

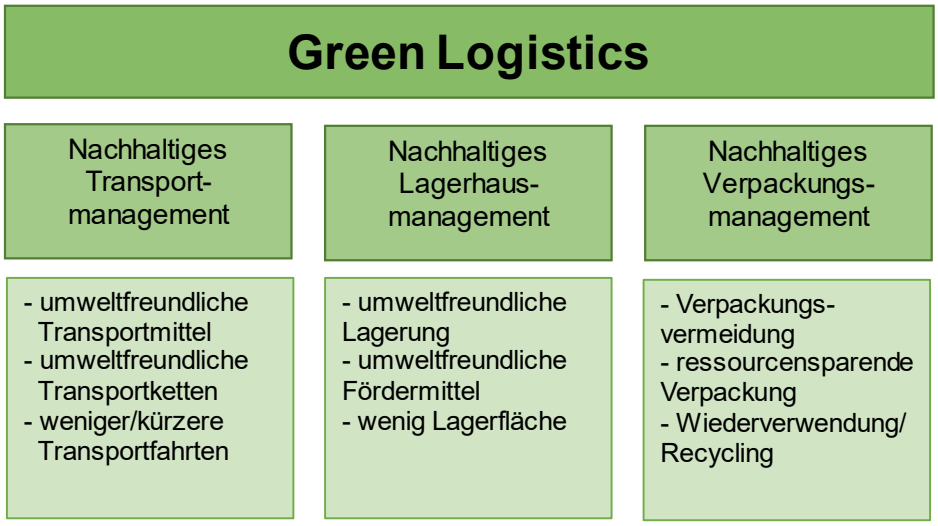

Abbildung 3: Green Logistics Framework in Anlehnung an (Deckert und Fröhlich 2014, S. 15)

Das nachhaltige Lagerhausmanagement bezeichnet die Fokussierung auf optimale Flächennutzung und Energieeffizienz in der Lagerhaltung. Dabei spielen die Bauweise der Lagerfläche und die damit verbundene Energieeffizienz eine wichtige Rolle. Nebst diesem Aspekt ist auch der Betrieb von umweltschonenden Fördermitteln, wie Flurförderfahrzeugen oder Förderanlagen notwendig. (vgl.Deckert 2016, S. 28ff.)
Ein weiterer Teilbereich des Frameworks beschreibt das nachhaltige Verpackungsmanagement. Ziele des nachhaltigen Verpackungsmanagements liegen in der Verpackungsvermeidung, der ressourcenschonenden Verpackung als auch auf der Abfallentsorgung nach Gebrauch der Verpackung.
Der letzte Teil des Frameworks beschreibt das nachhaltige Transportmanagement. Dabei liegt der Fokus auf der Nutzung von umweltfreundlichen Transportmitteln und –ketten. Zudem sollen kürze Transportfahrten und -wege zu einer Verminderung der Umweltschädigung durch Schadstoffemission führen. Dieser Teil des Frameworks ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung, da der Fokus der Arbeit auf der Vermeidung von Schadstoffemissionen im Straßengüterverkehr liegt.

3 Bedeutung nachhaltiger Transportkonzepte

3.1 Emissionen

Wie gesundheitsschädlich Schadstoffe in der Außenluft sind, ist mittlerweile durch vielzählige Studien belegt. Auch wenn sich in den letzten Jahrzehnten bereits eine Verbesserung der Schadstoffbelastung stattgefunden hat, müssen weitere Emissionen verringert werden. Bis 2050 soll nach Vorgabe der Europäischen Union (EU) Europa vollständig treibhausgasneutral sein. Dazu zählt auch der Straßengüterverkehr und die dort entstehenden Emissionen.

Nach §3 Absatz 3 des Bundes-Immissionsschutzgesetz, kurz BImSchG, definiert sich der Begriff Emission wie folgt: *„Emissionen im Sinne dieses Gesetzes sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnlichen Erscheinungen.“*

Bei Transporten im Straßengüterverkehr, welche durch den Einsatz von Diesel-LKW abgewickelt werden, werden bei der Kraftstoffverbrennung Stickstoffoxide (No_x), Flüchtige Organische Verbindungen (NMVOC), Kohlendioxid (CO_2), Partikel und Schwefeldioxid (SO_2) erzeugt.

Durch stetige Weiterentwicklung im Bereich der Fahrzeugtechnik und der Treibstoffe können bereits heute gegenüber 1990 Emissionen eingespart werden. Die direkten Emissionen je Verkehrsleistung werden in der Abbildung 4 veranschaulicht:

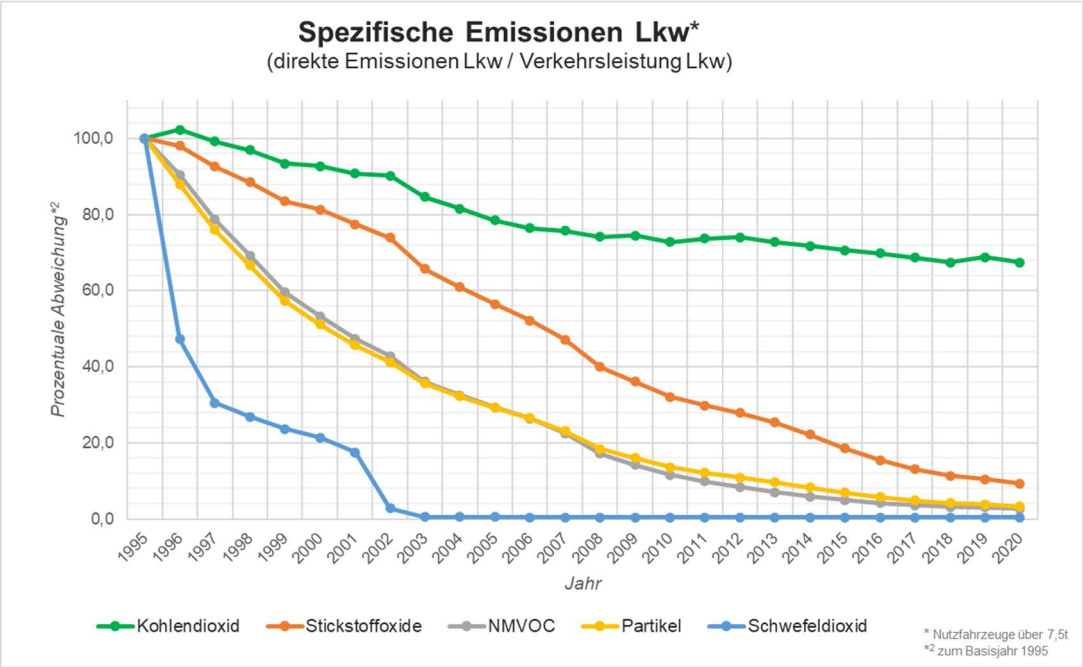

Abbildung 4: Spezifische Emissionen LKW vgl (Umwelt Bundesamt 2022)

Da gleichwohl mehr Fahrzeuge im Einsatz sind als noch vor 30 Jahren wird dieser Effekt aufgehoben. Im Vergleich wurden im Jahr 2020 17 % mehr CO_2 Emissionen emittiert als noch im Jahr 1995. (Umwelt Bundesamt 2022)

Nachhaltige Transportmittel sind daher unerlässlich, um die THG-Emissionen dauerhaft zu senken.

3.2 Steigende Erdölpreise

Der Ölpreis ist seit jeher volatil. Gerade in Zeiten von Pandemien und Kriegen mitten in Europa wird deutlich wie drastisch die Schwankungen des Preises sein kann. Da Deutschland nur wenig Erdöl selbst fördert, nämlich nur rund 2% des eigenen Bedarfs, ist das Land auf Importe aus bspw. Russland, Norwegen, den USA, Großbritannien und Kasachstan angewiesen. (Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG) 2021) Diese Abhängigkeit führen dazu, dass die Preise starken Schwankungen unterliegen.

Maßgeblich wird der Erdölpreis durch die Marktkräfte beeinflusst. Der internationale Rohstoffhandel ist abhängig von Konjunktur, politischer Lage und sogar der Jahreszeit. Hinzu kommen Schwankungen in der Ölfördermenge und Wechselkursschwankungen Da Öl hauptsächlich in Dollar gehandelt wird, unterliegen die Preise täglich wechselnden Kursschwankungen. (Leschus 2013)

Ein weiterer Treiber sind die Verbraucher selbst. Konkurrierende Erzeuger nutzen die hohe Nachfrage. Da es nur einige wenige Anbieter auf dem Markt gibt, herrscht ein genereller Nachfrageüberschuss, sodass die Anbieter den Preis maßgeblich beeinflussen können. (Grimme und Güntner 2018)

Was den Erdölpreis und somit auch den Dieselpreis zudem beeinflusst sind Steuern, Kosten für den Vertrieb, die Beschaffung sowie die CO_2 Bepreisung.

Aufgrund harter Klimaziele der EU werden auch zukünftig CO_2-Abgaben den Benzin- und Dieselpreis verteuern (Handelsblatt 2022)

Erdöl ist ein fossiler Rohstoff, welcher nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen wird. Durch die immer größere Verflechtung der internationalen Märkte spielt gerade der Transportsektor eine tragende Rolle. Demzufolge führen steigende Erdölpreise unweigerlich zu einem Anstieg der Dieselpreise, welche sich auf die Transportpreise niederschlagen. Höhere Transportkosten verteuern gleichermaßen Waren im Inland, sodass sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette Mehrkosten ergeben.

Nicht zuletzt aufgrund dieser Verflechtungen, wird eine nachhaltige und vor allem kostenstabile Wertschöpfungskette nur mit neuen Antriebstechnologien, welche den Preisschwankungen des Ölpreises nicht unterliegen möglich sein.

3.3 Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt umschreibt die Wirkung von THG in der Atmosphäre der Erde. Durch ihn kann ein lebensfreundliches Klima auf der Erde aufrechterhalten werden. Dabei wird zwischen dem natürlichen und anthropologischen Treibhauseffekt unterschieden.

Durch den natürlichen Treibhauseffekt wird eine bodennahe Durchschnittstemperatur von 15 Grad Celsius erreicht, ohne diesen Effekt läge diese bei -18 Grad Celsius.

Die Erde empfängt von der Sonne kurzwellige Strahlung, welche absorbiert werden. Sobald die Erde durch die Strahlung aufgewärmt wurde, fängt diese an selbst Strahlung abzugeben. Dieses Phänomen wurde bereits 1884 durch zwei österreichische Physiker, Josef Stefan und Ludwig Boltzmann, nachgewiesen. Mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes kann bei einer bestimmten Temperatur die thermisch abgestrahlte Leistung eines idealen schwarzen Körpers berechnet werden. Ein solcher Körper absorbiert die elektromagnetische Strahlung.

Dieser Effekt wird durch die von Menschen genutzten Maschinen und den damit zusammenhängenden ausgestoßenen Treibstoffen noch zusätzlich verstärkt. Der anthropogene Treibhauseffekt führt genauso wie der natürliche Treibhauseffekt zu einer Erwärmung der Atmosphäre der Erde. Jedoch wird dieser durch die Emission von synthetischen Gasen wie bspw. CO_2, Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) schneller vorangetrieben als er sollte. (Koch 2012, S. 291; Hüging 2014)

3.4 Regulierung des Staates

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben spielen Regulierungen des Staates ebenfalls eine Rolle in der Umsetzung von „Green Logistics“ Maßnahmen.

Die deutsche Klimaschutzpolitik sieht bis zum Jahr 2030 eine Reduktion der THG um 55 % gegenüber 1990 vor.
Bis zum Jahr 2050 soll Europa der erste treibhausneutrale Kontinent der Welt sein. Dieses ehrgeizige Ziel ist nur dann zu erreichen, wenn fossile Brennstoffe weitestgehend ersetzt werden. Gerade in dichtbesiedelten und verkehrsreichen Staaten wie Deutschland ist dies eine große Herausforderung.

Bereits 2019 veröffentlichte das Umwelt Bundesamt einen ganzen Katalog an Maßnahmen, welche die CO_2 Reduktion bei SNF reduzieren könnten. Dazu zählen unter anderem Maßnahmen wie die Anschaffung effizienter Nutzfahrzeuge, eine Umstellung auf eine CO_2-abhängige oder Effizienzlabels für Einzelkomponenten. (Umwelt Bundesamt 2019)

Die CO_2 abhängige Maut wurde im Juni 2021 im EU-Parlament mit der Richtlinie 1999/62/EG beschlossen und muss von den Mitgliedsstaaten in den nächsten 2 Jahren

umgesetzt werden, sodass ein zusätzlicher Anreiz geschaffen wird in neue Nutzfahrzeuge (NFZ) zu investieren, um Mautkosten zu senken. (vgl. Umwelt Bundesamt 2021b, S. 1) Viele der bereits bestehenden Alternativantriebe sind von der Maut befreit, um eine Einführung der neuen Technologien für die Unternehmen attraktiver zu gestalten. Zudem werden Förderungen bei der Anschaffung CO_2-armer NFZ ausgeschüttet, sodass ein zusätzlicher Anreiz besteht in neue Technologien zu investieren.

Eine weitere Regulierung von Seiten des Staates ist der Emissionshandel. Bei diesem müssen Unternehmen welche mit Heizöl, Benzin oder Diesel handeln seit dem 1. Januar 2021 einen CO_2 Preis zahlen. Dieser wird in Form von Zertifikaten vergütet. Die Unternehmen sind verpflichtet sich sogenannte „Emissionsrechte“ in Form von Zertifikaten zu erwerben. Mit dieser Ergänzung setzt Deutschland ebenfalls eine EU-Richtlinie um und ergänzt den Emissionshandel, der bereits in der Energiewirtschaft und Industrie Anwendung findet. Mit dieser neuen Form der Abgabe hat nun auch CO_2 einen Preis im Verkehrs- und Wärmesektor, sodass ein Umdenken auch in diesen Bereichen und die Ausrichtung auf nachhaltige Prozesse und die „Green Logistics“ immer notwendiger und vor allem auch ökonomisch sinnvoll ist. (Die Bundesregierung 2021)

Durch die ambitionierte Klimapolitik seitens der EU und auch Deutschlands sind weitere Maßnahmen durch den Staat möglich. Diese werden sich maßgeblich auf die Transportkosten im Straßengüterverkehr auswirken, weshalb ein Ausbau der erneuerbaren Antriebstechnologien weiter an Wichtigkeit zunimmt.

4 Alternative Antriebstechnologien

4.1 Verbrennungsmotor

4.1.1 Konventioneller Diesel-Antrieb

Der heute genutzte Dieselantrieb hat seinen Beginn Ende des 19.Jahrhunderts. Das Patent für diesen damals neuartigen Dieselmotor wurde 1892 von Rudolf Diesel angemeldet und ist die Weiterentwicklung der damalig bereits genutzten Dampfmaschine. Dieselmotoren sind Energieumwandlungsmaschinen, welche chemische Energie, die im Treibstoff enthalten ist, in mechanische Energie umwandeln. In den darauffolgenden 50 Jahren wird die Dampfmaschine vollständig durch den Dieselmotor verdrängt.

Im Laufe der Jahrzehnte wurde der Dieselmotor gerade im Bereich der Nutzfahrzeugtechnik fortgehend verbessert und optimiert. Trotz dieser Optimierungen kann die Verbesserung der Effizienz nicht zu einem Ausgleich der erhöhten Fahrtleistungen führen. Jährlich steigen die CO_2 Emissionen weiter an. So generieren neue Diesel-Fahrzeuge im Jahr 2008 nur noch 10% der schädlichen Emissionen gegenüber Fahrzeugen, welche um 1990 im Einsatz waren. Dieser Fortschritt in der Entwicklung ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Motoren effizienter arbeiten und somit weniger Kraftstoff verbrauchen, was wiederum zu einem geringeren CO_2-Ausstoß führt. (vgl. Gruden 2008, S. 205ff.)

Zusätzlich zum CO_2-Ausstoß kommen bei dem herkömmlichen Antrieb die Geräuschemissionen hinzu. Diese werden verursacht durch Motorengeräusche, wie Verbrennungs-, Ansaug-, Abgas-, Ventil-, Zahnrad- und Lüftergeräuschen; Reifenabrieb und unterschiedlichen Fahrbahnbelegen. Seit 1974 hat sich die Geräuschemission von Nutzfahrzeugen bereits deutlich verringert, wie anhand des nachfolgenden Schaubilds verdeutlicht wird. (vgl. Gruden 2008, S. 209ff.)

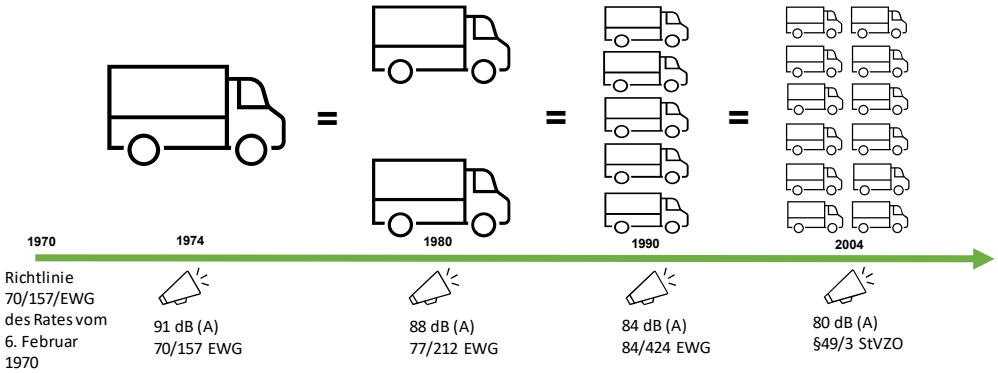

Abbildung 5: Geräuschemission schwere Nutzfahrzeuge 1970-2004 (Gruden 2008)

Abbildung 5 zeigt wie hoch die Einsparung hinsichtlich der Geräuschemission sich zwischen 1970 und 2004 bereits verbessert hat.

Ein SFZ im Jahr 1974 weist dieselbe Geräuschemission auf wie 12 SFZ im Jahr 2004. Es ist zu erwarten, dass es zwar weitere Optimierungen an Motoren und Bereifung geben wird, jedoch werden diese nicht zu einer vollständigen Vermeidung der Geräuschemission führen.

Der große Vorteil des Dieselbetriebenen NFZ ist die hohe Dichte an Tankstelleninfrastruktur und Werkstätten. Diese wurde über Jahrzehnte aufgebaut und ist heute nahezu lückenlos in allen Ländern der Welt.

Diese Infrastruktur, die hohe Reichweite je Tankfüllung und Effizienz der Motoren führen dazu, dass der Dieselmotor bis jetzt der meistgenutzte Antrieb ist.

4.1.2 Liquefied Natural Gas (LNG)

Im Kontext Klimapolitik wird immer wieder das Liquefied Natural Gas (LNG) genannt. Dabei handelt es sich um ein verflüssigtes Erdgas, welches ein 600-Fach kleineres Volumen als Erdgas aufweist und deshalb effizienter zu transportieren ist. (vgl. Wachsmuth und Oberle 2019, S. 6)

Im Vergleich zu herkömmlichen Diesel-Verbrennungsmotoren verbrennt LNG mit einer geringeren Schadstoff- und CO2-Emission als Diesel. Zudem ist der durch Erdgas betriebene Ottomotor leiser als herkömmliche Dieselmotoren.

