



Strategie für die Elektrifizierung
des Straßengüterverkehrs

Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr

Erster Teilbericht

Berlin, 15.10.2020

des Forschungs- und Dialogvorhabens
„StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“

Autorinnen und Autoren

Dr. Katharina Göckeler, Florian Hacker, Moritz Mottschall,
Ruth Blanck, Wolf Görz, Peter Kasten
Öko-Institut e.V.

Prof. Dr. Tobias Bernecker, Jonas Heinzelmann
Hochschule Heilbronn

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



Erneuerbar
mobil

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung	6
Summary	8
1. Einleitung	10
1.1. Hintergrund	10
1.2. Ziel und Einordnung des Papiers	12
2. Anforderungen des Transport- und Logistikmarkts	13
2.1. Marktstrukturen im Straßengüterverkehr	13
2.2. Einsatzprofile im Nah- und Regionalverkehr	18
2.3. Einsatzprofile im Fernverkehr	20
2.4. Standardisierung als Erfolgsfaktor	22
2.5. Anforderungen an Fahrzeugbeschaffung und -einsatz	25
3. Regulatorische Rahmenbedingungen	28
3.1. Fahrzeugantrieb	28
3.2. Infrastruktur	35
4. Antriebstechnologien – Status quo und Perspektiven	39
4.1. Bestandsaufnahme Dieselantrieb	39
4.2. Alternative Kraftstoffe	41
4.3. Batterieelektrischer-Lkw	45
4.4. Oberleitungs-Lkw	49
4.5. Brennstoffzellen-Lkw	53
4.6. Fazit	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Historische Entwicklung und Ziele für die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen	10
Abbildung 2-1:	Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge in Deutschland (4. Quartal 2018)	15
Abbildung 2-2:	Gewerblicher Güterkraftverkehr und Werkverkehr (4. Quartal 2018)	16
Abbildung 2-3:	Logistische Anforderungen an das Fahrzeug	27
Abbildung 3-1:	EU CO ₂ -Emissionsstandards für schwere Nfz und mögliche Szenarien der Zielerfüllung im EU-Durchschnitt auf Basis vorläufiger Referenzwerte	31
Abbildung 3-2:	Verteilung des Bestands an Nutzfahrzeugen zum 01.01.2019 nach Euronormen und Größenklassen	33
Abbildung 3-3:	Vergleich der Energiesteuersätze für Fahrzeugkraftstoffe und Strom bezogen auf den Heizwert. Die schraffierte Fläche veranschaulicht den reduzierten Stromsteuersatz für den Schienenverkehr.	38
Abbildung 4-1:	Wirkungsgradvergleich verschiedener Lkw-Antriebsoptionen auf Basis von Stromnutzung	44
Abbildung 4-2:	Funktionsweise und Eigenschaften des O-Lkw-Systems im Fernverkehr	50
Abbildung 4-3:	Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen von Diesel- und O-Lkw	51
Abbildung 4-4:	Vielversprechende erste Strecken, Zielnetz und perspektivische internationale Anbindung	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Straßengüterverkehr in Deutschland nach Güterabteilungen (NST-2007)	13
Tabelle 2-2:	Nutzfahrzeugbestand in Deutschland nach Aufbauform	17
Tabelle 2-3:	Übersicht über die Einsatzprofile im Nah- und Regionalverkehr	18
Tabelle 2-4:	Übersicht über die Einsatzprofile im Fernverkehr	21
Tabelle 3-1:	Regulierte Fahrzeuguntergruppen nach EU-VO 2019/1242 mit spezifizierten Jahresfahrleistungen (JFL) und Nutzlastwerten.	29
Tabelle 3-2:	Vorläufige CO ₂ Bezugswerte refCO ₂ in (g/tkm) für 2019 basierend auf durchschnittlichen Emissionen avgCO ₂ je Fahrzeuguntergruppe UG	30
Tabelle 3-3:	Mautsätze in ct / km ab 2019 für Nutzfahrzeuge im aktuellen Bestand	36
Tabelle 4-1:	Bestand von Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen in Deutschland nach Kraftstoffart und Nutzlast laut KBA (Stand 01.01.2019)	40
Tabelle 4-2:	Verfügbare schwere Lkw und SZM mit batterieelektrischem Antrieb (bei Wertebereichen wird für die Batteriekapazität das Maximum und für die Reichweite ein zugehöriger Mittelwert angegeben)	46
Tabelle 4-3:	Charakterisierung benötigter Ladepunkte mit anvisierten Ladeleistungen und Standzeiten	49
Tabelle 4-4:	Verfügbare schwere Oberleitungs-Lkw; die Reichweite bezieht sich auf die mögliche elektrische Fahrleistung ohne Oberleitung über die Batterie	51
Tabelle 4-4:	Verfügbare schwere Lkw mit Brennstoffzelle und Wasserstofftanks	54

Zusammenfassung

Der erste Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“, gefördert durch das Forschungsprogramm „Erneuerbar mobil“ des BMU, zielt auf eine Analyse des Status quo von Antriebsalternativen von schweren Nutzfahrzeugen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. Die Schwerpunkte liegen in den Nutzeranforderungen des Transport- und Logistikmarkts, den regulatorischen Rahmenbedingungen als Treiber und Hemmnisse von Technologietransformationen sowie in der Bewertung der Antriebsalternativen hinsichtlich ihrer technologischen Reife, der energetischen Effizienz und eines voraussichtlichen Markthochlaufs. Die Grundlage hierfür bilden eigene Analysen sowie Expertengespräche mit Nutzfahrzeugherstellern (OEMs und Start-up-Unternehmen) und weiteren Vertretern der Industrie. Die Interviews ergeben ein einheitliches Bild mit klaren Perspektiven für die kommende Marktentwicklung. Die zentralen Ergebnisse der Studie werden nachfolgend aufgeführt.

- Um die Vielfalt des Straßengüterverkehrs insgesamt abbilden zu können, werden insgesamt **17 charakteristische Einsatzprofile** entwickelt, wovon zehn im Nah- und Regionalverkehr und sieben im Fernverkehr verortet sind. Die Profile werden durch eine Verknüpfung von fahrzeugbezogenen und logistischen Merkmalen gebildet und in fünf Oberkategorien zusammengefasst. Dadurch soll eine spätere Definition von Dekarbonisierungs-Standardprofilen erleichtert werden.
- Die Chancen und Potenziale einer Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs scheinen insbesondere bei denjenigen Einsatzfeldern gegeben zu sein, die u.a. bezogen auf ihre Betriebs- und Leistungsprogramme über ein hohes **Standardisierungspotenzial** verfügen. Als besonders interessant wurden basierend darauf die drei Einsatzprofile Hub-Konzept des Stückgutverkehrs, Express- und Paketdienste sowie der Kombinierte Verkehr identifiziert.
- Für die spätere Identifizierung von Dekarbonisierungspotenzialen werden fünf Kriterien entwickelt, die zusammen ein Modell **logistischer Anforderungen an das Fahrzeug** ergeben. Diese bestehen aus planbaren Anforderungen (Touren, Fahrzeugvorhaltung, Güterstruktur) und spontanen Anforderungen (Verzögerungen, Reserven).
- Mit den **CO₂-Emissionsstandards** für schwere Nutzfahrzeuge wurde ein zentraler Treiber für die Markteinführung von Nullemissionsfahrzeugen geschaffen. Bereits das Reduktionsziel von 15 % der im Betrieb emittierten CO₂-Emissionen bis 2025 wird voraussichtlich nicht allein über Effizienzsteigerungen konventioneller Dieselantriebe erreicht werden. Das Reduktionsziel von 30 % bis 2030 setzt den Herstellern Anreize für eine direkte Transformation zu Nullemissionsfahrzeugen und hemmt Investitionen in Technologien mit begrenztem Dekarbonisierungspotenzial wie Hybridfahrzeuge oder Erdgasantriebe.
- Der **Verbrennungsmotor** auf Diesel-Basis bestimmt nach wie vor nahezu vollständig den Bestand an schweren Nutzfahrzeugen; gleichzeitig kündigen Hersteller ein Auslaufen der Nutzung fossiler Kraftstoffe für die kommenden Neuwagengenerationen an. Alternativen in Form strombasierter oder biogener Kraftstoffe stehen aufgrund der geringen Wirtschaftlichkeit und Gesamteffizienz nicht im Fokus der Herstellerstrategien, auch wenn Aktivitäten beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor existieren.
- Als **emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge** im Sinne der CO₂-Regulierung gelten unter den bereits in der praktischen Erprobung angewendeten Technologieoptionen elektrische Nutzfahrzeuge mit direkter Stromversorgung aus Batteriesystemen und/oder elektrifizierten Fahrbahnen (z.B. Oberleitungen) oder mit mobiler Stromerzeugung über Brennstoffzellen. Die direkte Stromnutzung ist mit einem Gesamtwirkungsgrad von knapp 75 % sehr viel effizienter als die Nutzung von strom-

basiertem Wasserstoff in Brennstoffzellen (ca. 30 %), dementsprechend ist die direkte Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs mit einem entsprechend geringerem zusätzlichen Strombedarf verbunden.

- Der **Batterieelektrische-Lkw** ist von den alternativen Antriebstechnologien aktuell am weitesten entwickelt. Verschiedene Vor-Serienmodelle marktanteilsstarker Hersteller mit bis zu 26 t Gesamtgewicht und Reichweiten von 200-300 km werden aktuell zur Erprobung **im Nah- und Regionalverkehr** eingesetzt. Ein Markthochlauf mit Serienmodellen wird in den kommenden Jahren erwartet. Das Aufladen der Batterie erfolgt überwiegend über Nacht im Depot bei realisierten Leistungsübertragungen unter 150 kW. Bei den Brennstoffzellen-Fahrzeugen sind bisher wenige Prototypen in Europa im praktischen Testeinsatz.
- Die Einsatzprofile **im Fernverkehr** bestimmen im Wesentlichen die Einhaltung der CO₂-Emissionsstandards. Für die hohen Reichweitenanforderungen reichen heutige Batterieenergiedichten und Ladeleistungen noch nicht aus. Der hohe Handlungsdruck macht zeitnahe Realisationen nicht unwahrscheinlich. Technologisch bereits in Feldversuchen umgesetzt, bietet die **dynamische Stromversorgung** während der Fahrt durch **Oberleitungen** auf verkehrsstarken Fernverkehrskorridoren eine synergiereiche Lösungsmöglichkeit. Der öffentliche Aufbau einer europäischen Oberleitungs-Infrastruktur wird von den interviewten Nutzfahrzeugherstellern allerdings eher kritisch bewertet. Langstreckenkompatible Brennstoffzellenfahrzeuge werden erst gegen Ende der 2020er im Produktsortimenten erwartet.

Summary

The first sub-report of the research and dialogue project "StratES: Strategy for the Electrification of Road Freight Transport", funded by the BMU's "Renewable Mobile" research program, aims to analyze the status quo of alternative drive systems for heavy-duty commercial vehicles to decarbonize road freight transport. The focus is on user requirements in the transport and logistics market, the regulatory framework as drivers and obstacles to technology transformation, and the evaluation of drive alternatives in terms of their technological maturity, energy efficiency and expected market ramp-up. The basis for this is provided by our own analyses and expert discussions with commercial vehicle manufacturers (OEMs and start-ups) and other representatives of industry. The interviews result in a uniform picture with clear perspectives for the coming market development. The central results of the study are listed below.

- In order to be able to depict the diversity of road freight transport as a whole, a total of **17 characteristic application profiles** are being developed, ten of which are located in local and regional transport and seven in long-distance transport. The profiles are formed by linking vehicle-related and logistical characteristics and are summarized in five main categories. This should facilitate the later definition of decarbonization standard profiles.
- The opportunities and potentials of decarbonization of road freight transport seem to exist especially in those fields of application that have a high **potential for standardization**, e.g. with regard to their operating and service programs. Based on this, the three application profiles hub concepts of general cargo transport, express and parcel services and combined transport were identified as particularly interesting.
- For the later identification of decarbonization potentials, five criteria were developed, which together result in a model of **logistical requirements for the vehicle**. These consist of plannable requirements (routes, vehicle availability, freight structure) and spontaneous requirements (delays, reserves).
- With the **CO₂ emission standards** for heavy commercial vehicles, a central driver for the market introduction of zero-emission vehicles was created. The reduction target of 15 % of CO₂ emissions emitted during operation by 2025 will probably not be achieved by increasing the efficiency of conventional diesel drives alone. The reduction target of 30% by 2030 provides manufacturers with incentives for a direct transformation to zero-emission vehicles and inhibits investments in technologies with limited decarbonization potential such as hybrid vehicles or natural gas drives.
- The diesel-based **internal combustion engine** continues to dominate almost the entire range of heavy commercial vehicles; at the same time, manufacturers are announcing an end to the use of fossil fuels for the coming generations of new cars. Alternatives in the form of electricity-generated or biogenic fuels are not in the focus of manufacturers' strategies due to their low economic and overall energetic efficiency, even though there is activity in the hydrogen combustion engine.
- Among the technology options already applied in practical testing, **emission-free heavy commercial vehicles** in the sense of CO₂ regulation are electric commercial vehicles with direct power supply from battery systems and/or electrified tracks (e.g. overhead lines) or with mobile power generation via fuel cells. With an overall efficiency of just under 75%, direct electricity use is much more efficient than the use of electricity-based hydrogen in fuel cells (approx. 30%). Accordingly, the direct electrification of road freight transport is associated with a correspondingly lower additional electricity requirement.
- The **battery electric truck** is currently the most advanced of the alternative drive technologies. Various pre-series models from strong manufacturers with a total weight of up to 26 t and ranges

of 200-300 km are currently being used for testing in **local and regional transport**. A market ramp-up with series models is expected in the coming years. The battery is mainly charged overnight at the depot with realized power transmissions below 150 kW. Few prototypes of fuel cell vehicles have been tested in Europe to date.

- The application profiles in **long-distance traffic** essentially determine the compliance with CO₂-emission standards. Current battery energy densities and charging capacities are not yet sufficient for the high range requirements. The high pressure to act does not make timely realizations unlikely. Having already been technologically implemented in field tests, the **dynamic power supply** during travel through **overhead lines** on busy long-distance traffic corridors offers a synergetic solution. However, the public installation of a European catenary infrastructure is rather critically evaluated by the interviewed commercial vehicle manufacturers. Long-distance compatible fuel cell vehicles are not expected in the product range until the end of the 2020s.

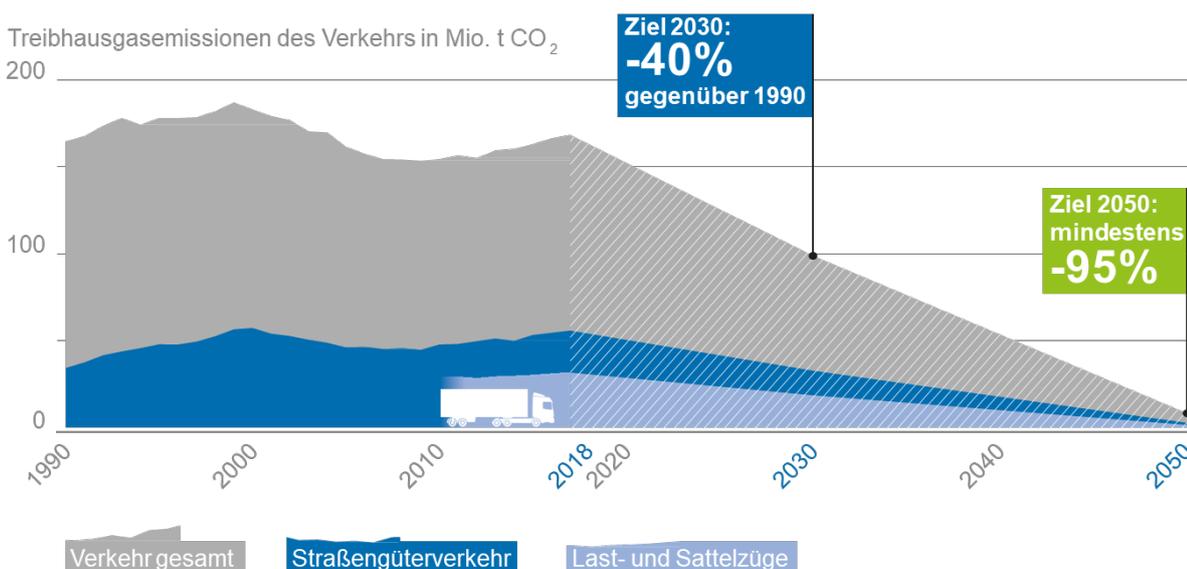
1. Einleitung

1.1. Hintergrund

Zur Erreichung des im Pariser Klimaabkommen vereinbarten 2- bzw. 1,5-Grad-Ziels setzt das Klima- und Energiepaket der EU verbindliche Ziele zur Reduktion von Treibhausgasen, wie sie bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe in Form von CO₂ ausgestoßen werden. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen in der EU um 40 % gegenüber dem Niveau von 1990 sinken und bis 2050 weitestgehende Klimaneutralität erreicht werden. Im Rahmen des European Green Deals wird eine Erhöhung des Ziels für 2030 auf 50-55 % erwogen, welches dem selbstverpflichteten Ziel Deutschlands entspricht. Inwieweit die gegenwärtige COVID-19-Pandemie an den Klimaschutzziele rütteln kann, ist noch nicht vollständig abzusehen, allerdings zeichnen sich bisher keine Abmilderungen der Zielvorgaben ab.

In dem Ende 2019 verabschiedeten Klimaschutzgesetz hat die Bundesregierung sektorspezifische Klimaschutzziele festgelegt. Wie in Abbildung 1-1 veranschaulicht, sollen die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen von 163 Mio. t im Jahr 2019 bis 2030 auf 95 Mio. t reduziert werden. Zuvor sind die deutschlandweiten CO₂-Emissionen im Verkehrssektor in den letzten 30 Jahren netto nicht gesunken, sondern sogar marginal um 1 % gestiegen. Fortschritte bei der Effizienz der Verkehrsmittel wurden durch eine gestiegene Nachfrage nach leistungsstarken und schweren Fahrzeugen kompensiert. Der Handlungsdruck für die kommenden 30 Jahre ist folglich enorm. Etwa ein Drittel der THG-Emissionen des Verkehrssektors werden durch den Straßengüterverkehr verursacht. Dieser trägt mit einem Anteil von 72 % allerdings auch die Hauptlast am Transportaufkommen des Güterverkehrs in Deutschland (BMVI 2019). Der Anteil des Schienenverkehrs beträgt derzeit lediglich 19 % mit einer möglichen Steigerung auf etwa 27 % bis 2030 unter Annahme ambitionierter Ausbauszenarien (Lobig et al. 2017). Die Hauptlast des Verkehrs wird also perspektivisch auf der Straße bleiben. Als Folge liegt ein großes Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasen im Güterverkehr in der Dekarbonisierung der Nutzfahrzeugantriebe, insbesondere von schweren Last- und Sattelzügen.

Abbildung 1-1: Historische Entwicklung und Ziele für die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen



Quelle: Hacker et al. 2020a

Im Straßengüterverkehr werden bisher nahezu ausschließlich Nutzfahrzeuge mit Diesel-Verbrennungsmotor eingesetzt. Waren Entwicklungen alternativer Technologien vor 10 Jahren zumeist auf emissionsmindernde Maßnahmen wie Hybridisierungen mit elektrischen Antrieben oder Beimischungen von Biokraftstoffen limitiert (Lenz et al. 2010), ist mittlerweile auch die Transformation zum CO₂-neutralen Betrieb bei schweren Nutzfahrzeugen für den europäischen Markt technologisch absehbar. Derzeit befinden sich verschiedene Technologien mit möglichen Kombinationen untereinander in der Entwicklung und praktischen Erprobung:

- Strombasierte synthetische (oder biogene) Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren
- Elektrischer Antrieb mit stationärer Stromversorgung durch ein Batteriesystem
- Elektrischer Antrieb mit dynamischer Stromversorgung (z.B. durch Oberleitungen)
- Elektrischer Antrieb mit mobiler Stromerzeugung in Wasserstoff-Brennstoffzellen

Die Dekarbonisierungsoptionen werden je nach Präferenzen der diversen Stakeholder u.a. aus der Transport- und Logistikbranche sowie der Fahrzeug-, Energie- und Mineralölindustrie zum Teil kontrovers diskutiert. Flankierend zur technologischen Entwicklung hat die Bundesregierung erstmalig konkrete Klimaschutzziele für den Straßengüterverkehr formuliert. Im Klimaschutzprogramm 2030 wurde das Ziel gesetzt bis 2030 ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr über elektrische Antriebe oder strombasierte Kraftstoffe abzudecken. Wesentliche Instrumente bestehen in der Einführung eines CO₂-Preises ab 2021 sowie in der fortgesetzten Förderung der Anschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben. Zusätzlich wird die Einführung einer nach CO₂-Emissionen differenzierten Mautstaffelung diskutiert und eine entsprechende Novellierung der Eurovignetten-Richtlinie angestrebt. Gutachten zeigen, dass die bisher festgelegten Maßnahmen nicht zur Erfüllung der Klimaschutzziele ausreichen werden, die Bundesregierung ist damit aufgefordert nachzubessern (Harthan et al. 2020, Kemmler et al. 2020).

Die 2019 in Kraft getretenen CO₂-Emissionsstandards setzen erstmals EU-weite verbindliche Reduktionsziele für die Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge. Fahrzeughersteller sind verpflichtet die Tank-to-Wheel, also die direkten Emissionen der Neuwagenflotten bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30 % gegenüber dem Niveau von 2019/2020 zu senken. Entsprechend kündigen Hersteller für die kommenden Nutzfahrzeuggenerationen eine Transformation zu klimaneutralen Antrieben an (Daimler 2019, VW 2018). Auch auf Nutzerseite wächst der Druck auf die Transport- und Logistikbranche alternative Technologien einzusetzen, da aufgrund von zu hohen Luftschadstoffkonzentrationen Kommunen zunehmend Zufahrtsbeschränkungen für Dieselfahrzeuge festsetzen. So tauchen entsprechende Fahrzeuganforderungen vor allem bei großen Verladern und im Rahmen der Kontaktlogistik vermehrt in Transportausschreibungen auf.

Der Ausbau einer alternativen Energieinfrastruktur für den Straßengüterverkehr steht ebenfalls noch am Anfang. Mit der anstehenden Novellierung der EU-Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID) werden verbindlichere Ziele für den EU-weiten Ausbau von Ladeinfrastruktur und Tankstellennetzen für alternative Kraftstoffe erwartet. Die kürzlich veröffentlichten Wasserstoffstrategien der Bundesregierung und der EU geben dem Wasserstoff eine prominente Rolle als Energieträger der Verkehrswende im Straßengüterverkehr, so soll der Ausbau eines Wasserstoff-Tankstellennetzes für den Schwerlastverkehr vorangetrieben werden. Parallel wird in drei Feldversuchen in Deutschland der praktische Einsatz von Oberleitungs-Lkw erprobt. Zudem existieren branchenbreite Initiativen zur Entwicklung von Schnellladesystemen. Ob sich der Brennstoffzellen-Lkw, rein elektrische Antriebe oder ein Technologiemix durchsetzen wird ist insbesondere für den Fernverkehr noch nicht absehbar. Dieses Papier soll eine Hilfestellung geben die diskutierten Antriebsalternativen anhand ihrer technologischen Reife und perspektivischen Markteinführung einzuordnen.

1.2. Ziel und Einordnung des Papiers

Das vorliegende Papier wurde im Rahmen des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“ erstellt. Das Vorhaben wird durch das Forschungsprogramm „Erneuerbar mobil“ des BMU gefördert.

Ziel dieses ersten Teilberichts ist es, einen Überblick über den Status quo und die Perspektiven von alternativen Antriebskonzepten für schwere Nutzfahrzeuge zu geben. In dem ersten Teil wird die Nutzerperspektive anhand der **Anforderungen des Transport- und Logistikmarkts** beleuchtet. Im Vordergrund steht dabei, ein Verständnis für die Nutzungsanforderungen an schwere Nutzfahrzeuge zu schaffen und eine Klassifizierung charakteristischer Einsatzprofile abzuleiten. Zudem sollen existierende Wissenslücken aufgezeigt werden, die sich über offiziell verfügbare Daten- und Informationsquellen nicht zufriedenstellend beantworten lassen. Im zweiten Teil wird ein Überblick über die zentralen **regulatorischen Rahmenbedingungen** gegeben, die als Treiber für Transformationen im Bereich der Fahrzeugantriebe und Infrastruktur betrachtet werden. Aus den Rahmenbedingungen lassen sich bereits erste potenzielle Strategien der Fahrzeugentwicklung ableiten. Im dritten Teil werden die einleitend erwähnten **alternativen Antriebstechnologien** zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs diskutiert: (1) alternative Kraftstoffe für Lkw-Verbrennungsmotoren, (2) batterieelektrische Lkw, (3) Oberleitungs-Lkw und (4) Brennstoffzellen-Lkw. Dafür wird ein Überblick über den Stand der technologischen Entwicklungen der Fahrzeugmodelle und der zugehörigen Energieinfrastruktur gegeben. Die Antriebsalternativen werden anhand aktueller Erkenntnisse bewertet und hinsichtlich ihrer voraussichtlichen Marktverfügbarkeit eingeordnet.

Die Analysen bauen auf umfassende Vorarbeiten im Projekt „StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“ auf und ergänzen diese insbesondere um Anwendungen im Nah- und Regionalverkehr. Neben der Literaturanalyse stellen – insbesondere mit Blick auf die Fahrzeugtechnologien und deren voraussichtlichen Marktverfügbarkeit – ausführliche Interviews mit Vertretern der Fahrzeughersteller und weiteren Technologieunternehmen, die im Zeitraum Februar bis April 2020 durchgeführt wurden, die Hauptinformationsquellen dar. Im Rahmen von insgesamt 8 leitfragengestützten persönlichen Interviews von etwa 90 Minuten Dauer wurden Fragen rund um die Technologieentwicklung, Treiber/Hemmnisse und Marktverfügbarkeit diskutiert. Zu den Interviewpartnern zählten vier Vertreter der größten europäischen Nutzfahrzeughersteller, ein Verbandsvertreter der Industrie, zwei Technologieunternehmen (Start-up-Unternehmen) sowie ein Infrastrukturbetreiber. Die von den Experten geäußerten Einschätzungen zur Technologie- und Marktentwicklung (insbesondere Kapitel 4) fließen in anonymisierter Form in die Bewertung mit ein.

2. Anforderungen des Transport- und Logistikmarkts

2.1. Marktstrukturen im Straßengüterverkehr

Dreh- und Angelpunkt der „richtigen“ Strategie zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs ist neben der Verfügbarkeit geeigneter Technologien deren Eignung für die Anforderungen des Straßentransportmarkts. Je besser sich die bestehenden Marktverhältnisse auf dem Transportmarkt und die derzeitigen Leistungsprofile von Lastkraftwagen mit neuen Antriebstechnologien abbilden lassen, umso einfacher kann der Übergang unter realen Marktbedingungen gelingen.