Die deutsche Energie-Agentur, kurz dena, hat dem Bundesverkehrsministerium 2018 bereits einen Maßnahmen-Katalog vorgelegt, welcher den Ausbau einer LNG-Struktur weiter fördern soll und Unternehmen Anreize bietet, um ihre Fahrzeugflotten auf LNG umzurüsten. (Siegemund et al. 2018)

Dementgegen stehen Studien, welche die Schadstoffemissionen kritisch sehen. Laut einer Studie des Umweltbundesamtes im Jahr 2020 haben LNG NFZ nur eine minimal geringere Schadstoffemission, sodass sich langfristig gesehen kein Potential ergibt, durch welches die Klimaziele eingehalten werden können. (Umwelt Bundesamt 2020)

Mittelfristig könnte LNG die CO_2-Belastung im Straßengüterverkehr zumindest teilweise senken. Da die Effizienz der Motoren ähnlich hoch wie die eines Dieselverbrennungsmotors ist und zudem annähernd dieselbe Reichweite pro Tankfüllung ermöglicht, ist LNG eine Alternative, welche heute schon eingesetzt werden kann. Namenhafte Hersteller wie Scania oder Volvo haben bereits Modelle in Produktion, sodass eine sofortige Umstellung möglich ist. Mitunter sind Reichweiten von bis zu 1.600 km je Tankfüllung mit einem LNG NFZ möglich. (PRIMAGAS Energie GmbH)

Aktuell wird LNG-Treibstoff, sowie Maut und Steuern staatlich subventioniert, was zu einer Vergünstigung für Betreiber dieser NFZ führt. Dennoch ist zu beachten, dass gerade diese Förderungen ab 2023 schrittweise auslaufen, sodass die Kosten für den Betrieb eines LNG NFZ steigen.

4.1.3 Bio-Treibstoff

Biotreibstoffe sind flüssige oder gasförmige Kraftstoffe, deren Basis Biomasse ist.

Die Biokraftstoffe werden durch die Vergärung von stärkehaltigen Pflanzen wie bspw. Zuckerrüben, Getreide oder Zuckerrohr gewonnen. Biodiesel wird aus Pflanzenölen, wie Rapsöl oder der Ölpalme, gewonnen. Diese Formen der Gewinnung werden als Kraftstoffe der ersten Generation bezeichnet. Kraftstoffe der zweiten Generation sind jene, die aus Nebenprodukten, Reststoffen und Abfällen hergestellt werden. Bereits geforscht wird an einer dritten Generation, bei welcher aus Reststoffen wie Stroh und Sägespänen Kraftstoffe hergestellt werden sollen.

Biotreibstoffe können Benzin, Diesel oder Erdgas je nach Motor teilweise oder sogar ganz substituieren. Bei der Verbrennung von Biodiesel werden dabei im Schnitt 70-90 % weniger THG emittiert als bei fossilen Treibstoffen, was zu einer verbesserten CO_2-Bilanz führt. (Reichel 2022)

Der Nachteil dieser Technologie ist, dass aktuell fast ausschließlich Treibstoffe der ersten Generation hergestellt werden. Dies führt zu einem Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion, da große landwirtschaftliche Flächen benötigt werden, um Zuckerrohr, Raps oder Getreide anzubauen. (Deutsches Netzwerk Wirtschaftsethik (DNWE) – EBEN Deutschland e. V 2018)

Bis 2012 wurde auf Biotreibstoffe keine Steuer erhoben, um die Einführung des neuen Treibstoffes anzukurbeln. Mit der Aufhebung der Steuerfreiheit ist die Nachfrage jedoch stark gesunken. Zum gleichen Zeitpunkt trat die Beimischquote in Kraft. Den heute

herkömmlichen Treibstoffen ist zu einem gewissen Teil Biotreibstoff beigemischt, bspw. E5 oder E10 bei Benzin. Viele der heute produzierten NFZ sind für die Betankung mit B30 und auch reinem Bio-Diesel B100 freigegeben, sodass keine spezielle Technologie entwickelt werden muss. Herkömmliche Diesel-LKW können größtenteils mit dem Bio-Treibstoff betankt werden. (Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e. V. (AGQM))

4.2 Elektroantriebe

4.2.1 Wasserstoff- und Brennzellentechnologie

Die Geschichte des Wasserstoffes geht bis in das 15. Jahrhundert zurück. Zu dieser Zeit wurde der Stoff bereits vom Schweizer Naturforscher Theophrastus Bombastus von Hohenheim hergestellt. Allerdings erkannte dieser den Stoff nicht als eigenes Element.

Im 18.Jahrhundert wurden erste Einsatzbereiche für den Wasserstoff entdeckt. So flogen die ersten bemannten Wasserstoffballons, welche mit dem neuartigen Treibstoff betrieben wurden. 1839 folgte dann die Erfindung der Brennstoffzelle durch den britischen Physiker und Anwalt Sir William Grove. Dieser erkannte erstmals das Potential von Wasserstoff zur Energiegewinnung. Das erste Fahrzeug, welches durch einen Verbrennungsmotor mit Wasserstoff angetrieben wurde, wurde im Jahr 1860 von Etienne Lenoir entwickelt. Dieses war jedoch sehr ineffizient und arbeitete mit einem hohen Schmiermittel- und Gasverbrauch.

Diese Erfindungen legten den Grundstein für die heutigen wasserstoffbetriebenen Motoren. Bereits seit Anfang der 2000er werden diverse PKW von Toyota, Hyundai, Honda und BWM hergestellt. Durch die neu entbrannten Diskussionen um den Klimaschutz hat die Forschung auf diesem Gebiet in den letzten Jahren noch einmal an Fahrt aufgenommen, sodass immer weitere Modelle in Serienproduktion hergestellt werden. (vgl. Klell et al. 2018, S. 31ff.)

Im Bereich der NFZ-Technologie steckt die Brennzellentechnologie noch in den Kinderschuhen. Bis dato werden von den Herstellern nur Prototypen gebaut und betrieben. Dies geschieht vornehmlich in den USA. Da der Aufbau der Infrastruktur, die Senkung der Kraftstoffpreise und die Lebensdauer noch weiter verbessert werden müssen, ist ein Einsatz bei SNF bisher nur bedingt möglich. Vielmehr eignet sich dieser Antrieb für kleine bis mittlere NFZ und Busse im städtischen Bereich, da dort Emissionen vermieden werden müssen. (vgl. Klell et al. 2018, S. 186ff.)

Großer Vorteil Brennstoffzellentechnologie ist, dass ausschließlich Wasserdampf freigesetzt wird. Es wird kein CO_2, Stickstoffoxid und Feinstaub emittiert. Hinzuzufügen ist, dass Wasserstoff nur dann nachhaltig ist, wenn dieser ausschließlich mit

Zuhilfenahme von erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird. Eine Herstellung aus Erdgas ist zwar möglich, jedoch wird bei diesem Verfahren CO_2 emittiert.

Zur Förderung dieser Technologie wird zudem keine Steuer und Maut für Fahrzeuge erhoben. (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022)

4.2.2 Elektro LKW

Bereits seit 180 Jahren kommen Elektromotoren zur Anwendung. Damit ist die Technologie bereits länger im Einsatz als der 1876 patentierte Otto-Verbrennungsmotor. Damit ist der Elektromotor keineswegs eine neue Technologie, vielmehr wurde sie wiederentdeckt und weiterentwickelt.

In den letzten Jahren hat der Elektroantrieb sowohl im PKW- wie auch im LKW-Bereich an Bedeutung gewonnen. Das mediale Interesse ist groß und auch in der Politik wird von einer „Verkehrswende“ gesprochen. Dies liegt vor allem an den schwindenden Ressourcen für den konventionellen Verbrennungsmotor. (vgl. Kampker et al. 2013, S. 6) Bis 2030 sollen allein in Deutschland 7 – 10 Millionen Elektrofahrzeuge im Einsatz sein. Dazu werden Anreize wie Steuer- und Mautbefreiung, Ausbau der Infrastruktur und Zuschüsse vom Staat bereitgestellt. (Die Bundesregierung 2022)

Unter einem Elektroantriebs-NFZ wird die Technologie verstanden, bei welcher das NFZ über einen Akkumulator und einen Elektromotor verfügt. Beim Betrieb dieses NFZ werden keine Emissionen emittiert. Daher gilt dieser Antrieb seit Jahren als die Lösung für den vermehrten CO_2- Ausstoß im Personen- und Güterverkehr. Allerdings sind auch negative Aspekte mit dem Elektroantrieben verbunden. So sind die notwendigen Batterien stark umstritten, da eine Entsorgung schwierig ist und daher die Klimabilanz dieser Module sehr schlecht ausfällt. Zudem wird auch der Strom, welcher zur Ladung der Batterien genutzt wird, häufig in Energie- und Emissionsstarken Kraftwerken hergestellt. Somit ist zwar der Transport mit solchen Nutzfahrzeugen emissionsfrei, allerdings erzeugen die Betriebsmittel eine nicht zu verachtende Menge an CO_2.

Aufgrund der geringen Reichweiten des E-LKW könnte diese Technologie eher im Bereich der Nachtlogistik in bspw. Wohngebieten oder in Innenstädten zur Anwendung kommen. Da elektrisch betriebene NFZ eine geringe Geräuschemission aufweisen, eignen sich diese für diesen besonderen Einsatz.

4.2.3 Oberleitungs-LKW

Eine weitere Alternative zu dem konventionellen Dieselantrieb stellt der so genannte Oberleitungs-LKW (O-LKW) dar. Hierzu wurde entlang der Autobahn 1 (A1) zwischen Reinfeld und dem Autobahnkreuz Lübeck eine Teststrecke errichtet, auf der ein Oberleitungsnetz errichtet wurde. Wie bereits bei Straßenbahnen oder Bussen im

Stadtverkehr zur Personenbeförderung, werden die O-LKW über eine Oberleitung mit Strom versorgt und fahren somit emissionslos.

Der Feldversuch auf der A1 in Zusammenarbeit mit der Spedition Bode, soll die technische, ökonomische und ökologische Umsetzbarkeit unter Verkehrsgesichtspunkten bewerten. Die daraus hervorgehenden Resultate sollen der Politik als Entscheidungsgrundlage für einen möglichen Ausbau und Einsatz dieser Technologie dienen.

Darüber hinaus werden Daten zur Netzqualität, Netzausbaustrategien, Schwingungsverhalten der Oberleitung und der mechanische Verschleiß des Systems gesammelt und analysiert. Auch ökologische Gesichtspunkte spielen bei der Bewertung des Systems eine Rolle, welche direkten Einfluss auf Mensch- und Tierwelt haben könnten. So werden die direkten Auswirkungen, die der Bau und der Betrieb der Oberleitungen auf bspw. die Vogelwelt hat, betrachtet.

Die eingesetzten Nutzfahrzeuge verfügen über einen konventionellen Dieselantrieb und einen elektronischen Antrieb mit entsprechender Batterie. Sie können sowohl rein elektrisch als auch rein über den Verbrennungsmotor betrieben werden. Ebenso ist ein Hybridantrieb möglich. Die Ladung der Batterie kann über Ladestationen, Energie aus der Oberleitung oder Rekuperationsvorgängen (der Rückgewinnung von Bremsenergie) erfolgen.

Während der Nutzung des E-Highways wird der LKW mit Hilfe der Oberleitung mit Strom versorgt und fährt für diesen Wegabschnitt emissionsfrei. (Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH 2022) Aufgrund der Hybridausstattung des Fahrzeuges sind Wegstrecken, welche abseits der Oberleitungen zurückgelegt werden, nicht gänzlich emissionsfrei. Mitunter werden gleiche Emissionen emittiert, wie bei einem Diesel NFZ.

5 Marktanalyse alternativer Antriebe

Deutschland ist Logistikweltmeister. Mit rund 73% LKW-Anteil am Güterverkehr macht dies deutlich, dass alternative Antriebstechnologien im Hinblick auf die „Green Logistics“ ein hohes Potential mit sich bringen. (Adolf et al. 2016)

Bereits bis 2030 muss der CO_2-Ausstoß im Straßengüterverkehr um 30 % gesenkt werden, um die Ziele der EU einhalten zu können. Hierzu gibt es bereits, wie in Kapitel 4 genannt, unterschiedliche Ansätze im Hinblick auf die Antriebstechnologien. Klimaziel der EU ist es bis 2050 ganz Europa treibhausgasneutral zu gestalten. Dieses ehrgeizige Ziel ist mit konventionellen Antrieben, welche mit Erdgas oder Diesel betrieben werden, nicht zu erreichen. Daher sind neue Antriebstechnologien zwingend notwendig, um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors voranzutreiben.

Die bereits genannten Effekte, wie Restriktionen seitens der Regierung, sowie steigende Mineralölpreise führen immer weiter zu einem Wandel in der Fahrzeugtechnik. Bislang sind schwere NFZ im Straßengüterverkehr zu rund 98% Dieselbetrieben. Als schwere NFZ werden jene Fahrzeuge verstanden, welche ein zulässiges Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t aufweisen. (e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue 2021)

Bereits jetzt ist ein Umschwung in der Logistikbranche zu erkennen. Die Nachfrage nach Alternativen zum herkömmlichen Dieselantrieb nimmt immer weiter zu.

Unternehmen, welche Transportleistungen im Straßengüterverkehr anbieten sind seit jeher einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt, sodass der Fokus bei der Anschaffung und dem Betrieb von NFZ auf der Wirtschaftlichkeit dieser liegt. Aktuelle Alternativ-Antriebstechnologien bergen durch ihre geringe Marktreife hohe Anschaffungskosten, welche nur zum Teil durch Förderungen kompensiert werden können. Zudem besteht die Herausforderung eine geeignete Infrastruktur für den jeweiligen Treibstoff oder Ladevorgang auszubauen. Bislang sind diese nicht flächendeckend verfügbar, dies führt zu einem hohen Planungsaufwand auf Seiten der Logistikdienstleister.

Wie eingangs bereits erwähnt werden die Restriktionen seitens des Staates in Hinblick auf den CO_2-Ausstoß in den nächsten Jahren weiter erhöht. Herstellerseitige Forschung unterliegt bislang noch hohen Marktunsicherheiten. Um dem entgegenzuwirken und die Forschung weiter voranzutreiben wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) das *Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge* ausgearbeitet.

Im Bereich der leichten NFZ unter 3,5t gibt es bereits serienreife Modelle für Nutzfahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb. Diese sind bereits flächendeckend im Einsatz und zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass meist nur geringe Reichweiten zurückgelegt werden, sodass 200-400 km Reichweite je Ladung ausreichend sind.

Das BMVI betont in seinem Konzept zu klimafreundlichen NFZ, dass eine Beschränkung auf nur eine alternative Antriebstechnologie nicht zweckmäßig ist. Deshalb legt sich das Ministerium bei der Zukunftsprognose nicht auf eine Antriebstechnologie fest, sondern betont, dass ein ausgewogener Technologiemix helfen wird die Klimaziele zu erreichen.

Für SNF liegen noch nicht ausreichend Erkenntnisse vor, als das bereits eine Nachfolgertechnologie zum Dieselantrieb benannt werden oder Prognosen gestellt werden könnte, wie zukünftiger Straßengüterverkehr aufgebaut sein wird. (vgl. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) 2022, S. 7ff.)

Bei aktueller Recherche wird der Eindruck vermittelt, dass die neue vorherrschende Antriebstechnologie der Elektroantrieb ist. Die Elektrifizierung schreitet gerade im PKW-Bereich mit großen Schritten voran. Und auch werden immer weitere Modelle für den Nutzfahrzeugbereich verfügbar. Für kleine Nutzfahrzeuge bis 3,5t ist der Elektroantrieb längst keine Ausnahme mehr. Große Marktteilnehmer wie Amazon und DHL setzen bei der Auslieferung bereits seit längerem auf Elektroantriebe. (Deutsche Post DHL Group 2021; Amazon) Im Bereich der SNF ist dies jedoch weiterhin die Ausnahme. Die Problematik besteht weiterhin in der geringen Reichweite der SNF. Aktuell verfügbare Modelle erreichen gerade einmal 200 km je Ladung der Batterie. Gerade im Fernverkehr führt dies zu erheblichen Problemen, da die Infrastruktur für Ladesäulen nicht flächendeckend verfügbar ist und der Ladevorgang zwischen 90-Minuten und mehreren Stunden benötigt. Auch in der Herstellung und Entsorgung der verbauten Lithium-Ionen-Batterien wird von Kritikern ein Risiko gesehen. Die Rohstoffe für die Herstellung werden vornehmlich aus dem globalen Süden aus teilweise umstrittenen Quellen bezogen. Die Entsorgung am Ende der Lebensdauer der Batterien ist kostenintensiv und aufwendig. Zudem kommen hohe Anschaffungskosten hinzu, welche teils bis zu 200% über dem Anschaffungspreis eines herkömmlichen Diesel-LKW liegen. (Brunnengräber 2020; Prause und Dietz 2020)

Im Bereich der City Logistik gibt es bereits jetzt ein großes Potential für diesen Antrieb. Die Vorteile, die die Elektrifizierung des Antriebs mit sich bringen sind nicht von der Hand zu weisen. Es entstehen weniger Emissionen während des Betriebs, sowohl CO_2 als auch Geräuschemissionen, was zu einem verbesserten Klima in den Städten führt.

Elektrofahrzeuge weisen hohe Wirkungsgrade auf. Dieser Umstand macht sie für den Einsatz im Straßengüterverkehr sehr attraktiv.

Einfach erklärt gibt der Wirkungsgrad die Effizienz eines Antriebs (oder einer Maschine) an. Er sagt aus, zu welchem Anteil die zugeführte Energie bei der Umwandlung in die gewünschte Energie umgewandelt wird. (vgl. Michalke 2020, S. 90)

Aktuell auf dem Markt verfügbare Modelle für SNF sind bspw.:

1. Volvo Volvo FH Electric Reichweite 345km
2. Renault Z.E. Reichweite 300 km

3.	Mercedes	eActros	Reichweite 200 km
4.	MAN	eTruck	Reichweite 180km

(Daimler Truck AG; MAN Truck & Bus SE; Renault Trucks; Volvo Group Trucks Central Europe GmbH)

Auch bei der Weiterentwicklung von anderen Technologien ist bereits der Wettkampf zwischen den Herstellern gestartet. So wird die Forschung auf dem Gebiet der Brennzellen- und Wasserstoffbetriebenen Motoren weiter durch unterschiedliche Hersteller vorangetrieben. Hersteller geben bereits jetzt eine Reichweite von bis zu 1000 km mit einer Tankfüllung Wasserstoff an. Aufgrund dieser Eigenschaft ist die Brennstoffzellentechnik äußerst attraktiv für den Betrieb SNF.