Der Transportmarkt ist gerade in Deutschland von einer Reihe an charakteristischen Besonderheiten und einer langen Vergangenheit geprägt. Zu diesen zählen insbesondere ein unverändert stark mittelständisch geprägtes Gewerbe mit zahlreichen, aber oft kleinen selbstständigen Unternehmen, regelmäßige Unterauftragnehmer-Verhältnisse, ein hoher Anteil gebietsfremder Fahrzeuge und Unternehmer im Fernverkehr, sowie in der Folge stark ausdifferenzierte Fahrzeug-Einsatzprofile. Dabei spielt die in ihren Grundzügen noch aus der Zeit des regulierten Marktes stammende Untergliederung des Straßengüterverkehrs in Entfernungsbereiche und Branchen eine wichtige Rolle für die Marktstruktur, wengleich die dahinter stehenden Prinzipien der Kontingente und Tarife bereits in den 1990er Jahren den Grundsätzen der europäischen Markt deregulierung und damit einem wettbewerblich geprägten Transportmarkt mit freier Preisbildung und grenzüberschreitendem Wettbewerb gewichen sind.

Aufgrund der bei keinem anderen Verkehrsträger in vergleichbarer Weise wie bei der Straße gegebenen Erschließung der Fläche werden heute Güter aller Gütergruppen zumindest teilweise auch auf der Straße transportiert. Ein Blick auf das nach Gütergruppen differenzierte Transportaufkommen und die Transportleistung im Straßengüterverkehr in Deutschland (Tabelle 2-1) zeigt dies exemplarisch für das Jahr 2019 (Intraplan und BAG 2020).

Tabelle 2-1: Straßengüterverkehr in Deutschland nach Güterabteilungen (NST-2007)

		2019	2019
		Transportaufkommen (Mio. t)	Transportleistung (Mrd. tkm, territorial)
	Straßengüterverkehr, Summe	3.787,9	502,7
B1	Land- u. forstwirtschaftliche Erzeugnisse	199,8	32,4
B2	Kohle, Rohöl, Erdgas	8,3	1,0
B3	Erze, Steine u. Erden, Bergbau	972,7	34,5
B4	Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch	576,1	115,0
B5	Kokerei- u. Mineralölerzeugnisse	101,0	11,4
B6	Chemische u. Mineralerzeugnisse	606,2	72,9
B7	Metalle u. Metallerzeugnisse	188,3	38,3
B8	Maschinen, langlebige Konsumgüter	229,1	54,1
B9	Sekundärrohstoffe, Abfälle	291,6	22,5
B10	Sonstige Produkte	614,8	120,7

Quelle: Intraplan und BAG 2020

Bei näherer Betrachtung der Aufteilung wird deutlich, dass beim Transportaufkommen ein Großteil der beförderten Tonnage auf Massengüter wie z.B. Erze, Steine, chemische Erzeugnisse, Getreide, Abfälle oder Mineralölerzeugnisse entfällt. Sie machen gemeinsam annähernd die Hälfte des Gesamtaufkommens im Straßengüterverkehr aus (Kategorien B1, B2, B3, B5, B6 und B9). Bezogen auf die Transportleistung, d.h. unter zusätzlicher Berücksichtigung der Transportentfernungen, ist der Anteil des Massenguts mit etwa 30 % an der gesamten Transportleistung des Straßengüterverkehrs hingegen bedeutend geringer. Dies ist darin zu begründen, dass Massengüter mit dem Lkw üblicherweise auf der letzten Meile als Teil von Transportketten befördert werden, während der längere Hauptlauf kostengünstiger und umweltfreundlicher per Schiff oder auf der Schiene stattfindet.

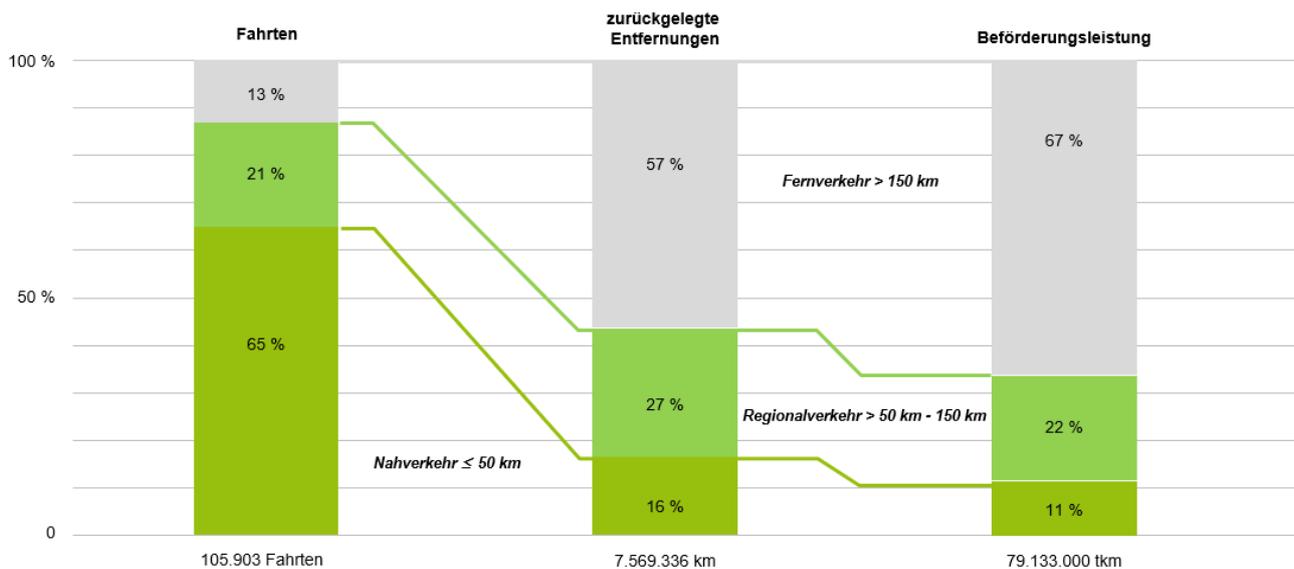
Einen vergleichsweise hohen Anteil an Straßentransporten sowohl beim Transportaufkommen als auch bei der Transportleistung haben hingegen die Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch (Kategorie B4). Darunter fallen beispielsweise Belieferungen mit Lebensmitteln und weiteren Konsumgütern an die Filialen von Einzelhändlern als Teil der Distributionslogistik. Hier spielen insbesondere die Eilbedürftigkeit bei verderblichen Gütern sowie die Bedienung sehr ausdifferenzierter Distributions- und Logistikkonzepte eine wesentliche Rolle für die sehr häufige Wahl der Straße als Verkehrsträger.

Sogenannte „containerisierte“, d.h. in Containern, Wechselbehältern o.ä. gestaute Waren werden statistisch nur nach der Art des Behältnisses, aber nicht nach dem Inhalt erfasst. Da diese Behälter in vielen Transportketten zum Standard geworden sind, spielt die Kategorie B10 der „Sonstigen Produkte“ mit einem Anteil von rund 15 % an der Menge und rund 25 % an der Transportleistung auch im Straßengüterverkehr eine relativ große Rolle. Die containerisierten Güter sind derzeit das wachstumsstärkste Segment im Güterverkehr. Sie werden sowohl im sogenannten Kombinierten Verkehr befördert, d.h. abschnittsweise per Bahn oder Binnenschiff mit anschließender Zustellung auf der Straße als auch im reinen Straßentransport, z.B. bei hoher Eilbedürftigkeit.

Die Beispiele zeigen, dass sich der Straßentransport vieler Güter auf typische Entfernungsbereiche konzentriert, in denen die Mehrzahl der jeweiligen Verkehre stattfindet. Beispielsweise werden gerade schwere Güter wie Steine und Erden auf der Straße oftmals auf vielen, aber kurzen Fahrten im Nahbereich zu Baustellen transportiert. Leichte, hochwertige Konsumgüter sind hingegen oft über längere Entfernungen zwischen Zentrallagern unterwegs die in der Fläche verteilt sind. Die Zahl der Fahrten ist gleichzeitig deutlich geringer als z.B. im Kurzstrecken-Baustellenverkehr. Die Entfernungen sind hingegen umso größer.

Die Haupt-Einsatzbereiche des Straßengüterverkehrs – viele schwere Güter über kurze Entfernungen und eher leichte Güter über große Entfernungen – haben unmittelbare Auswirkungen auf die nach Klassen differenzierte Entfernungsstatistik im Güterkraftverkehr:

Auf den Nahverkehr bis 50 km entfallen etwa zwei Drittel aller Lkw-Fahrten. Ergänzt man zusätzlich die Fahrten des Regionalverkehrs, lassen sich mehr als 85 % aller Lkw-Fahrten dem Entfernungsbereich bis einschließlich 150 Kilometern zuschreiben. Demgegenüber liegt der Anteil des Nah- und Regionalverkehrs an den im Straßengüterverkehr erbrachten Fahrzeugkilometern nur bei knapp 45 %. Einer durchschnittlichen Fahrtweite von 18 km im Nahverkehr und von 92 km im Regionalverkehr steht nämlich eine durchschnittliche Fahrtweite von 313 km im Straßengüterfernverkehr gegenüber (KBA 2018) (siehe Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge in Deutschland (4. Quartal 2018)

Quelle: In Anlehnung an KBA 2018

Nochmals etwas geringer als der Anteil des Nah- und Regionalverkehrs an der Fahrleistung ist der Anteil an der Beförderungsleistung. Neben den deutlichen Unterschieden bei den zurückgelegten Entfernungen lässt sich dies zusätzlich auf die Art der Transporte und die zum Einsatz kommenden Fahrzeuge zurückführen. Im Fernverkehr kommen fast ausschließlich Lastkraftwagen der Fahrzeugklasse N3 und Sattelzüge mit bis zu 40 Tonnen zulässiger Gesamtmasse zum Einsatz. Um den Transport möglichst wirtschaftlich durchführen zu können, sind die Fahrzeuge möglichst vollständig nach Volumen oder Gewicht ausgelastet. Anders sieht das hingegen beim Nah- und Regionalverkehr aus. Faktoren wie Termindruck, Liefertreue oder Fahrverbote spielen hier in der Regel eine größere Rolle als das optimale Ausnutzen der Auslastungskapazitäten der Fahrzeuge. Zusätzlich werden im Bereich des Nah- und Regionalverkehrs neben schweren Lkw zu einem erheblichen Anteil auch kleinere Fahrzeuge eingesetzt, die den Fahrzeugklassen N1 und N2 zuzuordnen sind.

Eine nicht unerhebliche Rolle gerade im Nah- und Regionalverkehr spielt zudem der sogenannte Werkverkehr, d.h. die vom Versender oder Empfänger selbst organisierte und durchgeführte Beförderung von Gütern, anstatt hierfür einen externen Spediteur oder Frachtführer zu beauftragen (Abbildung 2-2).

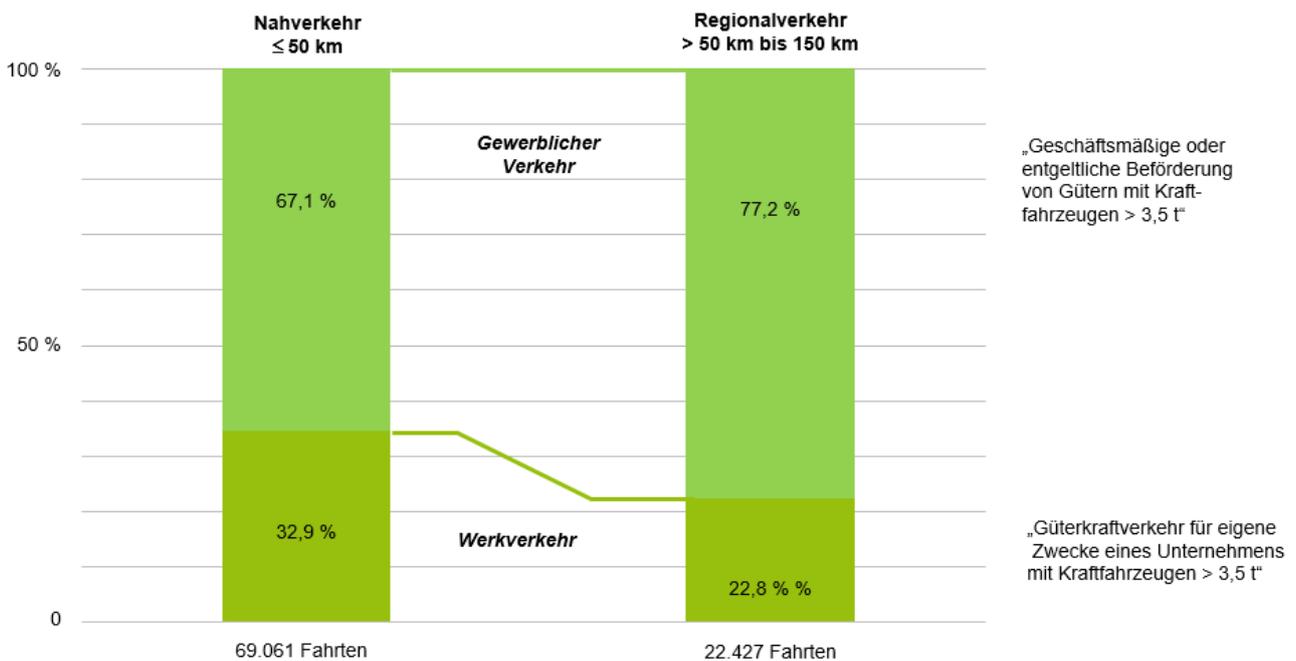
Die Zulässigkeit des Werkverkehrs ist rechtlich im Güterkraftverkehrsgesetz geregelt.¹ Es dürfen nur Transporte zu eigenen Zwecken durchgeführt werden und der Transport darf im Verhältnis zur sonstigen Geschäftstätigkeit nur eine Hilfstätigkeit sein. Typische Beispiele sind etwa die Belieferung eigener Baustellen durch einen Bauunternehmer oder die Versorgung eigener Filialen durch einen Einzelhändler. Aus den Merkmalen des Werkverkehrs ergibt sich u.a. ein Verbot, Ladung für Dritte auf der Rückfahrt aufzunehmen. Dies macht den Werkverkehr für den Güterfernverkehr, der aus Wirtschaftlichkeitsgründen auf Rückfrachten angewiesen ist, in aller Regel uninteressant.²

¹ GüKG, unter: https://www.gesetze-im-internet.de/g_kg_1998/, zuletzt abgerufen am 10.08.2020

² GüKG, (§1 Satz 2, unter: https://www.gesetze-im-internet.de/g_kg_1998/)

Im Nah- und Regionalverkehr entfallen hingegen rund ein Viertel der Fahrten auf den Werkverkehr. Diese Fahrten spielen sich also außerhalb des gewerblichen Transportmarkts ab. Um das Dekarbonisierungspotenzial dieser Fahrten und die dort eingesetzten Fahrzeuge nicht zu vernachlässigen, darf der Werkverkehr mit seinen spezifischen Regeln und Anforderungen bei der Betrachtung von Lkw-Einsatzprofilen und den daraus resultierenden Anforderungen in der Betrachtung nicht ausgeklammert werden (KBA 2018).

Abbildung 2-2: Gewerblicher Güterkraftverkehr und Werkverkehr (4. Quartal 2018)



Quelle: In Anlehnung an KBA 2018

Die Vielfalt des Straßengüterverkehrs zeigt sich auch in der Statistik der insgesamt in Deutschland derzeit rund 3,4 Mio. zugelassenen Nutzfahrzeuge, differenziert nach Gewichtsklassen sowie nach Aufbauform (KBA 2019a). (Tabelle 2-2).

Etwa drei Viertel aller Nutzfahrzeuge entfallen auf die Fahrzeugklasse N1, das heißt auf Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 t. Für den gewerblichen Einsatz dieser Fahrzeuge gelten allerdings verschiedene zentrale Regeln des Güterkraftverkehrs, wie beispielsweise die Bestimmungen des Güterkraftverkehrsgesetzes, Regelungen zur Einhaltung von Lenk- und Ruhezeiten und zum digitalen Tachograf, die Pflicht zur Entrichtung von Straßennutzungsgebühren auf Bundesfernstraßen oder das Sonn- und Feiertagsfahrverbot. Die Klasse der Fahrzeuge bis N2 birgt in Deutschland die Besonderheit, dass für Fahrzeuge bis 7,5 t teilweise Sonderregelungen gelten (keine Mautpflicht, Fahrerlaubnis mit der alten Führerscheinklasse 3), sodass im Segment N2 derzeit überwiegend Fahrzeuge bis 7,5 t zu finden sind, aber deutlich weniger Fahrzeuge zwischen 7,5 t und 12 t zulässiger Gesamtmasse.

Die nicht mautpflichtigen Fahrzeuge der Fahrzeugklasse N2 weisen zu rund 40 % einen Standard-Aufbau auf (Kasten oder Plane). Eine weitere Aufbauform, die relativ häufig bei den nicht mautpflichtigen Fahrzeugen zu finden ist, ist der Kipper. Auch die mautpflichtigen N2-Fahrzeuge umfassen zu etwas mehr als 40 % Standardfahrzeuge mit Kasten und Plane, gefolgt von den Aufbauformen Hakenlift/Ladegerät sowie dem Kipper.

Tabelle 2-2: Nutzfahrzeugbestand in Deutschland nach Aufbauform

	N1 (bis 3,5 t)	N2 (bis 12 t)		N3 (über 12 t)
	nicht mautpflichtige Fahrzeuge (unter 7,5 t)	mautpflichtige Fahrzeuge (ab 7,5 t)		
Plattform	1.724	1.666	508	1.817
Offener Kasten	213.436	26.704	3.720	3.133
Geschlossener Kasten	768.752	71.608	21.966	16.037
Mit Isolierwänden und Kühlung	21.899	8.596	6.303	15.550
Mit Isolierwänden ohne Kühlung	2.339	921	387	868
Seitenplane	28.283	16.663	6.308	10.116
Containerchassis	154	2.053	1.255	38.104
Hakenlift/Ladegerät	2.443	20.763	14.398	23.839
Kipper	33.783	62.168	12.362	62.895
Tankfahrzeuge für Normalgut	4	51	67	1.493
Tankfahrzeuge für Gefahrgut	86	413	377	6.089
Sattelzugmaschinen	493	1.207	540	216.043
Sonstige Aufbauten	1.543.215	24.418	6.071	41.763
Summe	2.616.611	237.231	74.262	437.747

Quelle: KBA 2019a und eigene Berechnungen

Die Struktur der Fahrzeuge in der Fahrzeugklasse N3 ist geprägt von Sattelzugmaschinen (und den zugehörigen Aufliegern), die etwa die Hälfte aller Fahrzeuge ausmachen. Weitere wichtige Aufbauformen sind auch hier der Kipper, Containerchassis für standardisierte Behältertransporte, sonstige Aufbauten wie z.B. Spezialaufbauten sowie der Hakenlift/Ladegerät.

Die Aufteilung der Lastkraftfahrzeuge in Aufbauformen ermöglicht erste Aussagen über Transportsegmente und wie diese dem Bestand zugeordnet werden können. So wird z.B. die Aufbauform des Containerchassis in der N3-Fahrzeugklasse überwiegend im Kombinierten Verkehr bzw. im Seehafenverkehr eingesetzt. Lkw in Kastenbauweise mit Isolierwänden mit oder ohne Kühlung werden typischerweise in der Lebensmittellogistik für zeitlich verderbliche Güter eingesetzt, wohingegen im Automotive-Bereich die Plane als Standard betrachtet werden kann. Sonstige Aufbauten gehören häufig zu Großraum- und Schwertransporten, Gefahrguttransporten oder der Entsorgungslogistik. Kipper werden in der Regel für die Baustellenlogistik sowie den Transport weiterer Massengüter eingesetzt.

Um die Vielfalt des Straßengüterverkehrs insgesamt abbilden zu können, ist eine über die statistische Differenzierung hinausgehende Profilbildung sinnvoll. Sie sollte möglichst viele der genannten Merkmale erfassen und in eine Systematik überführen, die in der Lage ist, konkrete Fahrzeug-Einsatzprofile so zu beschreiben, dass einerseits die Differenziertheit des Straßengütertransportmarktes möglichst zutreffend wiedergegeben wird, und andererseits eine beschränkte Anzahl an wirtschaftlich darstellbaren Profilen resultiert, die als Grundlage einer Flotten-Dekarbonisierung dienen können.

Dies gelingt am besten über eine Verknüpfung zwischen fahrzeugbezogenen Merkmalen wie Antriebsstrang, Aufbauform oder Nutzlast einerseits und logistischen Merkmalen wie Transportentfernungen, Ladungsstruktur oder Eilbedürftigkeit andererseits. Diese Verknüpfung soll als logistisches Einsatzprofil bezeichnet werden. Das logistische Einsatzprofil nimmt auf typische, regelmäßig wiederkehrende Situationen auf dem Transportmarkt Bezug und verknüpft so das eingesetzte Fahrzeug mit dem Leistungsprogramm, das es damit zu erfüllen gilt.

Nachfolgend werden über fünf übergeordnete Kategorien hinweg insgesamt 17 charakteristische Einsatzprofile vorgestellt, wovon zehn Profile im Nah- und Regionalverkehr sowie sieben Profile im

Fernverkehr eingegliedert wurden. Die Einsatzprofile unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Faktoren wie beispielsweise dem Einsatzgebiet, der Güterstruktur oder unternehmenstypischer Merkmale. Verwandte Einsatzprofile werden jeweils in übergeordneten Kategorien zusammengefasst, um die spätere Definition von Dekarbonisierungs-Standardprofilen zu erleichtern.

2.2. Einsatzprofile im Nah- und Regionalverkehr

Im Nah- und Regionalverkehr findet der Transport von Gütern nahezu ausschließlich auf der Straße statt. Entsprechend groß ist die Varietät der Transportaufgaben, die es zu bewältigen gilt, und damit auch die Vielfalt der logistischen Einsatzprofile. Es ist daher sinnvoll, diese zur Unterscheidung in eine überschaubare Anzahl von gut voneinander abgrenzbare Kategorien zu gliedern, die sich grundsätzlich zur Beschreibung des Straßengüterverkehrsmarktes eignen (Hölser 2019): Stückgut- und Systemverkehre, (Teil-)Ladungsverkehre, Werkverkehr, Sonder- und Spezialfahrten sowie Kombiniertes Verkehr. Diesen fünf Kategorien können anschließend jeweils spezifische Einsatzprofile zugeordnet werden (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Übersicht über die Einsatzprofile im Nah- und Regionalverkehr

Kategorie	Einsatzprofile	Güterstruktur	Anwendungsbeispiele	Fahrzeuge (überwiegend)
Stückgut-/ Systemverkehre	Express- und Paketdienste	Pakete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paketauslieferungen ▪ Regionale Umfuhren zwischen Depots 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
	Hubverkehre	Pakete, Sperrgut, Palettenware	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Letzte Meile in Hub-Konzepten ▪ Zustellung an Endkunden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
Regionale (Teil-)Ladungsverkehre	Regionale Beschaffungslogistik	Teile, Pakete, Palettenware	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebietsspeditionen in der Automobilbranche ▪ Werksversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N3
	Regionale Distributionslogistik	Lebensmittel, Non-food Konsumgüter	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Filialbelieferungen von Einzelhändlern ▪ Kontraktlogistik, Lebensmittellogistik 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
	Regionale Entsorgungslogistik	Abfall jeglicher Art	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leergutfahrten von Industrieunternehmen ▪ Entsorgungsfachbetriebe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
Werkverkehr	Werkverkehr und Werklieferverkehre	Güter, Konsumgüter	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eigene Filialversorgung von Einzelhändlern ▪ Lieferung kundenindividueller Produkte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
	Kurierdienste	Pakete, Teile, sonstige Ware	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Direktzustellung an Endkunden im KEP-Bereich ▪ Sonderfahrten für die Produktionsversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
Sonder-/Spezialfahrten	Regionale Gefahrguttransporte	Ätzende/oxidierende/giftige/reizende Waren und Stoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ADR-spezialisierte KMU, die Landverkehre zu Häfen/Bahnhöfe/Flughäfen ermöglichen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N2 ▪ N3
	Regionale Großraum- und Schwertransporte	U.a. Stahlträger, Maschinen, Windradteile, Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transport von Anlagen ▪ Maschinenumzüge 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N3
Kombiniertes Verkehr	Kombiniertes Verkehr	Güter in intermodalen Transporteinheiten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vor- und Nachlauf zu den Terminals des Kombinierten Verkehrs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N3

Quelle: Eigene Darstellung

Stückgut- und Systemverkehre

Im Stückgut- und Systemverkehr werden Waren transportiert, die sich einzeln und am Stück transportieren lassen. Dabei handelt es sich üblicherweise um Paletten oder andere Ladungsträger wie Gitterboxen, einzelne Packstücke (z.B. Versandkartons) oder auch Sperrgut (z.B. Artikel, die ohne Umverpackung versendet werden) (Hölser 2019). Diese eher kleineren Sendungen werden aus ökonomischen Gründen vielfach nicht als isolierte Ladeeinheit direkt von einem Versender zum Empfänger („Ladungsverkehre“) versandt, da geringe Fahrzeugauslastungen die Folge wären. Die Einzelsendungen werden stattdessen in einem Gebiet gesammelt und anschließend zu Komplettladun-

gen konsolidiert, um Bündelungspotenziale zu generieren. Um für die nötige Auslastung und regionale Abdeckung zu sorgen, agieren Speditionen oft in Stückgutkooperationen, die mit gemeinsamen Verbundnetzen sogenannte Systemverkehre bilden (Hölser 2018).

Zu der Kategorie der Stückgut- und Systemverkehre lassen sich die beiden Einsatzprofile *Express- und Paketdienste* und *Hubverkehre* zählen (Hölser 2018). Typische Beispiele für Nah- und Regionalverkehre im Bereich der *Express- und Paketdienste* sind Paketabholungen und -zustellungen mit allen Arten von Fahrzeugen vom Lastenrad bis hin zum Sattelzug sowie regionale Umfuhren zwischen den Depots von KEP-Dienstleistern, die oftmals mit Lastzügen abgewickelt werden. Das wichtigste Anwendungsbeispiel für *Hubverkehre* besteht aus der sogenannten ersten und letzten Meile, also der Abholung und Zustellung von Sendungen beim bzw. an den Endkunden. Die Grenze zwischen Express- und Paketdiensten sowie den klassischen Stückgutverkehren der Systemverkehrsdienstleister wird oft bei einem Sendungsgewicht von 31,5 kg gezogen (Schwemmer 2016).

Regionale (Teil-)Ladungsverkehre

Als Ladungsverkehre werden ungebrochene Verkehre bezeichnet, bei denen zu einer Ladeinheit gebündelte Güter direkt vom Versender zum Empfänger transportiert werden. Man unterscheidet Ladungsverkehre nach Auslastung des Fahrzeugs. Bei einem vollständig ausgelasteten Transport durch einen Verloader spricht man von einer Komplettladung (FTL „Full Truck Load“), bei einem Transport mit teilweiser Auslastung des Fahrzeugs durch einen Verloader von einer Teilladung (LTL „Less than Truck Load“). Der wirtschaftliche Vorteil von Ladungsverkehren resultiert aus geringeren Transaktionskosten, da nur wenige Kunden zu bedienen sind und aus dem Wegfall von Sammel-, Verteil- oder Umschlagsaktivitäten sowie der Vermeidung von Hub-bedingten Umwegen auf dem Transportweg (Hacker et al. 2020a).

Die Kategorie der regionalen (Teil-)Ladungsverkehre umfasst drei Einsatzprofile, die, differenziert nach logistischen Subsystemen, als *Regionale Beschaffungslogistik*, *Regionale Distributionslogistik* sowie *Regionale Entsorgungslogistik* definiert werden können (Schulte 2016). Beispielhafte Anwendungsbereiche der *Regionalen Beschaffungslogistik* sind Gebietsspeditionen in der Automobilbranche oder die Versorgung einer Endmontagelinie im Maschinenbau durch regionale Zulieferer. Die Lebensmittellogistik als Überbegriff und Filialbelieferungen im Einzelhandel sind Anwendungsfälle der *Regionalen Distributionslogistik*. Beispielhafte Anwendungen innerhalb der *Regionalen Entsorgungslogistik* können zum einen innerbetriebliche Leergutfahrten und sonstige logistische Entsorgungsprozesse, aber auch Verkehre kommunaler Entsorgungsbetriebe und spezialisierter Entsorgungsfachbetriebe sein.

Werkverkehr

Beförderungen, welche für eigene Zwecke eines Unternehmens und mit eigenen Kraftfahrzeugen durchgeführt werden, bezeichnet man als Werkverkehre. Es besteht im Unterschied zum gewerblichen Güterkraftverkehr keine Erlaubnis- und Versicherungspflicht, jedoch eine Meldepflicht an das Bundesamt für Güterverkehr³.

Dem Werkverkehr als Kategorie ist das Einsatzprofil *Werkverkehr und Werklieferverkehre* zugeordnet. Klassische Beispiele von Werkverkehren sind die eigene Auslieferung kundenindividueller Produkte oder die Filialversorgung von Einzelhändlern aus einem Zentrallager heraus mit eigenen Fahrzeugen. Beim Werklieferverkehr wird zusätzlich zur Lieferung beim Empfänger noch eine Dienstleistung erbracht, beispielsweise die Montage oder der Einbau des gelieferten Produkts. Üblicherweise

³ GüKG, §§1, 9, 15a, unter: https://www.gesetze-im-internet.de/g_kg_1998/ (abgerufen am 10.08.2020)

finden diese Verkehre über kürzere und mittlere Distanzen statt, sodass der Nah- und Regionalverkehr hier das dominierende Anwendungsfeld ist.

Sonder- und Spezialfahrten

Die Kategorie setzt sich aus Sonderfahrten und Spezialfahrten zusammen. Unter Sonderfahrten versteht man Direktfahrten, bei denen bestimmte, sehr eilbedürftige Waren außerplanmäßig und oft noch am selben Tag transportiert werden müssen. Ein Beispiel hierfür sind beauftragte Kurierdienste, die durch den Transport von Engpass-Bauteilen einem Produktionsstillstand entgegenwirken. Spezialfahrten umfassen hingegen Transporte, bei denen die zu befördernden Güter aufgrund ihrer Beschaffenheit besondere Anforderungen an die Fahrzeuge, das Personal und die Routenplanung stellen. Hierunter werden neben Großraum- und Schwertransporten auch Gefahrguttransporte verstanden (Hölser 2018).

Unter der Kategorie Sonder- und Spezialfahrten werden insgesamt drei Einsatzprofile zusammengefasst. Zunächst fällt das Einsatzprofil der *Kurierdienste* aufgrund der besonderen Eilbedürftigkeit der Sendungen in diese Kategorie. Die begleitete Zustellung an Endkunden im KEP-Bereich und Sonderfahrten für die Notfall-Produktionsversorgung von Industrieunternehmen sind hier beispielhafte Anwendungsfälle. *Regionale Gefahrguttransporte* definieren ein weiteres Einsatzprofil der Kategorie Sonder- und Spezialfahrten. Eine typische Gruppe sind hier kleine und mittelständische Transportunternehmen, die den Straßentransport von Gefahrgut im Vor- und Nachlauf zu einem Binnenschiffs-, Eisenbahn- oder Luftfrachttransport durchführen. Das letzte der drei Profile bilden *Großraum- und Schwertransporte*. Typisch für dieses Nischensegment sind Spezialtransporte von Anlagen, Fahrzeugen oder Maschinen, bei denen die gesetzlich zulässigen Fahrzeug- oder Ladungsmaße oder Gewichtsgrenzen überschritten sind (Schwemmer 2016).

Kombinierter Verkehr

Der Kombinierte Verkehr (KV) umfasst Haus-zu-Haus Transportketten, bei denen ein standardisierter Ladungsbehälter auf mindestens zwei Verkehrsträgern befördert wird und mindestens ein Umschlag zwischen den Verkehrsträgern stattfindet. Während der Hauptlauf mit der Bahn oder dem Schiff stattfindet, erfolgt der Vorlauf und der Nachlauf typischerweise mit dem Lastkraftwagen (Gronalt et al. 2011). Beim Kombinierten Verkehr erfolgt stets der Umschlag eines Ladungsbehälters zwischen den Verkehrsträgern aber kein Umschlag der einzelnen Güter. Diese verbleiben vielmehr im Ladungsträger. So wird eine hohe Standardisierung erreicht. Den größten Anteil an Transporten des Kombinierten Verkehrs macht der sogenannte unbegleitete Kombinierte Verkehr aus, bei dem ISO-Container, Wechselbehälter und Sattelaufleger umgeschlagen und transportiert werden. Beim begleiteten Verkehr hingegen werden komplette Lkw inklusive Zugmaschine und Fahrer abschnittsweise mit der Eisenbahn transportiert (Stock und Bernecker 2014).

Das Einsatzprofil des *Kombinierten Verkehrs* umfasst also alle Vorläufe und Nachläufe mit Lkw zu den intermodalen Terminals. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben finden diese in aller Regel immer in einem Entfernungsbereich von bis zu 150 km statt, sodass es sich um ein typisches Profil des Nah- und Regionalverkehrs handelt (Hacker et al. 2020a).

2.3. Einsatzprofile im Fernverkehr

Im Fernverkehr steht der Lkw stärker in Konkurrenz mit anderen Verkehrsträgern. Hieraus resultieren gerade auf längeren Strecken verschiedene Situationen, in denen die Schiene oder das Binnenschiff den wirtschaftlicheren Transport anbieten können, und daher zu bevorzugen sind. In der Regel

sind dies vor allem Punkt-zu-Punkt-Verkehre mit größeren Mengen. Bei anderen Transporten kommen hingegen auch auf der Langstrecke die Systemvorteile des Lkw wie seine Flexibilität, höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten und die gute Individualisierbarkeit von Transportangeboten zum Tragen.

Entsprechend erstreckt sich die Varietät der Lkw-Einsatzprofile im Fernverkehr über insgesamt drei Kategorien, nämlich die Hauptläufe im Stückgut- und Systemverkehr, die (Teil-)Ladungsverkehre sowie Sonder- und Spezialfahrten (Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Übersicht über die Einsatzprofile im Fernverkehr

Kategorie	Einsatzprofile	Güterstruktur	Anwendungsbeispiel	Fahrzeuge (überwiegend)
Stückgut-/ Systemverkehre	Express- und Paketdienste	Pakete	▪ Hauptläufe zwischen Depots	▪ N2 ▪ N3
	Hubverkehre	Pakete, Sperrgut, Palettenware	▪ Hauptläufe zwischen Ausgangsdepots und Zentralhub ▪ Hauptläufe zwischen Zentralhub und Empfangsdepots	▪ N2 ▪ N3
(Teil-)Ladungsverkehre	Beschaffungslogistik	Teile, Pakete, Palettenware	▪ Direkttransporte zwischen Absender und Empfänger (Zulieferer und Verloader)	▪ N3
	Distributionslogistik	Lebensmittel, Non-food Konsumgüter	▪ Hauptläufe auf der Straße innerhalb der Kühlkette	▪ N2 ▪ N3
Sonder-/Spezialfahrten	Kurierdienste	Pakete, Teile, sonstige Ware	▪ Sonderfahrten für die Produktionsversorgung	▪ N2 ▪ N3
	Gefahrguttransporte	ätzende/oxidierende/giftige/reizende Waren und Stoffe	▪ ADR-spezialisierte KMU, die Landverkehre zu Häfen/Bahnhöfe/Flughäfen ermöglichen	▪ N2 ▪ N3
	Großraum- und Schwertransporte	u.a. Stahlträger, Maschinen, Windradteile, Fahrzeuge	▪ Transport von Anlagen ▪ Maschinenumzüge	▪ N3

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgrund des Rückfrachtenproblems finden *Werkverkehre* in aller Regel nur auf Entfernungen bis 150 km statt und werden daher beim Fernverkehr nicht weiter betrachtet. Die im Nah- und Regionalverkehr zusätzlich betrachtete Kategorie des *Kombinierten Verkehrs*, die das gleichnamige Einsatzprofil beinhaltet, entfällt bei der Betrachtung des Fernverkehrs ebenfalls. Aufgrund der Definition des Kombinierten Verkehrs im Sinne der Richtlinie 92/106/EWG, in der Fassung 2006/103/EG⁴, wird im KV nur der – in der Privilegierung in StVO und StVZO auf 150 km begrenzte – Vor- und Nachlauf auf der Straße durchgeführt. Der Fernverkehr („Hauptlauf“) findet hingegen gerade nicht auf der Straße statt, und bleibt daher hier ohne Betrachtung.

Stückgut- und Systemverkehre

Die für die Kategorie Stückgut- und Systemverkehre definierten Einsatzprofile *Express- und Paketdienste* und *Hubverkehre* lassen sich grundsätzlich auch auf den Fernverkehr übertragen. Es ändert sich lediglich der zu betrachtende Teil der Transportkette, der jeweils den Anwendungsfall für den Fernverkehr bildet. So rücken beispielsweise bei den *Express- und Paketdiensten* im Fernverkehr die nächtlichen Hauptläufe zwischen Depots in den Mittelpunkt, bei denen Sendungen aus der Versandregion in die Region der Empfänger transportiert werden (Hölser 2019). Die Organisation der *Hubverkehre* kommt dem Prinzip der *Express- und Paketdienste* nahe. Im Stückgutverkehr finden sich allerdings häufig mehrstufige Netzwerke, d.h. neben den Verkehren zwischen den Zentralhubs

⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0103> (zuletzt abgerufen am 10.08.2020)

sind hier auch Hauptläufe zwischen Ausgangsdepot und einem Zentralhub sowie Hauptläufe zwischen Zentralhub und Empfangsdepot zu betrachten (Hölser 2018).

(Teil-)Ladungsverkehre

Die Einsatzprofile der Kategorie (Teil-)Ladungsverkehre können ebenfalls in modifizierter Form für den Fernverkehr herangezogen werden. Unter die *Beschaffungslogistik* im Fernverkehr fallen alle Direktfahrten zwischen Absender und Empfänger, also beispielsweise zwischen Zulieferer und Produktionsunternehmen über längere Entfernungen (Schwemmer 2016). Überall dort, wo Eisenbahn oder Schiffstransport aufgrund der spezifischen Anforderungen an den Transport nicht in Frage kommen, werden diese Transporte mit Lkw durchgeführt.

Für das Einsatzprofil der *Distributionslogistik* charakteristische Anwendungsfälle im Fernverkehr sind u.a. temperaturgeführte Transporte in der Lebensmittellogistik. Das Profil der *Entsorgungslogistik* wiederum findet sich nur selten im Straßengüterfernverkehr. Übliche Aufgaben wie das Sammeln und der anschließende Transport von Abfallprodukten zu Aufarbeitungsstellen finden in der Regel im Nah- und Regionalverkehr statt. Hauptläufe innerhalb der Entsorgungslogistik finden ebenfalls meist auf der Wasserstraße und nicht auf der Straße statt (Göpfert 2012).

Sonder- und Spezialfahrten

Die Kategorie der *Sonder- und Spezialfahrten* beinhaltet die Einsatzprofile *Kurierdienste*, *Gefahrguttransporte* sowie *Großraum- und Schwertransporte*. *Kurierdienste* im Fernverkehr können beispielsweise als Sonderfahrten für die Produktionsversorgung von Industrieunternehmen in die Betrachtung aufgenommen werden. *Gefahrguttransporte* werden zu einem großen Teil in Vor- und Nachläufen auf der Straße als Teil des Kombinierten Verkehrs transportiert. Dadurch empfiehlt sich insbesondere eine Betrachtung des Einsatzprofils innerhalb des Nah- und Regionalverkehrs. Dennoch werden *Gefahrguttransporte* auch im Fernverkehr auf der Straße transportiert. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den *Großraum- und Schwertransporten*. Das Einsatzprofil ist ebenfalls typischerweise von kurzen und mittleren Entfernungen geprägt. Dennoch werden hier auch Transporte vollzogen, die der Definition nach dem Fernverkehr zugeordnet werden können.

2.4. Standardisierung als Erfolgsfaktor

Die Entwicklung des vom kommerziellen Verkehr geprägten Güterverkehrsmarkts in der Vergangenheit hat gezeigt, dass Innovationen überall dort auf fruchtbaren Boden gefallen sind, wo sich mit ihnen Potenzial zu einer Standardisierung der Verkehrsabwicklung und damit zu einer Effizienzsteigerung des Betriebs verbunden hat. Die Standardisierung kann dabei das Fahrzeug (z.B. UIC-Normen für Güterwagen, EU-Standardisierung im Lkw-Bereich), die Energieversorgung (Energieträger und Versorgungsinfrastruktur), die Transportbehälter (z.B. Seecontainer, Wechselbrücken), aber auch die Betriebsabwicklung (z.B. industrialisierte Systemverkehre) betreffen. Umgekehrt zeigt gerade das Beispiel der Eisenbahn sehr deutlich, wie sich fehlende Standardisierung (Spurweiten, Stromsysteme, Leit- und Sicherungstechnik im grenzüberschreitenden Verkehr) negativ auf die Innovationsfähigkeit und damit letztlich auch auf wirtschaftlichen Erfolg auswirken kann.

Daher ist zu vermuten, dass auch in Bezug auf die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs die Chancen und Potenziale für eine rasche Marktdurchdringung dort besonders hoch sein werden, wo ein hohes Standardisierungspotenzial besteht. Es werden daher nun Einsatzprofile erläutert, die als besonders interessant innerhalb der beschriebenen Einsatzfelder eingestuft wurden, weil sie ein hohes Standardisierungspotenzial beinhalten. Dies sind die *Hub-Konzepte* des Stückgutverkehrs,

Express- und Paketdienste sowie der *Kombinierte Verkehr*, Alle drei Profile haben die Gemeinsamkeit, dass der Wunsch nach einer möglichst umfassenden Standardisierung der Betriebs- und Leistungsprogramme im Mittelpunkt der unternehmerischen Überlegungen steht.

Hub-Konzepte

Das Einsatzprofil der *Hub-Konzepte* ist der Kategorie *Stückgut- und Systemverkehre* zuzuordnen. Dieses Profil ist geprägt durch den hohen Kostenanteil der Letzten Meile an den Gesamtkosten des Transports, vor allem bei Direktzustellungen mit niedrigen Fahrzeug-Auslastungen. Dies ist gekoppelt mit einer niedrigen Produktivität, die durch häufiges Nicht-Antreffen der Endkunden trotz Zustell-Avisierung und daraus resultierend mehrere Zustellversuche insbesondere im B2C-Bereich (Business to Customer) zustande kommt. Ein weiterer Komplexitätsfaktor sind steigende Kundenbedürfnisse bei der Zustellung, die in Konzepten wie der Zeitfensterzustellung, der Expresslieferung über Nacht und einem 24-Stunden-Service resultieren. Als dominierende Unternehmensstruktur in diesem Einsatzprofil lassen sich Speditionskooperationen mit Partner- und Mitgliedsunternehmen identifizieren. Dadurch werden Bündelungspotenziale geschaffen und eine regionale Netzabdeckung ermöglicht. Während die absolute Zahl der aktiven größeren Speditionskooperationen in Deutschland bei weniger als zehn liegt, ist durch die oft klein- und mittelständisch geprägte Mitgliederstruktur bzw. ein ausgeprägtes Subunternehmertum die Zahl der beteiligten Frachtführer sehr groß und die individuelle Flottengröße oft sehr klein (Schwemmer 2016). Häufig kommen im Nah- und Regionalverkehr Solo-Lkw mit Koffer oder Plane zum Einsatz, während die Hauptläufe zwischen den Depots mit Gliederzügen und Sattelzügen abgewickelt werden (Hölser 2018).

Die Verkehre auf der letzten Meile sind besonders anfällig für Staus, die überwiegend in den Verdichtungsräumen auftreten. Die Ursache liegt vor allem im Urbanisierungseffekt, der viele Zustellungen im städtischen Raum hervorgerufen hat. Auch Fahrverbote wie beispielsweise Lkw-Durchfahrtsverbotszonen haben erhebliche Auswirkungen auf die Planung und Organisation von Verkehren auf der letzten Meile.

Hub-Verkehre sind von einer hohen Heterogenität der Güterstruktur geprägt. Dies lässt sich zum einen auf die Struktur der Einzelsendungen zurückführen. Die zu versendenden Güter variieren stark. Es werden beispielsweise Pakete, Sperrgut und Paletten transportiert. Zugleich unterscheiden sich die Einzelsendungen stark in Gewicht, Größe und Abmessungen. Durch diese Varietät können Fahrzeuge sowohl volumenseitig als auch gewichtsseitig ausgelastet sein. In der Regel werden mehrere Kunden auf einer Tour beliefert. Daraus resultieren zahlreiche, wenn auch eher kurze Stopp und eine hohe Relevanz des Standverbrauchs. Da eine Vielzahl an Endkunden innerhalb einer Tour bedient wird, gibt es meist wenige, mittellange Touren pro Tag und Fahrzeug. Hinzu kommt ein häufiges Anfahren des Hubs zum Neubeladen des Zustellfahrzeugs. Das Programm der Fahrzeuge im Vor- und Nachlauf variiert täglich. Daher ist eine tagesübergreifende Standard-Routenplanung im Einsatzprofil *Letzte Meile in Hub-Konzepten* in der Regel nicht möglich. Hingegen sind die *Hauptläufe in Hub-Konzepten* von einem sehr hohen Standardisierungsgrad und einer hohen Planbarkeit geprägt.

Express- und Paketdienste

Das Einsatzprofil der *Express- und Paketdienste* ist ebenfalls der Kategorie der *Stückgut- und Systemverkehre* zuzuordnen. Bezogen auf die Anzahl der Sendungen dominiert innerhalb des Profils der Paketmarkt mit rund 3 Mrd. Sendungen pro Jahr und einem Umsatz von rund 12 Mrd. Euro. Der Expressmarkt nimmt demgegenüber mit 150 Mio. Sendungen pro Jahr und rund 4,7 Mrd. Euro Umsatz eine wesentlich kleinere Rolle ein (BIEK 2020).

Im Express- und Paketverkehr ist ein ausgeprägtes Subunternehmertum weit verbreitet. Dadurch kommt es zu relativ kleinen Eigenfuhrparks und es sind viele Fremdfahrzeuge im Einsatz. Die Abwicklung der Transporte ist gekennzeichnet von einem hohen Grad an Standardisierung. Dies ist darin begründet, dass Güter ausschließlich in Form von Paketen versendet werden, und die Pakete durch Restriktionen bei Maß und Gewicht der Sendungen stark standardisiert sind. Die Zustellfahrzeuge sind in Folge dieser Festlegungen nahezu ausschließlich volumenseitig ausgelastet. Auf dem Markt herrscht ein großer Kostendruck, der eine starke Wettbewerbsintensität zwischen den involvierten Unternehmen erzeugt. Dies hat dazu geführt, dass sich eine oligopolistische Organisation auf dem Express- und Paketdienstmarkt gebildet hat. Wenige, international ausgerichtete Logistikdienstleister haben geschlossene und eigenständige Transportnetzwerke aufgebaut.

Das Einsatzprofil ist im Nah- und Regionalverkehr stark vom innerstädtischen Verkehr geprägt. Viele Brems- und Anfahrvorgänge und zahlreiche Stopps im urbanen Raum machen die Express- und Paketdienste zu einem maßgeblichen Verursacher externer Kosten des Verkehrs. Bis zu 40 % aller Gütereinfahrten in Großstädten lassen sich auf Kurier-, Express- und Paketdienste zurückführen (Arndt 2018). Auch lässt sich aus den Fahrtenprofilen wiederum eine hohe Relevanz des Standverbrauchs ableiten.

Ein Fahrzeug der *Express- und Paketdienste* wird meist für mehrere, relativ kurze Touren pro Fahrzeug und Tag eingesetzt. Dies bedeutet einen häufigen Aufenthalt des Fahrzeugs an der Zustellbasis. Analog zu dem Einsatzprofil der *Letzten Meile in Hub-Konzepten* weichen Zustell-Touren auch hier täglich ab. Regionale Umfuhren zwischen den Depots werden ebenfalls oft bedarfsorientiert und abhängig vom tagesaktuellen Aufkommen durchgeführt. Teilweise finden diese Fahrten aber auch planmäßig statt. Daher kann eine tagesübergreifende Routenplanung nur mit Einschränkungen erfolgen und stehen immer unter dem Vorbehalt einer spontanen Abweichung von dem geplanten Programm.

Kombinierter Verkehr

Beim *Kombinierten Verkehr* handelt es sich um Punkt-zu-Punkt-Ladungsverkehre mit intermodalen Transporteinheiten. Hierfür kommen überwiegend Container, Wechselbrücken und Sattelaufleger zum Einsatz. Während der Einsatz von Containern und Wechselbrücken zu festen Lkw-Einheiten führt und am Terminal lediglich ein Wechsel der aufgesetzten Behälter erfolgt, wird beim Einsatz von Sattelauflegern bei jedem Terminalaufenthalt die Bindung des Zugfahrzeugs zur Transporteinheit aufgelöst. Nur das Zugfahrzeug verbleibt am Terminal und nimmt dort einen neuen Auflieger entgegen oder kehrt leer ins Depot zurück (Hölser 2018).

Die bis zu 150 km langen Vor- und Nachläufe zu und von den KV-Terminals sind üblicherweise B2B-Transporte (Business to Business) für Kunden, die ausreichend Transportaufkommen für Sendungen des Kombinierten Verkehrs aufweisen, d.h. sie werden als Ladungsverkehre mit mindestens einem Behälter ausgeführt. Akteure des Kombinierten Verkehrs sind meist große, international ausgerichtete Speditionen und Logistikdienstleister mit einem ausgeprägten Subunternehmertum. Eine Konsequenz daraus ist, dass der Fuhrpark der Unternehmen meist nur aus Zugmaschinen bzw. dem Chassis besteht. Die als Transporteinheiten zum Einsatz kommenden Seecontainer stehen überwiegend im Eigentum von Verladern, Reedereien und Leasinggesellschaften. Sattelaufleger und Wechselbehälter sind meist Eigentum des Subunternehmens oder des Kunden. In den Behältern wird jegliche Art von Gütern transportiert, bei denen dies von den Abmessungen her möglich ist. Durch den Umschlag des Transportgefäßes und nicht des Guts an sich wird ein hoher Standardisierungsgrad entlang der Transportkette erreicht (Stock und Bernecker 2014).

Ein zentrales Merkmal des Straßenvorlaufs im Kombinierten Verkehr ist der oft längere Vorstau vor Einfahrt in das Terminal. Lange Wartezeiten und verhältnismäßig viele Stopps der Fahrzeuge ergeben relativ lange Standzeiten bei oftmals relativ kurzen Distanzen. Die Anzahl und Länge der Touren hängt vom angewandten Transportsystem des Kombinierten Verkehrs ab. Der begleitete Kombinierte Verkehr wird typischerweise als ein Vorlauf am Tag vollzogen, an den sich eine längere Bahnfahrt anschließt. Da beim unbegleiteten Kombinierten Verkehr nur der Ladungsträger transportiert wird, gibt es hier in der Regel mehrere Touren pro Tag für jedes Fahrzeug, das im Vor- und Nachlauf zwischen Verladern bzw. Empfängern und Terminal eingesetzt wird (Gronalt et al. 2011).

Da der unbegleitete Kombinierte Verkehr den weitaus größeren Teil des Kombinierten Verkehrs ausmacht, wird auch die Mehrzahl der Straßenfahrzeuge im Kombinierten Verkehr mehrfach am Tag eingesetzt. Typisch sind dabei ein relativ fester Kundenstamm und sich wiederholende Routen. Dies ermöglicht eine gute Planbarkeit des Programms. Jedoch wird diese auch erschwert durch den oft langen Vorstau aufgrund von Überlastungen am Terminal, der in den derzeitigen Systemen in aller Regel nicht voraussehbar bzw. kalkulierbar ist.

2.5. Anforderungen an Fahrzeugbeschaffung und -einsatz

Um die Dekarbonisierungspotenziale der identifizierten Einsatzprofile im Nah- Regional- und Fernverkehr identifizieren und erfolgversprechende Dekarbonisierungspfade entwickeln zu können, ist es erforderlich, die sich aus den Profilen ergebenden charakteristischen Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Nutzfahrzeuge zu kennen. Wiederum ist dabei auf eine sinnvolle Standardisierung zu achten. Spezialfahrzeuge werden weder für jedes der identifizierten Einsatzprofile noch für jede der übergeordneten Kategorien wirtschaftlich sinnvoll sein. Vielmehr sind möglichst viele Gemeinsamkeiten zwischen den Profilen zu finden, die für charakteristische Anforderungen bzw. Prüfsteine an das Fahrzeug stehen.

Einen guten Ansatzpunkt hierfür bieten die in Kapitel 2.4 beschriebenen standardisierten Einsatzprofile. Diese bauen ihrerseits auf tragfähigen Geschäftsmodellen im Straßengüterverkehrsmarkt und deren Spezifika auf. Aus den beschriebenen Charakteristika der Profile geht dabei hervor, dass die Bereitschaft zur Fahrzeugbeschaffung und die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugeinsatzes letztlich im Wesentlichen von fünf Faktoren abhängig sein werden, nämlich von den Konditionen der Fahrzeugvorhaltung, den zu befördernden Gütern (Güterstruktur), den Touren und Verzögerungen sowie der erforderlichen Reserven.

Fahrzeugvorhaltung

Rund 80 % der Unternehmen, die in Deutschland im gewerblichen Güterkraftverkehr tätig sind, haben weniger als 20 Beschäftigte und höchstens zehn Fahrzeuge (BGL 2019). Im Teilmarkt der Ladungsverkehre (FTL) werden 25 % des Umsatzes von den zehn größten Unternehmen und ihren Subunternehmern erwirtschaftet. Gleichzeitig stehen den großen Anbietern eine hohe Anzahl kleine und mittelständische Transportunternehmen zum Teil als Konkurrenz gegenüber. KMU sind nicht nur als Subunternehmer tätig, sondern bedienen oftmals auch mit eigenem Fuhrpark und Fahrpersonal Nischensegmente. Im Gegensatz dazu werden im Teilmarkt der Stückgutverkehre 95 % der Umsätze von Transportdienstleistern erwirtschaftet. 68 % dieser Umsätze werden wiederum von den zehn größten Unternehmen und ihren Subunternehmern generiert. Dieses ausgeprägte Subunternehmertum findet sich in vielen Einsatzprofilen des Stückgutmarktes, ist aber insbesondere für die hoch standardisierten Verkehre typisch (Schwemmer 2016). Im Ergebnis muss der Lkw-Fahrzeugmarkt also einerseits Transportunternehmen bedienen, die selbst größere Flotten betreiben und als Fahrzeug-Großkunden auftreten, andererseits aber auch eine Vielzahl an kleinen Unternehmen,

die nur über wenige Fahrzeuge verfügen und diese teils in eigenem Namen, teils aber auch für andere in wechselnden Einsatzprofilen einsetzen.