Eine geeignete Infrastruktur für Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge besteht bislang nicht. Im Jahr 2021 gab es lediglich 92 Wasserstofftankstellen in ganz Deutschland. (H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG) Für den Aufbau einer solchen und weiteren Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus werden Projekte bspw. vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr ins Leben gerufen. Das Ministerium vergibt dabei Fördergelder für Regionen in Deutschland welche den Ausbau von Wasserstoffinfrastruktur in Verkehr und Industrie vorantreiben. (H2-Region Emsland) Bislang sind nur Prototypen der wasserstoffbetriebenen SNF auf Deutschlands Straßen zu finden. Einige Hersteller planen bereits Serienmodelle. Folgende Hersteller werden zeitnah die entsprechenden Modelle auf den Markt bringen:

1.	Daimler Trucks	GenH2 Truck	voraus. Reichweite 1.000 km
2.	Hyundai	Xcient Fuel Cell	Reichweite 400 km
3.	IVECO	IVECO S-Way	Prototyp
4.	Hyzon	Hyzon HyMax 250	Reichweite 400 km

(H2-Region Emsland)

Eine alternative zum Dieseltreibstoff ist der Biotreibstoff bzw. Biodiesel. Dieser kann in vielen bereits heute erhältlichen Diesel-NFZ verwendet werden. Bei der Verbrennung werden wie bereits genannt 70-90 % weniger THG emittiert, was den Betrieb eines solchen NFZ deutlich umweltfreundlicher macht. Modelle gibt es von fast allen Herstellern, die Reichweiten sind zudem mit denen eines Diesel NFZ vergleichbar. Bislang fehlt jedoch der Durchbruch in der Herstellung der Biotreibstoffe. Diese werden bislang aus extra für diese Verwendung angebauten Pflanzen hergestellt, für diese werden große Flächen benötigt und stehen in Konkurrenz zur Lebensmittelindustrie. Forschende arbeiten bereits an neuen Herstellungsmethoden, bei denen die Treibstoffe aus Pflanzenresten und Abfallprodukten aus der Lebensmittelindustrie hergestellt werden können. Dieser Durchbruch würde die Biotreibstoffe deutlich nachhaltiger und „grüner“ machen.

LNG wird ebenfalls als Alternative gesehen, da hinsichtlich Reichweite der NFZ keine Abstriche gemacht werden müssten. Da diese Technologie bereits marktreif ist, kann sie jederzeit verwendet werden. Auch bei dieser Technologie gibt es bereits viele Hersteller, welche die NFZ herstellen (PRIMAGAS Energie GmbH):

1.	IVECO	Stralis NP	Reichweite 1.500 km
2.	Scania	G 410 LNG	Reichweite 1.600 km
3.	Volvo	FM LNG	Reichweite 1.000 km

Allerdings handelt es sich um einen fossilen Treibstoff, sodass die Wahrscheinlichkeit besteht, dass eine weitere Förderung dieses Antriebs nicht stattfinden wird.

Zuletzt wird in dieser Arbeit der O-LKW behandelt. Da dieser stark abhängig vom Oberleitungsnetz ist und diese nicht flächendeckend verfügbar sind, gibt es aktuell nur begrenzte Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie. Bislang werden die Fahrzeuge nur auf Teststrecken in kleinen Stückzahlen getestet. Eine Serienproduktion besteht daher nicht. Zudem kommen hohe Investitionskosten für den Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur hinzu, bei welchen heute noch nicht geklärt ist wer diese tragen wird.

Zusammenfassend ist zu betonen, dass bereits einige Prototypen und Kleinserien für alternative Antriebe bestehen. Davon sind jedoch noch keine marktfähig genug, um den Dieselantrieb vollständig abzulösen. Deshalb werden die bereits genannten Antriebstechnologien in der nachfolgenden Analyse nach den wichtigsten Entscheidungskriterien beurteilt, um eine Nachfolgertechnologie für den Dieselantrieb herauszustellen.

6 Gegenüberstellung alternativer Antriebstechnologien

6.1 Nutzwertanalyse

6.1.1 Ziel der Analyse

Die Nutzwertanalyse (NWA) stellt ein heuristisches Entscheidungsverfahren dar, welches zur systematischen Entscheidungsvorbereitung durch Bewertung von unterschiedlichen Alternativen dient.
Erstmalig wurde die NWA in den 1970er Jahren durch Christof Zangemeister definiert:

„Nutzwertanalyse ist die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen alternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Alternativen." (Zangemeister 2014, S. 45)

Die NWA soll dabei helfen eine strukturierte Bewertung von verschiedenen Optionen als Lösungsansatz einer definierten Problemstellung bzw. Zielfrage vorzunehmen. Dabei werden die einzelnen Optionen gewichtet, um eine Vergleichbarkeit der Werte herzustellen. Die Entscheidungskriterien können dabei messbar oder auch subjektiv sein. Das Ziel der Analyse ist es den Entscheidungsprozess zu erleichtern und die beste Alternative aus den gegebenen Varianten zu verdeutlichen. Da die Bewertung teils subjektiv ist, können unterschiedliche Unternehmen oder Personen zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Die NWA eignet sich vor allem dann, wenn die Entscheidungskriterien nicht monetär messbar sind. (Kühnapfel 2021, S. 5; Drews 2007, S. 118ff.)

Anhand des nachfolgenden Schaubilds wird der allgemeine Verlauf der NWA aufgezeigt. Wie ersichtlich wird, soll die Analyse der Vereinfachung des Entscheidungsprozesses dienen.

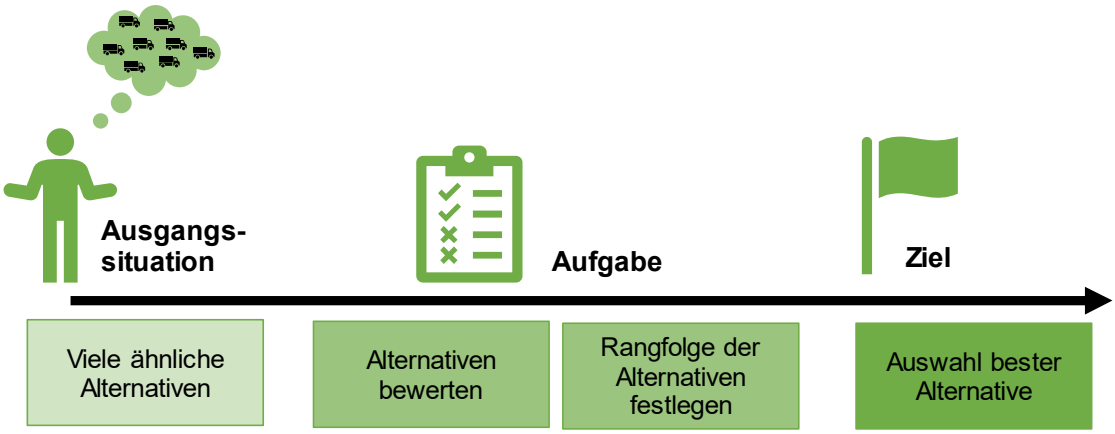

Abbildung 6: Aufgaben der Nutzwertanalyse (vgl.Drews 2007, S. 119)

Im anschließenden Kapitel wird die Vorgehensweise der NWA im Detail erklärt.

6.1.2 Funktions- und Vorgehensweise

Die nachstehende Tabelle 1 zeigt den Ablauf der NWA in seine einzelnen Schritte gegliedert.

Schritte	Maßnahme	Kurzerklärung
1.	**Ziel der NWA festlegen**	*Festlegung von "Muss" oder "K.O." Kriterien*
2.	**Entscheidungskriterien auswählen**	*Katalog von monetären und subjektiven Kriterien*
3.	**Wichtigkeit Entscheidungskriterien festlegen**	*Gewichtung erstellen*
4.	**Geeignete Maßstäbe festlegen**	*Bewertungsskala auswählen*
5.	**Alternativen einzeln bewerten**	*Ermittlung Nutzwerte durch Multiplikation von Bewertung und Gewichtung*
6.	**Nutzwerte der Alternativen feststellen**	*Teilnutzwerte summieren*
7.	**Ergebnis Analysieren**	*Plausibilität der Ergebnisse prüfen*
8.	**Rangfolge bilden**	*Rangfolge über Nutzwerte bilden*
9.	**Lösung auswählen**	*Anhand der Rangfolge kann die beste Lösung ermittelt werden*

Tabelle 1: Ablauf Nutzwertanalyse (vgl. Drews 2007, S. 121ff.; vgl. Kühnapfel 2021, S. 25ff.)

Zunächst wird im Zuge der NWA das Ziel festgelegt, d.h. dass ein klares Problem beschrieben wird, welches mit Hilfe der NWA gelöst oder bearbeitet werden soll. Wie bereits beschrieben handelt es sich dabei meist um „Entweder – Oder“ Entscheidungen aus unterschiedlichen gleichwertigen Alternativen.

Die Entscheidungskriterien werden im darauffolgenden Schritt erarbeitet und definiert. Zu den Kriterien gehören sowohl monetäre als auch nicht monetäre Aspekte, sowie subjektive Einflüsse. Nach Auswahl der Entscheidungskriterien werden diese gewichtet, um die zentralen Aspekte höher zu bewerten.

Zur Bewertung kommen unterschiedliche Skalen zur Anwendung. Die Festlegung auf eine dieser Bewertungsmaßstäbe führt zu einer einheitlichen Bewertung der Entscheidungskriterien. Es wird unterscheiden zwischen Punktskala, Rangskala und Notenskala. In Tabelle 2 werden diese kurz verdeutlicht.

Bewertungsskalen	
Punktskala von-bis	1 = schlecht 10 = sehr gut
Rangskala von-bis	1. Platz 10. Platz
Notenskala von-bis	1 = sehr gut 6 = sehr ungenügend

Tabelle 2: Bewertungsskalen Netzwerkanalyse (vgl. Drews 2007, S. 124)

Die Entscheidungskriterien werden dann innerhalb der Skala bewertet. Bspw. werden Kriterien, welche weder besonders „gut“ noch besonders „schlecht“ sind mit einer 5 auf der Punktskala bewertet.

Im Anschluss an die Festlegung des Bewertungsmaßstabs erfolgt die eigentliche Bewertung der Entscheidungskriterien. Diese kann von Person zu Person oder auch Unternehmen zu Unternehmen sehr unterschiedlich ausfallen und ist den jeweiligen Bedürfnissen der Akteure angepasst.

Die gewonnen Ergebnisse werden vor der Auswertung gewichtet, um sie vergleichbar zu machen. Aus dieser Gewichtung ergeben sich die eigentlichen Nutzwerte. Die gesammelten Daten werden vor der finalen Auswertung noch einmal auf ihre Plausibilität geprüft.

Darauf folgt die Erstellung einer Rangordnung. Die Alternativen mit den höchsten Nutzwerten werden auf Platz 1 gesetzt, die schlechteste bspw. auf Platz 10. Anhand dieser Rangfolge kann nun die beste Alternative ausgewählt werden.

6.2 Durchführung der Nutzwertanalyse

6.2.1 Festlegung Messkriterien

Durch immer weiter ansteigende Restriktionen in Bezug auf den Umweltschutz müssen gerade SNF im Fernverkehr effizienter und nachhaltiger werden. Die nachfolgenden Messkriterien sind deshalb unter den Gesichtspunkten der „Green Logistics“ ausgewählt worden und zielen vollständig darauf ab die eingangs formulierte Leitfrage dieser Arbeit zu beantworten.

Um die Bewertung Praxisnah durchführen zu können wird die NWA aus der Sicht eines Logistikunternehmens erstellt, welches den Fokus auf die Erweiterung seiner „Green Logistics“- Leistungen im Fernverkehr mit SNF legt. Als SNF werden für diesen Teil der Arbeit jene Fahrzeuge bezeichnet, deren zulässiges Gesamtgewicht 12t überschreiten. Aufgrund des Schwerpunkts auf den Fernverkehr wird in der NWA berücksichtigt, dass die zurückgelegten Strecken in der Regel 400 km übersteigen.

Das Logistikunternehmen aus dessen Sicht die Analyse erstellt wird, ist ein deutsches Großunternehmen mit mehreren Standorten innerhalb Deutschlands. Dabei zeichnen sich Großunternehmen dadurch aus, dass sie mehr als 249 Angestellte beschäftigen oder deren Jahresumsatz 50 Mio. Euro übersteigt. (Statistisches Bundesamt)

Für die Analyse wird vorausgesetzt, dass das Logistikunternehmen hauptsächlich im Fernverkehr tätig ist und diesen mit eigenen Fahrzeugen abwickelt.

Namenhafte Handelsunternehmen, wie bspw. Bosch, welche ihre Supply Chains nachhaltiger gestalten möchten sind Kunden.

Um die beste Alternativtechnologie im Vergleich zum konventionellen Diesel-LKW zu ermitteln, werden die einzelnen Alternativen zuerst mit dem Dieselverbrennungsmotor verglichen. Anschließend werden diese noch einmal miteinander verglichen, um einen Eindruck über Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien zu erhalten und eine finale Entscheidung treffen zu können.

Die ausgewählten Messkriterien sind dabei die nachfolgenden:

- Anschaffungskosten des SNF der entsprechenden Antriebstechnologie.
- Tankstelleninfrastruktur: Diese bezeichnet die Anzahl und Dichte an verfügbaren Tankstellen für den jeweiligen Treibstoff. Dabei werden auch die durchschnittlichen

Umwege zu den Tankstellen, sowie die durchschnittliche Tankzeit pro Tankvorgang berücksichtigt.

- Reichweite bezeichnet die maximal zurücklegbaren Kilometer (km), welche pro Tankfüllung mit dem NFZ zurückgelegt werden kann.
- Betriebskosten: Darunter fallen Kraftstoffe oder Stromverbrauch, Mautgebühren auf deutschen Straßen, sowie steuerliche Vorteile, welche durch die Nutzung einer innovativen Antriebstechnologie entstehen.
- Schadstoffemission, welche durch den Betrieb des NFZ entstehen, dabei wird sich an den wichtigsten spezifischen Emissionen des Straßengüterverkehrs orientiert. Dabei ausgeschlossen werden Emissionen, die durch Reifen- und Bremsabrieb entstehen, da diese für alle Antriebe anfallen. Hinzu kommen Geräuschemissionen, welche während des Betriebs des NFZ entstehen.
- Marktreife der Antriebstechnologie. Es wird festgestellt, ob für eine Antriebstechnologie Modelle für SFZ gibt, welche in Serie produziert werden.
- Nachhaltigkeit in der Produktion der Antriebstechnologie und des Treibstoffes.
- Image der Antriebstechnologie in Bezug auf die Außenwahrnehmung durch Bevölkerung, Unternehmen und Politik.

6.2.2 Gewichtung der Entscheidungskriterien

Bei der Gewichtung der in Kapitel 6.2.1 definierten Entscheidungskriterien werden entsprechende Prozentsätze hinterlegt, um die Wichtigkeit für das Unternehmen festzulegen.

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt die Messkriterien mit der jeweiligen Gewichtung.

Gewichtung der Messkriterien zur Nutzwertanalyse	
Entscheidungskriterium	**Gewichtung**
Reichweite	18,50%
Tankstellen- infrastruktur	15,15%
Anschaffungskosten	14,05%
Betriebskosten	12,75%
Marktreife	12,55%
Schadstoff- und Geräuschemission	10,55%
Nachhaltigkeit des Antriebs/Treibstoffes	9,50%
Image	6,95%
	100,00%

Tabelle 3: Gewichtung der Messkriterien zur Nutzwertanalyse

Da durch das Logistikunternehmen hauptsächlich Transporte im Fernverkehr durchgeführt werden, ist die Reichweite von elementarer Bedeutung und wird entsprechend hoch mit 18,5 % gewichtet. Bei Strecken welche 400 km übersteigen ist es notwendig, dass eine möglichst weite Reichweite mit dem SNF erreicht werden kann. Die Gewichtung für Schadstoff- und Geräuschemissionen beträgt 10,55 %. Durch den zunehmenden Druck seitens Regierung und Verbrauchern schädliche Emissionen einzusparen, wird im Logistikunternehmen Wert daraufgelegt, dass die Antriebstechnologie möglichst wenig Schadstoff- und auch Geräuschemissionen verursacht. So können auch Transporte in bspw. Umweltzonen möglich gemacht werden. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn Entladestellen in Innenstädten oder Wohngebieten liegen.

Anschaffungskosten mit 14,05 % und Tankstelleninfrastruktur mit 15,15 % sind ungefähr gleich hoch gewichtet. Die Anschaffungskosten für das neue SNF müssen kalkulierbar sein. Investitionen für die Anschaffung eines neuen Fahrzeugs können nur in gewissem Rahmen getätigt werden, daher wird dieses Entscheidungskriterium für das Unternehmen weit oben gewertet.

Auch die Tankstelleninfrastruktur ist bei Fernverkehrstransporten von Wichtigkeit. Da die Strecken meist 400 km übersteigen und eine Betankung auf dem eigenen Betriebsgelände daher nicht möglich ist, muss eine geeignete Infrastruktur außerhalb des Betriebs bestehen, um während des Transports nachtanken oder aufladen zu können.

Mit 12,75 % folgt das Entscheidungskriterium Betriebskosten. Da diese für jeden gefahrenen Kilometer anfallen, müssen diese bei der Beurteilung miteinbezogen werden. Die unterschiedlichen Antriebstechnologien weisen signifikante Unterschiede hinsichtlich Kraftstoff- oder Strompreis, Maut und Steuer auf, welche in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen.

Die Nachhaltigkeit des Antriebs wird mit 9,5 % gewichtet, dies ist darauf zurückzuführen, dass das Unternehmen hauptsächlich ökonomisch handelt und „Green Logistics“-Dienstleistungen nach und nach aufbauen möchte. Zudem sind viele der Alternativtechnologien noch in der Forschungsphase, sodass davon auszugehen ist, dass diese in den kommenden Jahren deutlich nachhaltiger werden.

Zuletzt sind noch Image und Marktreife zu gewichten. Das Image der Antriebstechnologie wird mit 6,95 % gewichtet. Dem Logistikunternehmen ist die Außenwirkung und die damit verbundene Aufmerksamkeit durch potenzielle Kunden zwar wichtig, jedoch soll der ökonomische Vorteil der Unternehmung nicht unter dem neuen Geschäftsfeld leiden.

Mit nur 12,55 % wird die Marktreife der Technologie gewichtet. Dies liegt vor allem daran, dass immer mehr Modelle durch die NFZ Hersteller auf den Markt gebracht werden und

davon auszugehen ist, dass dieser Trend in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) 2021)

Um eine Bewertung dieser Entscheidungskriterien durchzuführen, muss eine Bewertungsskala festgelegt werden. Für die nachfolgende NWA wird eine Punktskala von 1 bis 10 gewählt. Diese eignet sich für die Bewertung von alternativen Antriebsformen besonders gut, da sehr genaue Punkte je Messkriterium vergeben werden können und somit eine genaue Bewertung möglich ist. Dabei wird das beste Ergebnis mit einer 10 bewertet, wohingegen die schlechteste mit 1 bewertet wird.