Güterstruktur

Die Güterstruktur steht für die Beschaffenheit bzw. die Art der zu transportierenden Güter. Sie erlaubt Aussagen zu durchschnittlichen Fahrzeugauslastungen, erforderlichen Ladeeinheiten sowie zum Standardisierungsgrad der Transporte. Viele leichte Sendungen mit hochwertigen Stückgütern führen im Straßengüterverkehr zu einer Dominanz der volumenseitigen Fahrzeugauslastung, wohingegen die maximale Nutzlast weniger häufig der Engpassfaktor ist. Bei rund 20 % der Fahrten ist sie aber der limitierende Faktor (Intraplan und BVU 2007). Hinzu kommt, dass die Sendungsstruktur je nach Einsatzprofil stark variieren kann. Daher ist im Einzelfall oft keine klare Aussage möglich, ob die Fahrzeuge eher volumen- oder gewichtsseitig ausgelastet sein werden. Ein Nutzlastverlust z.B. durch zusätzliche Batteriegewichte kann daher aus wirtschaftlichen Gründen genauso wenig pauschal akzeptiert werden wie ein Verlust an Laderaumvolumen durch neue technische Einbauten, z.B. aufgrund eines vergrößerten Motorraums.

Touren

Die Tourenplanung entscheidet über die Anzahl und Längen der Fahrten. Sie hat unter anderem die Anzahl der Kunden, die Sendungsstruktur, Durchschnittsgeschwindigkeiten, die Reichweite der Fahrzeuge sowie die Lenk- und Ruhezeiten der Fahrer nach der Verordnung (EG) Nr. 561/2006⁵ zu berücksichtigen. Als ein wesentlicher resultierender Faktor ergibt sich aus der Tourenplanung die Häufigkeit und Länge der täglichen Stopps an Hubs, Depots und Abladestellen sowie die Nutzbarkeit dieser Aufenthalte z.B. zum Nachladen oder Tanken.

Verzögerungen

Neben den im Rahmen der Tourenplanung planbaren Stopps ist jede Tour von weiteren, nicht planbaren Stopps und damit von Verzögerungen geprägt. Diese können kundeninduziert sein, wie z.B. unplanmäßige Warte- und Standzeiten an Wareneingängen bzw. -ausgängen. Sie werden umso bedeutsamer, je zahlreicher die geplanten Stopps sind, wie z.B. im Verteilerverkehr. Ungeplante Stopps sind oftmals auch verkehrsinduziert, wenn es durch Stau oder zähfließenden Verkehr zu ungeplanten Unterwegaufenthalten bis hin zu zusätzlichen Pausen wegen unzulässiger Überschreitung der maximalen Lenkzeiten kommt, die dann eventuell durch verkürzte Standzeiten am Depot wieder ausgeglichen werden müssen.

Reserven

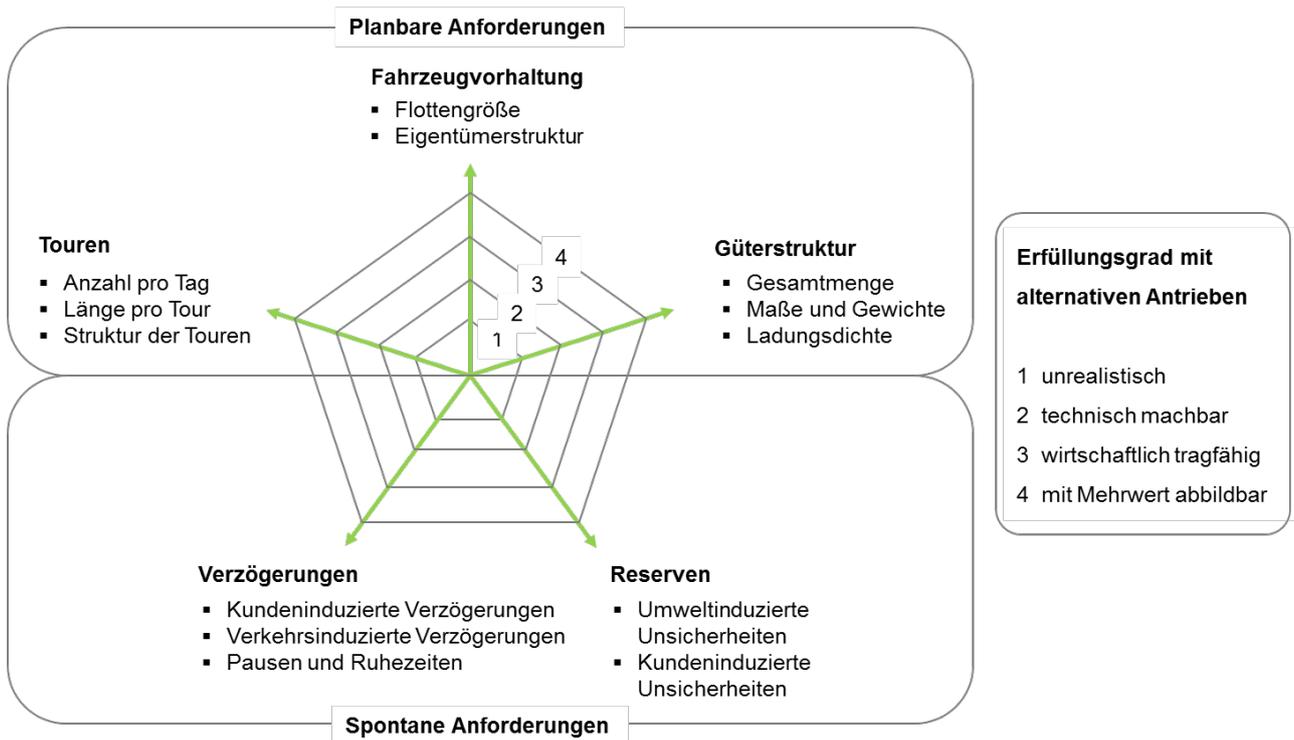
Ausreichende Reserven sind Bestandteile jedes erfolgreichen logistischen Leistungsprogramms. Nur durch ausreichende Reserven ist der Frachtführer in der Lage, auf umweltinduzierte und kundenspezifische Unsicherheiten angemessen zu reagieren. Gleichzeitig dürfen Reserven nicht zu übermäßig bemessen sein, um die Wirtschaftlichkeit des Leistungsangebots nicht zu gefährden. Zu den umweltinduzierten Unsicherheiten zählen beispielsweise kurzfristige Straßensperrungen mit der Konsequenz von Umwegen und längeren Fahrzeiten oder witterungsbedingte Verzögerungen. Zu den kundeninduzierten Unsicherheiten zählen beispielsweise kurzfristige Eilaufträge von Stammkunden (etwa zusätzliche Ladung oder zusätzlich zu bedienende Empfänger), die zur Sicherung der Geschäftsbeziehung in jedem Fall erfüllt werden müssen.

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R0561-20150302&from=DE> (abgerufen am 10.08.2020)

Logistische Anforderungen an das Fahrzeug

In der Zusammenfassung ergeben sich aus diesen fünf Kriterien die wesentlichen Anforderungen, die an das Fahrzeug bzw. den Lkw zu stellen sind. Sie resultieren teilweise aus Faktoren, die sich durch eine gute Planbarkeit auszeichnen (Güterstruktur, Touren und Fahrzeugvorhaltung), teilweise aber auch spontan zu erfüllen sind, um handlungsfähig zu bleiben (Verzögerungen und Reserven) (siehe Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Logistische Anforderungen an das Fahrzeug



Quelle: Hochschule Heilbronn

Es ist anzunehmen, dass sich die Durchsetzungsfähigkeit alternativer Antriebe in der logistischen Praxis letztlich aus dem Erfüllungsgrad dieser fünf Kernanforderungen heraus ergibt. Dabei sind unterschiedliche Abstufungen der Auswirkungen alternativer Antriebe denkbar, die sich mindestens in die Stufen *unrealistisch* (technisch nicht umsetzbar), *technisch machbar* (aber nicht marktfähig), *wirtschaftlich tragfähig* (aber ohne ökonomischen Zusatznutzen) und *mit Mehrwert abbildbar* (mit ökonomischem Zusatznutzen) unterscheiden.

3. Regulatorische Rahmenbedingungen

2016 hat die EU Kommission ihre Strategie für die Transformation zur emissionsarmen Mobilität vorgestellt, welche drei regulatorische Schwerpunkte setzt (EU climate action policies - transport)⁶:

- Optimierung des Verkehrssystems und Erhöhung seiner Effizienz
- Verstärkter Einsatz emissionsarmer alternativer Energieträger im Verkehrssektor
- Übergang zu emissionsfreien Fahrzeugen

Im Zuge dessen wurden in den letzten Jahren wesentliche Neuerungen der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Straßengüterverkehr umgesetzt oder werden aktuell noch verhandelt, welche einen entscheidenden Einfluss auf Fahrzeugangebot und -nachfrage haben.

3.1. Fahrzeugantrieb

EU-Verordnung: CO₂-Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge

Die im August 2019 in Kraft getretene EU-Verordnung 2019/1242⁷, welche in der EU erstmalig CO₂-Emissionsstandards für neuzugelassene schwere Nutzfahrzeuge definiert, wird einvernehmlich von allen Interviewpartnern als zentraler Treiber für die Entwicklung der kommenden Fahrzeuggenerationen benannt.

Der durchschnittliche CO₂-Ausstoß (Tank-to-Wheel) pro Tonnenkilometer der europäischen Neufahrzeugflotten soll gegenüber einem von Juli 2019 bis Juni 2020 ermittelten Bezugswert bis 2025 um 15 % und bis zum Jahre 2030 auf vorläufig 30 % sinken. Dabei ist zu beachten, dass der Bezugswert über die gesamte Neufahrzeugflotte aller Hersteller ermittelt wird und die Fahrzeughersteller die Emissionen ihrer Neufahrzeugflotte mindestens auf das vorgegebene Niveau senken müssen. Fahrzeughersteller, die im Bezugsjahr bereits unter den Durchschnittsemissionen liegen, haben damit bereits einen Teil der Verpflichtung zur Emissionsminderung bei den Neufahrzeugen erfüllt.

Die Regulierung betrifft Hersteller von Lkw und Sattelzugmaschinen (SZM) mit Achskonfigurationen von 4 x 2 und über 16 t zulässigem Gesamtgewicht sowie mit 6 x 2er Radformel, die für den Güterverkehr eingesetzt werden. Eine Übersicht über die regulierten Fahrzeuguntergruppen bietet Tabelle 3-1. Laut EU werden damit 65 % bis 70 % der CO₂ Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen adressiert. Mit der Revision der Regulierung im Jahr 2022 wird erwartet, dass die CO₂-Emissionsstandards auf weitere Nutzfahrzeuggruppen erweitert werden. Um mögliche Nutzlastverluste beispielsweise bei batterieelektrischen Nutzfahrzeugen abzufedern, wird Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ein zulässiges Gesamtgewicht von zusätzlich 1 t bzw. 2 t gestattet.

Grundlage der CO₂-Emissionsstandards sind die mit dem Simulationstool VECTO⁸ bestimmten Energieverbrauchs- und CO₂-Emissionswerte bei der Zulassung, die seit Januar 2019 verpflichtend im Zulassungsverfahren erhoben⁹ und an die EU-Kommission weitergeleitet werden müssen¹⁰. Wesentlich für die Berechnung der CO₂-Emissionen mit VECTO ist die Art des Einsatzprofils (urbaner

⁶ https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_de (zuletzt abgerufen am 10.08.2020)

⁷ https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en#tab-0-0 (abgerufen am 10.08.2020)

⁸ https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en (besucht am 10.08.2020)

⁹ EU-Verordnung 2017/2400, unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593438504238&uri=CELEX:32017R2400> (abgerufen am 14.08.2020)

¹⁰ EU-Verordnung 2018/956, unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593438546703&uri=CELEX:32018R0956> (abgerufen am 14.08.2020)

Güterverkehr / UD, regionaler Güterverkehr / RD und Langstreckengüterverkehr / LH), für die unterschiedliche Kilometerleistungen und Nutzlasten für die verschiedenen Fahrzeuggruppen angenommen werden.

Bei der Berechnung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Fahrzeughersteller werden Gewichtungsfaktoren verwendet, die sich aus der angenommenen Fahrleistung und Nutzlast der einzelnen Fahrzeuggruppen und Einsatzprofile berechnen lassen. Dadurch beeinflussen insbesondere emissionsstarke Fahrzeuggruppen für den Fernverkehr mit entsprechend hohen Transportleistungen wirksam den Flottendurchschnitt der Hersteller. So ergeben sich die höchsten berechneten Gewichtungsfaktoren für Kilometerleistung und Nutzlast MPW (Mileage & Payload Weighting Factor) in Tabelle 3-2 für die Fahrzeuguntergruppen 5-LH, 10-LH und 9-LH. Daher bewirkt die Regulierung ein Umdenken bei der Dekarbonisierung gerade bei diesen Nutzfahrzeuggruppen, da Hersteller der technischen Realisierung alternativer Antriebskonzepte für die Fahrzeuge zuvor eher kritisch gegenüberstanden.

Der sogenannte „ZLEV Faktor“, mit dem die durchschnittlichen CO₂-Emissionen eines Herstellers um bis zu 3 % reduziert werden können, schafft einen zusätzlichen Anreiz, emissionsfreie (ZEV) und -arme (LEV) Nutzfahrzeuge zuzulassen. Emissionsarme Fahrzeuge sind in der Verordnung dabei als Fahrzeuge definiert, die je Fahrzeuggruppe und Einsatzprofil weniger als die Hälfte der CO₂-Emissionen der Referenzwerte aus dem Zeitraum von Juli 2019 bis Juni 2020 aufweisen. Durch Mehrfachzählung mit Faktoren zwischen 1 und 2 senken diese Fahrzeuge die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neufahrzeugflotte der Hersteller überproportional. Auch Nullemissionsfahrzeuge der Lkw-Gruppen, die heute nicht Teil der Regulierung sind, können bis zur Grenze von 1,5 % für die Minderung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen eines Herstellers als Teil des „ZLEV-Faktors“ angerechnet werden. Die ZLEV-Fahrzeuge werden für die Berechnung des „ZLEV-Faktors“ unberücksichtigt von den zuvor genannten Gewichtungsfaktoren angerechnet (Formel in Tabelle 3-2).

Tabelle 3-1: Regulierte Fahrzeuguntergruppen nach EU-VO 2019/1242 mit spezifizierten Jahresfahrleistungen (JFL) und Nutzlastwerten.

Fz.-UG	Typ	Achsentyp	Zul.-GG	JFL (km)	Nutzlastwerte (t)
4-UD	Lkw	4x2	> 16 t	60.000	2,7
4-RD	Lkw	4x2	> 16 t	78.000	3,2
4-LH	Lkw	4x2	> 16 t	98.000	7,4
5-RD	SZM	4x2	> 16 t	78.000	10,3
5-LH	SZM	4x2	> 16 t	116.000	13,8
9-RD	Lkw	6x2	alle	73.000	6,3
9-LH	Lkw	6x2	alle	108.000	13,4
10-RD	SZM	6x2	alle	68.000	10,3
10-LH	SZM	6x2	alle	107.000	13,8

UD: urbaner Güterverkehr, RD: regionaler Güterverkehr, LH: Langstreckengüterverkehr

Quelle: EU-VO 2019/1242

Tabelle 3-2: Vorläufige CO₂ Bezugswerte refCO₂ in (g/tkm) für 2019 basierend auf durchschnittlichen Emissionen avgCO₂ je Fahrzeuguntergruppe UG

Fz.-UG	NZL _{UG}	MPW _{UG}	avgCO ₂ _{UG}	refCO ₂ _{UG}
4-UD	0,4%	10%	-	-
4-RD	7,9%	15%	198,1	2,42
4-LH	1,9%	45%	102,9	0,89
5-RD	0,8%	50%	84	0,33
5-LH	62,8%	100%	56,5	35,48
9-RD	7,2%	29%	110,9	2,28
9-LH	9,2%	90%	64,7	5,36
10-RD	0,1%	43%	84	0,04
10-LH	9,7%	92%	58,6	5,24
refCO₂ 2019				52,04

NZL: Neuzulassungen, MPW: Gewichtungsfaktor für Kilometerleistung und Nutzlast

$$\text{Berechnungsformeln: refCO}_2 = \sum_{UG} (\text{NZL}_{UG} \times \text{MPW}_{UG} \times \text{avgCO}_2_{UG})_{ref}$$

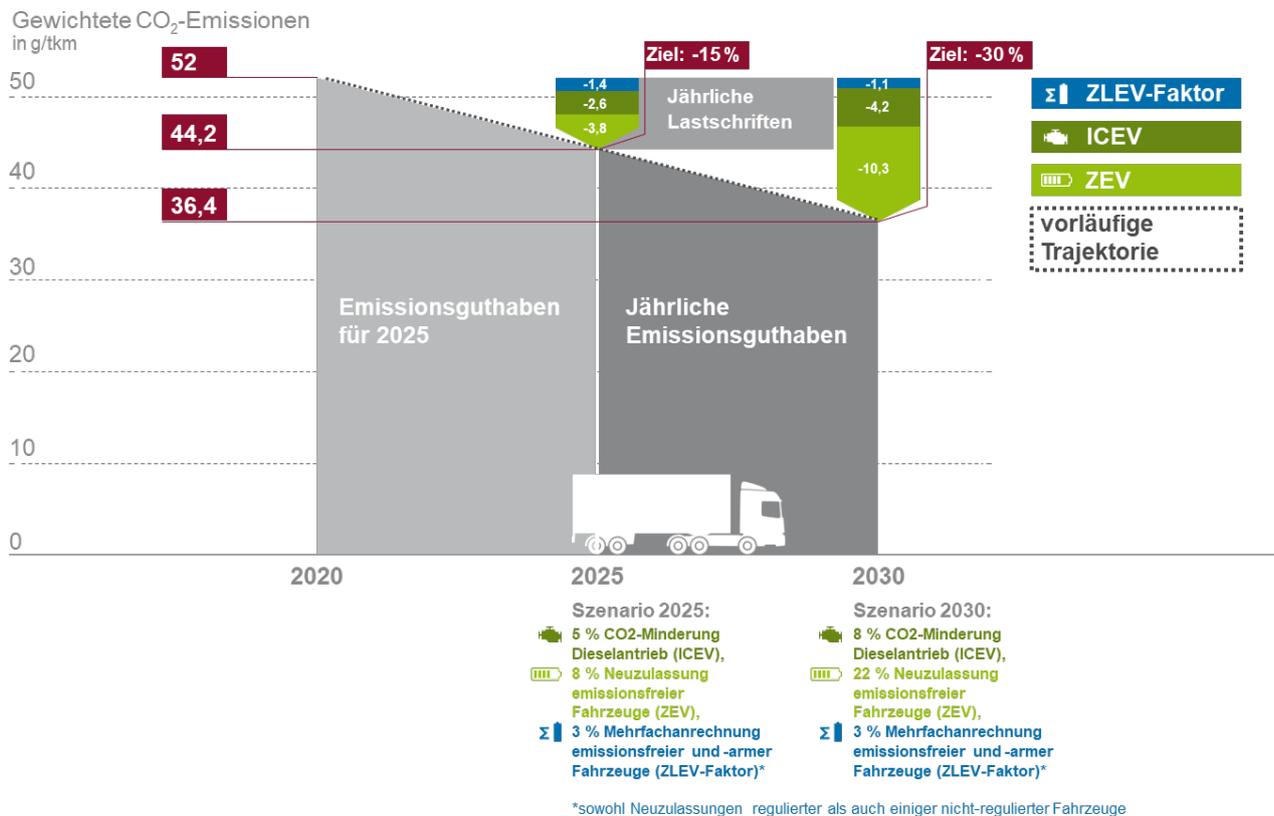
$$\Delta\text{CO}_2 = \text{ZLEV} \times \sum_{UG} (\text{NZL}_{UG} \times \text{MPW}_{UG} \times \text{avgCO}_2_{UG}) - \text{refCO}_2$$

Quelle: EU-VO 2019/1242, ACEA 2020b, eigene Berechnungen

Herstellerspezifisch besteht zusätzlich die Möglichkeit, über „Banking“ und „Borrowing“ Emissionsguthaben und bis zur Grenze von 5 % der durchschnittlichen Emissionen des Jahres 2025 Emissionsschulden aufzubauen. Als Referenzwert zur Ermittlung von Emissionsguthaben dient ab dem Jahr 2020 die lineare Trajektorie vom Bezugswert zu den Zielwerten der Jahre 2025 und 2030 (Abbildung 3-1). Hersteller mit spezifischen CO₂ Emissionen unterhalb dieser Trajektorie können ausgehend vom Jahr 2020 bis zum Jahr 2029 einsetzbare Emissionsguthaben erwerben. Emissionsdefizite, die sich dann einstellen, wenn die durchschnittlichen CO₂-Emissionen eines Herstellers im Zeitraum 2025 bis 2029 über dem ab dem Jahr 2025 gültigen Zielwert liegen, müssen bis zum Jahr 2029 ausgeglichen werden. Eine hilfreiche Übersicht zur Regulierung bietet auch das ICCT (Rodriguez 2019).

Als ersten Zwischenstand für die Referenzwerte der Regulierung sind in ACEA 2020b erste Werte veröffentlicht, mit Ausnahme der Fahrzeuguntergruppe 4-UD (Tabelle 3-2). Die über das VECTO-Tool ermittelten Emissionswerte sind hier bereits für jede Lkw-Gruppe aggregiert. Der Anteil der Neuzulassungen wird mit 62,8 % von Sattelzugmaschinen der Untergruppe 5-LH dominiert. Weitere wichtige Lkw-Untergruppen sind die Fahrzeuge der Untergruppen 9 und 10 für den Langstreckentransport. Über alle in der CO₂-Regulierung berücksichtigten Fahrzeuggruppen (ohne 4-UD) ergibt sich ein durchschnittlicher spezifischer CO₂ Ausstoß von 52 g CO₂/tkm (Tabelle 3-2). Die Streuung der CO₂-Emissionen über die Hersteller liegt bei +13 % bis -8 % (ACEA 2020b). Die gewichteten CO₂-Emissionen müssen im Mittel also bis zum Jahr 2025 um 7,8 g/tkm und bis 2030 um 15,6 g/tkm zurückgehen. Strafzahlungen werden für den Zeitraum von 2025 - 2029 in Höhe von 4.250 € je g CO₂/tkm über dem Zielwert fällig. Ab dem Jahr 2030 erhöht sich das Bußgeld auf derzeit 6.800 € je g CO₂/tkm.

Abbildung 3-1: EU CO₂-Emissionsstandards für schwere Nfz und mögliche Szenarien der Zielerfüllung im EU-Durchschnitt auf Basis vorläufiger Referenzwerte



Quelle: EU-VO 2019/1242, ACEA 2020b, eigene Berechnungen

Daraus lassen sich mögliche Szenarien für die Erfüllung der Zielwerte ableiten, wiederum bezogen auf den europäischen Durchschnittswert. Hersteller sehen mögliche kosteneffiziente CO₂-Minderungstechnologien für konventionelle Dieselfahrzeuge von weiterhin etwa 1 % jährlich (siehe Abschnitt 4.1). Für eine Beispielrechnung nehmen wir für 2025 eine Effizienzsteigerung von 5 % und für 2030 unter Berücksichtigung abnehmender Investitionen in die Technologie von 8 % an. In beiden Zieljahren wird der ZLEV-Faktor mit einem Wert von 0,97 voll ausgeschöpft. Der übrige Bedarf an CO₂-Minderung wird vereinfachend ausschließlich über Nullemissionsfahrzeuge mit Gleichverteilung über die Fahrzeuguntergruppen abgedeckt. Werden diese Werte und Annahmen zu Grunde gelegt, ist im Mittel ein Anteil von etwa 8 % an Nullemissionsfahrzeugen an den Neuzulassungen nötig, um den Zielwert im Jahr 2025 zu erreichen; für 2030 erhöht sich der Anteil auf ca. 22 %. Abbildung 3-1 veranschaulicht die Anteile von Effizienzsteigerungen konventioneller Antriebe, des ZLEV-Faktors und der Neuzulassungsquoten an emissionsfreien Fahrzeugen zur hypothetischen Erfüllung der CO₂-Emissionsstandards. Stehen keine Nutzfahrzeuge der Langstrecken-Fahrzeuguntergruppen (4-LH, 5-LH, 9-LH und 10-LH) zur Verfügung, müssten 2025 mindestens 80 % der Neuzulassungen der regulierten Nutzfahrzeuge mit Einsatzprofilen im Nah- und Regionalverkehr durch Nullemissionsfahrzeuge abgedeckt werden. Das Reduktionsziel für 2030 kann im Mittel unter den getroffenen Annahmen für die Effizienzsteigerung der konventionellen Dieselfahrzeuge nicht ohne Neuzulassungen von Nullemissionsfahrzeugen mit Einsatzprofilen im Fernverkehr erreicht werden.

EU-Verordnung: Euronorm für Luftschadstoffemissionen

Die EU regelt über die EU-Typengenehmigungsrichtlinie 2007/46/EG¹¹ die Rahmenbedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und zugehörigen Systemen. Neben technischen Spezifikationen beinhalten die Typengenehmigungen für Nutzfahrzeuge seit 1988 auch Abgasnormen für Verbrennungsmotoren mit sukzessiver Verschärfung hinsichtlich ihrer Luftschadstoffemissionen. Für schwere Nutzfahrzeuge gilt gesondert von den übrigen Kraftfahrzeugen bereits seit 2012 die Euro VI Norm (EU-Verordnungen 582/2011¹², 595/2009¹³), welche die Schadstoffemissionen gegenüber 1988 theoretisch um 98 % senkt (VDA 2017). Ein Vorschlag zur weiteren Verschärfung auf Euro VII wird derzeit erarbeitet (Euro 7 Initiative)¹⁴.

Grenzwerte gelten für Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) ohne Methananteil (NMHC) und insgesamt unverbrannte Kohlenwasserstoffe (THC), den Methanschlepp (CH₄), Stickoxide (NO_x), Feinstaub (PM) und Ammoniak (NH₃). Für schwere Nutzfahrzeuge beziehen sich die Grenzwerte auf die Motorleistungsabgabe in Kilowattstunden und werden über PEMS-Messungen (Portable Emission Measurement System) im realen Fahrbetrieb kontinuierlich überwacht. Für die NO_x-Emissionen beispielsweise sind 400-460 mg/kWh zulässig; zum Vergleich waren in der Euro V-Norm noch 2.000 mg/kWh erlaubt und in der Euro III-Norm 5.000 mg/kWh. Die notwendige Abgasaufbereitung ist aufwändig und erfolgt mindestens über eine selektive katalytische Reduktion (SCR) mit Harnstoffeinspritzung. Messungen des ICCT signalisieren allerdings, dass die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte in der Praxis für geringe Lastbereiche bzw. Fahrgeschwindigkeiten unterhalb von 40 km/h im Durchschnitt der Testfahrzeuge überschritten werden (Posada et al. 2020).

Die Bestandsverteilung in Abbildung 3-2 zeigt, dass Sattelzugmaschinen bereits überwiegend nach Euro VI Norm zugelassen sind. Gründe hierfür liegen in den nach Schadstoffklassen gegliederten Mautabgaben (Abschnitt 3.2) gekoppelt mit hohen Jahresfahrleistungen der überwiegend auf Langstrecken eingesetzten Sattelzugmaschinen. Die Nutzungsdauern liegen typischerweise bei 4-5 Jahren (Kühnel et al. 2018). Der Anteil an vor 2012 zugelassenen Euro V und älteren Sattelzugmaschinen weist allerdings auf zum Teil deutlich längere Nutzungsdauern hin. Für Nutzfahrzeuge der Klasse N2 ist etwa ein Viertel der Fahrzeuge noch auf die Euro III-Norm zugelassen (KBA 2019b).