6.2.3 LNG

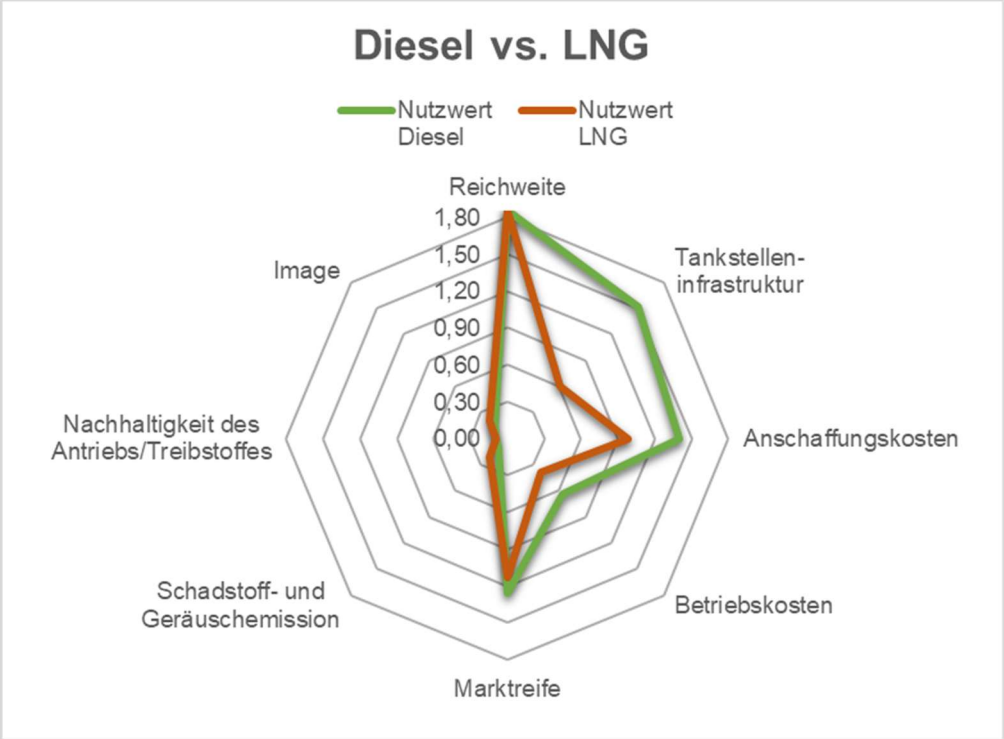

Abbildung 7: Diesel versus LNG

Bei der Betrachtung der Abbildung 7 wird ersichtlich, dass der LNG-LKW dem Diesel-LKW in vielen Punkten der Entscheidungskriterien ähnliche Nutzwerte erreicht. Dies kann vor allem darauf zurückgeführt werden, das LNG seit Jahren eingesetzt wird und bis Ende 2023 von der Bundesregierung durch Mautfreiheit gefördert wird. Genauso wie bei dem konventionellen Diesel handelt es sich jedoch um einen fossilen Kraftstoff, sodass für die Förderungen bereits ein Endzeitpunkt festgelegt wurde.

NFZ beider Antriebe können pro Tankfüllung ungefähr die gleiche Distanz zurücklegen. Dabei kommen die Modelle je nach Ladung und Strecke auf bis zu 1500 km/Tankfüllung. Die Tankstelleninfrastruktur in Deutschland für LNG ist sehr gering. Im März 2021 waren gerade einmal 47 LNG-Tankstellen im Bundesgebiet zu finden. Zum Vergleich gibt es in ganz Deutschland ca. 14.000 Tankstellen, an welchen Diesel getankt werden kann. (PRIMAGAS Energie GmbH) Diese geringe Infrastruktur führt dazu, dass der LNG-Antrieb nur einen Nutzwert von 0,61 erreicht, während der Dieselantrieb bei einem Nutzwert von 1,52 liegt. Die Umstellung von Diesel NFZ auf LNG NFZ würde demnach für das Logistikunternehmen einen erhöhten Planungsaufwand hinsichtlich der Tankstelleninfrastruktur mit sich bringen. Mitunter könnte es so zu großen Umwegen auf der Strecke kommen, da nicht ausreichend Tankstellen verfügbar sind.

Modelle für diesen alternativen Antrieb mit LNG sind auf dem Markt bereits seit Jahren verfügbar. Namenhafte Hersteller wie Scania oder Volvo produzieren LNG NFZ in Serie. Die Anschaffungskosten für ein NFZ mit LNG-Antrieb sind seit Anfang des Jahres 2022 deutlich gestiegen. Händler können die Preise aktuell nur kurzzeitig halten, was an steigenden Rohstoffpreisen und hoher Inflation liegt. Vor Pandemiebeginn im Jahr 2020 war bei der Anschaffung eines LNG NFZ damit zu rechnen, dass die Anschaffungskosten, die denen eines Diesel NFZ um ca. 35 % übersteigen. (PRIMAGAS Energie GmbH) Damit ist die Anschaffung im Vergleich zum konventionellen Antrieb um einiges teurer für den LNG-LKW, dies schlägt sich auch in der Bewertung nieder, wie an Abbildung 7 deutlich wird.

Zu den hohen Anschaffungskosten kommt auch der gestiegene Preis für LNG. Bereits zum Jahresbeginn 2022 war 1 kg LNG deutlich teurer als 1 Liter Dieseltreibstoff. Zum 15.07.2022 lag der LNG Preis bei 2,49 EUR/kg und der Dieselpreis bei 1,90 EUR/l. (Tagesaktuelle Diesel- und LNG Preise 2022) Um die Vergleichbarkeit der Preise nicht zu verfälschen wurden keine Großabnehmerpreise für Diesel herangezogen, da es keine vergleichbare Quelle für LNG gibt. Aus diesem Grund wurden in diesem Absatz Tankstellenpreise herangezogen, um einen Eindruck über die entstehenden Betriebskosten zu geben.

Ein kostenmindernder Umstand ist, dass bis Ende 2023 die Maut für den LNG entfällt. Da dies jedoch nur ein kleiner Teil der Betriebskostenstruktur ist, fällt dieser Umstand aufgrund der hohen Kraftstoffpreise nicht ins Gewicht bei der Errechnung der Nutzwerte.

Da ein Kilogramm LNG ungefähr dieselbe Fahrleistung erbringt wie ein Liter Diesel, übersteigen die Betriebskosten in dieser Hinsicht die des Diesel-LKW wie anhand der Tabelle 4 nachvollzogen werden kann:

Antrieb	Durchschnittl. Verbrauch je 100 km	Einheit	Treibstoffpreis je 1 Einheit Stand 21.07.2022	Gesamtkosten je 100 km
Diesel	25	Liter	1,90 €	47,50 €
LNG	25	Kilogramm	2,49 €	62,25 €

Tabelle 4: Kostenvergleich Diesel und LNG

LNG NFZ sind emissionsärmer als Diesel LKW, weshalb diese noch bis Ende 2023 von der Maut befreit sind, und Steuervergünstigungen erhalten. Nach Ablauf dieser Frist laufen diese Förderungen des LNG-Antriebs aus. Aufgrund dessen ist kurzfristig gesehen der LNG Antrieb zwar eine Option, allerdings wird der Betrieb eines solchen Fahrzeuges ab 2024 noch einmal teurer. (Gieße 2017)

Da auch LNG aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird, ist die Außenwahrnehmung dieses Antriebs ähnlich schlecht wie die des Diesel LKW. Was sich auch in der Bewertung in der Abbildung 7 deutlich erkennen lässt. Angesichts des geringen öffentlichen Interesses wird der LNG Antrieb öffentlich kaum diskutiert, sodass die Vor- und Nachteile in der Bevölkerung nicht bekannt sind. Dadurch wird LNG negativ behaftet wahrgenommen. (Bernshausen 2017)

Seit Einführung des Euro-VI-Standards bei Dieselfahrzeugen ist der Vorteil des LNG Antriebs bei der Schadstoffemission immer weiter gesunken. Neuere Diesel-Modelle sind ähnlich schadstoffarm wie LNG NFZ, sodass sich kaum ein Vorteil aus ihnen ziehen lässt. (Umwelt Bundesamt 2020) Aufgrund dieses Umstandes werden beide Antrieben mit sehr geringen Nutzwerten versehen. Der Dieselantrieb erreicht einen Nutzwert von gerade einmal 0,11, der LNG-Antrieb gerade einmal 0,21. Die bessere Bewertung des LNG-Antriebs ist darauf zurückzuführen, dass bei der Verbrennung von Gas weniger Geräusche emittiert, werden als bei einem konventionellen Dieselmotor.

Die Gewinnung des Treibstoffes und auch der Fahrzeuge ist genauso wenig nachhaltig wie bei einem Diesel NFZ. Die Verflüssigung des Gases ist sehr energieintensiv. Hinzu kommt, dass das Gas in speziellen Druckkammern gelagert und transportiert werden muss. Da die meisten LNG Produzenten in den USA, Australien und Katar produzieren, ist es notwendig das Gas über den Seeweg nach Europa zu verbringen. (Siebel 2022) Durch diesen zusätzlichen Seetransport entstehen zusätzliche CO_2 Emissionen. Daraus ergibt sich wie auch beim Diesel keine Nachhaltigkeit des Treibstoffes, weshalb LNG vom Logistikunternehmen mit geringen Punkten innerhalb der NWA bewertet wurde.

6.2.4 Wasserstoff- und Brennzellentechnologie

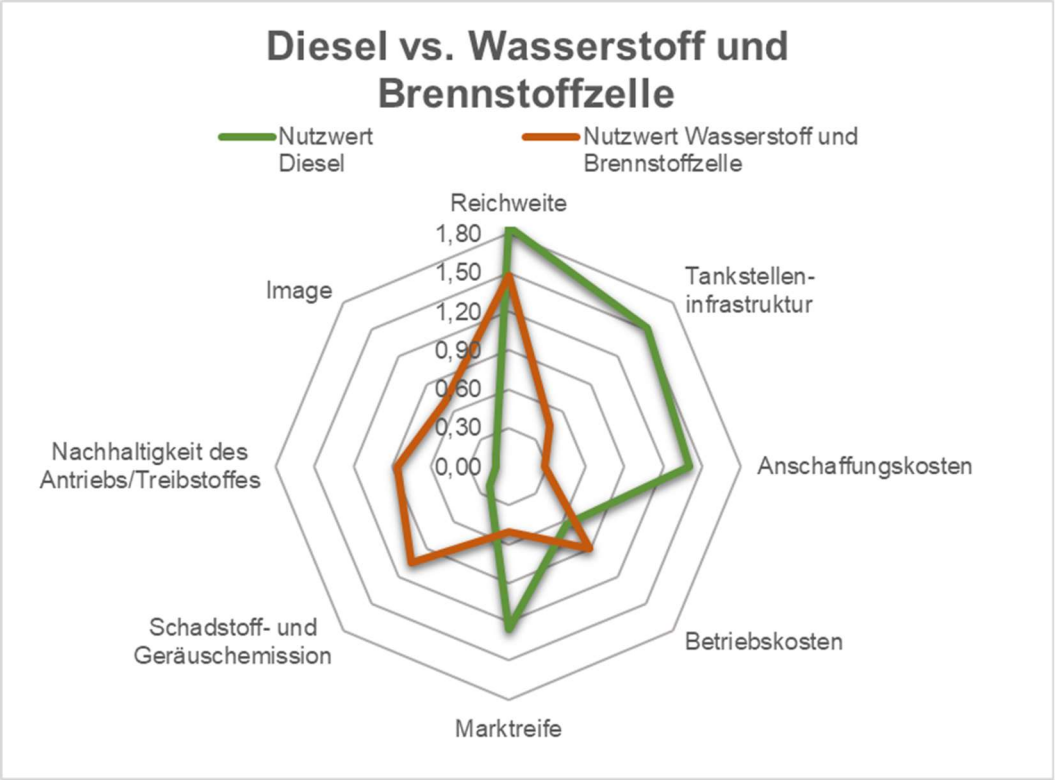

Abbildung 8: Diesel versus Wasserstoff/Brennstoffzelle

Aufgrund der Stoffbeschaffenheit, dem flexiblen Einsatz und des einfachen Transports besitzt Wasserstoff das Potential den Dieselantrieb weitestgehend abzulösen. Nicht nur im Verkehrswesen gibt es Einsatzbereiche für den wiederentdeckten Stoff. Auch in Bereichen wie Stahlproduktion oder in der Chemieindustrie könnte Wasserstoff zum Einsatz kommen.

Zur Herstellung von Wasserstoff wird unter hohem Einsatz von Energie die Elektrolyse vollzogen. Um nachhaltigen und vor allem grünen Wasserstoff herzustellen, bedarf es daher Strom aus erneuerbaren Energien. In Deutschland wird bislang nur rund 40 % des Stromes aus erneuerbaren Energien erzeugt, was dazu führt, dass nicht ausschließlich „grüner“ Wasserstoff hergestellt wird. Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff ist die Dampfreformierung von Erdgas, bei welchem neben Wasserstoff auch CO_2 produziert wird. Bei dem hergestellten Wasserstoff wird von „grauem“ Wasserstoff gesprochen.

Kurzfristig gesehen, um den Übergang zu vollständig grünem Wasserstoff könnte auch „grauer“ Wasserstoff zum Einsatz kommen, da seine Umweltbilanz besser ist als beim konventionellen Dieselantrieb. (vgl. Geitmann 2013, S. 24ff.; Arlt 2017) Aus diesem Grund ist der Nutzwert des Wasserstoffantriebs im Bereich der Nachhaltigkeit trotz des

geringen Anteils an aus erneuerbaren Energien gewonnenem Strom deutlich höher als bei dem Dieselantrieb, wie aus Abbildung 8 zu entnehmen ist.

In der Herstellung von Brennstoffzellen NFZ oder auch Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) gibt es noch große Einsparungspotentiale in Bezug auf die Anschaffungskosten eines solchen NFZ. Bei der Herstellung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnik entstehen hohe Produktionskosten, dies ist vor allem auf den Platinanteil in der Brennstoffzelle zurückzuführen (vgl. Berns et al. 2021, S. 172ff.)

SNF im Bereich der Brennstofftzellentechnologie sind bislang nur bei einigen wenigen Herstellern verfügbar. Eine Serienproduktion besteht bislang bei keinem Hersteller. Es wird damit gerechnet, dass die Kosten für ein FCEV um 500.000 EUR liegen werden. Vergleichsweise günstig ist hingegen der Diesel-LKW. Bei diesem können Modelle bereits ab 90.000 EUR erworben werden. Bei der Anschaffung eines FCEV sollen zukünftig hohe Förderungen durch den Bund einen Anreiz schaffen, um die Nutzung dieser Antriebstechnologie voranzutreiben. (vgl. Wietschel 2019, S. 39; Bennühr 2021) Durch die noch hohen Anschaffungskosten ergibt sich für diese Technologie zum aktuellen Zeitpunkt lediglich ein Nutzwert von 0,28 im Vergleich zum Dieselantrieb mit einem Nutzwert von 1,41. Damit liegt das FCEV im Hinblick auf die Anschaffungskosten deutlich hinter dem konventionellen Dieselantrieb.

Das entsprechende Tankstellennetz befindet sich bereits im Aufbau. In den letzten Jahren wurden knapp 100 Tankstellen aufgeschaltet. Im Vergleich zur Verfügbarkeit von Diesel ist dies jedoch sehr gering. Bis 2030 soll eine geeignete Infrastruktur ausgebaut werden. (H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG 2021) Ein flächendeckender Zugang zur Infrastruktur ist für Wasserstoff noch nicht gegeben, sodass sich Routenplanungen der Unternehmen gerade im Fernverkehr an der bestehenden Infrastruktur orientieren müssen. Dies führt zu einem erhöhten Planungsaufwand. Mit einer Betankungszeit von 10-15 Minuten ist eine Betankung schneller möglich als bei dem herkömmlichen Dieselantrieb. Da die Reichweite eines FCEV noch weit unter dem eines konventionellen Diesel NFZ liegt und daher vermehrte Tankvorgänge notwendig sind, ist auch hier der Nutzwert für wasserstoffbetriebene SNF für das Unternehmen geringer.

Wie bereits erwähnt ist die Reichweite eines FCEV bislang gering. Die Reichweite erster Modelle misst mit Zuladung ca. 500 km. Bereits jetzt wird allerdings von möglichen Reichweiten von über 1000 km je Tankfüllung gesprochen. Mit Erreichung solcher Reichweiten könnte das FCEV eine tatsächliche Alternative zum Diesel-LKW werden. Prognosen lassen bereits jetzt darauf schließen, dass die Entwicklung in diesem Bereich in den nächsten Jahren große Fortschritte machen wird, sodass immer mehr Modelle in Serie produziert werden. (H2-Region Emsland)

Die Kosten je kg Wasserstoff betragen 12,85 EUR. Beim FCEV von Hyzon ist der Verbrauch mit 9-10kg je 100km angegeben, wohingegen bei einem Diesel-LKW 20-30

Liter je 100 km verbraucht werden. (Burgdorf 2020; NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie). Der aktuelle Dieselpreis liegt bei ungefähr 1,90 EUR/Liter. (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) 2022) Um die Vergleichbarkeit der beiden Preise beizubehalten wurden Tankstellenpreise übernommen und keine Großabnehmerpreise. Aufgrund der geringen Anzahl an wasserstoffbetriebenen NFZ und der geringen Abnahme des Stoffes, gibt es noch keine ausreichenden Quellen, welche sich mit Großabnehmerpreisen befassen.

Aus den genannten Verbräuchen sowie Kraftstoffkosten ergibt sich folgende Kostenaufstellung in Tabelle 5:

Antrieb	Durchschnittl. Verbrauch je 100 km	Einheit	Treibstoffpreis je 1 Einheit Stand 21.07.2022	Gesamtkosten je 100 km
Diesel	25	Liter	1,90 €	47,50 €
Wasserstoff	9,5	Kilogramm	12,85 €	122,08 €

Tabelle 5: Kostenvergleich Diesel und Wasserstoff

Aus der vorhergegangenen Tabelle 5 wird ersichtlich, dass der Betrieb eines FCEV aktuell noch teurer ist als der eines Diesel-NFZ. Zukünftig können durch die Nutzung von FCEV Steuern und Mautkosten gesenkt werden. Zudem ist davon auszugehen, dass die Wasserstoffpreise in Zukunft deutlich sinken werden, sodass der Betrieb einen FCEV günstiger wird als der Betrieb eines Diesel-NFZ. Es ist außerdem zu erwarten, dass weitere Abgaben für die Emission von CO_2 im Straßengüterverkehr erhoben werden, da die Klimaziele bis 2030 bzw. 2050 eingehalten werden müssen. Daher ist das FCEV vom herangezogenen Logistikunternehmen besser bewertet worden als der Diesel-LKW, dies lässt sich anhand der Nutzwerte in Abbildung 8 entnehmen.

Im Betrieb emittiert das FCEV lediglich Wasserdampf. Umweltschädliche THG werden im Gegensatz zum Diesel NFZ nicht emittiert. (Salchenegger 2006) Auch bei der Geräuschemission schneidet das FCEV besser ab als ein konventioneller Diesel-LKW. Infolge, dass kein Verbrennungsprozess während des Betriebs erfolgt, entstehen weniger Motorengeräusche, sodass der Betrieb eines FCEV nur mit minimaler Geräuschemission erfolgt.

Zu der Brennstoffzellentechnologie wurden vielfältige Feldversuche durchgeführt, um die Relevanz dieser Technik zu ermitteln. Das öffentliche Interesse ist aufgrund immer weiter steigender Preise von fossilen Kraftstoffen groß und eine Umstellung scheint im Hinblick auf die Klimaziele der EU unausweichlich. Durch zusätzliche Förderung des Bundes und stark gestiegenen Forschungs- und Investitionstätigkeiten der Hersteller

gewinnt die Technologie weiter an Bedeutung, sodass auch die Außenwahrnehmung hoch ist. Dies wird anhand der Abbildung 8 deutlich zu erkennen. Das Image des Dieselantriebs wird durch den zunehmend spürbaren Klimawandel immer schlechter.

6.2.5 Elektro LKW

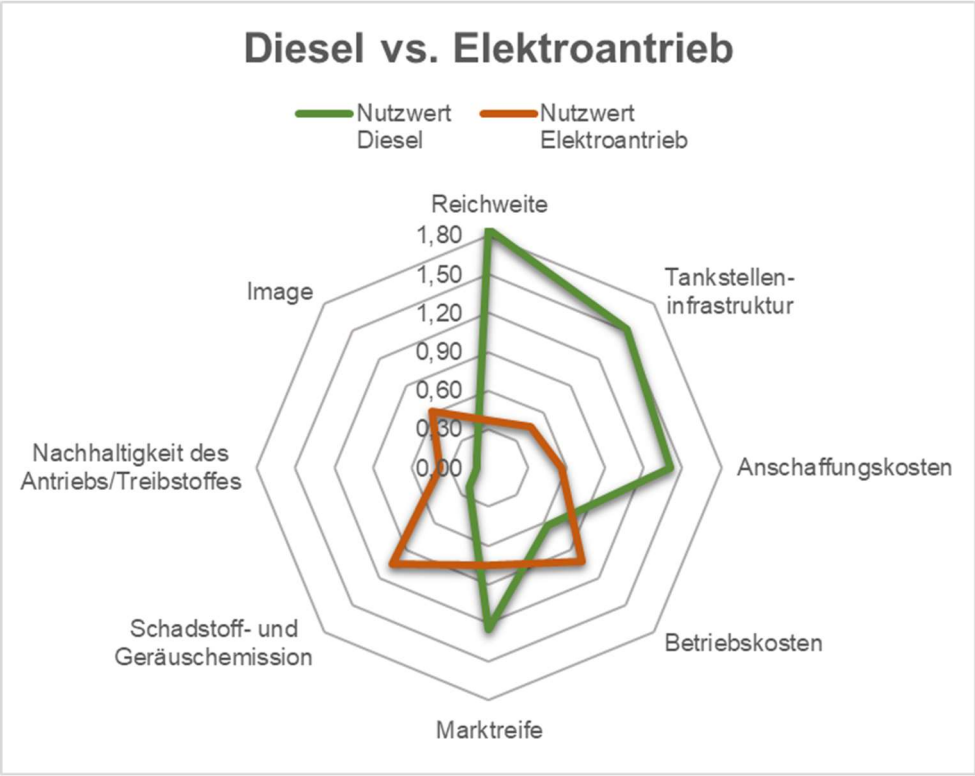

Abbildung 9: Diesel versus Elektroantrieb

Die Elektrifizierung im Personen- und Nutzfahrzeugbereich schreitet immer weiter fort. Namenhaften Hersteller entwickeln stetig neue elektrobetriebene Fahrzeuge. Dieser Trend ist nun auch im Bereich der SFZ angekommen. Bereits jetzt gibt es viele unterschiedliche Modelle in Serienproduktion, welche jedoch im Fernverkehr noch keine Konkurrenz zum konventionellen Dieselantrieb darstellen. Die Gegenüberstellung der Nutzwerte aus Sicht des Logistikunternehmens wird in Abbildung 9 verdeutlicht.

Mit Reichweiten von meist nur 200 – 400 km eignen sich die aktuellen Elektro-LKW (E-LKW) nicht für den Fernverkehr. Daher sind die aktuellen Modelle im Fernverkehr keine Konkurrenz zum Dieselantrieb. Mit einem Nutzwert von gerade einmal 0,37 im Gegensatz zu dem des Diesels von 1,85 besteht noch eine große Diskrepanz der beiden Antriebe. Der Einsatz von E-LKW ist nach aktuellem Entwicklungsstand der Technologie, sowie dem Stand der Ladesäuleninfrastruktur besser für City-Logistik oder Werksverkehre mit festen Strecken möglich. Wegen der geringen Reichweite und des

teils langen Ladeprozesses eignen sich die NFZ für Strecken, an den an Entlade- und Ladestellen aufgeladen werden kann.

Volvo gibt den Ladevorgang für seine Modelle mit ca. 9 Stunden an, mit einem Gleichstromladegerät kann die Dauer auf 2 Stunden verkürzt werden. (Volvo Group Trucks Central Europe GmbH)

Damit liegt hier noch ein großes Problem der Antriebstechnologie. Einsätze der Fahrzeuge müssen viel genauer geplant werden, sodass eine unplanmäßige Routenänderung oder verlängerte Standzeiten zu Problemen führen können. Der Dieselantrieb ist in dieser Hinsicht deutlich flexibler durch den schnellen Tankvorgang und eine hohe Anzahl an Tankstellen.

Die Ladesäuleninfrastruktur für Elektro-PKW ist nahezu flächendeckend gegeben. In den letzten Jahren wurde der Ausbau stark vorangetrieben. Auch LKW können an den Ladestationen geladen werden, da das Anschlusssystem genormt ist und somit eine Ladung von allen PKW- und LKW-Typen zulässt. Laut des Verbandes der Automobilindustrie gibt es Deutschlandweit mehr als 52.000 Ladepunkte, welche hauptsächlich für das Laden von PKW errichtet wurden. (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen 2022)

Bis 2030 werden 14.000 Ladepunkte für E-LKW angestrebt. Nach 4,5 Stunden Fahrtzeit besteht eine gesetzliche Pausenpflicht für LKW-Fahrer. In dieser Zeit könnte mittels Schnellladestation der E-LKW geladen werden. Dazu bedarf es jedoch an wichtigen Dreh- und Angelpunkten einen lückenlosen Ausbau der Ladeinfrastruktur. (Liehr 2022) Gegenüber den knapp 14.000 Tankstellen, an denen zum Teil mehrere hundert LKW abgefertigt werden könnten, sind 14.000 Ladestationen für E-LKW gering, wenn mit einbezogen wird, dass ein Ladevorgang mehrere Stunden andauern kann. Aufgrund dessen wird die Tankstelleninfrastruktur für den Elektroantrieb gerade einmal mit einem Nutzwert von 0,45 bewertet, wohingegen der Dieselantrieb mit einem Nutzwert 1,52 bewertet wird. Da es sich um einen ausschlaggebenden Punkt im Fernverkehr handelt, fällt die Bewertung für den E-LKW sehr schlecht aus.

Die Anschaffungskosten für einen E-LKW liegen deutlich über denen eines Diesel-LKW. Aktuell wird mit den dreifachen Kosten im Vergleich zum Diesel-LKW gerechnet. Die enormen Kosten werden auch bei dem Elektroantrieb durch Förderungen abgefangen. So werden unterschiedliche Förderungen nach Gewichtsklasse der Fahrzeuge ausgeschüttet. (Handelsblatt GmbH 2022)

Ein weiterer Anreiz für die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte ist die Befreiung von der Steuer und der Maut. So wird versucht, die hohen Kosten für die Anschaffung zu kompensieren. Durch diesen Umstand der Förderungen und den geringen Kilowattstunden (kWh) Preis, ist der Betrieb des E-LKW günstiger als der eines Diesel-LKW. Sofern der E-LKW auf dem eigenen Geländegeladen wird, fielen im Jahr 2021

Stromkosten von ca.32,63ct/kWh an. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2021) Anhand Tabelle 6 lässt sich erkennen, dass der E-LKW bei dem gegebenen Strompreis von 2021 in den Betriebskosten günstiger ist als der Diesel-LKW. Hinzu kommt zudem, dass für E-LKW eine Mautbefreiung und Steuervergünstigung besteht, was den Betrieb eines solchen Fahrzeugs noch einmal vergünstigt.

Antrieb	Durchschnittl. Verbrauch je 100 km	Einheit	Treibstoffpreis Stand 21.07.2022	Gesamtkosten je 100 km
Diesel	25	Liter	1,90 €	47,50 €
Strom	110	Kilowattstunde	0,33 €	35,89 €

Tabelle 6: Kostenvergleich Diesel und Elektroantrieb

Aufgrund der geringen Lebensdauer der im E-LKW verbauten Batterien, stehen die Fahrzeuge regelmäßig in der Kritik. Da die Batterien aus teils seltenen Metallen, wie bspw. Lithium und Kobalt, hergestellt werden und deren Entsorgung und Recycling bis heute nicht vollständig möglich ist, stehen die Hersteller vor weiteren Herausforderungen. Zudem wird nur ein Teil des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Energien gewonnen. Der Tankvorgang eines E-LKW wäre nur dann nachhaltig, wenn ausschließlich Ökostrom aus erneuerbaren Energien zur Ladung genutzt würde.

Durch die mediale Aufmerksamkeit des Elektroantriebs gibt es auch immer häufiger Kritik an der Antriebstechnologie. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Entsorgung der Batterien, sowie die eingesetzten Materialien und die Lebenszeit der Batterien stark diskutiert werden. Die Rohstoffe für die Erzeugung der Lithium-Ionen-Batterien, welche in Elektrofahrzeugen verbaut werden, stammen aus teilweise umstrittenen Quellen, wie bspw. dem Kongo. (Prause und Dietz 2020)

Elektrisch betriebene NFZ emittieren keine Schadstoffe. Zudem ist die Geräuschemission dieser Fahrzeuge minimal, weshalb sie sich vor allem für Nacht- und City-Logistik eignen.

6.2.6 Oberleitungs-LKW

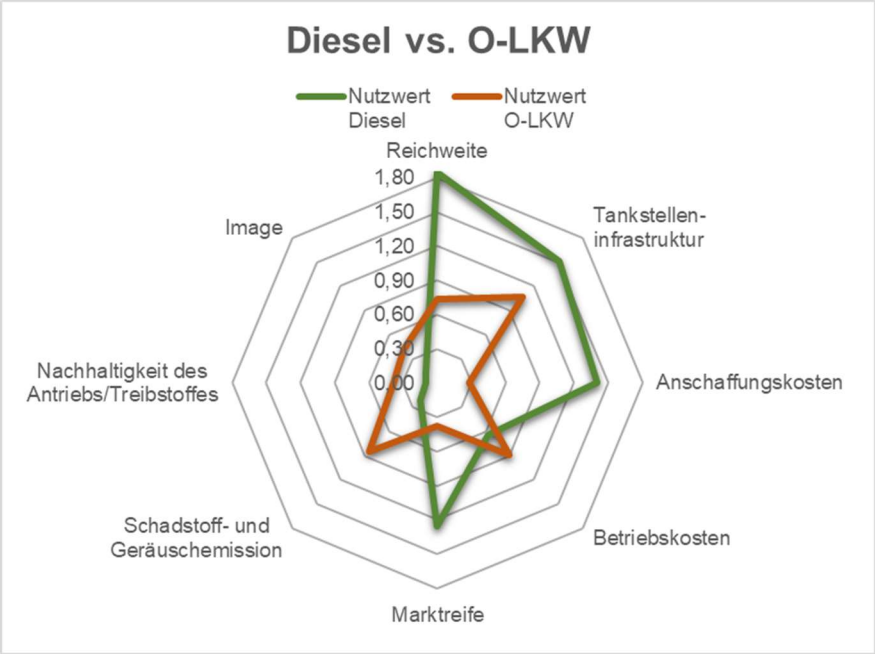

Abbildung 10: Diesel versus O-LKW

Das Pilotprojekt auf der Autobahn 1 soll Erkenntnisse darüber bringen, ob ein Oberleitungsnetz auf deutschen Autobahnen realisierbar und vor allem nachhaltig ist.

Aufgrund der geringen Reichweite von Elektro- und Hybrid- NFZ soll die Oberleitung als Unterstützung der beiden Antriebe dienen.

Da es sich bislang lediglich um Pilotprojekte handelt ist das Streckennetz sehr eingeschränkt. Der O-LKW ist jedoch nicht ausschließlich an das Oberleitungsnetz gebunden. Vielmehr ist auch ein Hybridbetrieb oder ein reiner Elektrobetrieb möglich. Bei dem Betrieb über Hybrid können Reichweiten ermöglicht werden, welche denen des Dieselantriebs ähneln. Im Elektrobetrieb, welcher in Bezug auf die Nachhaltigkeit deutlich besser für den „Green Logistics“-Ansatz geeignet ist, sind die Reichweiten abseits der Oberleitungen sehr gering, wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben wurde. Deshalb wird im Folgenden nur der O-LKW mit Elektroantrieb bewertet.

Die geringe Reichweite zeichnet sich auch in der Abbildung 10 ab. Der O-LKW wird dabei deutlich schlechter bewertet als der Dieselantrieb. Da diesem Entscheidungskriterium eine hohe Gewichtung zufällt, fallen die Nutzwerte für Antriebe mit einer geringen Reichweite sehr niedrig aus.

Die Tankstelleninfrastruktur beschreibt für den O-LKW sowohl Oberleitungsnetze als auch Ladesäulen. Beide Technologien sind bislang noch nicht flächendeckend verfügbar. Dies erschwert den Betrieb eines solchen Fahrzeugs massiv. Jedoch ist zu erwähnen, dass im Gegensatz zum E-LKW bei einem O-LKW mehrere

Lademöglichkeiten bestehen, sodass dieser universaler eingesetzt werden kann. Der O-LKW kann sowohl an herkömmlichen Ladestationen als auch über eine Oberleitung mit Strom gespeist werden. Trotz der beiden Lademöglichkeiten für den O-LKW ist die Infrastruktur sehr gering gegenüber der für den Dieselantrieb.

Der O-LKW emittiert weder während des Anschlusses an die Oberleitung noch im elektrischen Betrieb Schadstoffemissionen. Ebenfalls sind die Geräuschemissionen um ein Vielfaches geringer. Dies schlägt sich auch auf die Nutzwerte der beiden Antriebe nieder. Während der Dieselantrieb nur einen Nutzwert von 0,21 erreicht, hat der O-LKW einen Nutzwert von 0,84 und ist somit um ein Vielfaches Emissionsärmer als der Diesel-LKW. geringer als bei einem herkömmlichen Diesel-LKW. Durch ein entsprechend ausgebautes Oberleitungsnetz könnten im Jahr 12 mio. Tonnen CO_2 vermieten werden. (Köllner 2020)

Zu den Betriebskosten ist aktuell noch keine Prognose möglich, da es sich lediglich um Pilotprojekte handelt. Anzunehmen ist, dass die Nutzung der Oberleitungen auf Basis der verbrauchten kWh vergütet werden wird und ggf. noch eine Netznutzungsgebühr anfällt. In jedem Fall wird die Vergütung leistungsbezogen sein. Sollte ein elektrisch betriebener O-LKW zum Einsatz kommen, ist dieser von Steuer und Maut befreit, da er wie ein E-LKW behandelt wird. Bei einem Hybrid würden Steuern und Maut in geringerer Höhe anfallen als bei einem Diesel-LKW.

Bislang gibt es nur wenige Hersteller, welche O-LKW herstellen. Aufgrund der wenig ausgebauten Infrastruktur werden diese zur als Prototypen zu testzwecken gefertigt. Eine Serienproduktion ist bisher nicht absehbar. Die Kosten für die Anschaffung eines solchen O-LKW sind aktuell nicht bekannt, jedoch ist auch hier die Annahme, dass sich der preisliche Rahmen, den eines E-LKW übersteigen wird, da zusätzliche Technik verbaut werden muss. So werden die O-LKW nicht nur mit einer Batterie, sondern auch zusätzlich mit dem Kopplungssystem für die Oberleitungen ausgestattet. Kurzfristig ist wegen der enormen Kosten nicht damit zu rechnen, dass der O-LKW eine konkrete Alternative zum Diesel-LKW ist. (Allianz pro Schiene e.V.)

Die hohen Anschaffungskosten sind auch hier auf den Herstellungsprozess für die Batterien des Fahrzeugs bezogen. Auch bei der Herstellung eines O-LKW werden seltene Rohstoffe verwendet, welche fossilen Ursprungs sind. Ebenfalls ist der Betrieb der Oberleitung und auch der Ladesäulen nur dann nachhaltig, wenn diese mit 100 % Ökostrom gespeist werden. Da nicht nur „grüner“ Strom in Deutschland in das Stromnetz eingespeist wird, führt dies dazu, dass nicht ausschließlich „grüner“ Strom zur Verfügung steht. (Prause und Dietz 2020) Dennoch ist der O-LKW sowohl in Herstellung und Betrieb nachhaltiger als der konventionelle Diesel-LKW. Dies schlägt sich in den Nutzwerten entsprechend wieder und kann anhand der Abbildung 10 nachvollzogen werden.

Wie zu Beginn angemerkt, handelt es sich bei den aktuell umgesetzten Projekten zum bspw. dem E-Highway lediglich um Pilotprojekte. Diese sollen dazu dienen Politik und Wirtschaft Vorschläge zur Ausweitung dieser Technologie zur Verfügung zu stellen. Ob und inwieweit eine Umsetzung des Oberleitungsnetzes erfolgen wird, ist bislang noch unklar. Die Marktreife für diese Technologie kann noch Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nehmen, vorausgesetzt die Studien überzeugen Politik und Wirtschaft davon, dass es im Hinblick auf einen CO_2 freien Straßengüterverkehr ein geeignetes Mittel ist, um umweltpolitische Ziele zu erreichen. (Bundesanstalt für Straßenwesen)

Bislang wird das Projekt als vielversprechend bewertet. Gerade die Spedition Bode, die das Pilotprojekt auf der A1 begleitet äußert sich durchweg positiv. Auch die Außenwahrnehmung der Bevölkerung wird in den Feldversuch einbezogen und in der abschließenden Beurteilung des Projekts berücksichtigt.

6.2.7 Bio-Treibstoff

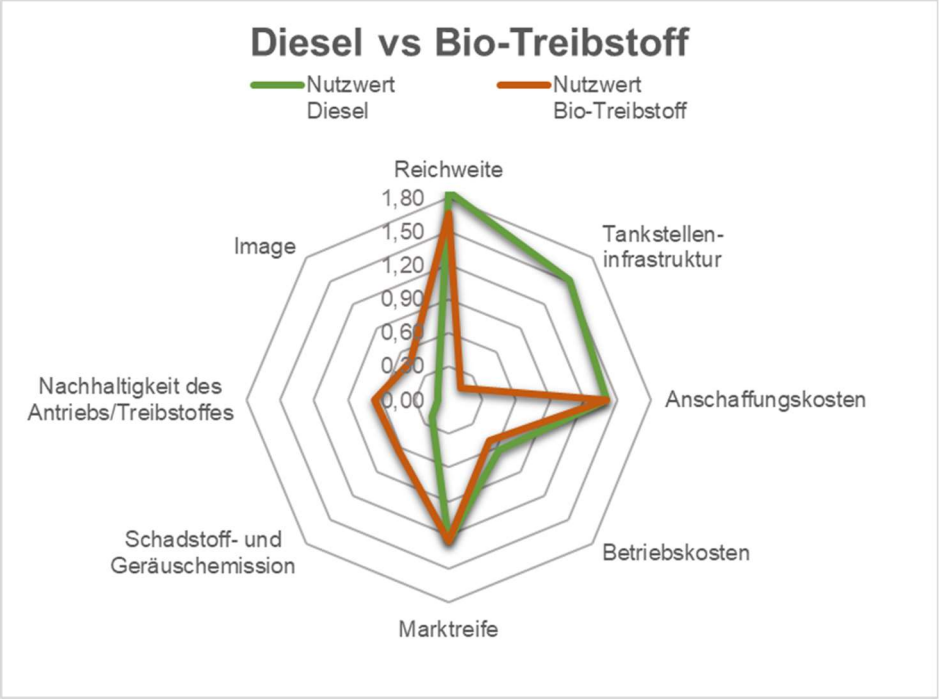

Abbildung 11: Diesel versus Bio-Treibstoff

Biotreibstoff bzw. Biodiesel wird bereits seit Jahrzehnten produziert und für den Betrieb von Nutzfahrzeugen eingesetzt. Bis zum 01.August 2012 war der Biotreibstoff von der Mineralölsteuer befreit, was dazu führte, dass die Nachfrage an Biodiesel vor diesem Datum stark stiegen war. Die Steuerfreiheit wurde zum Stichtag 01.August 2012 gegen die Beimischquote in fossilen Kraftstoffen getauscht. Biodiesel wird seit diesem Stichtag den herkömmlichen Dieselkraftstoffen zu 7 % beigemischt, um den Ausstoß von umweltschädlichen Schadstoffen zu verringern. Biodiesel emittiert mitunter 70-90 %

weniger THG als herkömmlicher Diesel. (Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V. (VDB) 2021) Damit sind Biotreibstoffe deutlich nachhaltiger im Hinblick auf Schadstoffemissionen als herkömmlicher Diesel. Dies lässt sich anhand der Abbildung 11 deutlich erkennen. Hinsichtlich der Geräuschemissionen lassen sich durch den Biotreibstoff keine Einsparungen generieren. Da dieselben Fahrzeuge für Diesel als auch für Biodiesel verwendet werden, sind beide Kraftstoffe im Verbrennungsprozess gleich laut.