Am 1. September 2020 wurde die EU-Typengenehmigungsrichtlinie durch die unmittelbar auf für Personen- und Lastkraftfahrzeuge anzuwendende EU-Verordnung 2018/858¹⁵ abgelöst. Aufgrund der Manipulation von Abgastests durch Abschalteinrichtungen in Pkw, welche ab 2015 für diverse Hersteller aufgedeckt wurden, werden mit der Verordnung zusätzliche Regeln zur Marktüberwachung geschaffen. Neben marktweiten Fahrzeugkontrollen im Realbetrieb, sollen auch die durchführenden technischen Dienste regelmäßig und unabhängig geprüft werden. Die Kommission behält sich im Falle von Nichtkonformitäten europaweite Rückrufaktionen sowie Verwaltungsanktionen von bis zu 30.000 € pro Fahrzeug vor.

¹¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593440036520&uri=CELEX:32007L0046> (besucht am 10.08.2020)

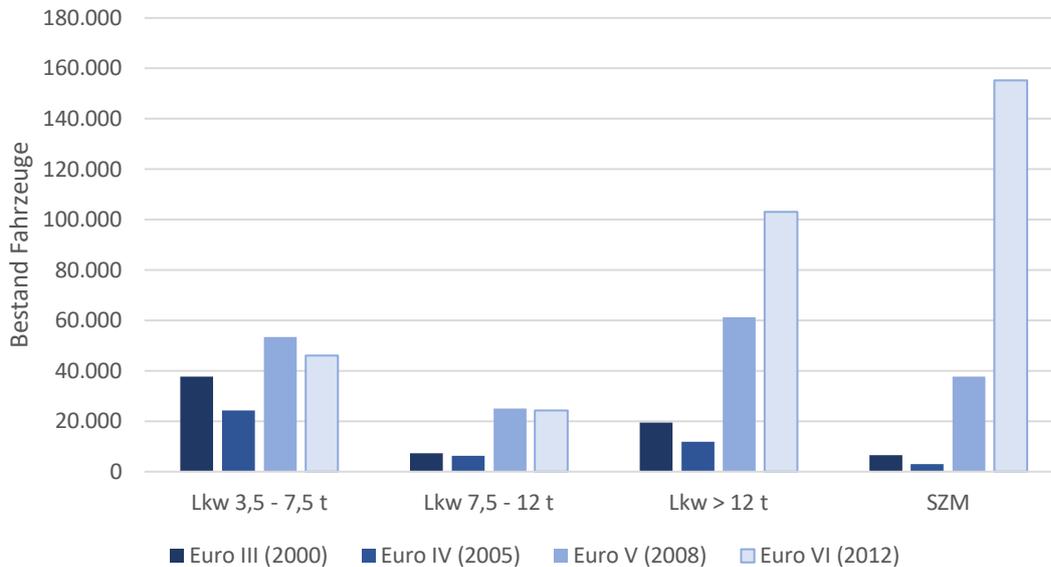
¹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593440076492&uri=CELEX:32011R0582> (abgerufen am 10.08.2020)

¹³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593440122756&uri=CELEX:32009R0595> (abgerufen am 10.08.2020)

¹⁴ <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-Development-of-Euro-7-emission-standards-for-cars-vans-lorries-and-buses> (zuletzt abgerufen am 10.08.2020)

¹⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593443445162&uri=CELEX:32018R0858> (abgerufen am 10.08.2020)

Abbildung 3-2: Verteilung des Bestands an Nutzfahrzeugen zum 01.01.2019 nach Euronormen und Größenklassen



Quelle: KBA 2019b

Neben den Euronormen für Neuzulassungen, spielen die Luftschadstoffemissionen auch für Bestandsfahrzeuge eine zunehmende Rolle, da insbesondere durch den Straßenverkehr in Städten und Ballungsgebieten festgelegte Immissionsgrenzwerte für Feinstaub und Stickstoffdioxid^{16 17} häufig deutlich überschritten werden (Minkos et al. 2020). Als Folge wurden bereits in über 60 Städten in Deutschland Umweltzonen eingerichtet, welche in der Regel nur von mindestens Euro IV-Fahrzeugen passiert werden dürfen. Zudem haben einige Städte zusätzliche Zufahrtsbeschränkungen ausgesprochen (UBA online, Umweltzonen¹⁸). So sind einige Straßen in Berlin vollständig für Dieselfahrzeuge verboten, in Hamburg und weiteren Städten sind einige Straßenabschnitte nur für Dieselfahrzeuge ab Euro V zugelassen und in Stuttgart soll ab Mitte 2020 ein flächendeckendes Fahrverbot für Dieselfahrzeuge unter Euro VI gelten.

Im Güterverkehr sind hiervon der urbane und regionale Verteilerverkehr sowie Vor- und Nachläufe des Fernverkehrs betroffen. Liegen im Fernverkehr die Nutzungsdauern in Deutschland typischerweise bei nur 4-5 Jahren, verkehren im Nah- und Regionalverkehr bei den Größenklassen unterhalb der Sattelzugmaschinen häufig auch ältere Lastkraftwagen mit entsprechend hohen Emissionswerten (vergleiche Abbildung 3-2). Spediteure berücksichtigen die kommunalen Zufahrtsbeschränkungen vermehrt bei der Fahrzeugwahl. So können Grenzwerte für Luftschadstoffe die Transformation zu alternativen Antriebstechnologien begünstigen, mit welcher auch eine Dekarbonisierung des Straßenverkehrs einhergeht.

¹⁶ EU-Richtlinie 2008/50/EG, unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593443518137&uri=CELEX:32008L0050> (abgerufen am 10.08.2020)

¹⁷ BImSchG, unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/> (abgerufen am 10.08.2020)

¹⁸ <http://gis.uba.de/website/umweltzonen/index.php?tab=karte> (abgerufen am 10.08.2020)

EU-Richtlinie: Clean Vehicle Directive

Die im April 2019 verabschiedete EU-Richtlinie 2019/1161¹⁹ (ersetzt 2009/33/EG²⁰) setzt den Mitgliedsstaaten individuelle verbindliche Ziele für die Beschaffung emissionsarmer Fahrzeuge durch öffentliche Träger. In Deutschland sollen ab 2025 45 % der neu angeschafften Busse „saubere“ Antriebe aufweisen. Ab 2030 steigt der Anteil auf 65 %, wobei jeweils die Hälfte durch emissionsfreie Fahrzeuge zu erbringen ist. Reisebusse sind von der Richtlinie ausgenommen. Für schwere Nutzfahrzeuge der Kategorie N2 und N3 werden Ziele von 10 % bis 2025 und 15 % bis 2030 gesetzt

Die Definition eines „sauberen“ Fahrzeugs ist technologieoffen formuliert und beinhaltet Antriebe durch Strom, Wasserstoff, Biokraftstoffe, synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe oder Gas (CNG, LNG, LPG, Biomethan) sowie Plug-In Hybridbusse. Die Richtlinie gilt für Vergaben ab August 2021, zur Prüfung der Zieleinhaltung werden nationale Durchschnittswerte ermittelt.

Die Richtlinie wirkt effektiv für die Dekarbonisierung von Stadtbussen und kommunalen Arbeitsfahrzeugen (nicht Teil der CO₂-Regulierung). Der Einfluss auf Nutzfahrzeuge des nicht-öffentlichen Transportsektors ist zwar gering, allerdings gelten die Transformationsgeschwindigkeiten der elektrischen Antriebsentwicklung im Bussegment als vorbildlich für den Nutzfahrzeugmarkt.

Deutschland: Klimaschutzgesetz und Förderprogramme

Das am 18. Dezember 2019 in Kraft getretene Bundes-Klimaschutzgesetz²¹ setzt Deutschland das Ziel, die THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % zu senken und 2050 THG-Neutralität zu erreichen. Es wurden für die Jahre 2020-2030 sektorale jährliche Klimaschutzziele eingeführt. Im Verkehr sollen die THG-Emissionen demnach deutlich sinken von rund 163 Mio.t im Jahr 2019 auf 150 Mio.t in 2020 und dann linear abfallen auf 95 Mio.t in 2030.

Für den Transportsektor wurden einige Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgase beschlossen. So wird 2021 ein CO₂-Preis eingeführt, welcher 2025 von 25 € pro Tonne auf 55-65 € steigen soll. Darüber hinaus soll der Schienenverkehr ausgebaut und die Anschaffung CO₂-armer Nutzfahrzeuge gefördert werden. Eine CO₂-basierte Mautspreizung sowie ein CO₂-Aufpreis auf die Mautabgaben ab 2023 soll Anreize für die Nutzung emissionsarmer Fahrzeuge schaffen. Außerdem soll der Ausbau der Energieinfrastruktur für alternative Antriebe sowie die Entwicklung fortschrittlicher Biokraftstoffe und strombasierter Kraftstoffe vorangetrieben werden. Bewertungen der Maßnahmen des Klimaschutzprogrammes kommen zu dem Ergebnis, dass die bisherigen Maßnahmen nicht ausreichen werden, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen (Harthan et al. 2020; Kemmler et al. 2020).

Für den Straßengüterverkehr hat die Bundesregierung im Klimaschutzprogramm 2030²² erstmalig ein konkretes Einsparziel genannt: Bis 2030 soll ein Drittel der Fahrleistung über elektrische Antriebe oder strombasierte Kraftstoffe abgedeckt werden. Ein wesentliches Instrument zur Dekarbonisierung der Nutzfahrzeugflotten sind Kaufprämien. Bereits im Juni 2018 wurden Prämien für den Erwerb von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben ausgezahlt. Im Haushalt sind für den Zeitraum bis 2023 insgesamt rund 1 Mrd. Euro vorgesehen. Die Zuschüsse sind auf 40 % der Mehrkosten zu einem vergleichbaren Euro VI Fahrzeug begrenzt und betragen 8.000 € für LNG-Lkw, 12.000 € für LNG-

¹⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593444393368&uri=CELEX:32019L1161> (abgerufen am 10.08.2020)

²⁰ abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593444426316&uri=CELEX:32009L0033>

²¹ <https://www.bmu.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz/> (abgerufen am 10.08.2020)

²² <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1673502/855f58eed07bcbbd697820b4644e83a7/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf> (zuletzt abgerufen am 19.08.2020)

Lkw und E-Lkw bis 12 t und 40.000 € für E-Lkw ab 12 t.²³ Die Umrüstung konventioneller Bestandsfahrzeuge wird über das De-Minimis Programm mit maximal 2.000 € pro Nutzfahrzeug gefördert. Zudem sind elektrische Kraftfahrzeuge bei einem Erwerb bis Ende 2020 über 10 Jahre von der Kfz-Steuer befreit. Neben Fördermaßnahmen des Bundes werden auch auf Landesebenen zusätzliche monetäre Anreize für den Erwerb von klimaschonenden Technologien gesetzt²⁴.

Zur weiteren Entwicklung von Strategien und Handlungsempfehlungen für die Bundesregierung zur Erreichung der Klimaziele im Verkehrssektor wurde 2018 das Gremium „Nationale Plattform Zukunft der Mobilität“²⁵ gegründet. Die Handlungsfelder umfassen alternative Antriebe und Kraftstoffe, die Stärkung klimafreundlicher Verkehrs- und Transportmittel, die Nutzung der Digitalisierung sowie Batterierecycling und Standardisierungen. Derzeit wird ein Konzept zur Förderung von emissionsarmen Nutzfahrzeugen und der benötigten Energieinfrastruktur erarbeitet, welches Ende 2020 vorgestellt werden soll.

3.2. Infrastruktur

EU-Richtlinie: Eurovignette / Lkw-Maut

Die EU-Richtlinie 1999/62/EG²⁶ (mit der Änderung 2011/76/EU²⁷) regelt die Rahmenbedingungen für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge. Die auch als „Wegekostenrichtlinie“ bezeichnete Regulierung muss von den Mitgliedsländern umgesetzt werden, sofern sie Gebühren auf transeuropäischen Verkehrswegen erheben.

Deutschland hat 2005 mit Blick auf den hohen Transitverkehr eine Lkw-Maut eingeführt. Grundlage hierfür bildet das Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG)²⁸ in letzter Änderung von 2019. Ziel ist es, den Gütertransportsektor nach dem Verursacher- und Nutzerprinzip an der Finanzierung der Straßeninfrastruktur zu beteiligen. Im Gegensatz zu zeitabhängigen Abgaben über Vignetten, wird die Maut streckengenau berechnet.

Die Lkw-Maut galt bei ihrer Einführung zunächst nur für Lkw über 12 t auf Bundesautobahnen. Sie wurde sukzessive auf Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht ab 7,5 t (seit Oktober 2015) und zur Vermeidung von Ausweichverkehren auf Bundesstraßen (2012, 2015, seit Juli 2018 alle Bundesstraßen) ausgeweitet. Grundlage für die Höhe der Lkw-Maut sind die Wegekostengutachten, auf deren Grundlage die Maut zuletzt im Januar 2019 angepasst wurde. Eine Übersicht bietet Tabelle 3-3.

Die Maut setzt sich aus Anteilen der Kosten für Infrastruktur sowie externer Kosten für Luftverschmutzung und seit 2019 auch Lärmbelastung zusammen. Die Infrastrukturkosten werden durch das zulässige Gesamtgewicht und die Achskonfiguration bestimmt, dessen Spreizung bei Nutzfahrzeugen mit 7,5 t beginnt. Der Anteil der Luftverschmutzung klassifiziert sich nach den Euro-Abgasnormen, während die Lärmbelastungskosten bei einem festen Betrag liegen. Für einen 40 t Sattel-

²³ Förderrichtlinie BMVI, unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 10.08.2020)

²⁴ <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/foerderung-elektromobilitaet/e-lkw/> (abgerufen am 10.08.2020)

²⁵ <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/> (abgerufen am 18.08.2020)

²⁶ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593444907573&uri=CONSIL:ST_13535_2018_INIT (aufgerufen am 19.08.2020)

²⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593444825883&uri=CELEX:32011L0076> (Abruf am 18.08.2020)

²⁸ <https://www.gesetze-im-internet.de/bfstrmg/> (abgerufen am 10.08.2020)

zug mit Euro VI Motor liegt die Maut beispielsweise bei 18,7 ct/km, wovon der Anteil der Luftverschmutzungskosten 1,1 ct/km und die Lärmbelastungskosten 0,2 ct/km betragen (Korn et al. 2018). Die externen Kosten entsprechen den in Richtlinie 2011/76/EU im Anhang IIIb festgelegten Höchstbeträgen²⁹. Nach Korn et al. 2018 lagen die anrechenbaren Luftverschmutzungskosten bei 76 % der verursachten Kosten, bei den Lärmbelastungskosten waren durch die Maximalsätze lediglich 45 % anlastbar.

Tabelle 3-3: Mautsätze in ct / km ab 2019 für Nutzfahrzeuge im aktuellen Bestand

Fzg.-Konfiguration:	Infrastruktur	Externe Kosten	
		EURO III	EURO VI
Lkw: 7,5 t - 12 t	8,0	6,4	1,3
Lkw: 12 t - 18 t	11,5	6,4	1,3
Lkw: ab 18 t, bis zu 3 Achsen	16,0	6,4	1,3
Lkw: ab 18 t, ab 4 Achsen	17,4	6,4	1,3

Quelle: Korn et al. 2018

Elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge sind in Deutschland von der Maut befreit, wodurch eine frühere Amortisation der höheren Anschaffungskosten gefördert und somit der Markthochlauf elektrischer Antriebe begünstigt wird (Hacker et al. 2020a). Die Mautbefreiung gilt dabei unabhängig von dem ökologischen Fußabdruck der Stromproduktion. Auch Erdgas betriebene Nutzfahrzeuge sind von der Maut befreit. Der ökologische Nutzen ist allerdings umstritten, da LNG-Kraftstoffe für schwere Nutzfahrzeuge in der Praxis nicht unbedingt zu einer realen Einsparung an THG-Emissionen oder Luftschadstoffen führen (Mottschall et al. 2020, Cornelis 2019). Im Mai 2020 hat der Bundestag eine Verlängerung der Mautbefreiung, die ursprünglich Ende 2020 auslaufen sollte, bis 2023 beschlossen. Im Juni wurde dem Gesetzespaket, welches z.B. auch Verbesserungen bei der Radverkehrsinfrastruktur beinhaltet, im Bundesrat zugestimmt. Allerdings wurde im September durch die EU-Kommission bereits Einspruch gegen die Mautbefreiung von nicht-emissionsfreien Lkw erhoben. Der Ausstieg aus der Förderung von NG-, LNG- und CNG-Kraftstoffen für schwere Nutzfahrzeuge wird mittlerweile neben wissenschaftlichen Akteuren auch von Herstellern vermehrt gefordert, da sie keine langfristig wirtschaftliche Dekarbonisierungsoption darstellen (Abschnitt 4.2).

Seit 2017 wird auf europäischer Ebene über eine Revision der Eurovignetten-Richtlinie verhandelt. Die Kommission schlägt vor, Pkw, Kraftomnibusse sowie leichte Nutzfahrzeuge ab 3,5 t aufzunehmen und eine Stauegebühr zu ermöglichen. Als zentrale Forderung soll die Gebührendifferenzierung nach CO₂-Emissionen die Euro-Abgasnormen ablösen (2017/0114/COD)³⁰. Eine Mautspreizung nach CO₂-Emissionen wird von vielen Stakeholdern als wichtiges Anreizinstrument für alternative Antriebe gesehen, welches die Möglichkeit bietet, einen CO₂-Preis zu realisieren ohne Ausweichmöglichkeiten durch „Tanktourismus“ zu schaffen. Bei einer Spreizung nach CO₂-Emissionen im Betrieb blieben bei Erdgasantrieben allerdings wiederum klimawirksame Vorketten der Kraftstoffbe-

²⁹ <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:269:0001:0016:DE:PDF> (Abruf am 18.08.2020)

³⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A52017PC0275> (abgerufen am 10.08.2020)

reitstellung und Betankung unberücksichtigt (Abschnitt 4.2). Die Bundesregierung hat in ihrem Eckpunktepapier zum Klimaschutzprogramm angekündigt, die notwendige Novelle der Eurovignetten-Richtlinie inklusive einer CO₂-Mautspreizung voranzutreiben³¹.

EU-Richtlinie: AFID - Alternative Fuels Infrastructure Directive

Die 2014 verabschiedete EU-Richtlinie 2014/94/EU zum Ausbau der EU-Infrastruktur alternativer Kraftstoffe, in Kurzform „AFID“ genannt, definiert Rahmenbedingungen für den nationalen Aufbau von elektrischen Ladestationen sowie LNG-, CNG- und Wasserstofftankstellen.³² Zurzeit erfolgt eine Revision dieser Richtlinie, für welche eine Verschärfung der Vorschriften sowie eine Defokussierung von Erdgas hin zu vollständigen Tank-to-Wheel Dekarbonisierungsoptionen durch Strom und Wasserstoff gefordert werden (Mathieu et al. 2020).

In der aktuellen Fassung wird für schwere Nutzfahrzeuge lediglich der Ausbau von LNG-Tankstellen im vorhandenem TEN-V Kernnetz mit einem Durchschnittsabstand von 400 km empfohlen, sofern die Kosten im Vergleich zum Nutzen, einschließlich des Nutzens für die Umwelt, nicht unverhältnismäßig sind. Die Möglichkeit einer direkten Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge war zu diesem Zeitpunkt noch nicht absehbar. Zudem ist die Ausgestaltung des Infrastrukturausbaus den jeweiligen Nationen überlassen. Seit 2019 wird in Fortschrittsberichten die Umsetzung der nationalen Strategien begutachtet. Zurzeit läuft u.a. gegen Deutschland ein Vertragsverletzungsverfahren, da die Richtlinie noch nicht ausreichend in nationales Recht umgesetzt wurde.³³

Als Teil der Umsetzung der EU-Richtlinie setzt der „Nationale(r) Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“³⁴ aus dem Jahre 2016 insbesondere Ziele für den Ausbau von Ladesäulen und Wasserstofftankstellen für Pkw; ein Förderprogramm für den Ausbau der Energieinfrastruktur für Nutzfahrzeuge soll Ende 2020 vorgestellt werden. Der Masterplan Ladeinfrastruktur sieht die Ausarbeitung von Konzepten für Batterie-Lkw, Oberleitungen für Lkw und Wasserstoff-Tankstellen vor³⁵. Dabei sollen folgende Themen Berücksichtigung finden:

- Internationale Zusammenarbeit und Standardisierung von ultraschneller Ladeinfrastruktur (>150 kW) und Vorgaben zum EU-Roaming
- Planung von Fernverkehrsteststrecken zur praktischen Erprobung des Hochleistungsladens
- Schaffung zweckgebundener Ladesäulen für leichte Nutzfahrzeuge im innerstädtischen Bereich und auf Betriebsgeländen

Die nationalen Ziele zum Ausbau einer Energieinfrastruktur für Nutzfahrzeuge können ein wesentlicher Treiber für die Dekarbonisierung der Logistikbranche werden. Bisher zeigt die AFID-Richtlinie wenig Auswirkung auf die Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs, die Revision könnte das ändern. Im Gespräch ist auch eine Überführung der Richtlinie in eine verbindlichere Verordnung. Auch seitens des europäischen Verbandes der Automobilhersteller werden konkrete Forderungen an den Umfang des Ausbaus von Lade- und Tankinfrastruktur formuliert (ACEA 2020a).

³¹ <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975232/1673502/768b67ba939c098c994b71c0b7d6e636/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf?download=1> (zuletzt aufgerufen am 10.08.2020)

³² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593446184398&uri=CELEX:32014L0094> (abgerufen am 10.08.2020)

³³ EC EU MEMO/12/12, unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/MEMO_18_3986 (abgerufen am 10.08.2020)

³⁴ <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-nationaler-strategierahmen-afid.html> (Aufruf am 18.08.2020)

³⁵ <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?blob=publicationFile> (abgerufen am 18.08.2020)

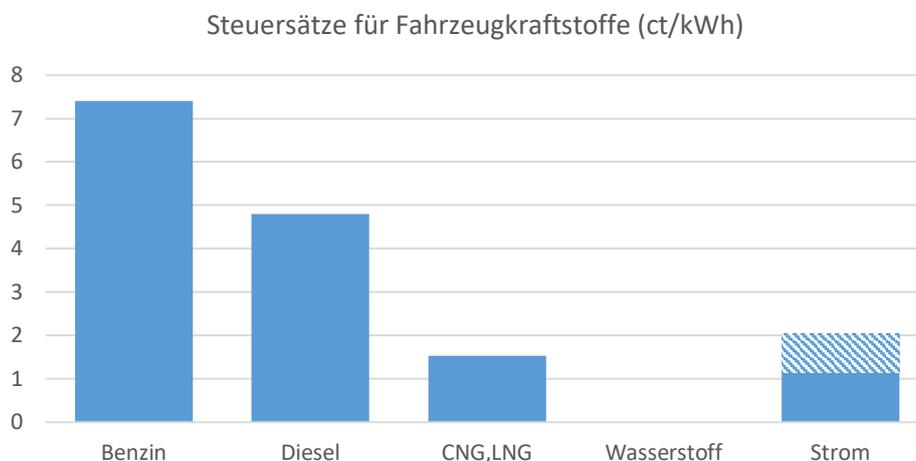
Die im Juni veröffentlichte „Nationale Wasserstoffstrategie“ des BMWi nennt das Hinwirken auf eine Novellierung der AFID mit Umsetzung ab 2021 als eine Maßnahme zur Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor (BMW 2020). In dem Strategiepapier rückt auch der Schwerlastverkehr in den Fokus, nachdem Fördermaßnahmen in den letzten Jahren vornehmlich auf das Pkw-Segment abzielten. So ist eine weitere Maßnahme der „koordinierte Aufbau einer bedarfsgerechten [Wasserstoff-]Tankinfrastruktur zur Versorgung der Fahrzeuge auch im schweren Straßengüterverkehr (BMW 2020).

Deutschland: Energiesteuer

Das Energiesteuergesetz legt als Nachfolger des Mineralölgesetzes seit 2006 die Steuersätze für stoffgebundene Energieträger aus fossilen oder erneuerbaren Quellen fest.³⁶ Die Steuersätze auf die Kraftstoffe Diesel und Benzin liegen seit 2003 unverändert bei jeweils 47,04 ct/l und 65,45 ct/l, wodurch sich im Verbrauch ein steuerlicher Vorteil für Dieselfahrzeuge ergibt.

Das für Nutzfahrzeuge relevante komprimierte und flüssige Erdgas (CNG und LNG) ist in der Energiesteuer als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge derzeit mit Bezug auf den Brennwert von 31,80 €/MWh auf 13,90 €/MWh abgesenkt. Der Energiesteuersatz wird jedoch sukzessive bis 2026 angehoben. Aktuell bietet die steuerliche Erleichterung einen Anreiz für den Betrieb von Erdgasantrieben, wie der Vergleich in Abbildung 3-3 bei Bezug auf die Heizwerte zeigt.

Abbildung 3-3: Vergleich der Energiesteuersätze für Fahrzeugkraftstoffe und Strom bezogen auf den Heizwert. Die schraffierte Fläche veranschaulicht den reduzierten Stromsteuersatz für den Schienenverkehr.



Quelle: EnergieStG, StromStG, Kühnel et al. 2018

Wasserstoff ist bei der Nutzung als Kraftstoff derzeit von der Energiesteuer befreit. Hingegen fallen für reinelektrische Nutzfahrzeuge Stromsteuern nach dem Stromsteuergesetz an.³⁷ Der Regelsatz liegt seit 2003 bei 2,05 ct/kWh, für den Schienenverkehr gilt ein reduzierter Steuersatz von 1,14 ct/kWh. Hinzu kommen die EEG- und weitere Umlagen. Bisher gibt es keine Regelung zur Nutzung des reduzierten Steuersatzes für eine Stromversorgung der Oberleitung oder für den Stromverbrauch an öffentlichen oder teil-öffentlichen Ladepunkten.

³⁶ EnergieStG, unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/> (abgerufen am 10.08.2020)

³⁷ StromStG, unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/> (abgerufen am 10.08.2020)

4. Antriebstechnologien – Status quo und Perspektiven

Der Nutzfahrzeugmarkt ist nahezu vollständig durch den Diesel-Verbrennungsmotor geprägt. Die mit der hohen Energiedichte des Kraftstoffs verbundenen Reichweiten ermöglichen einen flexiblen Fahrzeugeinsatz für die Logistikbranche. Aufgrund eines etablierten Massenmarktes der Fahrzeugproduktion, einer vorhandenen Tankstellen-Infrastruktur und relativ geringer Kraftstoffkosten ist die vergleichsweise hohe Wirtschaftlichkeit der Dieselfahrzeuge ein Hemmnis für den Einsatz alternativer Technologien.

Gleichzeitig steigt der Handlungsdruck auf die Branche auch bedingt durch immer stringenter politische Rahmenbedingungen. So kündigen marktanteilsstarke Hersteller wie Daimler und VW mit der Nutzfahrzeuggruppe Traton (MAN, Scania) CO₂-neutrale Neuwagenflotten u.a. für den europäischen Markt bis 2039/2040 an (Daimler 2019, VW 2018). Unsicherheit besteht nach wie vor darüber, welche Technologien bzw. Kombinationen von Technologien zukünftig den Markt prägen werden.