Mit der Einführung der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung des Bundesimissionsschutzgesetzes (BIMSchG) im Jahr 2010 dürfen Biotreibstoffe nur noch dann hergestellt werden, wenn deren Herstellung nachhaltig erfolgt. So dürfen bspw. keine Flächen zum Anbau genutzt werden, welche hohen Naturschutzwert oder Kohlenstoffbestand haben. Seit 2011 müssen Biotreibstoffe nach dem BIMSchG zudem besondere Anforderungen auch hinsichtlich ihrer weltweiten Herstellung erfüllen. Die Kraftstoffe müssen mindestens 50 % THG bei der Herstellung gegenüber den herkömmlichen fossilen Kraftstoffen einsparen. Gemäß einer Publikation des Umwelt Bundesamts kann bei der Herstellung von Biodiesel 61 % der THG-Emission gegenüber der Dieselherstellung eingespart werden. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Lichtblau et al. 2012) Entsprechend dieser Gesetze, wird Biodiesel in Deutschland ausschließlich aus nachhaltigen Quellen bezogen. Dies schlägt sich auch in der Bewertung in der NWA nieder.

Nach Auslauf der Steuerfreiheit für Biodiesel verschwand dieser vollständig von deutschen Tankstellen. Bis 2013 konnte Biodiesel an rund 1.900 im Bundesgebiet getankt werden. Heute besteht keine Tankstelleninfrastruktur mehr für reinen Biodiesel. (Deutscher Landwirtschaftverlag GmbH 2013; Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR))

Da der Kraftstoff aktuell nicht an Tankstellen verfügbar ist und aus diesem Grund nur beim Produzenten bezogen werden kann, benötigen Unternehmen, welche diesen nutzen möchten, eine eigene Infrastruktur in Form von eigenen Hof-Tankstellen. Daraus ergibt sich ein Nutzwert von 0,15, welcher im Vergleich zum Diesel mit 1,52 sehr niedrig ausfällt.

Die Großabnehmerpreise in Kalenderwoche 29 im Jahr 2022 betragen 235,2 EUR/100l. (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP) 2022)

Der Verbrauch eines Biodieselbetriebenen NFZ entspricht ungefähr dem eines konventionellen Diesel-NFZ. 1 Liter Biodiesel ersetzt dabei ca. 0,91 Liter Diesel. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)) Daher ist der Verbrauch beim Biodiesel höher als beim Diesel. Durch die nicht mehr vorhandenen Förderungen und Steuererleichterungen ist ein deutlicher Anstieg der Betriebskosten zu erkennen. Im Hinblick auf die aktuellen Betriebskosten ergeben sich folgende Kosten je 100 km wie in der Tabelle 7 zu erkennen ist.

Antrieb	Durchschnittl. Verbrauch je 100 km	Einheit	Treibstoffpreis je 1 Einheit Stand 21.07.2022	Gesamtkosten je 100 km
Diesel	25	Liter	1,90 €	47,50 €
Biodiesel	29,5	Liter	2,35 €	69,38 €

Tabelle 7: Kostenvergleich Diesel und Biodiesel

Aus dem Betrieb mit Biodiesel kann demnach hinsichtlich der Betriebskosten kein Vorteil gezogen werden. Einzig bei der Maut könnte es zukünftig Erleichterungen geben, da diese CO_2 abhängig berechnet werden wird und der Betrieb mit Biodiesel weniger Schadstoff emittiert. Da diese Einsparung jedoch marginal ist, erhält das Biodiesel NFZ nur einen Nutzwert von 0,51, wohingegen das Diesel NFZ einen Nutzwert von 0,64 aufweist und damit besser bewertet wird als das biodieselbetriebene NFZ.

Da viele der heutig gebauten Diesel-LKW auch für den Biodiesel B100 freigegeben sind, gibt es hinsichtlich der Anschaffungskosten und Reichweite eines solchen Fahrzeuges keine Nachteile. Es sind von vielen Herstellern Modelle in der Serienproduktion, sodass sie jederzeit genutzt werden können, sofern eine eigene Infrastruktur für die Betankung vorhanden ist. (Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e. V. (AGQM))

Das Image bei Verbrauchern zum Thema Biotreibstoffe zeigt, dass 69 % der deutschen Verbraucher in einer Studie des UFOP angaben, dass sie Biokraftstoffe befürworten. (TNS Infratest 2016) Dies schlägt sich auch auf die Nutzwerte in der Analyse nieder. Wie anhand Abbildung 11 deutlich wird, ist die Außenwahrnehmung des Biodiesels deutlich bessere als die des fossilen Diesels.

6.2.8 Vergleich der Antriebstechnologien

Nachdem nun der Vergleich zwischen den alternativen Antriebstechnologien mit jeweils dem Dieselantrieb erfolgt ist und die Nutzwerte aus Sicht eines Logistikunternehmens dargelegt wurden, werden die Antriebstechnologien noch einmal gegenübergestellt.

Da der Dieselantrieb nicht zukunftsfähig ist und über kurz oder lang geeignetere Antriebstechnologien entwickelt werden müssen, wird der Dieselantrieb nicht in die Gegenüberstellung aufgenommen.

Ziel der Arbeit ist es alternative Antriebstechnologien zu bewerten und in das Marktgeschehen einzuordnen, um unter „Green Logistics“ Gesichtspunkten eine Nachfolgertechnologie zum konventionell Dieselantrieb zu ermitteln.

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse stellen sich wie in der Abbildung 12 dar:

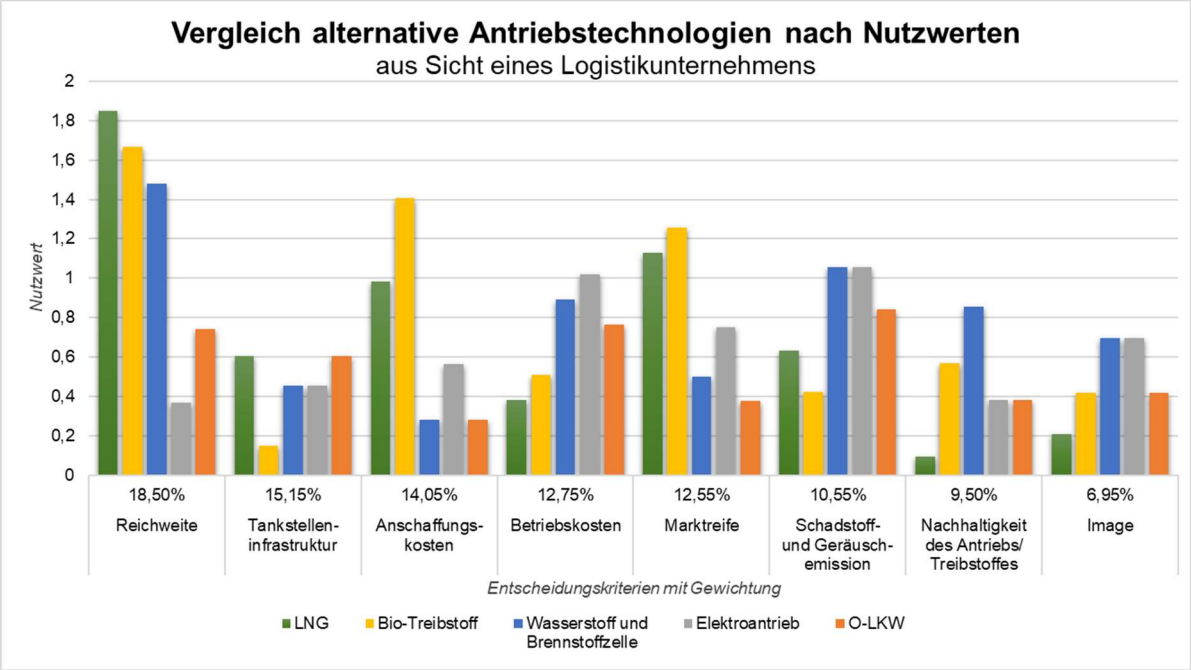

Abbildung 12: Vergleich alternative Antriebstechnologien nach Nutzwerten

Zu sehen sind die jeweiligen Entscheidungskriterien und die Nutzwerte, die je Antriebstechnologie errechnet wurden.

Bei der Reichweite wird deutlich, dass der LNG-Antrieb am besten unter den Alternativen abschneidet. Mit Reichweiten die annähernd an die eines Diesel-LKW heranreichen ist dies im Hinblick auf dieses Kriterium die beste Alternative. Knapp dahinter folgt der Bio-Treibstoff und der Wasserstoff-Antrieb. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie noch nicht weit genug ausgereift sind. Das Potential in diesem Sektor jedoch hoch, sodass auch hier Reichweiten zu erwarten sind, welche sich an die eines Diesel-Antriebs annähernd könnten. Dieser Umstand muss in einigen Jahren noch einmal überprüft werden, um die NWA entsprechend anzupassen.

Die Tankstelleninfrastruktur ist bei dem Elektroantrieb am weitesten ausgebaut. Da die Ladung der Batterien an fast allen PKW-Ladestationen, sowie auf Betriebsgeländen möglich wäre, liegt hier ein großes Potential. Auf Autobahnraststätten, welche für den Fernverkehr eine elementare Rolle spielen, ist die Infrastruktur noch nicht flächendeckend ausgebaut, damit Transporte im Fernverkehr problemlos möglich wären. Die selben Problematiken gibt es für die anderen Antriebstechnologien. Zwar sind teilweise Tankstellen bzw. Ladestationen verfügbar, allerdings sind diese meist mit einem Umweg oder langen Tankzeiten verbunden. Von den Alternativen ist aktuell die Infrastruktur für den LNG Antrieb am besten ausgebaut, darauf folgt der O-LKW, da dieser unabhängig von der Oberleitung auch im Hybridmodus oder Elektromodus

gefahren werden kann. Schlusslicht bildet der Biotreibstoff, da es für diesen aktuell keine Infrastruktur besteht.

Neben Reichweite und Tankstelleninfrastruktur spielen die Anschaffungskosten für die Logistikunternehmen eine große Rolle. Diese sind beim Bio-Treibstoff betriebenen NFZ am geringsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die konventionellen Diesel-LKW häufig ebenfalls mit Biodiesel betrieben werden können, deshalb sind die Anschaffungskosten gleich mit denen eines herkömmlichen Diesel-LKW. Kurz dahinter folgt der LNG Antrieb. Am kostenintensivsten sind aktuell Elektro-, Wasserstoff- und O-LKW. Führende Hersteller kündigen bereits heute Preisreduktionen an, sobald marktfähige Modelle entwickelt wurden und in Serie produziert, werden können.

Im Kontrast zu den Anschaffungskosten stehen die Betriebskosten der einzelnen Technologien. Durch geringe Preise für Strom gegenüber hohen Kosten für Wasserstoff, Biodiesel und LNG ist der Elektroantrieb am besten geeignet. Miteingeflossen in die Betriebskosten sind zudem Kosten für Maut und Steuererleichterungen der jeweiligen Antriebstechnologie. Elektro- und Wasserstoffbetriebene-NFZ sind sowohl von der Maut befreit als erhalten sie Steuervergünstigungen und Förderungen durch den Staat, sodass ihre Betriebskosten deutlich unter denen eines fossilen Antriebs liegen. LNG und Biotreibstoffe erhalten diese Erleichterungen nicht, weshalb ihre Betriebskosten höher liegen als bei „neuen“ Technologien.

Welcher Umstand ebenfalls Einfluss auf die Kosten der Antriebstechnologien nimmt ist die Marktreife der Technologie. Da Elektro- und Wasserstoffantrieb, sowie die Oberleitungstechnologie bislang nur mit Prototypen oder großen Abstrichen in Sachen Preis und Reichweite verfügbar sind, erreichen sie nur einen geringen Nutzwert bei dem Entscheidungskriterium Marktreife. Biotreibstoff betriebene NFZ und LNG NFZ dagegen werden schon in Serie produziert und stehen den Unternehmen somit schon uneingeschränkt zur Verfügung und erreichen dadurch hohe Nutzwerte, wie in Abbildung 12 zu sehen ist.

Schadstoff- und Geräuschemissionen sind sowohl bei Wasserstoff-, als auch bei Elektrofahrzeugen gleichermaßen gering. Beide Antriebe emittieren während des Betriebs keine Schadstoffe. Auch die Motorengeräusche fallen bei diesen Antrieben deutlich geringer aus, sodass sie sich vor allem für Nacht- und City-Logistik sehr gut eignen. Da LNG-, Biotreibstoff und Oberleitungs-NFZ mit Hybridantrieb mit Verbrennungsmotoren arbeiten, entstehen bei diesen Schadstoffen und auch Geräuschemissionen, weshalb diese Technologien langfristig nicht geeignet sind, um Klimaneutralität in Deutschland zu erreichen.

Die beste Außenwahrnehmung wird von FCEV erreicht. Das liegt vor allem daran, dass bei E-LKW die öffentliche Debatte geführt wird, wie die Batterien nach ihrer Nutzung recycelt werden können. Bei dem Bio-Treibstoff, sowie LNG entstehen weiterhin zwar geringere Schadstoffe, doch erfüllen beide Antriebe nicht den Anspruch von Politik,

Bevölkerung und Wirtschaft nach einem CO_2-neutralen Straßengüterverkehr. Bei den O-LKW spielt der Aufbau der kostenintensiven Infrastruktur und Wartung der Oberleitungen eine große Rolle für das Image des Antriebs.

Aus der sich im Anhang befindlichen NWA und den darin errechneten Nutzwerten ergibt sich die Rangfolge der Antriebstechnologien wie in Tabelle 8 dargestellt:

1	Bio-Treibstoff
2	Wasserstoff-und Brennstoffzelle
3	LNG
4	Elektroantrieb
5	O-LKW

Tabelle 8: Rangfolge der alternativen Antriebsformen nach Nutzwerten

Rein nach Nutzwerten betrachtet ist die aktuell beste Alternativtechnologie zum Dieselantrieb der Biotreibstoff und dicht gefolgt darauf die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Mittelfristig ist diese Rangfolge denkbar, um schnell und vor allem ohne großen Aufbau einer neuartigen Infrastruktur CO_2-Emissionen zu verringern. Bei der Verbrennung von Biodiesel entstehen jedoch weiterhin THG, welche für einen beschleunigten Treibhauseffekt sorgen. Somit ist diese Alternative für die Klimaziele bis 2050 ungeeignet. Da bislang jedoch keine vergleichbaren Alternativen vorliegen und der Betrieb eines normalen Diesel NFZ fast immer auch mit Biodiesel möglich ist, sollte die Umstellung vollzogen werden, um schnellstmöglich Schadstoffemissionen zu verringern.

In den nächsten Jahren wird die Forschung auf dem Gebiet der Brennstoffzellentechnologie und Elektrofahrzeuge allem Anschein nach, noch weitere große Fortschritte machen, sodass bis 2030 viele Alternativen verfügbar bzw. die jetzigen Alternativen entsprechend verbessert sein werden.

Langfristig gesehen kann das Logistikunternehmen einen Technologiemix nutzen, welcher auf die Bedürfnisse des Unternehmens abgestimmt ist.

Denkbar wären dabei FCEV für Fernverkehr und E-LKW für den Regionalverkehr, Werksverkehr und City-Logistik.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend ist zu betonen, dass gegenwärtig im Straßengüterverkehr keine marktfähige Technologie besteht, welche dem direkten Vergleich zum Dieselantrieb standhalten kann. Auch wenn bereits einige vielversprechende Antriebstechnologien erforscht werden, erreichen noch keine opportunen Standards, welche hinsichtlich ihres ökologischen und ökonomischen Nutzens mit denen des Dieselantriebs vergleichbar sind. Bei fast allen Alternativen gibt es Einbußen hinsichtlich Reichweite und Infrastruktur, was dazu führt, dass ein flächendeckender Einsatz der Technologien noch nicht möglich ist. Zudem liegt ein weiterer Schlüsselfaktor in der Produktion der Fahrzeuge und deren Kraftstoffen. Emissionsfreie Prozessketten sind aktuell kaum verfügbar, sodass sich auch bei schadstoffarmen Fahrzeugen eine gewisse CO_2-Belastung nicht vermeiden lässt.

In der NWA wurden die wesentlichen Entscheidungskriterien gegenübergestellt und bewertet. Dies geschah aus Sicht eines Logistikunternehmens, da diese Unternehmen besonders stark von den immer größer werdenden Restriktionen und steigenden Preisen betroffen sind.

Die Ergebnisse der NWA zeigen, dass die Kosten für die alternativen Antriebsformen aktuell noch sehr hoch sind. Die Anschaffungskosten für FCEV und E-NFZ übersteigen die Kosten eines Diesel-NFZ um ein Vielfaches. Aus diesem Grund werden immer weitere Förderungen durch die Regierung ermöglicht. Dadurch soll ein schneller Ausbau der Technologien und deren Akzeptanz bei Logistikunternehmen gefördert werden. Zukünftig ist damit zu rechnen, dass Förderungen dieser Art weiter zunehmen werden und diese auch mit dem Erscheinen marktreifer Antriebstechnologien in Anspruch genommen werden.

Auch bei den Betriebskosten ist mit einem starken Rückgang der Kosten zu rechnen. Wasserstoff und auch Strom aus erneuerbaren Energien wird in den nächsten Jahren günstiger werden, sodass sich die Investition in alternative Antriebe lohnen wird. Mit Blick auf die stark gestiegenen Dieselpreise in diesem Jahr, werden Alternativtechnologien immer notwendiger. Zum Teil auch, um eine Konkurrenz zum konventionellen Diesel zu schaffen und somit Preisdruck auf die Produzenten von Diesel auszuüben.

Mit der zunehmenden CO_2 Besteuerung wird es darüber hinaus dazu kommen, dass der Betrieb eines Diesel-LKW unwirtschaftlich wird und zwangsläufig neue Technologien den alten Antrieb ablösen müssen. Steigende Restriktionen und Abgaben auf CO_2 werden den Betrieb von Diesel NFZ weiter verteuern.

Wiederkehrende und immer fatalere Naturkatastrophen machen zusätzlich deutlich, wie wichtig ein Handeln bereits jetzt ist, um die Auswirkungen des Klimawandels abzudämpfen. Bereits mittelfristig könnte durch den Einsatz von Biodiesel die CO_2-Belastung deutlich gesenkt werden. Eine entsprechende Infrastruktur besteht zwar

aktuell nicht, da der Kraftstoff jedoch bereits einmal an den Tankstellen zu finden war, wäre eine Reaktivierung durchaus denkbar. Mithilfe dieses Treibstoffes könnten 70-90 % der schädlichen Emissionen gegenüber dem Dieselantrieb eingespart werden. Auf lange Sicht gesehen, müssten Biotreibstoffe weiterentwickelt werden. Die aktuell hergestellten Treibstoffe bergen das Risiko landwirtschaftliche Flächen zu belegen, welche für die Nahrungsmittelindustrie gebraucht werden und stehen somit in Konkurrenz zu dieser.

Langfristig sind nur Antriebstechnologien zu berücksichtigen, welche vollkommen Schadstoffemissionsneutral betrieben werden können. Auch in der Herstellung der NFZ muss die Nachhaltigkeit erhöht werden. Der Verbau von seltenen Rohstoffen führt zu einem Konflikt in der Nachhaltigkeit. Da es sich bei Kobalt, Platin und Lithium, nicht um nachwachsende Rohstoffe handelt, werden auch zukünftig Probleme mit der Beschaffung auftreten. Auch für die Entsorgung und das Recycling der Fahrzeuge werden neue Strategien und Techniken benötigt, um gerade bei seltenen Rohstoffen einen hohen Nutzungsgrad zu generieren. Vor diese und viele weitere Probleme werden die Hersteller in den nächsten Jahrzehnten gestellt werden. Da all diese Problematiken bereits bekannt sind, werden die Hersteller von NFZ neue Prozesse entwickeln müssen, um weiterhin Konkurrenz- und Zukunftsfähig zu sein.

Das wahrscheinlich größte Potential birgt die Wasserstoff- und Brennzellentechnologie, da Wasserstoff aus erneuerbaren Energien hergestellt werden kann und zudem bei der Verbrennung nur Wasserdampf emittiert wird. Ein entscheidender Punkt dieser Technologie sind bislang die hohen Herstellungskosten für das NFZ und der hohe Wasserstoffpreis. Perspektivisch ist anzunehmen, dass sich beide Kosten deutlich senken werden, sodass die Technologie auch dem breiten Markt zugänglich gemacht werden. Förderungen und Mautbefreiung sorgen zusätzlich dafür, dass die Verbreitung weiter vorangetrieben wird. Prototypen zeigen bereits jetzt, dass hohe Potential in der Technologie liegt. Erste Hersteller geben bereits Reichweiten bis zu 1000 km je Tankfüllung an. Mit dieser Reichweite wären FCEV reale Alternativen zum Dieselantrieb.

Der O-LKW und der LNG Antrieb werden aller Voraussicht nach nicht für den Wechsel der Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr sorgen.

Für den O-LKW wären deutlich zu hohe Investitionskosten und Kosten für die Wartung der Anlagen notwendig. Zudem müsste administrativ koordiniert werden, wie die Nutzung an den Betreiber vergütet wird. Die erhöhte Technologie in den Fahrzeugen selbst, würde zu einem starken Anstieg an Kosten und Gewicht der NFZ führen. Sollte ein Ausbau dieser Technologie jedoch weiter vorangetrieben werden und werden nur Elektro- und keine Hybridfahrzeuge für den Betrieb genutzt, können deutliche Einsparungen hinsichtlich CO_2-Emission stattfinden.

Der LNG LKW ist keine konkrete Option, um den Diesel-LKW abzulösen. Aufgrund der Schadstoffemission kann diese Technologie nicht die Lösung für einen nachhaltigen

Straßengüterverkehr sein. Wie bereits während der NWA erwähnt, werden auch bei der Verbrennung von LNG Schadstoffe emittiert. Bei Dieselmodellen mit neusten Schadstoffstandards sind es ungefähr gleich hohe Belastungen wie bei einem LNG NFZ, sodass sich kein Vorteil aus dem Betrieb eines LNG NFZ ziehen lässt.

Zusammenfassend ist deshalb zu sagen, dass zwar aktuell noch keine ebenbürtige Antriebstechnologie im Vergleich zum Diesel-LKW besteht, allerdings sind bereits viele Hersteller in den letzten Schritten der Forschung. Alternative Antriebe werden uns noch viele Jahrzehnte beschäftigen und weiter an Wichtigkeit gewinnen. Die Forschung in diesem Bereich ist noch lange nicht ausgeschöpft und wird sich stetig weiterentwickeln.

Das BMVI stellte Ende 2020 bereits einen Fahrplan für die Umstellung auf alternative Antriebstechnologien vor. Nachfolgend in der Abbildung 13 wird dieser dargestellt.

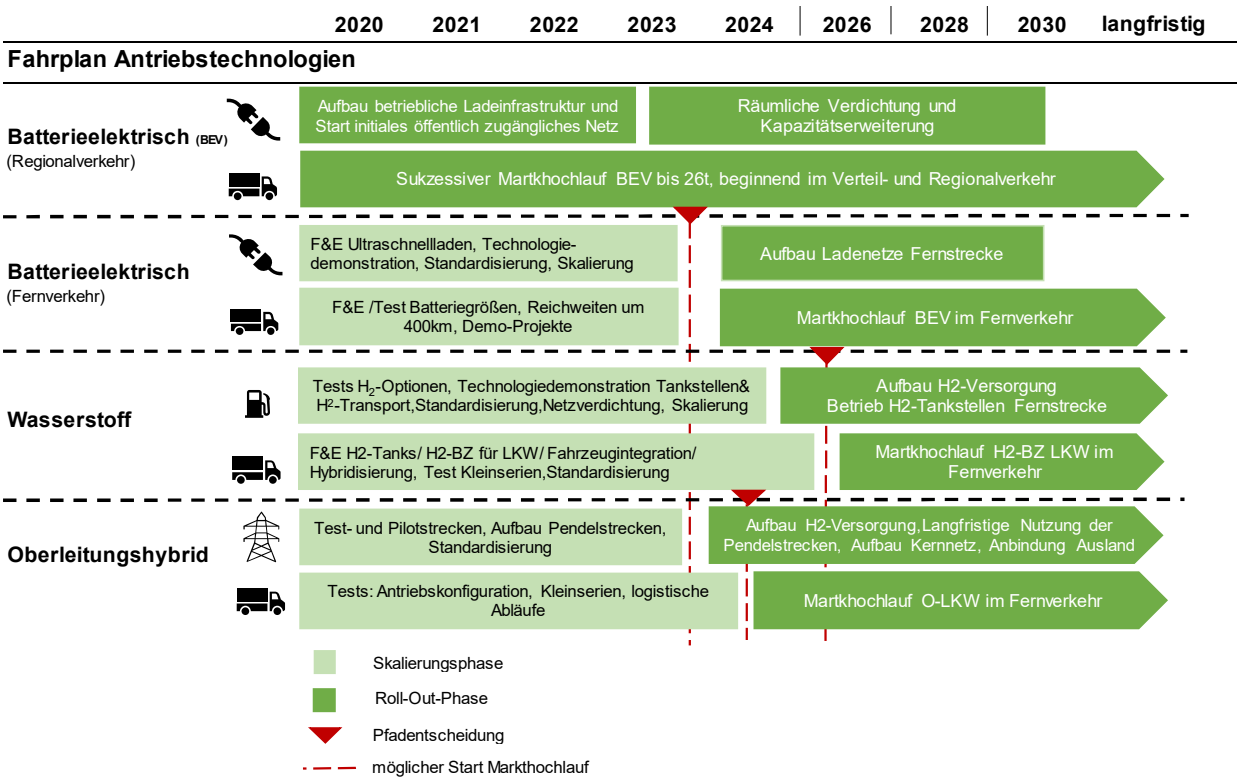

Abbildung 13: Fahrplan Antriebstechnologie des BMVI (vgl. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) 2022, S. 15)

Wie ersichtlich wird, ist die Entwicklung im Bereich der Elektroantriebe bereits stark vorangeschritten. Regionalverkehre sind bereits möglich, sofern die entsprechende Ladeinfrastruktur entlang der Strecke zur Verfügung steht. Wohingegen zu erwarten ist, dass sich die Brennstoffzellentechnologie und Oberleitungstechnologie noch bis Ende 2024 in der Forschungsphase befindet.

Eine Nachfolge zum Dieselantrieb wird nach heutigem Kenntnisstand nicht ein einziger Alternativantrieb sein. Vielmehr werden viele unterschiedliche Technologien auf Deutschlands Straßen zu finden sein. Je nach Art des Transports und der Strecke werden unterschiedliche Antriebstechnologien zum Einsatz kommen.

8 Fazit

„Ich glaube an das Pferd. Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung.“

(Wilhelm II, letzter deutscher Kaiser, 1859-1941)

Wird das o.g. Zitat auf die heutige Zeit übertragen, so würde dies wahrscheinlich lauten: „Ich glaube an den Dieselantrieb. Alternative Antriebstechnologien sind nur eine vorübergehende Erscheinung“.

Letztlich ist auf Grundlage dieser Arbeit schon zum jetzigen Zeitpunkt offensichtlich, dass der Dieselantrieb eine auslaufende Technologie ist. Klimawandel und die dadurch erhobenen Klimaziele sorgen dafür, dass sich ein Wandel einstellen muss. Förderungen und Bestrebungen der Politik den Wandel zu unterstützen, führen zu einer größeren Akzeptanz und bei Abfederung der teils enormen Mehrkosten im Vergleich zum Dieselantrieb.

Eine Umstellung der Antriebe ist aufgrund der geringen Marktreife der Alternativtechnologien nach aktuellem Stand nur begrenzt möglich. Geringe Reichweiten und Tankstellen- bzw. Ladeinfrastruktur führen dazu, dass eine lückenlose Nutzung der Antriebe nicht möglich ist.

Da gerade im Fernverkehr die NFZ stundengenau getacktet sind, erschweren Tankstellen- und Ladestellensuche die Disposition von Routen. Hinzu würden bspw. bei einem E-LKW die langen Ladezeiten kommen, welche abgefangen werden müssen.

Wie aus dieser Arbeit zu entnehmen ist, wird bereits an Konzepten zum Infrastrukturaufbau gearbeitet. Bis diese jedoch flächendeckend ausgeweitet sind, kann der Aufbau noch einige Jahre in Anspruch nehmen. Für diese Übergangszeit würden sich bereits marktreife Technologien anbieten bei denen zwar THG emittiert werden, jedoch nicht im gleichen Umfang wie bei dem konventionellen Dieselantrieb. Sowohl LNG als auch Biodiesel NFZ wären heute bereits erhältlich und würden mittelfristig eine Erleichterung der Triebhausgasemission mit sich bringen. Langfristig gesehen werden jedoch Antriebe wie E-LKW, FCEV und O-LKW den Markt dominieren und zu einem grüneren Transportwesen führen.

Daraus lässt sich die zu Beginn genannte Forschungsfrage nicht eindeutig beantworten. Zwar können bereits jetzt Prognosen gegeben werden, wie sich der Markt in den kommenden Jahren entwickeln wird, jedoch gibt es keine allgemeingültige Antwort welche Antriebstechnologie das Potential hat den Dieselantrieb vollends abzulösen.

Aus der Analyse ergibt sich, dass ein Technologie-Mix aus unterschiedlichen Antriebstechnologien für die Anforderungen eines Logistikunternehmens am sinnvollsten erscheint, um den „Green Logistics“-Ansatz auszuweiten.

Auf kurzen Strecken sind Elektrofahrzeuge geeignet, da sich die Reichweite dieser NFZ in naher Zukunft nicht exorbitant erhöhen lässt. Besonders bei Nachtbelieferungen und

City-Logistik kann der Antrieb genutzt werden, um Geräusch- und Schadstoffemissionen zu minimieren. Auf Mittelweiten- und Langstrecken können FCEV zum Einsatz kommen, da schon heute deutlich ist, dass die Reichweiten sich deutlich erhöhen lassen. O-LKW machen immer dort Sinn, wo Regelverkehre gefahren werden auf dessen Strecken das Oberleitungsnetz ausgebaut ist.

Aufgrund ihrer THG-Emission werden Biotreibstoff und LNG zukünftig keine übergeordnete Rolle mehr im Verkehrssektor spielen.

Abschließend ist also die Forschungsfrage

„Welche erneuerbare Antriebstechnologie kann zukünftig den konventionellen Dieselantrieb ablösen, um unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten eine Verbesserung für Unternehmen und Umwelt darzustellen?“

wie folgt zu beantworten:

Ein Technologie-Mix aus Elektroantrieb, Oberleitungs-LKW und Brennstoffzellen-NFZ wird den Dieselantrieb in den nächsten 20 Jahren ablösen und sorgt somit für eine maximale Minimierung der THG Emission und trägt demzufolge dazu bei die „Green Logistics“ weiter voranzutreiben. Zur kurzfristigen Minimierung der THG Emissionen können Biodiesel und LNG Abhilfe schaffen und den Zeitraum bis zur Marktreife anderer Technolgien überbrücken.

9 Literaturverzeichnis

Adolf, Jörg; Lenz, Barbara; Lischke, Andreas; Knitschky, Gunnar (2016): Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016. Hg. v. Shell Deutschland Oil GmbH. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/312217773_Shell_Nutzfahrzeug-Studie_Diesel_oder_Alternative_Antriebe_-_Womit_fahren_Lkw_und_Bus_morgen, zuletzt geprüft am 27.07.2022.

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (Hg.) (2022): Spritpreis: Benzin billiger, Diesel unverändert. Online verfügbar unter https://www.adac.de/news/aktueller-spritpreis/, zuletzt aktualisiert am 20.07.2022, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Allianz pro Schiene e.V. (Hg.): Oberleitungs-Lkw. Online verfügbar unter https://www.allianz-pro-schiene.de/glossar/oberleitungs-lkw/#:~:text=Bei%20einem%20Oberleitungs%2DLkw%2C%20auch,Dekarbonisierung%20des%20wachsenden%20Stra%C3%9Feng%C3%BCterverkehrs%20beitragen., zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Allianz pro Schiene e.V. (2020): Klimavorsprung der Schiene wird immer größer. Bahnen nutzen technischen Fortschritt deutlich besser als andere Verkehrsträger. Berlin. Online verfügbar unter https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/klimavorsprung-der-schiene-wird-immer-groesser/, zuletzt aktualisiert am 30.12.2020, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Amazon (Hg.): Transport. Elektrifizierung unserer Lieferflotten. Online verfügbar unter https://nachhaltigkeit.aboutamazon.de/umwelt/nachhaltige-betriebsablaufe/nachhaltiger-transport, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e. V. (AGQM) (Hg.): Freigaben der Nutzfahrzeughersteller für den Betrieb mit Biodiesel (B20 | B30 | B100). Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP); Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V. (VDB). Online verfügbar unter https://www.agqm-biodiesel.de/application/files/4715/2992/5789/WEB_AGQM_0216_FREIGABEN.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Arlt, Dr.-Ing. Wolfgang (2017): Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr. Hg. v. Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik -Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. gefördert durch BMVI. Erlangen. Online verfügbar unter https://www.tvt.tf.fau.de/files/2018/11/lohc-lkw_bericht_final_teil_1.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Baumgarten, Helmut (2008): Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen. Unter Mitarbeit von B. V. L. BVL e.V. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=364427.

Bennühr, Sven (2021): Bahn frei für den Wasserstoff-Lkw. Hg. v. Deutsche Verkehrs-Zeitung. Online verfügbar unter https://www.dvz.de/dossiers/impfstoff-logistik/detail/news/bahn-frei-fuer-den-wasserstoff-lkw.html, zuletzt aktualisiert am 02.03.2021, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Berns, Karsten; Dressler, Klaus; Kalmar, Ralf; Stephan, Nicole; Teutsch, Roman; Thul, Martin (Hg.) (2021): Commercial Vehicle Technology 2020/2021. Proceedings of the 6th Commercial Vehicle Technology Symposium. 1st ed. 2021. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg (Springer eBook Collection).

Bernshausen, Thorsten (2017): LNG - Eine Aussicht für die Zukunft. Hg. v. Westsächsische Hochschule Zwickau. Zwickau. Online verfügbar unter https://libdoc.fh-zwickau.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/10616, zuletzt aktualisiert am 23.08.2017, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Brunnengräber, Achim (Hg.) (2020): Baustelle Elektromobilität. Sozialwissenschaftliche Perspektiven auf die Transformation der (Auto-)Mobilität. Unter Mitarbeit von Tobias Haas. 1st ed. Bielefeld: transcript (Edition Politik).

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.): Oberleitungs-Lkw. Pilotstrecken zum e-Highway. Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter https://www.bast.de/Forschungsplanung/DE/Mobilitaet/Beitr%C3%A4ge/Lkw.html, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hg.) (2022): Lkw-Maut. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 17.07.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hg.): Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. Wegweiser in ein klimaneutrales Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050#:~:text=Die%20deutsche%20Bundesregierung%20hat%20mit,Klimaschutzziele%20best%C3%A4tigt%20und%20weiter%20pr%C3%A4zisiert., zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2021): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter

2020/21. Intraplan Consult GmbH. München/Köln. Online verfügbar unter https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/Mittelfristprognose_Winter_2020_2021.pdf;jsessionid=3B1554ADB4DE9DD5A4602B282069C602.live21324?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) (Hg.) (2021): Roadmap – Markthochläufe alternativer Antriebe und Kraftstoffe aus technologischer Perspektive. Berlin. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG2_Technologie_Roadmap.pdf.

Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) (Hg.) (2022): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hg.) (2021): Der Strompreis. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/strompreise-bestandteile.html, zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.) (2022): Elek-tro-mo-bi-li-tät: Öf-fent-li-che Ladein-fra-struk-tur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html, zuletzt aktualisiert am 01.06.2022, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG) (Hg.) (2021): Erdölförderung in Deutschland. Unter Mitarbeit von Martina Altmann. Online verfügbar unter https://www.bveg.de/die-branche/erdgas-und-erdoel-in-deutschland/erdoel-in-deutschland/, zuletzt aktualisiert am 10.01.2022, zuletzt geprüft am 17.04.2022.

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. (Hg.) (2022): Logistikumsatz und Beschäftigung. Bedeutung der Logistik für die deutsche Wirtschaft. Online verfügbar unter https://www.bvl.de/service/zahlen-daten-fakten/umsatz-und-beschaeftigung#:~:text=Bedeutung%20der%20Logistik%20f%C3%BCr%20die,dessen%20Besch%C3%A4ftigtenzahl%20um%20das%20Dreifache., zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Burgdorf, Jan (2020): Der Löwe brüllt wieder. In: *Trucker* (07), S. 20–27. Online verfügbar unter

https://www.man.eu/ntg_media/media/content_medien/microsite/pdfs/Die_neue_MAN_TG_Presseartikel_Trucker_Supertest.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Daimler Truck AG (Hg.): Der EActros und seine Services. Mehr als ein Truck. Online verfügbar unter https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html#:~:text=Der%20eActros%20bringt%20es%20dank,zudem%20emissionsbasierte%20Fahrverbote%20in%20St%C3%A4dten., zuletzt geprüft am 06.08.2022.

Deckert, Carsten (Hg.) (2016): CSR und Logistik. Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Management-Reihe Corporate Social Responsibility). Online verfügbar unter http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1498368.