Die Vorteile der Antriebe mit Verbrennungsmotor liegen in der Energiedichte der Kraftstoffe. Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors selbst ist durch den Carnot-Prozess limitiert und liegt in modernen Lkw bei etwa 39-46 % (Delgado et al. 2017; Earl et al. 2018). Zusammen mit dem Antriebsstrang beträgt die Effizienz etwa 40 % (Earl et al. 2018). Die hohe Energiedichte flüssiger Kraftstoffe sowie der einfache Transport des stoffgebundenen Energieträgers ermöglichen einen flexiblen Fahrzeugeinsatz und lange Fahrtstrecken ohne Tankaufenthalte. Beides sind Merkmale, die in der Logistikbranche einen hohen Stellenwert besitzen. Eine nachhaltige Nutzung von Verbrennungsmotoren wäre perspektivisch nur über fortgeschrittene Biokraftstoffe oder strombasierte synthetische Kraftstoffe möglich (Abschnitt 4.2) oder als Oberleitungs-Hybrid-Lkw (Abschnitt 4.4).

Der elektrische Antrieb ermöglicht eine effizientere Energienutzung gegenüber der Verbrennung von Kraftstoffen. Lkw-Elektromotoren erreichen Wirkungsgrade von ca. 95 %. Werden der Antriebsstrang und Umwandlungsverluste der Transformatoren berücksichtigt, erreicht der elektrische Antrieb eine Gesamteffizienz von etwa 85 % (Earl et al. 2018). Bei Bremsvorgängen kann der Elektromotor zudem als Generator wirkend Energie zurückgewinnen (wie beim Diesel-Hybridantrieb). Die Rekuperation von Bremsenergie wird auch bei elektrischen Schienenfahrzeugen bereits seit längerer Zeit eingesetzt. Als zentrale Eigenschaft werden durch den elektrischen Antriebsstrang weder klimawirksame Gase noch Luftschadstoff- und Lärmemissionen ausgestoßen. In der Gesamtbilanz können allerdings je nach Bereitstellungspfad des Stroms oder Wasserstoffs für Brennstoffzellen dezentrale Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen entstehen. Technologieoptionen für Nutzfahrzeuge mit Elektromotor sind batterieelektrische-, Oberleitungs- oder Brennstoffzellen-Lkw (Abschnitte 4.3 bis 4.5).

4.1. Bestandsaufnahme Dieselantrieb

Das konventionelle Nutzfahrzeug mit Dieselerverbrennungsmotor bestimmt nach wie vor nahezu vollständig über alle Größenklassen den Bestand (Tabelle 4-1) und die Neuzulassungen. Gleichzeitig werden laut Aussagen der Fahrzeughersteller in den Interviews keine signifikanten Investitionen mehr in die Weiterentwicklung des Dieselerverbrennungsmotors fließen.

Der mechanische Aufbau des Dieselantriebs ist auch durch die lokal hohen Temperaturen komplex und durch eine Vielzahl mechanischer Verschleißteile geprägt (Kupplung, Getriebe etc.). Die Herstellungsprozesse der Fahrzeuge und Antriebsstränge sind allerdings seit Jahren etabliert, eine Umstellung auf alternative Antriebe stellt die Hersteller daher vor gewisse Herausforderung. Auch für die Materialien, insbesondere dem vorwiegend eingesetzten Stahl, stehen etablierte Recyclingver-

Tabelle 4-1: Bestand von Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen in Deutschland nach Kraftstoffart und Nutzlast laut KBA (Stand 01.01.2019)

Bestand Jan. 2019	Lkw <2 t	Lkw 2-6 t	Lkw 6-12 t	Lkw >12 t	SZM
Benzin	133.547	929	60	68	74
Diesel	2.488.833	253.016	101.322	122.467	217.809
Gas (LPG/CNG)	28.277	351	67	53	159
Elektro	17.235	346	8	8	13
Hybrid (inkl. Plug-in)	53	77	7	5	8
Sonstige (inkl. LNG)	204	84	45	99	391
Gesamt	2.668.138	254.803	101.509	122.700	218.454

Quelle: KBA 2019b

fahren zur Verfügung, welche eine hohe Recyclingquote ermöglichen. Innovationen im Nutzfahrzeugbereich sind in der Regel durch das Pkw-Segment mit seinen sehr viel größeren Stückzahlen getrieben. Auch bei der Umrüstung der Herstellungsprozesse werden die Lernkurven voraussichtlich in diesem Segment bestimmt.

Der Verbrennungsmotor arbeitet am effektivsten bei seiner spezifischen Betriebstemperatur und unter Vollast. Mögliche Effizienzsteigerungen von Diesel-Nutzfahrzeugen werden nach Herstellerangaben mit weiterhin etwa 1 % pro Jahr beziffert und setzen sich aus Optimierungen beim Motor, der Fahrzeugaerodynamik und der Reifenrollwiderstände zusammen. Bereits das 15 %-Ziel für 2025 wird also voraussichtlich nicht allein über Effizienzsteigerungen der konventionellen Fahrzeuge erreicht werden. Das 30 %-Ziel für 2030 wird nur über einen nennenswerten Anteil von Nullemissionsfahrzeugen realisierbar, wodurch auch hohe Investitionen in emissionsmindernde Übergangstechnologien wie Hybridfahrzeuge unattraktiv werden (vergleiche auch Abschnitt 3.1).

Die Hybridisierung eines konventionellen Verbrennungsmotors mit einem elektrischen Antrieb ermöglicht über die Rekuperation von Bremsenergie signifikante Effizienzsteigerungen. Diese werden in den Expertengesprächen aktuell mit 8-10 % beziffert und können nach Dünnebeil et al. 2015 perspektivisch etwa 15 % für Sattelzugmaschinen erreichen. Die Vorteile der durch die Rekuperation erzielbaren Effizienzgewinne liegen insbesondere im städtischen stop-and-go Verkehr, während sie für den emissionsintensiven Fernverkehr weniger relevant sind. Auch aufgrund der hohen Komplexität des Hybridantriebs deuten Hersteller darauf hin, dass dieser Pfad nicht mit hohen Investitionen in die Entwicklung verbunden ist und insbesondere für den Fernverkehr nicht als Strategie verfolgt wird. Die verfügbaren Modelle stammen überwiegend aus den 2010er Jahren mit Ausnahme des seit 2019 verfügbaren CF Hybrid von DAF (DAF 2020a).

Trotz der drängenden Transformation zu klimaneutralen Technologien werden Diesel-Fahrzeuge laut Herstellervertretern auf absehbare Zeit weiterhin den Bestand prägen und den wesentlichen Anteil am Umsatz der Hersteller ausmachen. Die Entwicklungsbudgets werden voraussichtlich sukzessive zu den alternativen Antrieben verlagert.

4.2. Alternative Kraftstoffe

Eine viel diskutierte Alternative für den Klimaschutz zum fossilen Diesel sind alternative Kraftstoffe. Ein Vorteil besteht in dem Erhalt des etablierten Verbrennungsmotors inklusive seiner Herstellungs- und Reichweitenpotenziale. Alternative Kraftstoffe auf Basis von Biomasse und/oder strombasierter (synthetischer) Kraftstoffe, so genannter Power-to-Liquid-(PtL)-Kraftstoffe oder „E-Fuels“, können in der Gesamtbilanz klimaneutral genutzt werden, wenn die bei der Verbrennung entstehenden CO₂-Emissionen bei der Erzeugung der Atmosphäre entnommen werden und die Herstellung keine weiteren THG-Emissionen verursacht. Bei Biokraftstoffen erfolgt die Entnahme des CO₂ aus der Atmosphäre über Photosynthese, während bei PtL-Kraftstoffen das für die Herstellung verwendete Kohlendioxid beispielsweise klimaneutral über Direct-Air-Capture³⁸ aus der Atmosphäre gewonnen werden kann. Ein entsprechender Herstellungsprozess existiert auf Demonstrationsniveau. Außerdem müssen insbesondere bei den Biokraftstoffen noch weitere Nachhaltigkeitskriterien erfüllt werden. Bleibt der Verbrennungsantrieb für Nutzfahrzeuge erhalten, muss in jedem Fall auch für alternative Kraftstoffe eine aufwendige Nachbehandlung des Abgases zur Reduktion von Luftschadstoffen erfolgen.

Darüber hinaus soll an dieser Stelle daraufhin gewiesen werden, dass in der EU-Verordnung zu den CO₂-Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge explizit Emissionen im Betrieb auf Tank-to-Wheel-Basis (TTW) adressiert werden, alternative Kraftstoffe können daher nicht zur Erfüllung der gesetzten Minderungsziele beitragen. Im Folgenden werden Status quo und Perspektiven einiger alternativer Kraftstoffe aufgezeigt. Als mögliche Brückentechnologie wird dabei auch der Erdgasantrieb thematisiert.

LNG-Kraftstoff

In den letzten Jahren sind vermehrt Antriebe mit flüssigem Erdgas (Liquified natural gas, LNG) auf den Markt gekommen. Durch die Nutzung von verflüssigtem Erdgas werden höhere Energiedichten im Vergleich zu komprimiertem Erdgas (CNG) erreicht. Gelagert in vakuumisolierten Kraftstofftanks bei Temperaturen von -125 °C bis -160 °C ist die volumetrische Dichte jedoch immer noch 40 % niedriger als bei Diesel-Kraftstoffen (Mottschall et al. 2020).

In dem Bestand des Kraftfahrt-Bundesamtes (Tabelle 4-1) werden Fahrzeuge mit Erdgasantrieb unter „Sonstige“ aufgeführt. Bis Mitte Juli 2020 wurden 1.172 LNG-Lkw auf Basis des Förderprogramms "Förderung von energieeffizienten und/oder CO₂-armen schweren Nutzfahrzeugen (EEN)" gefördert (BAG 2020). Verfügbare Modelle stammen überwiegend von den Marken Iveco, Scania und Volvo. Adaptionen am Motor und insbesondere der Kraftstofftank erzeugen Mehrkosten von etwa 30.000 € bis 45.000 € gegenüber Diesel-Fahrzeugen. Für die Anschaffung von LNG-Antrieben wurden finanzielle Anreize über Kaufprämien, Energiesteuerreduktion und Mautbefreiungen geschaffen. Für ein im Jahr 2020 angeschafftes Fahrzeug beträgt die Förderung durch diese drei Mechanismen bei einer Jahresfahrleistung von 120.000 km und 5 Jahren Haltedauer aufgrund der verlängerten Mautbefreiung zwischen 123.000 und 132.000 € pro Fahrzeug³⁹.

Erdgas mit der Hauptkomponente Methan weist aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung gegenüber Diesel rund 25 % geringere CO₂-Emissionen pro Energieeinheit auf. In einer kürzlich veröffentlichten Studie zeigen Öko-Institut und ICCT anhand einer Well-to-Wheel-Betrachtung, dass dieser CO₂-Vorteil in der Praxis überwiegend verloren geht (Mottschall et al. 2020). Die meisten in

³⁸ Direct Air Capture bezeichnet ein Verfahren zur Gewinnung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre, indem Luft mittels großer Ventilatoren durch ein CO₂-absorbierendes Filtermedium geleitet wird.

³⁹ Mottschall et al. 2020, ergänzt um die im Juni 2020 beschlossene Verlängerung der Mautbefreiung.

Deutschland zugelassenen LNG-Lkw sind mit SI-LNG-Motoren (Spark Injektion) nach dem Ottomotoren-Prinzip ausgestattet, welche im Vergleich zu Dieselmotoren und HPDI-NG-Motoren (High pressure direct injection) deutlich niedrigere Motorenwirkungsgrade aufweisen. Der Energieverbrauch liegt um etwa 22 % über dem von Dieselfahrzeugen, weshalb die TTW-CO₂-Emissionen lediglich rund 5 % unter denen eines Diesel-Lkw liegen (Mottschall et al. 2020). Werden zudem die Verdampfungsverluste des klimapotenteren Methans berücksichtigt, werden die im Betrieb erzielten CO₂ Einsparungen fast vollständig kompensiert. Ein Minderungseffekt der Well-to-Wheel THG-Emissionen von 7-9 % wird lediglich Erdgasmotoren mit Hochdruck-Direkteinspritzung zugewiesen. Für die sehr viel verbreiteteren Ottomotoren liegen die THG-Emissionen etwa auf Höhe vergleichbarer Dieselfahrzeuge. Auch deuten Messungen mit mobilen Abgassonden in der Praxis an, dass die Stickoxidemissionen in der Größenordnung von vergleichbaren Dieselfahrzeugen liegen (Cornelis 2019).

LNG-Antriebe sind daher in Hinblick auf Klimaschutz und Luftreinhaltung keine Lösung für den Straßengüterverkehr. Auch in den Interviews wurden Erdgasantriebe seitens der Fahrzeughersteller nicht als langfristige Entwicklungsziele benannt.

Biokraftstoffe

Biokraftstoffe werden seit über 20 Jahren als erneuerbare Energieträger im Verkehrssektor eingesetzt. Davon werden in Deutschland überwiegend Biodiesel aus Raps (ca. 14 PJ in 2017) sowie Bioethanol zur Beimischung von Benzin aus Getreide und Zuckerrüben (ca. 6 PJ in 2017) produziert; etwa 75 % der im Jahr 2017 verwendeten Energiemengen an Biokraftstoffen von insgesamt 113 PJ wurden jedoch importiert, allein 19 PJ in Form von südostasiatischem Palmöl (Fehrenbach 2019). Im aktuellen Evaluationsbericht für die Biokraftstoffnutzung in Deutschland ist für das Jahr 2018 ein Anstieg der Biokraftstoffnutzung auf 120 PJ angegeben (BLE 2019).

Biokraftstoffe decken derzeit einen Großteil des Anteils erneuerbarer Energien im Verkehr ab, im Jahr 2019 stellten Biodiesel, Bioethanol, Biomethan und Pflanzenöl zusammen einen Anteil von 86 % (UBA 2020). Der Anreiz, Biokraftstoffe und andere klimafreundliche Energieoptionen im Verkehrssektor einzusetzen, stammt aus der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) der EU sowie derer daraus abgeleiteten nationalen Umsetzung. Die RED verpflichtet die Mitgliedsstaaten bis 2020 einen Anteil von 10 % erneuerbarer Energien im Verkehrssektor zu erreichen, wobei bis zum Jahr 2030 eine Steigerung auf mindestens 14 % bis 2030 vorgesehen ist. In Deutschland betrug der erneuerbare-Energie-Anteil im Jahr 2019 effektiv 5,6 % und rechnerisch nach Vorgaben der Richtlinie 7,9 % (Eurostat 2020). In Deutschland erfolgt die Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie als Treibhausgasminderungsquote. Darin sind die Inverkehrbringer von Diesel- und Ottokraftstoffen verpflichtet, ab dem Jahr 2020 eine THG-Minderung um 6 % gegenüber fossilen Kraftstoffen⁴⁰ zu erzielen.⁴¹

Konventionelle Biokraftstoffe standen bereits früh in der Kritik, da die Gewinnung aus der Pflanzenfrucht in direkter Landnutzungskonkurrenz zur globalen Produktion an Nahrungs- und Futtermitteln steht (Fritsche et al. 2012). Auf EU-Ebene wurden 2009 durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie⁴² und die Kraftstoffqualitäts-Richtlinie⁴³ verbindliche Vorgaben zum besseren Schutz von Umwelt und

⁴⁰ Es wird ein fossiler Komparator mit dem Wert 94,1 g CO₂e/MJ als Vergleichsgröße zugrunde gelegt.

⁴¹ Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), §37a-g, unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/> (abgerufen am 23.07.2020); sowie weitere Verordnungen zur Ergänzung des BImSchG.

⁴² RED, 2009/28/EG, unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:de:PDF> (Abruf am 10.08.2020)

⁴³ FQD, 2009/30/EG, unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0088:0113:DE:PDF> (abgerufen am 10.08.2020)

Artenvielfalt sowie zur Nachhaltigkeit von Anbauflächen für Biokraftstoffe formuliert. So mussten zur Anrechenbarkeit zur EE-Quote bestimmte Minderungsquoten in der gesamtheitlichen Treibhausgasbilanz erfüllt werden. Nicht zufriedenstellend eingedämmt werden konnten indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC) beispielsweise durch klimaschädigende Umwandlung bewaldeter Flächen wie Primärwald in den Tropen (Fehrenbach 2019). Die Novellierungen von 2015⁴⁴ und 2018⁴⁵ (RED II) zielen auf eine weitere Eindämmung des Anbaus von Energiepflanzen für Kraftstoffe, so wurde der Anteil an konventionellen Biokraftstoffen bis 2030 auf 1 % über dem 2020 realisierten Anteil bzw. maximal 7 % gedeckelt. Biokraftstoffe mit hohem ILUC-Risiko⁴⁶ müssen bis spätestens dem Jahr 2030 zudem komplett ausgephast werden und können nicht mehr auf die Erreichung der EE-Ziele der RED II angerechnet werden.

Biokraftstoffe aus biogenen Rest- und Abfallstoffen vermeiden die direkte Konkurrenz zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln. Die RED II beinhaltet eine Liste von biogenen Rohstoffen zur Erzeugung fortschrittlicher Biokraftstoffe (Anhang IX, Teil A), darunter Alt- und Industrierestholz, Stroh oder Gülle. Fortschrittliche Biokraftstoffe (darunter auch Biogas) können doppelt zur Erfüllung der EE-Quote angerechnet werden⁴⁷, zusätzlich ist in der RED II eine Mindestquote von 3,5 % für 2030 festgesetzt. Die Potenziale für einen Einsatz im Verkehr sind allerdings sehr begrenzt und ergeben sich derzeit vor allem aus der Biogasnutzung sowie gegebenenfalls aus der Produktion fortschrittlichen Bioethanols (Fehrenbach et al. 2019). Für Biokraftstoffe aus Altfetten und -ölen wird aufgrund des hohen Risikos indirekter Nutzungsänderungen die Anrechenbarkeit auf 1,7 % limitiert. Biogene Rohstoffquellen wie Algen bieten höhere Mengenpotenziale, die Prozesse und Verfahren befinden sich allerdings noch in der sehr frühen Entwicklung und weisen hohe Energiebedarfe für die Gesamtkette der Produktion auf.

Neben sozialen und ökologischen Problemen im Zusammenhang mit der Herstellung von Biokraftstoffen, ergeben sich auch Nutzungskonkurrenzen der Biomasse mit einer stofflichen Verwertung in der chemischen Industrie zur Substituierung von Erdöl sowie zur effizienteren direkten energetischen Nutzung zur Strom- und Wärmebereitstellung (Agora Verkehrswende 2020).

Als Folge ist das Potenzial von Biokraftstoffen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs sehr begrenzt. In den Interviews wurden Biokraftstoffe seitens der Hersteller nicht als Dekarbonisierungsoption thematisiert.

Power-to-Liquid-Kraftstoffe

Power-to-Liquid (PtL) Kraftstoffe bezeichnen die Herstellung bekannter Kraftstoffarten (Benzin, Diesel, Kerosin) auf Basis von Strom. Die Grundlage bildet die Nutzung von Strom zur Elektrolyse von Wasserstoff und die anschließende Synthese mit Kohlendioxid zu kohlenwasserstoffhaltigen Kraftstoffen. Werden für den Herstellungsprozess nur regenerative Energie- und Stoffquellen eingesetzt, d.h. in Bezug auf Kohlendioxid beispielsweise die Gewinnung aus der Atmosphäre über Direct-Air-Capture Verfahren, stellt die Nutzung von PtL-Kraftstoffen oder „E-Fuels“ eine technologisch umsetzbare Dekarbonisierungsoption für den Straßengüterverkehr dar. Dabei bleibt die Fahrzeugtechnologie weitgehend unverändert und die flüssigen Kraftstoffe ermöglichen aufgrund ihrer hohen Energiedichte Reichweiten, welche mit konventionellen Kraftstoffen vergleichbar sind.

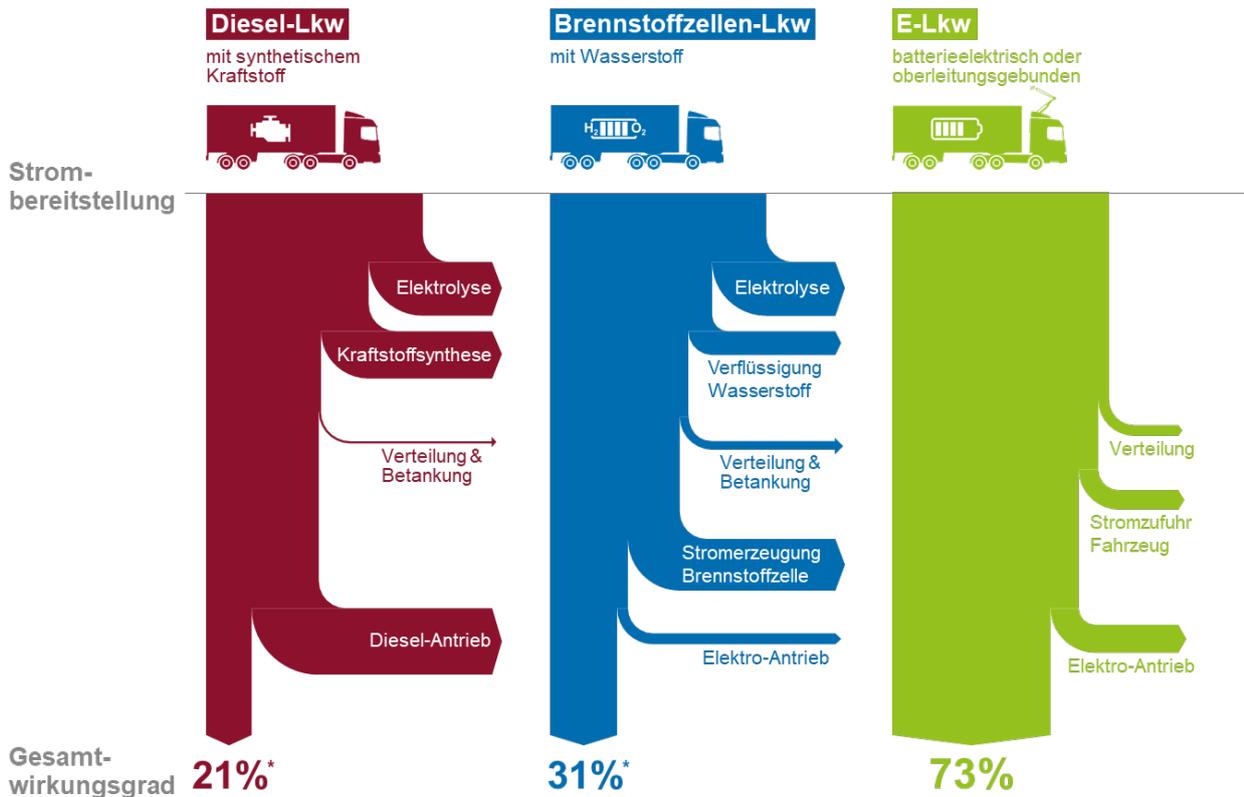
⁴⁴ iLUC-Richtlinie, unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32015L1513> (besucht am 10.08.2020)

⁴⁵ Richtlinie 2018/2001, unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/LSU/?uri=CELEX:32018L2001> (Abruf am 10.08.2020)

⁴⁶ Derzeit sind Biokraftstoffe aus Palmöl als Kraftstoffe mit hohem ILUC-Risiko definiert.

⁴⁷ In der deutschen Umsetzung findet sich derzeit keine Doppeltanrechnung für fortschrittliche Kraftstoffe.

Abbildung 4-1: Wirkungsgradvergleich verschiedener Lkw-Antriebsoptionen auf Basis von Stromnutzung



*bei Erschließung von Effizienzpotenzialen bei Elektrolyse, Kraftstoffsynthese und Brennstoffzelle

Quelle: basierend auf Kühnel et al. 2018 und Hacker et al. 2020a

Der Gesamtwirkungsgrad der Energieumwandlung vom Strom bis hin zum mechanischen Antrieb wurde bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes „StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“ ermittelt (Kühnel et al. 2018, Hacker et al. 2020a). In Abbildung 4-1 werden die Wirkungsgrade der Antriebsoptionen auf Basis von Stromnutzung anschaulich gegenübergestellt. Für den Diesel-Lkw mit synthetischem Kraftstoff geht ein Energieanteil von etwa 40 % bereits bei der Herstellung des PtL-Kraftstoffs verloren. Der vergleichsweise niedrige Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors senkt den Gesamtwirkungsgrad weiter auf insgesamt ca. 20 %. Von den strombasierten Technologieoptionen geht der PtL-Pfad demnach mit dem höchsten Strombedarf zur Realisierung eines klimaneutralen Güterverkehrs einher.

Den etablierten Fertigungsketten konventioneller Fahrzeuge stehen außerdem die Kosten der Kraftstoffherstellung gegenüber. Diese hängen nach Agora Energiewende et al. 2018) wesentlich von den Kosten der Bereitstellung von erneuerbarem Strom und der Auslastung der PtL-Anlagen ab. Eine Auswertung der zeitlichen Überschussproduktion von erneuerbarem Strom verdeutlicht, dass höhere Volllaststunden für einen wirtschaftlichen Betrieb der PtL-Anlagen nötig sind. Werden die gesamten Volllaststunden der erneuerbaren Stromproduktion zu Grunde gelegt, ermittelt die Studie Kraftstoffkosten für eine inländische Produktion über Offshore-Windkraft in Nord-/Ostsee von umgerechnet ca. 1,90-3,20 €/l. Für Importe aus Nordafrika und/oder dem Nahen Osten werden in einer frühen Marktphase Gestehungskosten von 1,50-2,20 €/l angegeben und perspektivische Kostendegressionen bis 2030 auf 1,10-1,90 €/l. Kreidelmeyer et al. 2020) geben die Bereitstellungskosten für den Endverbraucher in 2030 mit 2,20-4,80 €/l an. Eine Parität zu fossilen Kraftstoffen wird demnach auch über hohe Energieimporte voraussichtlich nicht erreicht. Als Folge empfiehlt sich der Einsatz

von PtL-Kraftstoffen fokussiert für Anwendungen, für welche absehbar keine alternativen Technologien zur Verfügung stehen, wie beispielsweise in der Luftfahrt oder Binnenschifffahrt.

Diverse Studien verweisen auf den Vorteil einer direkten Stromnutzung im Verkehrssektor sowohl hinsichtlich der energetischen Effizienz als auch der langfristigen volkswirtschaftlichen Kosten, die mit dem Aufbau einer Energieversorgungsinfrastruktur zusammenhängen (Kasten et al. 2016, BCG und Prognos 2018, Mottschall et al. 2019, Agora Verkehrswende 2020). Für Nutzfahrzeughersteller bedeutet der Einsatz von PtL-Kraftstoffen die geringsten Modifikationen der etablierten Antriebstechnologie, da der Kraftstoff dem Motor angepasst wird. In den Expertengesprächen wurde der Dekarbonisierungspfad über strombasierte Kraftstoffe allerdings aufgrund der hohen Energiekosten für die Kunden und der geringen Gesamteffizienz einvernehmlich als nicht prioritär kommuniziert.

Strombasierter Wasserstoff

Wasserstoff lässt sich neben der Nutzung in Brennstoffzellen auch in einem auf die Verbrennungseigenschaften adaptierten Motor einsetzen. Bei THG-neutraler Bereitstellung des Wasserstoffs ist dies eine Dekarbonisierungsoption, zu welcher derzeit einige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Zusammenhang mit dem Start-up-Unternehmen Keyou existieren.

Der Wasserstoffmotor soll Wirkungsgrade von bis zu 45 % - 50 % erreichen, je nach Ausführung mit äußerer oder innerer Gemischbildung. Im Volllastbereich könnte der Wasserstoffmotor der Brennstoffzelle damit Konkurrenz machen, da diese ihren hohen Wirkungsgrad von 50-60 % nur bei moderaten Betriebstemperaturen und damit bei hoher Lastabgabe nur durch Kühlsysteme aufrechterhalten kann. Insbesondere im Fernverkehr könnte sich das Betriebsoptimum im Volllastbereich für den Wasserstoffmotor als vorteilhaft erweisen. Zudem blieben etablierte Herstellungsketten und Fertigungsstrategien überwiegend erhalten.

Technische Herausforderungen bestehen in der Materialbeständigkeit der Werkstoffe. Darüber hinaus reagiert Wasserstoff mit der Verbrennungsluft neben Wasserdampf auch zu Stickoxiden, wodurch eine Nachbehandlung des Abgases auch bei magerer Verbrennung notwendig bleibt.

Die Herausforderungen bezüglich der Wasserstoffinfrastruktur und der Speicherung des komprimierten oder flüssigen Wasserstoffs werden in Zusammenhang mit Brennstoffzellenfahrzeugen in Abschnitt 4.5 thematisiert.

4.3. Batterieelektrischer-Lkw

Die direkte Stromnutzung in einem elektrischen Fahrzeugantrieb stellt den energieeffizientesten Dekarbonisierungspfad der aktuellen Technologieoptionen dar. Der hohe Gesamtwirkungsgrad von etwa 73 % ergibt sich aus dem effizienten Elektromotor und der nahezu verlustfreien Stromspeicherung in Lithium-Ionen-Batterien (Abbildung 4-1). Die technischen Herausforderungen, insbesondere bei dem hohen Leistungsbedarf schwerer Nutzfahrzeuge, liegen in Einschränkungen bei den erzielbaren Reichweiten sowie in dem Masse- und Volumenbedarf des Batteriesystems, welche aus den im Vergleich zu konventionellen stoffgebundenen Energieträgern geringeren Energiedichten resultieren.

Wirtschaftlich stehen den Mehrkosten der Fahrzeuganschaffung Einsparungen beim Energieverbrauch im Fahrbetrieb sowie die Mautbefreiung gegenüber. Für einige Einsatzprofile im regionalen Verteilerverkehr können Batterie-Lkw bereits vor 2025 auch wirtschaftliche Vorteile erzielen (Heid et al. 2017). Auch ein TCO-Fallbeispiel im Projekt StratON sieht bei einer Jahresfahrleistung von 120.000 km und einer Nutzungsdauer von 5 Jahren auch ohne Mautbefreiung schon ab 2025 einen

potenziellen Kostenvorteil für ein schweres Nutzfahrzeug mit einer Batteriekapazität für 400 km Reichweite (Hacker et al. 2020a).

Der technische Aufbau des elektrischen Antriebes ist weniger komplex und kommt mit weniger Komponenten aus als der Antriebsstrang eines Verbrennungsmotors. Die technischen Herausforderungen liegen in der Leistungselektronik, welche die Steuerung und Kommunikation der elektrischen Antriebskomponenten regelt. Diese beinhaltet auch die Umwandlung der verschiedenen Spannungsniveaus von wenigen Volt der Batterien bis zur 800 V Hochvolttechnik des Antriebs. Auf ein Getriebe wird für schwere Nutzfahrzeuge auch beim elektrischen Antrieb in der Regel nicht verzichtet. Zumindest zwei bis drei Gänge sollen eine bessere Abdeckung der Lastbereiche ermöglichen. Insgesamt ergibt sich nach Herstelleraussagen in den Experteninterviews eine Gewichtseinsparung des elektrischen Antriebs ohne Energiespeicher gegenüber einem vergleichbaren Diesel-Fahrzeug von etwa 0,5-1 Tonnen.

Technologisch ist die Entwicklung des rein batterieelektrischen Antriebs unter den schweren Nutzfahrzeugen mit Elektromotor derzeit am weitesten fortgeschritten, so existieren von diversen Herstellern bereits erste Vor-Serienmodelle. Die ersten BEV-Modelle wurden, ähnlich zum Pkw-Markt, von Start-up-Unternehmen über Umrüstung konventioneller Nutzfahrzeuge entworfen, wie beispielsweise E-Force One oder Designwerk aus der Schweiz, Emoss und Terberg aus den Niederlanden sowie Framo aus Deutschland. Seit 2018 bieten auch OEMs wie Daimler, MAN (Traton Gruppe), DAF und Volvo (inkl. Renault) schwere Nutzfahrzeuge mit reinem batterieelektrischem Antrieb an. Eine Übersicht über aktuell verfügbare Modelle der N3-Klasse bietet Tabelle 4-2. Es handelt sich bei allen Modellen um wenige Prototypen, die derzeit in einzelnen Praxistests erprobt und zum Teil

Tabelle 4-2: Verfügbare schwere Lkw und SZM mit batterieelektrischem Antrieb (bei Wertebereichen wird für die Batteriekapazität das Maximum und für die Reichweite ein zugehöriger Mittelwert angegeben)

Hersteller	Modell	Zul. GGW	E-Motor	Batterie	Reichweite
E-Force*	EF18/26	44 t	550 kW	340 kWh	340 km
Designwerk*	Futuricum Semi 40E	44 t	500 kW	340 kWh	380 km
Emoss*	EMS 1824	18 t	230 kW	240 kWh	230 km
DAF	CF Electric	37 t	210 kW	170 kWh	100 km
	LF Electric	19 t	195 kW	222 kWh	220 km
Renault	D Wide Z.E.	26 t	370 kW	200 kWh	200 km
	D Z.E.	16 t	185 kW	300 kWh	300 km
Volvo	FE Electric	27 t	400 kW	200 kWh	200 km
	FL Electric	16 t	200 kW	300 kWh	300 km
Daimler	eActros	25 t	252 kW	240 kWh	200 km
MAN	eTGM	26 t	264 kW	185 kWh	190 km
Scania	BEV		230 kW	300 kWh	250 km

*Umrüstung konventioneller Nutzfahrzeuge

Quelle: Eforce 2020, Designwerk 2020, Emoss 2020, DAF 2020b, Renault 2018, Volvo Trucks 2020a, Volvo Trucks 2020b, Daimler 2018, MAN 2018, Scania 2020a

durch Förderprojekte begleitet werden (z.B. Concept ELV²⁴⁸). Serienmodelle mit zuverlässigeren Kostenabschätzungen werden erst in den kommenden Jahren erwartet. Auch von dem chinesischen Hersteller BYD werden in absehbarer Zeit Nutzfahrzeuge für den europäischen Markt erwartet.

Der Einsatzzweck der verfügbaren Batterie-Lkw liegt schwerpunktmäßig im städtischen und regionalen Verteilerverkehr. Hier existieren Transportrelationen, für welche die derzeit erzielbaren Reichweiten von 200-300 km ausreichen. In diesen Fällen wird die Batterie über Nacht im Depot aufgeladen und ggf. tagsüber einmal nachgeladen. Bei den Fahrzeugtypen handelt es sich um Motorwagen und Sattelzugmaschinen mit überwiegend 16 t oder 26 t zulässigem Gesamtgewicht. Die 26 t Lkw erreichen bei Motorleistungen zwischen 230-265 kW Reichweiten bis 200 km. Aus den verbauten Batteriekapazitäten von etwa 200 kWh ergibt sich ein Verbrauch von ca. 1 kWh/km. Derzeitige Energiedichten von etwa 160 Wh/kg angenommen, betragen die Gewichte der Batteriesysteme etwa 1,2 - 1,9 t. Es entstehen demnach bei Berücksichtigung des zusätzlich erlaubten Gesamtgewichts von 2 t und den oben ausgeführten Gewichtseinsparungen des elektrischen Antriebs für diese Fahrzeuge keine Nutzlastverluste. Auch das Nutzlastvolumen wird durch die Platzierung der Batteriepakete im Fahrzeuggestell zwischen Reifen und Achsen nicht negativ beeinflusst.

Darüber hinaus sind erste Sattelzugmaschinen mit 44 t zulässigem Gesamtgewicht im regionalen Verteilerverkehr unterwegs. Der Futuricum Semi 40E wurde von Designwerk für ein Unternehmen aus der Lebensmittellogistik umgerüstet (Werwitzke 2019). Ceekon, Emoss und MAN haben einen 40 t Sattelschlepper auf Basis eines TGX mit einer Reichweite von 200 km für ein Schweizer Transport- und Logistikunternehmen elektrifiziert (MAN 2019). Die Motorleistung dieser Fahrzeuge liegt bei 500-550 kW, der Verbrauch wird entsprechend höher mit etwa 1,5 kWh/km angegeben.

Der Einsatz von Sattelzügen dieser Größenordnung im Fernverkehr erfordert, abgeleitet aus zulässigen Lenkzeiten eines Fahrers von 4,5 Stunden, Reichweiten von mindestens 360-400 km. Daraus ergeben sich Batteriekapazitäten von über 540-600 kWh, die idealerweise innerhalb der Fahrerpause an öffentlichen Ladepunkten in 30 min aufladbar sein sollten. Für diese Anforderungen wurden bisher keine schweren Nutzfahrzeuge für den europäischen Markt realisiert. Ankündigungen von Herstellern in diesen Dimensionen fokussieren sich aktuell auf den US-amerikanischen Markt mit seinen Klasse 8 Modellen: u.a. Tesla Semi und Daimler eCascadia. Das US-amerikanische Startup Nikola entwickelt den langstreckentauglichen Nikola Tre mit angekündigter 720 kWh Batterie auch für den europäischen Markt, in Kollaboration mit Bosch und CNH Industrial (Iveco).

Für den flächendeckenden Einsatz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen wird neben der Verfügbarkeit einer Ladeinfrastruktur die weitere Entwicklung der Batteriesystemkosten und -gewichte ausschlaggebend sein. Für die Energiedichte des Batteriesystems inklusive Kühlung werden in den kommenden Jahren Steigerungen auf 200-270 Wh/kg erwartet, damit wären auch 44 t Sattelzugmaschinen mit einer Reichweite von 400 km ohne signifikante Nutzlastverluste realisierbar. Ab 2030 hoffen die Hersteller auf alternative Speichertechnologien zur NCM-Batterie wie Festkörperzellen mit höheren Energiedichten von 400 Wh/kg.

Die Kosten des Batteriesystems bestimmen maßgeblich den Fahrzeugpreis. Für eine rasche Kostendegression ist für OEMs eine Skalierbarkeit der in Pkw eingesetzten Batteriespeicher relevant. Die hohen Fahrleistungen der Transportverkehre erfordern im Nutzfahrzeugbereich allerdings höhere Zyklenzahlen von 2000-3000. Laut Aussagen der Fahrzeughersteller lassen sich die Eigenschaften der Batterien voraussichtlich über Modifikationen entsprechend anpassen, wobei Kompromisse zwischen energieoptimierten Zellen (hohe Kapazität) und leistungsoptimierten Zellen (Schnellladefähigkeit) abgewogen werden. Welche Zellchemie tatsächlich in den Serienmodellen

⁴⁸ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/concept-elv2-flottentest> (besucht am 19.08.2020)

schwerer Nutzfahrzeuge zum Einsatz kommen wird, ist noch nicht abschließend geklärt. Auch wird sich zuverlässig erst in der Praxis zeigen, ob die realen Zyklenzahlen und damit auch die Lebensdauer der Batterien für die Nutzungsdauer der Fahrzeuge ausreichen wird. Wahrscheinlich wird für die ersten Serienmodelle ein Ersatz der Batterie innerhalb der Nutzungsdauer nötig werden.

Aus heutiger Sicht haben die batterieelektrischen Nutzfahrzeuge einen Technologievorsprung gegenüber den in der Öffentlichkeit viel diskutierten Brennstoffzellenfahrzeugen. Das batterieelektrische Nutzfahrzeug ist zudem ein sinnvoller erster Schritt zum effizienten elektrischen Antrieb, da auch für die übrigen elektrischen Antriebe eine ähnliche Grundstruktur aus Elektromotor und Batterie verwendet wird. Trotz des aktuell vernachlässigbaren Bestandes werden Batterie-Lkw nach einstimmiger Herstellereinschätzung als erste alternative Antriebstechnologie in den Nutzfahrzeugmarkt kommen. Speziell im Nah- und Regionalverkehr werden BEV als dominierende Alternative zum Diesel gesehen. Auf Basis der CO₂-Emissionsstandards prognostiziert der europäische Automobilverband ACEA für 2030 einen Anteil von 200.000 batterieelektrischen Fahrzeugen im europäischen Bestand, dies entspricht einem Anteil von 3 % bezogen auf den gesamten Bestand von 6,6 Mio. Lkw in 2018 (ACEA 2020a, 2019).

Statische Ladeinfrastruktur

Die Diskrepanz zwischen dem Bestand an elektrischen Nutzfahrzeugen und dem drängenden Markthochlauf zur Erreichung der Klimaziele spiegelt sich auch in dem Bestand an Lademöglichkeiten wider. 2019 zählte der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) insgesamt 25 öffentliche und teil-öffentliche Ladestationen, die sich mit einer Ladeleistung von 150 kW für elektrische Lkw eignen (Lanzinger 2019). Durch den erhöhten Energiebedarf der Nutzfahrzeuge und damit verbundenen Leistungsanforderungen handelt es sich bei diesen Ladestationen in der Regel um Gleichstromanlagen (DC) im Hochvolt-Spannungsbereich ab 400 V.

Der europäische Automobilverband ACEA fordert in dem im März 2020 veröffentlichten Positionspapier ACEA 2020a einen europaweiten Ausbau von 4.000 öffentlichen Ladepunkten mit einer Ladeleistung bis 100 kW DC bis 2025 und 50.000 bis 2030. Hinzu kommen nicht-öffentliche Ladepunkte im Depot der Betreiber im Umfang von 20.000 bis 2025 und 200.000 bis 2030 im gleichen Leistungsbereich. Bei einer Leistung von 100 kW benötigt ein Lkw mit 200-300 kWh Batteriekapazität und 200 km Reichweite etwa 2-3 Stunden Ladezeit.

Insbesondere eine rasche Ausstattung der Depots und Logistikzentren mit geeigneten Ladepunkten wird als kritischer Treiber für die Nutzung von E-Lkw im Nah- und Regionaltransport gesehen (Mathieu et al. 2020, ACEA 2020a). Im Depot können die Fahrzeuge über Nacht langsamer und daher im Zweifelsfall auch mittels Wechselstroms (AC) geladen werden, hierfür werden bei 63 A und 44 kW Ladezeiten von 6-8 Stunden benötigt. In den Logistikzentren können Standzeiten während des Ent- und Beladens genutzt werden, sofern die Zyklenfestigkeit der Batteriesysteme mitspielt. Dabei wird eine teil-öffentliche Nutzung durch verschiedene Betreiber angedacht. Eine Übersicht möglicher Lademuster bietet Tabelle 4-3. Für eine bessere Abschätzung der damit erschließbaren Potenziale elektrifizierter Transportrelationen werden detailliertere Aussagen zu Standzeiten differenziert nach charakteristischen Einsatzprofilen benötigt.

Schnellere Lademöglichkeiten für Nutzfahrzeuge wurden noch nicht realisiert. Laut ACEA 2020a werden weitere öffentliche Ladepunkte mit 350 kW und Schnellladeoptionen mit über 500 kW benötigt, namentlich jeweils 20.000 Stück in Europa bis 2030. Da sich die „Megacharger“ noch in der Entwicklung befinden, wird hier eine Stückzahl von 2.000 angesetzt, während die 350 kW Ladestationen bereits zu 2025 in einer Quantität von 11.000 innerhalb des TEN-T Netzes existieren sollen. Die Megacharger sollen die Lücke zum Fernverkehr schließen. In den vorgeschriebenen Lenk- und

Ruhezeiten soll ein Aufladen für eine Weiterfahrt über 4,5 Stunden ermöglicht werden, dies ergibt Ladeleistungen von mindestens 600-800 kW.

Tabelle 4-3: Charakterisierung benötigter Ladepunkte mit anvisierten Ladeleistungen und Standzeiten

Ladeorte	Lademuster	Nutzung	Ladeleistung	Ladezeiten
Depot	Übernachtladen	Nicht-öffentlich	< 100 kW AC/DC	6-8 Std.
Umschlagpunkte	Gelegenheitsladen	Teil-öffentlich	350 kW DC	1-2 Std.
Streckenseitig	Gelegenheitsladen	Öffentlich	> 500 kW DC	30-45 min

Quelle: Eigene Darstellung

Die technischen Herausforderungen liegen bei der Energieübertragung zum Fahrzeug. Die hohe Leistungsabgabe erfordert eine aufwendige Kühlung des Steckers, zum Teil über flüssige Wärmeträger. Darüber hinaus ist die Auswirkung auf die Batterielebensdauer umstritten und wird sich final erst in der Praxis vollständig klären lassen. Proprietäre Stecker-Lösungen werden für den Nutzfahrzeugmarkt wohl auch durch den hohen Handlungsdruck mittlerweile eher vermieden, so definiert und entwickelt die Branche im Rahmen der CharIn Initiative den gemeinsamen Standard HPCCV (High-power charging of commercial vehicles) speziell für Nutzfahrzeuge.⁴⁹ Erste Systeme sollen 2024 auf den Markt kommen mit Leistungen von 1 MW für den europäischen Markt, sowie 2 MW für die längeren Distanzen des US-amerikanischen Transportverkehrs.

Die hohen Leistungsraten resultieren in Kosten pro Ladestation, die ab 100 kW bereits im sechsstelligen Bereich liegen. Die Förderschwerpunkte für Nutzfahrzeuge liegen entsprechend der AFID aus dem Jahre 2014 und dem abgeleiteten „Nationalen Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ bei Erdgasantrieben (Abschnitt 3.2). Eine Novelle der europäischen Strategie zur Förderung der Infrastruktur alternativer Antriebe ist daher dringend erforderlich. Nationale Strategien zur Elektromobilität konzentrieren sich bisher überwiegend auf den Ausbau von Ladesäulen für den Pkw-Markt, welche nicht mit Ladepunkten für E-Lkw kompatibel sind. Im Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung des BMVI soll zu Ende 2020 ein Förderprogramm für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur für Lkw erstellt werden.⁵⁰ Zentrale Ziele werden auch im Abschnitt 3.2 in Zusammenhang mit der AFID thematisiert. Eine zügige Ausstattung von Depots und Umschlagpunkten mit Ladepunkten für E-Lkw ist ein sinnvoller erster Schritt für eine zeitnahe Elektrifizierung des Nah- und Regionalgüterverkehrs und schafft zudem Synergien zur Elektrifizierung des Fernverkehrs über Schnellladesysteme oder dynamische Ladeoptionen über Oberleitungen.

4.4. Oberleitungs-Lkw

Die Problematik des Energiespeichers und der Zeitverluste beim stationären Laden wird beim Oberleitungs-Lkw durch eine direkte Stromversorgung aus einer elektrischen Oberleitung gelöst und bisher insbesondere als Lösung für den schweren Straßengüterverkehr mit hohen Tagesfahrleistungen von bis zu 600 km diskutiert. Mögliche zusätzliche Potenziale durch den Regionalverkehr wurden bislang nicht betrachtet. Die Fahrzeuge werden mit einem ausfahrbaren Stromabnehmer ausgerüstet, ähnlich zu Anwendungen bei Straßenbahnen oder einigen Stadtbussen. Die Batterie kann so auf die nötigen Vor- und Nachlaufstrecken von 100-200 km zum Oberleitungsnetz dimensioniert

⁴⁹ <https://www.charinev.org/index.php?id=170> (besucht am 10.08.2020)

⁵⁰ https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 10.08.2020)

werden (Abbildung 4-2). Alternativ sind auch weitere Antriebssysteme für die Fahrten abseits des Oberleitungsnetzes denkbar. So kommen in den frühen Anwendungen Diesel-Hybrid-Varianten zum Einsatz, die jenseits der elektrifizierten Strecken einen flexiblen Lkw-Einsatz auf Basis des verbrennungsmotorischen Antriebs erlauben.

Die Technologie wird bisher von wenigen großen Akteuren entwickelt. Wesentliche Entwicklungsaktivitäten zur Fahrbahnelektrifizierung sowie in Bezug auf einen serienreifen Stromabnehmer für den Lkw-Einsatz wurden bisher insbesondere durch die Siemens AG geleistet, welche mehrere Teststrecken mit dem sogenannten eHighway⁵¹ ausgestattet hat (Siemens AG 2012, Siemens AG et al. 2016). Nach frühen Anwendungen im öffentlichen Straßenraum in Kalifornien, USA, (Siemens AG 2017) und in Schweden⁵² befinden sich aktuell drei Teststrecken in Deutschland im Betrieb bzw. im Aufbau (ELISA⁵³, FESH⁵⁴, eWayBW⁵⁵), um Praxiserfahrungen im regulären Logistikbetrieb auf Bundesautobahnen bzw. Bundesstraßen zu sammeln. Die Fahrzeuge für die Feldversuche werden im Rahmen von Forschungsvorhaben durch Scania entwickelt und bereitgestellt, in den USA war Volvo an der Fahrzeugentwicklung beteiligt. Die Feldversuche werden neben der wissenschaftlichen Begleitforschung der jeweiligen Projekte auch durch das gemeinschaftliche Begleitvorhaben BOLD⁵⁶ ergänzt.

Abbildung 4-2: Funktionsweise und Eigenschaften des O-Lkw-Systems im Fernverkehr



Quelle: basierend auf Hacker et al. 2020a

Der Stromabnehmer bzw. Pantograph kann während der Fahrt aus- und eingefahren werden, wobei die Erkennung der Oberleitung sensorgestützt erfolgt. So stellen Überholmanöver, Tunnel und Brücken keine Einschränkungen für den Fahrbetrieb im Oberleitungs-Lkw dar. Bei den Prototypen-Fahrzeugen ist das Pantographenmodul hinter der Fahrerkabine montiert. Der Platzbedarf von etwa einem halben Meter wird derzeit über entsprechend kompakte Fahrerkabinen ohne Liegeplatz kompensiert. Für den Einsatz im Fernverkehr werden gegebenenfalls Modifikationen der Fahrerkabine und/oder eine Anpassung der Längenbegrenzungen der Nutzfahrzeuge nötig werden. Zudem muss das Fahrzeug offenkundig über einen elektrischen Antriebsstrang verfügen. Bei den Testfahrzeugen handelt es sich um Diesel-Hybridfahrzeuge des Modells Scania R450 Hybrid, welche über einen

⁵¹ <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/strasse/ehighway.html> (Besuch am 10.08.2020)

⁵² Schwedisch-Deutsches Kooperationsprojekt CollERS: <https://www.electricroads.org/collers/> (abgerufen am 10.08.2020)

⁵³ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elisa-ii> (abgerufen am 10.08.2020)

⁵⁴ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/fesh-ii-b> (abgerufen am 10.08.2020)

⁵⁵ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ewaybw> (abgerufen am 10.08.2020)

⁵⁶ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/bold>

Elektromotor mit einer Leistung von 130 kW und einen Verbrennungsmotor mit einer Leistung von 330 kW verfügen (Tabelle 4-4). Für kommende Testfahrzeuge werden leistungsstärkere Elektromaschinen erwartet.

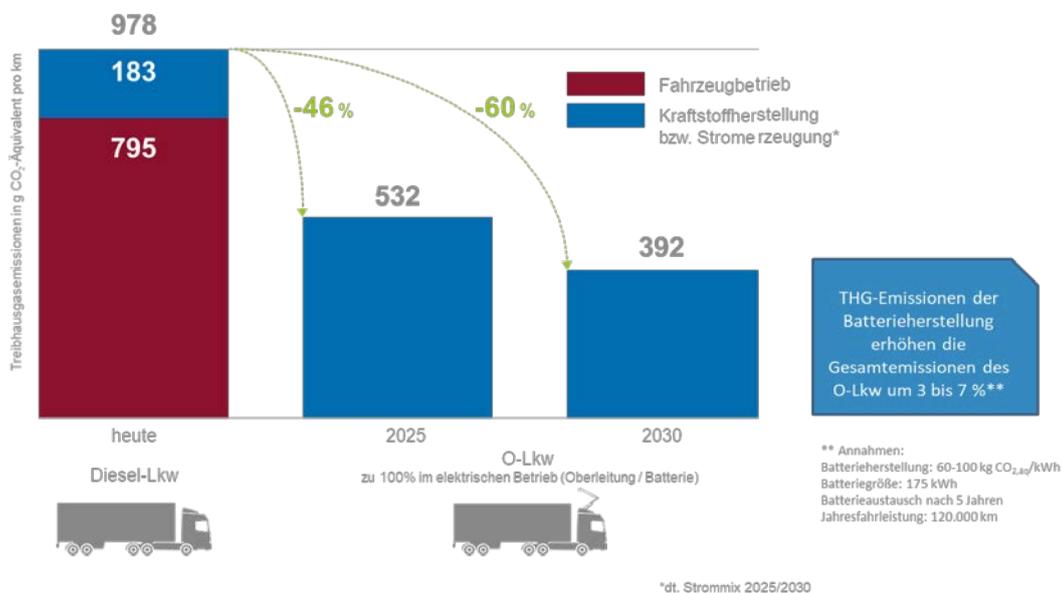
Tabelle 4-4: Verfügbare schwere Oberleitungs-Lkw; die Reichweite bezieht sich auf die mögliche elektrische Fahrleistung ohne Oberleitung über die Batterie

Hersteller	Modell	zul. GGW	E-Motor	V-Motor	Batterie	Reichweite
Scania	R450	40 t	130 kW	330 kW	18,5 kWh	15 km

Quelle: Daniels 2019

Das THG-Minderungspotenzial des Oberleitungs-Lkw wurde mit Schwerpunkt auf den innerdeutschen Fernverkehr in einigen umfassenden Studien bewertet (Hacker et al. 2020a, Jöhrens et al. 2020, Wietschel et al. 2017); ein Synthesepapier wurde im Mai dieses Jahres veröffentlicht (Hacker et al. 2020b). Das THG-Minderungspotenzial von O-Lkw mit rein elektrischem Antrieb hängt auch bei Berücksichtigung der Fahrzeugherstellung und des Infrastrukturausbaus im Wesentlichen von den Emissionen der Stromproduktion ab. In den genannten Studien wurde der aktuelle Fahrplan des Kohleausstiegs zu Grunde gelegt, für welchen in dem Projekt „StratON“ beispielsweise für das Jahr 2030 ein Emissionsfaktor von 275 gCO₂/kWh angenommen wurde (Hacker et al. 2020a). Im Ergebnis können Oberleitungs-Lkw als BEV-Variante mit 100 % elektrischer Fahrleistung ca. 60 % weniger CO₂-Emissionen im Betrieb als Diesel-Lkw verursachen (Abbildung 4-3). Im gleichen Bezugsjahr können Oberleitungs-Lkw als Diesel-Hybride unter Annahme eines elektrischen Fahranteils von 55 % gegenüber Diesel-Lkw pro Kilometer etwa ein Viertel CO₂-Emissionen einsparen.