Deckert, Prof. Carsten; Fröhlich, Prof. Elisabeth (2014): Green Logistics: Framework zur Steigerung der logistischen Nachhaltigkeit. Hg. v. Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. Düsseldorf,Köln. Online verfügbar unter https://www.bme.de/fileadmin/_horusdam/691-SCMA_Green_Logistics.pdf, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Deutsche Industrie- und Handelskammertag (DIHK) (Hg.) (2022): Explodierende Energiepreise aktuell sehr große Herausforderung für die Wirtschaft. Immer weiter steigende Strom- und Energiepreise machen vielen Unternehmen zu schaffen. Online verfügbar unter https://www.dihk.de/de/aktuelles-und-presse/tdw/explodierende-energiepreise-aktuell-sehr-grosse-herausforderung-fuer-die-wirtschaft-67882, zuletzt aktualisiert am 17.03.2022, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Deutsche Post DHL Group (Hg.) (2021): Nachhaltigkeitsfahrplan. Zahlen & Fakten. Online verfügbar unter https://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/de/media-center/responsibility/dpdhl-nachhaltigkeitsfahrplan-zahlen-fakten.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Deutscher Landwirtschaftverlag GmbH (Hg.) (2013): Reiner Biodiesel als Konkurrenz zu fossilem Diesel abgeschafft. Online verfügbar unter https://www.agrarheute.com/energie/reiner-biodiesel-konkurrenz-fossilem-diesel-abgeschafft-461810#:~:text=B100%20wurde%20insbesondere%20von%20Speditionsunternehmen,Tankstellen%20bundesweit%20reinen%20Biodiesel%20tanken., zuletzt aktualisiert am 14.01.2013, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Deutsches Netzwerk Wirtschaftsethik (DNWE) – EBEN Deutschland e. V (Hg.) (2018): Bioökonomie und Ethik. Berlin. Online verfügbar unter https://d-nb.info/1172741891/34#page=52, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Die Bundesregierung (Hg.) (2021): Anreiz für weniger CO2-Emissionen. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134, zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Die Bundesregierung (Hg.) (2022): Volle Ladung Klimaschutz. Wir fördern klimaschonenden Verkehr. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschonender-verkehr-1790050, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Drews, Günter (2007): Lexikon der Projektmanagement-Methoden. 1. Auflage. München: Rudolf Haufe Verlag GmbH & Co. KG (Haufe Projektmanagement). Online verfügbar unter https://www.wiso-net.de/document/HAUF,AHAU,VHAU__9783448080520285.

DSLV Bundesverband Spedition und Logistik e. V. (Hg.) (2014): BMVI veröffentlicht Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Online verfügbar unter https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/id/li_fdih9l5gzg.html#:~:text=Der%20G%C3%BCterverkehr%20in%20Deutschland%20wird,G%C3%BCterverkehrs%20%C3%BCber%20die%20Stra%C3%9Fe%20rollen., zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Eckey, Hans-Friedrich; Stock, Wilfried (2000): Verkehrsökonomie. Eine empirisch orientierte Einführung in die Verkehrswissenschaften. Wiesbaden: Gabler Verlag (Springer eBook Collection).

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue (Hg.) (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf, zuletzt geprüft am 07.08.2022.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.): Biodiesel. gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/biodiesel, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.): Biokraftstoff Nachhaltigkeitsverordnung Gesetze und Verordnungen. Die Nachhaltigkeitsverordnung für Biokraftstoffe. gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter https://bioenergie.fnr.de/klimaschutz/gesetze-verordnungen-richtlinien/gesetzeslage/biokraftstoff-nachhaltigkeitsverordnung, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH (Hg.) (2022): Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein. Projektbeschreibung. Online verfügbar

unter https://www.ehighway-sh.de/de/projektbeschreibung.html, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Geitmann, Sven (2013): Wasserstoff-Autos. Was uns in Zukunft bewegt. Oberkrämer-Schwante: Hydrogeit Verlag. Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6747231, zuletzt geprüft am 21.07.2022.

Gieße, André (2017): Längerer Steuerrabatt für CNG, LNG und LPG. Hg. v. verkehrs RUNDSCHAU. Online verfügbar unter https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/nfz-fuhrpark/laengerer-steuerrabatt-fuer-cng-lng-und-lpg-2988924, zuletzt aktualisiert am 14.06.2017, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Grimme, Christian; Güntner, Jochen (2018): Ursachen des Rohölpreisanstiegs seit 2016. In: *Wirtschaftsdienst* 98 (8), S. 605–607. Online verfügbar unter https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2018/heft/8/beitrag/ursachen-des-rohoelpreisanstiegs-seit-2016.html, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Gruden, Dušan (2008): Umweltschutz in der Automobilindustrie. Motor, Kraftstoffe, Recycling. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch). Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=747380.

H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG: Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland von 2018 bis 2021. Hg. v. zitiert nach de.statista.com: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstofftankstellen-in-deutschland/. Online verfügbar unter https://h2.live/presse/, zuletzt geprüft am 03.07.2022.

H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG (Hg.) (2021): Wasserstoffbetankung von Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick. Förderung durch COHRS,Hydrogen Mobility Europe, BMVI. Online verfügbar unter https://h2-mobility.de/wasserstoffbetankung-im-schwerlastverkehr/, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

H2-Region Emsland (Hg.): Die HyLand-Region Emsland. Erfolgreicher Abschluss des HyExperts-Projekts. gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Online verfügbar unter https://h2-region-emsland.de/das-hyexperts-projekt/, zuletzt geprüft am 29.07.2022.

H2-Region Emsland (Hg.): Wasserstoff-und Brennstoffzellen LKW. Hersteller, Fahrzeuge, Entwicklungen - ein Überblick. Online verfügbar unter https://h2-region-emsland.de/2021/08/31/wasserstoff-lkw/, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Handelsblatt (Hg.) (2022): Ölpreis steigt: Autofahren und Heizen noch teurer. Getrieben von Konjunktur, Knappheit und Ukraine-Krise steuert der Ölpreis zügig Richtung 100 Dollar und zieht die Kosten für Sprit und Heizöl mit nach oben. Online verfügbar unter https://www.handelsblatt.com/dpa/wirtschaft-handel-und-finanzen-oelpreis-steigt-autofahren-und-heizen-noch-teurer/28067116.html, zuletzt aktualisiert am 14.02.2022, zuletzt geprüft am 28.07.2022.

Handelsblatt GmbH (Hg.) (2022): Elektro-Lkw bereits 2025 günstiger als Diesel-Modelle. Online verfügbar unter https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/transport-elektro-lkw-bereits-2025-guenstiger-als-diesel-modelle/28208654.html#:~:text=Ein%20E%2DLastwagen%20koste%20drei,schnellen%20Ladestation%2C%20etwa%20acht%20Stunden., zuletzt aktualisiert am 29.03.2022, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Hüging, Hanna (2014): Vom Menschen gemacht. Der anthropogene Treibhauseffekt. Hg. v. Bundeszentrale für politische Bildung. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/38441/vom-menschen-gemacht/, zuletzt aktualisiert am 10.03.2014, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) (Hg.): Biodieseltankstellen in Deutschland. Online verfügbar unter http://www.iwr.de/biodiesel/tankstellen.html, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Kampker, Achim; Vallée, Dirk; Schnettler, Armin (Hg.) (2013): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1603503.

Klell, Manfred; Eichlseder, Helmut; Trattner, Alexander (2018): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch). Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5356050.

Koch, Susanne (2012): Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1487558.

Köllner, Christiane (2020): Pro und Contra Oberleitungs-Lkw. Hg. v. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Online verfügbar unter https://www.springerprofessional.de/schwere-lkw/emissionen/pro-und-contra-oberleitungs-lkw/17781332, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Kühnapfel, Jörg B. (2021): Scoring und Nutzwertanalysen. Ein Leitfaden für die Praxis. 1st ed. 2021. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Gabler (Springer eBook Collection).

Leschus, Leon (2013): Die Entwicklung des Ölpreises. Hg. v. Bundeszentrale für politische Bildung. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bpb.de/themen/wirtschaft/energiepolitik/149681/die-entwicklung-des-oelpreises/#node-content-title-1, zuletzt aktualisiert am 01.03.2013, zuletzt geprüft am 27.07.2022.

Lichtblau, Günther; Pölz, Werner; Stix, Sigrid; Winter, Ralf (2012): Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe. Erstellt im Rahmen des Projekts "Biokraftstoffe - Potentiale, Risiken, Zukunftsszenarien". Hg. v. Umweltbundesamt- Österreich. Wien (Reports, REP-0360). Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub_id=1957, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Liehr, Christoph (2022): E-Lkw: Die Ladesäulen sind der Knackpunkt. Hg. v. Deutsche Verkehrs-Zeitung. Bonn. Online verfügbar unter https://www.dvz.de/rubriken/land/strasse/detail/news/e-lkw-die-ladesaeulen-sind-der-knackpunkt.html, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

MAN Truck & Bus SE (Hg.): Vollelektrisch, flüsterleise und hocheffizient. Der MAN eTGM. Online verfügbar unter https://www.man.eu/de/de/lkw/alle-modelle/der-man-etgm/etgm.html, zuletzt geprüft am 06.08.2022.

Michalke, Carl (Hg.) (2020): Allgemeine Grundlagen der Elektrotechnik. Reprint 2019. Berlin, Boston: De Gruyter (Siemens-Handbücher, 1).

NABU – (Naturschutzbund Deutschland) e.V. (Hg.): 20 Jahre fast ohne Fortschritt. Warten auf den verbrauchsarmen LKW. Unter Mitarbeit von Daniel Rieger. Online verfügbar unter https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/verkehr/strassenverkehr/21445.html, zuletzt geprüft am 01.07.2022.

NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Hg.): HYZON HyMax-250/450. Online verfügbar unter https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/hyzon-hymax-250-450/, zuletzt geprüft am 30.07.2022.

Prause, Louisa; Dietz, Kristina (2020): Die sozial-ökologischen Folgen der E-Mobilität. Konflikte um den Rohstoffabbau im Globalen Süden. In: Achim Brunnengräber (Hg.): Baustelle Elektromobilität. Sozialwissenschaftliche Perspektiven auf die Transformation der (Auto-)Mobilität. Unter Mitarbeit von Tobias Haas. 1st ed. Bielefeld: transcript (Edition Politik), S. 329–351. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/louisa-

prause/publication/342803149_die_sozial-okologischen_folgen_der_e-mobilitat_konflikte_um_den_rohstoffabbau_im_globalen_suden, zuletzt geprüft am 29.07.2022.

PRIMAGAS Energie GmbH: Was bringt ein Erdgas-Antrieb - LNG-LKW statt Dieselfahrzeuge für die Logistik? LNG-Antrieb: Fahrzeuge, Tankvorgang und mehr. Online verfügbar unter https://fluessiggas.de/wissen/gewerbe/lng-lkw/, zuletzt geprüft am 16.07.2022.

Reichel, Johannes (2022): Biodiesel: Weitere Modelle freigegeben - hohe CO2-Einsparung möglich. Hg. v. Logistra - Das Fachmagazin für NFZ-Fuhrpark & Lagerlogistik. Online verfügbar unter https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-biodiesel-weitere-modelle-freigegeben-hohe-co2-einsparung-moeglich-117212.html, zuletzt geprüft am 01.06.2022.

Renault Trucks (Hg.): RENAULT TRUCKS Stellt den neuen E-LKW für die Stadt vor: Der vollelektrische D Wide Z.E. LEC mit niedrigem Fahrerhaus. Online verfügbar unter https://www.renault-trucks.de/press-release/e-lkw-low-entry-cab, zuletzt geprüft am 06.08.2022.

Salchenegger, Stefan (2006): Emissionen von Wasserstofffahrzeugen. Abschätzung der Emissionen von wasserstoff- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich. Wien. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0012.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Siebel, Thomas (2022): Wie LNG hergestellt und transportiert wird. Hg. v. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.springerprofessional.de/erdgas/verfahrenstechnik/wie-lng-hergestellt-und-transportiert-wird/20284502#:~:text=LNG%20%E2%80%93%20von%20der%20Quelle%20zum,oder%20Kesselwagen%20zum%20Endkunden%20gebracht., zuletzt aktualisiert am 05.04.2022, zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Siegemund, Stefan; Trommler, Marcus; Zinnecker, Valentin (2018): LNG als alternativer Kraftstoff im Straßengüterverkeh. Handlungsempfehlungen zur Beschleunigung der Marktentwicklung. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2018/9270_Handlungsempfehlungen_Marktentwicklung_LNG.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Statistisches Bundesamt (Hg.): Kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-

Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/Glossar/kmu.html, zuletzt geprüft am 31.07.2022.

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2022): Beförderte Gütermenge und Beförderungsleistung (Straßengüterverkehr): Deutschland, Jahre, Verkehrsart, Verkehrswege. Straßengüterverkehrsstatistik Deutschland. Kraftfahrt-Bundesamt Flensburg. Online verfügbar unter https://www-genesis.destatis.de/genesis/online#astructure, zuletzt geprüft am 21.07.2022.

Sternad, Dietmar; Höfferer, Meinrad; Haber, Gottfried (Hg.) (2020): Grundlagen Export und Internationalisierung. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler (Springer eBook Collection).

Tagesaktuelle Diesel- und LNG Preise. Westfalen Tankstelle - Herne (2022). Online verfügbar unter https://www.clever-tanken.de/tankstelle_details/49222, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

TNS Infratest (Hg.) (2016): Wie denken Verbraucher über Biokraftstoffe? Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP); Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V. (VDB); OVID Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e.V. Online verfügbar unter https://www.ufop.de/files/1714/7817/0035/WEB_RZ_UFOP_1375_OnePager_021116.pdf#:~:text=WIE%20DENKEN%20VERBRAUCHER%20%C3%9CBER%20BIOKRAFTSTOFFE%3F,-69%20Prozent%20bef%C3%BCrworten&text=69%20Prozent%20der%20Deutschen%20bewerten,als%20gut%20bis%20sehr%20gut., zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Umwelt Bundesamt (Hg.) (2019): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO2-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Dessau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_12-2019_co2-minderung-schwere-nutzfahrzeuge.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Umwelt Bundesamt (Hg.) (2020): Flüssigerdgas-Lkw haben kaum einen Klimavorteil. Klimabilanz ernüchternd, zuletzt aktualisiert am 13.05.2022, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Umwelt Bundesamt (Hg.) (2021a): Treibhausgasneutralität in Kommunen. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2021-03-24_factsheet_treibhausgasneutralitaet_in_kommunen.pdf, zuletzt geprüft am 06.08.2022.

Umwelt Bundesamt (Hg.) (2021b): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Fahrleistungsabhängige Lkw-Maut. INFRAS und Öko-Institut. Desssau. Online

verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_lkw-maut_kliv.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Umwelt Bundesamt (Hg.) (2022): Emissionen des Verkehrs. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#-das-mehr-an-pkw-verkehr-hebt-den-fortschritt-auf, zuletzt aktualisiert am 22.04.2022, zuletzt geprüft am 23.07.2022.

Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP) (Hg.) (2022): Biodieselpreise (Stand: KW 29). Online verfügbar unter https://www.ufop.de/biodiesel-und-co/biodiesel-preis/, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V. (VDB) (Hg.) (2021): Biokraftstoffe im kommunalen Lkw- und Busfuhrpark. Geld sparen und weitere Vorteile nutzen. Online verfügbar unter http://www.biokraftstoffverband.de/index.php/detail/items/biokraftstoffe-im-kommunalen-lkw-und-busfuhrpark-geld-sparen-und-weitere-vorteile-nutzen.html, zuletzt aktualisiert am 28.09.2021, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Volvo Group Trucks Central Europe GmbH (Hg.): Der Volvo FH Electric im ersten unabhängigen Test. Online verfügbar unter https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-electric/volvo-fh-electric-im-ersten-unabhaengigen-test.html?s_kwcid=AL!12357!3!579711338846!b!!g!!volvo%20fh%20electric&gclid=Cj0KCQjw0JiXBhCFARIsAOSAKqA2hUwuIS-Thnfm0jVm5qeLPfX, zuletzt geprüft am 06.08.2022.

Volvo Group Trucks Central Europe GmbH (Hg.): Häufig gestellte Fragen zu elektrisch angetriebenen Lkw. Online verfügbar unter Häufig gestellte Fragen zu elektrisch angetriebenen Lkw, zuletzt geprüft am 24.07.2022.

Wachsmuth, Jakob; Oberle, Stella (2019): Wie klimafreundlich ist LNG? Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG). Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. im Auftrag des Umweltbundesamtes. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-15_cc_21-2019_roadmap-gas_lng.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Wehking, Karl-Heinz (2020): Technisches Handbuch Logistik 1. Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6360962.

Wietschel, Martin (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Endbericht. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf, zuletzt geprüft am 21.07.2022.

Wittenbrink, Paul (2014): Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. 2., vollst. neu bearb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler (Springer eBook Collection). Online verfügbar unter http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8349-3825-1.

Wittenbrink, Paul (2015): Green Logistics. Konzept, aktuelle Entwicklungen und Handlungsfelder zur Emissionsreduktion im Transportbereich. 1. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Gabler (Springer eBook Collection).

Zangemeister, Christof (2014): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 5. Auflage 2014 (erweitert). Winnemark: Zangemeister & Partner.

Anhang

Alternative Antriebstechnologien			1. Diesel		2. LNG		3. Bio-Treibstoff		4. Wasserstoff und Brennstoffzelle		5. Elektroantrieb		6. Oberleitungs-LKW	
			Bewertung	Nutzwert Diesel	Bewertung	Nutzwert LNG	Bewertung	Nutzwert Bio-Treibstoff	Bewertung	Nutzwert Wasserstoff und Brennstoffzelle	Bewertung	Nutzwert Elektroantrieb	Bewertung	Nutzwert O-LKW
			nach Punkteskala	Bewertung x Gewichtung	nach Punkteskala	Bewertung x Gewichtung	nach Punkteskala	Bewertung x Gewichtung	nach Punkteskala	Bewertung x Gewichtung	nach Punkteskala	Bewertung x Gewichtung	nach Punkteskala	Bewertung x Gewichtung
Nr.	**Entscheidungskriterium**	**Gewichtung**												
1.	**Reichweite**	18,50%	10	1,85	10	1,85	9	1,67	9	1,67	2	0,37	4	0,74
2.	**Tankstellen- infrastruktur**	15,15%	10	1,52	3	0,45	1	0,15	2	0,30	6	0,91	7	1,06
3.	**Anschaffungskosten**	14,05%	10	1,41	8	1,12	10	1,41	2	0,28	4	0,56	2	0,28
4.	**Betriebskosten**	12,75%	5	0,64	3	0,38	4	0,51	6	0,77	8	1,02	7	0,89
5.	**Marktreife**	12,55%	10	1,26	9	1,13	10	1,26	3	0,38	7	0,88	3	0,38
6.	**Schadstoff- und Geräuschemission**	10,55%	2	0,21	6	0,63	6	0,63	10	1,06	10	1,06	8	0,84
7.	**Nachhaltigkeit des Antriebs/Treibst**	9,50%	1	0,10	3	0,29	7	0,67	10	0,95	3	0,29	4	0,38
8.	**Image**	6,95%	2	0,14	3	0,21	7	0,49	10	0,70	10	0,70	6	0,42
	Gesamt	**100,00%**		**7,11**		**6,07**		**6,77**		**6,09**		**5,77**		**4,99**
	Platzierung				**3**		**1**		**2**		**4**		**5**	

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht. Die vorgelegte Arbeit hat weder in der gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung schon einem anderen Fachbereich der Hochschule Ruhr West oder einer anderen wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen.

Yvonne Weselmann

Bochum, 07.08.2022

Ort, Datum

Unterschrift