Abbildung 4-3: Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen von Diesel- und O-Lkw



Quelle: basierend auf Hacker et al. 2020a

Das Treibhausgasminderungspotenzial hängt von der Marktdurchdringung der Fahrzeuge ab. Die vorliegenden Analysen zeigen, dass das Marktpotenzial von Oberleitungs-Lkw insbesondere von der Verfügbarkeit des Oberleitungsnetzes und der Sicherstellung eines stabilen Wirtschaftlichkeits-

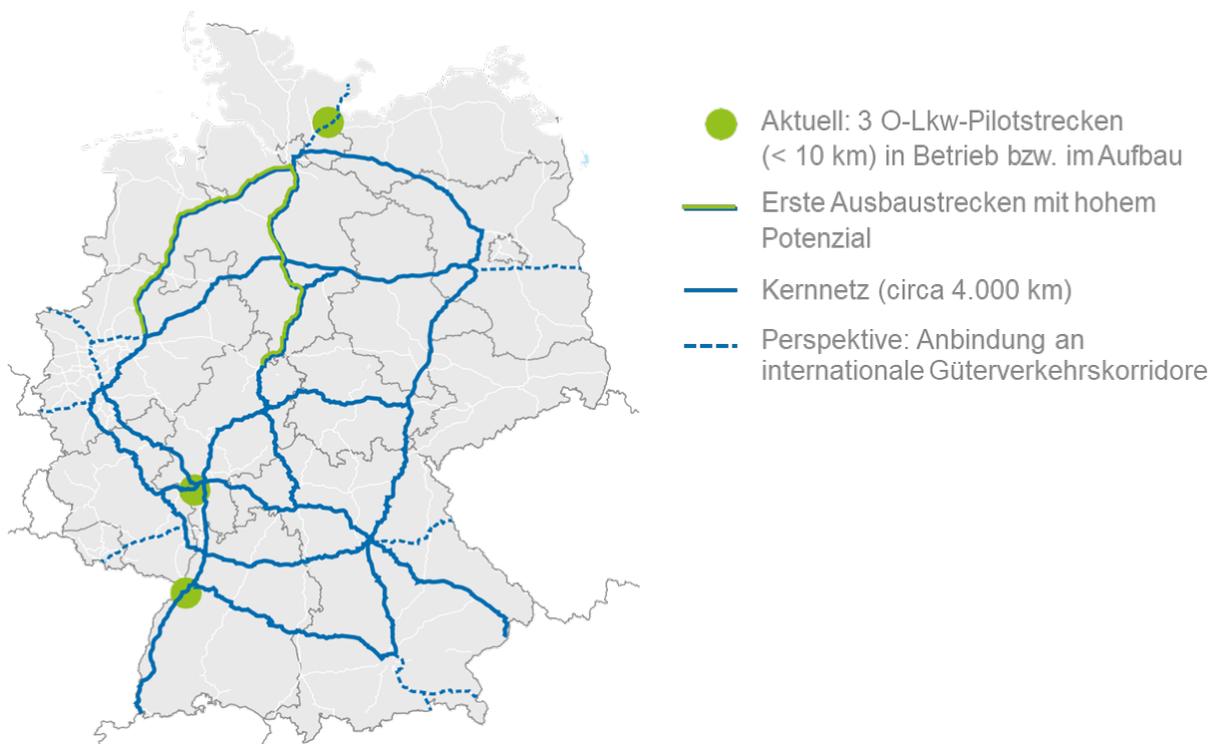
vorteils gegenüber Diesel-Lkw abhängig ist. Auch ohne Infrastrukturkosten ergeben sich aktuell höhere Gesamtnutzungskosten von O-Lkw gegenüber Dieselfahrzeugen bedingt durch höhere Anschaffungskosten. Abhängig von der erzielbaren elektrischen Fahrleistung ergeben sich bei entsprechender Entwicklung der Energiepreise durch den günstigeren elektrischen Betrieb innerhalb der Nutzungsdauer Kostenvorteile. Parität zum Diesel-Fahrzeug wird im Jahr 2030 je nach Ausgestaltung der Rahmenbedingungen nach jährlich 15.000-35.000 km an der Oberleitung erreicht (Hacker et al. 2020b).

Durch den Oberleitungs-Lkw können neben dem batterieelektrischen Lkw für regionale Transportrelationen weitere Potenziale der direkten Stromnutzung im Fernverkehr gehoben werden. In den Experteninterviews mit Fahrzeugherstellern wurden Oberleitungs-Lkw nicht als mögliche Dekarbonisierungsstrategie für die Fahrzeugentwicklung benannt. Die Vorbehalte gegenüber der Technologie beziehen sich überwiegend auf die Realisierung der Oberleitungs-Infrastruktur.

Oberleitungsnetz

Zurzeit existieren drei Oberleitungs-Pilotstrecken in Deutschland: 2019 wurden jeweils 2-mal 5 km Bundesautobahnstrecken in Schleswig-Holstein auf der A1 zwischen der Anschlussstelle Reinfeld und dem Autobahnkreuz Lübeck elektrifiziert (FESH) sowie in Hessen die A5 zwischen den Anschlussstellen Langen/Mörfelden und Weiterstadt (ELISA). In Baden-Württemberg befindet sich eine 18 km lange Teststrecke auf der Bundesstraße B462 bei Rastatt im Aufbau, auf welcher in beide Fahrtrichtungen je 4 km in zwei Abschnitten elektrifiziert werden (eWayBW). Der Feldversuch wird voraussichtlich 2021 starten. Die Standorte der Pilotstrecken sind auf der Karte in Abbildung 4-4 markiert.

Abbildung 4-4: Vielversprechende erste Strecken, Zielnetz und perspektivische internationale Anbindung



Quelle: basierend auf Hacker et al. 2020a

Perspektivisch wird ein Kernnetz von etwa 4000 km auf verkehrsreichen Autobahnen als besonders relevant diskutiert (Hacker et al. 2020b, Hacker et al. 2020a), welches in Abbildung 4-4 zusammen mit vielversprechenden ersten Ausbaustrecken und potentiellen internationalen Anschlussstellen dargestellt wird. Mit einem Anteil von etwa einem Drittel am Gesamtnetz bündelt das Kernnetz über 65 % des Lkw-Fernverkehrs. Der Aufbau einer solchen Infrastruktur wird mit Kosten von ca. 10-15 Mrd. € abgeschätzt (Hacker et al. 2020b, Hacker et al. 2020a). Eine Teilfinanzierung wäre über Einnahmen einer CO₂-basierten Lkw-Maut denkbar. Mehrere Analysen kommen zu dem Schluss, dass O-Lkw im Fernverkehrseinsatz mit Blick auf die langfristigen volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Dekarbonisierung Vorteile gegenüber der indirekten Stromnutzung über strombasierte Kraftstoffe (Wasserstoff und PtL) aufweisen (Kasten et al. 2016, BCG und Prognos 2018, Mottschall et al. 2019, Hacker et al. 2020a, Jöhrens et al. 2020). Parallel zur dynamischen Stromversorgung via Oberleitung befinden sich auch andere Technologien zur konduktiven bzw. induktiven Stromübertragung in verschiedenen Ländern in der Entwicklung bzw. Erprobung im Rahmen von Forschungsvorhaben (z.B. Elonroad⁵⁷ oder Electreon⁵⁸). Zwar gibt es aus mehreren europäischen Ländern Interesse an der Oberleitungstechnologie, bisher hat die Technologie aber noch keinen Eingang in EU-weite Strategien bzw. Richtlinien (z.B. AFID) gefunden und es wurden noch keine gemeinsamen Technologiestandards definiert. Eine klare Positionierung eines EU-Mitgliedsstaates zu Gunsten der Technologie hätte eine wichtige Signalwirkung.

Insbesondere von den Fahrzeugherstellern wird die Realisierung eines europäischen Oberleitungsnetzes in der notwendigen Geschwindigkeit vor dem Hintergrund langwieriger europäischer Abstimmungs- und Genehmigungs- bzw. Planungsprozesse zum jetzigen Zeitpunkt skeptisch bewertet. Der europäische Automobilverband ACEA nennt die Oberleitungstechnologie allerdings explizit als eine Option für die längerfristige Dekarbonisierung der Straßengüterverkehrs (ACEA 2020a).

4.5. Brennstoffzellen-Lkw

Das Brennstoffzellenfahrzeug bietet die Möglichkeit, in Form von Wasserstoff weiterhin einen stoffbasierten Energiespeicher zu nutzen. Die Umsetzung des Wasserstoffs in Strom zum Antrieb des Elektromotors erfolgt mit gegenüber Verbrennungsmotoren hohen Wirkungsgraden von 50-60 % ohne Emissionen von Luftschadstoffen oder Lärm (Kühnel et al. 2018). Der Gesamtwirkungsgrad ist durch die Zwischenschritte der Wasserstoffbereitstellung und Energieumwandlung in der Brennstoffzelle allerdings geringer als bei der direkten Stromnutzung in batterieelektrischen- oder Oberleitungs-Lkw (Abbildung 4-1).

Aktuell sind einige wenige schwere Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellen auf dem europäischen Markt verfügbar. Der Einsatzbereich der realisierten Modelle liegt wie bei den batterieelektrischen Lkw-Prototypen im städtischen und regionalen Verteilerverkehr. Seit 2018 wird ein von Esoro umgebauter MAN TGS in der Schweiz erprobt (Bottler 2018), während in Norwegen ein Praxistests eines Scania-Modells mit einem Lebensmittelhändler läuft (Scania 2020b). Ein Brennstoffzellen-Lkw von VDL mit mobiler Wasserstofftankstelle wird im Rahmen des EU-Projektes „H2Share“⁵⁹ wechselnden Praxiseinsätzen zur Verfügung stehen, im April 2020 begann der Einsatz in den Niederlanden (Schaal 2020b). Hyundai hat im Juli 2020 die ersten 10 Fahrzeuge des angekündigten Modells H2

⁵⁷ <https://elonroad.com/> (Besuch am 18.08.2020)

⁵⁸ <https://www.electreon.com/> (besucht am 18.08.2020)

⁵⁹ <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/h2share-hydrogen-solutions-for-heavy-duty-transport/> (zuletzt abgerufen am 14.10.2020)

Xcient in die Schweiz ausgeliefert, 40 weitere Brennstoffzellen-Lkw sollen im laufenden Jahr noch folgen. Eine Sattelzugmaschine mit Brennstoffzelle ist von Toyota in den USA im Einsatz.

Interessant für den europäischen Markt ist das Joint Venture aus dem US-amerikanischen Start-up-Unternehmen Nikola, dem Iveco Dachkonzern CNH Industrial und Bosch. Der Nikola Tre soll sowohl als rein batterieelektrische Sattelzugmaschine als anschließend ab 2023 auch als Brennstoffzellenfahrzeug auf den Markt kommen. Gemeinsame Aktivitäten bündeln sich auch in dem H2Share übergeordnetem Horizon 2020 Projekt H2Haul⁶⁰, welches das Ziel hat, 15 weitere Schwerlast-Lkw mit Wasserstoff-Brennstoffzellen für die praktische Erprobung zu entwickeln. Daimler und Volvo streben derzeit ebenfalls ein Joint Venture bezüglich der Brennstoffzellentechnologie an. Und auch bei MAN bestehen Forschungsaktivitäten zusammen mit Shell und DHL Logistics.

Tabelle 4-5: Verfügbare schwere Lkw mit Brennstoffzelle und Wasserstofftanks

Hersteller	Modell	zul. GGW	E-Motor	BS-Zelle	Batterie	H ₂ Tank	Reichweite
Esoro*	FCT1	34 t	250 kW	100 kW	120 kWh	31 kg	400 km
Scania		27 t	290 kW	90 kW	56 kWh	33 kg	400 km
Hyundai	H2 Xcient	34 t	350 kW	190 kW	73 kWh	32 kg	400 km
VDL		27 t	210 kW	88 kW	84 kWh	30 kg	400 km

*umgebaute MAN TGS

Quelle: Esoro 2018, Scania 2020b, Hyundai 2020, Schaal 2020b

Bislang wird noch kein schweres Nutzfahrzeug mit Wasserstoffbrennstoffzelle in Deutschland eingesetzt. Tabelle 4-4 gibt einen Eindruck über die Fahrzeugspezifikationen der Prototypen in den erwähnten europäischen Praxistests. Bei den Fahrzeugmodellen liegt die Leistung der Brennstoffzelle unterhalb der Motorleistung und zielt damit auf eine Abdeckung der Grundlast des Fahrzeugantriebs ab. Höhere Lastanforderungen bei Beschleunigungsvorgängen oder Steigungen werden durch die Batterie abgefangen, die entsprechende Kapazitäten aufweisen muss. In den verfügbaren Modellen werden Batterien von 50 kWh und 120 kWh verbaut, die sich als Plugin-Modelle auch direkt laden lassen. Es ergibt sich bei Brennstoffzellenfahrzeugen also ein Platzbedarf für die Brennstoffzellenstacks, die Batterie und den Wasserstofftank. Zusätzlich wird von den Expertinnen und Experten als technische Herausforderung häufig der Kühlbedarf der Brennstoffzelle thematisiert, da der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Gegensatz zum Verbrennungsmotor mit steigender Temperatur abnimmt. Darüber hinaus setzt der Betrieb der Brennstoffzellen einen hohen Reinheitsgrad des Wasserstoffs voraus, wodurch sich auch ein Bedarf an standardisierten Kraftstoffspezifikationen ergibt. Ein Vorteil gegenüber vergleichbaren Batterie-Lkw mit 26 t zGG ist die höhere Reichweite, die für die aufgeführten Modelle mit mindestens 400 km angegeben wird.

Die Reichweite der Brennstoffzellenfahrzeuge ergibt sich neben dem Energieverbrauch im Wesentlichen durch den Wasserstofftank. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff bei Umgebungsbedingungen wird der Energieträger im Tank komprimiert bei 350 bar oder 700 bar gespeichert oder bei Temperaturen von -253 °C in flüssiger Form (LH₂) eingelagert. In den zuvor erwähnten realisierten Fahrzeugmodellen wird der Wasserstoff komprimiert auf 350 bar in zylindrischen Tanks hinter der Fahrerkabine gespeichert. Auch für Brennstoffzellen-Busse wird derzeit diese Druckstufe verwendet. Perspektivisch setzen Nutzfahrzeughersteller aufgrund des höheren Energiebedarfs auf eine Komprimierung bei 700 bar oder favorisiert auf den LH₂-Tank. Der volumetrische Heizwert der

⁶⁰ <https://cordis.europa.eu/project/id/826236/de> (zuletzt abgerufen am 19.08.2020)

beiden Varianten liegt immer noch lediglich bei entsprechend etwa 20 % und 25 % des Wertes von Dieselkraftstoffen. Neben dem Platzbedarf des Wasserstofftanks ergeben sich durch die dick- und für kryogene Tanks mehrwandige Stahlhülle auch massebezogene Herausforderungen. Darüber hinaus sind aus dem Pkw-Bereich Probleme durch Verdampfungsverluste der kryogenen Tanks bekannt, da die tiefkalten Temperaturen nicht allein durch Isolierung aufrechterhalten werden können (Rivard et al. 2019). Für den Wasserstofftank für schwere Nutzfahrzeuge besteht entsprechend weiterhin Entwicklungsbedarf.

Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen-Lkw sind noch mit vielen Unsicherheiten behaftet. Neben den Kosten der Wasserstoffbereitstellung und -verteilung sowie der komprimierten oder verflüssigten Speicherung im Kraftstofftank, befindet sich auch die Brennstoffzelle im Einsatz für schwere Nutzfahrzeuge noch in der Entwicklung. In der Fahrzeuganschaffung werden für Brennstoffzellen-Lkw derzeit die höchsten Kosten unter den alternativen Antrieben gesehen. Bosch schätzt die Kosten in einer frühen Marktphase auf etwa die dreifachen Kosten eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs (Schaal 2020a). In einer Studie des DVGW werden die Anschaffungskosten der FCEV-Prototypen mit dem fünffachen Preis beziffert, während eine Prognose für 2030 von einer optimistischen Kostendegression auf die etwa 1,5-fachen Kosten ausgeht (Ehret 2020). Nach einer TCO-Modellierung des Fraunhofer ISI aus dem Jahre 2017 liegt das Potenzial von Brennstoffzellen-Lkw bis 12 t zGG bei etwa 2-3 % im Bestand von 2030, während der Markthochlauf von schweren Nutzfahrzeugen aufgrund des Speicherbedarfs der benötigten Wasserstoffmengen kritisch bewertet wird (Gnann et al. 2017).

Insgesamt stehen die Entwicklungen im Bereich der wasserstoffbasierten Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge in einem gewissen Kontrast zur Präsenz der Technologie im öffentlichen Diskurs. Herstellerübergreifend ergibt sich aus den Experteninterviews die Strategie, zunächst batterieelektrische Nutzfahrzeuge in den Markt einzuführen. Im Nah- und Regionalverkehr mit realisierbaren Reichweitenanforderungen zeichnet sich bereits ein wirtschaftlicher Einsatz von Batterie-Lkw ab. Auch im europäischen Fernverkehr werden zunächst rein batterieelektrische Fahrzeuge erwartet in Abhängigkeit der Entwicklungen im Bereich der Batterie- und Ladesysteme. Perspektivisch können Brennstoffzellen-Lkw batterieelektrische Lkw in Einsatzbereichen mit hohen Reichweitenanforderungen ergänzen oder in Regionen lukrativ sein, die auf eine starke Wasserstoffwirtschaft setzen. Schwere Nutzfahrzeuge mit Wasserstoffbrennstoffzelle werden erst Ende der 2020er im Produktportfolio der Nutzfahrzeughersteller erwartet.

Wasserstoff-Tankstellennetz

Nach aktuellem Stand der Recherchen existiert bisher in Deutschland keine auf die Kapazitäts- und Raumanforderung schwerer Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge zugeschnittene Wasserstofftankstelle. Brennstoffzellen-Busse können bereits an einigen wenigen Standorten mit Tankzeiten von etwa 10 min Wasserstoff bei 350 bar tanken, während sich im Pkw-Bereich ein flächendeckender Ausbau von Zapfpunkten für komprimierten Wasserstoff bei 350 bar und 700 bar sowie für Flüssigwasserstoff (LH₂) entwickelt (<https://h2.live/>, Ehret 2020). Der Aufbau wird auch durch das Unternehmen „H2 Mobility“ vorangetrieben, einem Zusammenschluss von Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und Total. Gefördert wird die Initiative durch das BMVI im Rahmen des „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“, von der Europäischen Kommission durch „Hydrogen Mobility Europe (H2ME)“ und durch das trans-European Transport Network (TEN-T CEF) im Projekt „Connecting Hydrogen Refueling Stations (COHRS)“.

Der europäische Automobilverband ACEA hat aufgrund der Bestrebungen einiger Hersteller im Bereich der Brennstoffzellentechnologie einen Bedarf an europaweiten Lkw-Wasserstofftankstellen von 50 Stück im Jahr 2025 und mindestens 500 Stück für das Jahr 2030 ermittelt ohne sich auf die

temperatur- und druckseitigen Tankbedingungen festzulegen (ACEA 2020a). Die Forderungen nach einem mindestens fünfstelligen Ausbau von Ladepunkten bis 2030 ist vergleichsweise ambitionierter und untermauert die angebotsseitige Strategie eines primären Markthochlaufs batterieelektrischer Nutzfahrzeuge.

Die Nachhaltigkeit des Einsatzes von Wasserstoff für den Straßenverkehr hängt wesentlich von dem Bezugspfad des Energieträgers ab. Derzeit wird Wasserstoff überwiegend aus fossilen Quellen über Dampfreformierung produziert. Die potenzielle Bereitstellung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse aus erneuerbarem Strom ist zwar eine vielversprechende Möglichkeit, allerdings wird die häufig diskutierte Nutzung von „überschüssigem“ EE-Strom für eine wirtschaftliche Auslastung der Elektrolyseanlagen voraussichtlich nicht ausreichen (Agora Energiewende et al. 2018). Eine Nutzung von Wasserstoff als Energieträger im Verkehr ist demzufolge mit einem über die Energiewende hinausgehenden inländischen Ausbau an erneuerbaren Energien verbunden und/oder mit Energieimporten. Eine detailliertere Analyse plausibler Wasserstoffbezugspfade überschreitet den Rahmen dieses ersten Teilberichts, wird aber im Fokus weiterer Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes „StratES“ stehen.

4.6. Fazit

Der Bestand an schweren Nutzfahrzeugen ist nach wie vor nahezu vollständig durch den Dieselmotor geprägt. Angetrieben durch regulatorische Rahmenbedingungen zum Klimaschutz, soll die Entwicklung des Dieselmotors durch die Nutzfahrzeughersteller in den nächsten Jahren zurückgefahren und die Neuzulassungen im europäischen Markt ausgephast werden.

In den im Rahmen der vorliegenden Studie geführten Gesprächen mit einigen marktanteilsstarken Nutzfahrzeugherstellern werden unter anderem aufgrund des hohen Gesamtwirkungsgrades einvernehmlich elektrische Antriebe als favorisierte Alternative für zukünftige Nutzfahrzeuggenerationen genannt. Unter den elektrischen Antrieben wird zunächst ein Markthochlauf Batterieelektrischer-Lkw verfolgt. Vor-Serienmodelle diverser Hersteller mit bis zu 26 t Gesamtgewicht und Reichweiten von 200-300 km befinden sich in geringer Stückzahl seit etwa 2018 in der praktischen Erprobung für den Einsatz im Nah- und Regionalverkehr.

Für einen Einsatz im Fernverkehr reicht die mit heutigen Batteriesystemen ohne signifikante Nutzlastverluste erzielbare Reichweite noch nicht aus. Forschung und Entwicklung zielen auf eine weitere Erhöhung der Energiedichte und Zyklenfestigkeit der Batterien. Parallel existieren herstellerübergreifende Initiativen zur Standardisierung und Einführung von Schnellladesystemen.

Ebenfalls in der praktischen Erprobung befinden sich Oberleitungs-Lkw, welche die Antriebsenergie dynamisch aus einer über Oberleitungen elektrifizierten Fahrbahn beziehen. Abseits der Oberleitung kann die Antriebsenergie aus einem Batteriesystem gewonnen werden, für welches heutige Batteriekapazitäten ausreichen, oder über andere Energieumwandlungsverfahren wie einen zusätzlich verbauten Verbrennungsmotor. Die interviewten Fahrzeughersteller stehen der Oberleitungs-Technologie eher kritisch gegenüber. Die Vorbehalte beziehen sich überwiegend auf Zweifel an der Umsetzbarkeit eines schnellen Ausbaus des benötigten Oberleitungs-Kernetzes.

Die Entwicklung von Brennstoffzellen-Lkw wird von einigen interviewten Herstellern als eine Möglichkeit gesehen die Reichweite auf Kosten eines geringeren Gesamtwirkungsgrades zu erhöhen. Bisher werden in Deutschland keine Praxistests mit Brennstoffzellen-Lkw durchgeführt, einige wenige Fahrzeugprototypen werden allerdings in der Schweiz und Norwegen eingesetzt. Mit einer Verfügbarkeit erster langstreckentauglicher Serienmodelle rechnen die Interviewpartner zu Ende der 2020er Jahre.

Literaturverzeichnis

- ACEA (2019): Vehicles in use - Europe 2019. Hg. v. ACEA. Online verfügbar unter https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2019.pdf, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- ACEA (2020a): Charging and re-fuelling infrastructure required for heavy-duty vehicles. Hg. v. ACEA. Online verfügbar unter <https://www.acea.be/publications/article/position-paper-charging-and-refuelling-infrastructure-required-for-heavydut>.
- ACEA (2020b): CO2 emissions from heavy-duty vehicles - Preliminary CO2 baseline (Q3-Q4 2019) estimate. Hg. v. ACEA. Online verfügbar unter https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_preliminary_CO2_baseline_heavy-duty_vehicles.pdf.
- Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Frontier Economics (Hg.) (2018): The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels. Agora. Berlin. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2020.
- Agora Verkehrswende (2020): Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende. Kritische Beleuchtung eines Postulats. Online verfügbar unter <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/technologieneutralitaet-im-kontext-der-verkehrswende-2/>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Arndt, Wulf-Holger (2018): Aktuelle Entwicklungen und Konzepte im urbanen Lieferverkehr. Lieferkonzepte in Quartieren - die letzte Meile nachhaltig. Hg. v. Wulf-Holger Arndt und Tobias Klein. Berlin.
- BAG (2020): Bundesamt für Güterverkehr (BAG): Förderung von energieeffizienten und/oder CO2-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs, 15.07.2020. Persönliche Mitteilung an Öko-Institut e.V. (ÖI).
- BCG; Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI). Unter Mitarbeit von Philipp Gerbert, Patrick Herhold, Jens Buchardt, Stefan Schönberger, Florian Rechenmacher, Almut Krichner et al. The Boston Consulting Group; Prognos. Berlin, Basel, Hamburg.
- BGL (2019): Der Gewerbliche Güterkraftverkehr - eine Branche in Zahlen. Hg. v. Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL). Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://www.bgl-ev.de/images/daten/brancheninfo.pdf>, zuletzt geprüft am 22.07.2020.
- BIEK (2020): Verbinden, sichern und versorgen, KEP-Studie 2020 – Analyse des Marktes in Deutschland. Hg. v. Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK) / KE-CONSULT Kurte&Esser GbR. Berlin, Köln.
- BLE (2019): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2018. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).
- BMVI (2019): Verkehr in Zahlen 2019/2020. 48. Jahrgang. Unter Mitarbeit von Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) und Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMWI (2020): Nationales Reformprogramm 2020 - Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. v. BMWI. Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

- Bottler, Stefan (2018): Leuchtturmprojekt Brennstoffzellen-LKW. Hg. v. Deutsche Verkehrs-Zeitung. Online verfügbar unter <https://www.dvz.de/rubriken/test-technik/alternative-antriebe/detail/news/leuchtturmprojekt-brennstoffzellen-lkw.html>, zuletzt aktualisiert am 24.07.2018.
- Cornelis, Stef (2019): Do gas trucks reduce emissions? Hg. v. Transport & Environment (T&E). Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_09_do_gas_trucks_reduce_emissions_paper_EN.pdf.
- DAF (2020a): DAF startet Feldtest mit CF Hybrid. Hg. v. DAF Trucks N.V. Online verfügbar unter <https://www.daftrucks.de/de-de/presse-und-downloads/news-articles/global/2020/q1/28-02-2020-daf-starts-field-test-with-cf-hybrid>, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- DAF (2020b): Elektro- und Hybridfahrzeuge Produktdaten. Hg. v. DAF Trucks Deutschland GmbH. Online verfügbar unter <https://www.daftrucks.de/de-de/lkw/daf-elektro-und-hybridfahrzeuge>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- Daimler (2018): Vollelektrische Mercedes-Benz Lkw für den schweren Verteilerverkehr: Nachhaltig, voll-elektrisch und leise: Mercedes-Benz eActros geht 2018 in den Kundeneinsatz. Hg. v. Daimler AG. Online verfügbar unter <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Vollelektrische-Mercedes-Benz-Lkw-fuer-den-schweren-Verteilerverkehr-Nachhaltig-vollelektrisch-und-leise-Mercedes-Benz-eActros-geht-2018-in-den-Kundeneinsatz.xhtml?oid=33451264>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- Daimler (2019): Daimler Trucks & Buses strebt komplett CO₂-neutrale Neufahrzeugflotte bis 2039 in wichtigsten Regionen an. Hg. v. Daimler AG. Online verfügbar unter <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/nachrichten/kapitalmarktmeldungen/daimler-ir-release-de-20191025.pdf>, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- Daniels, Achim (2019): LKW mit Oberleitung auf dem eHighway – so funktioniert es. Hg. v. Achim Daniels – nextDrive. Online verfügbar unter <https://nextdrive.de/lkw-mit-oberleitung-auf-dem-ehighway-so-funktioniert-es/>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2019, zuletzt geprüft am 29.07.2020.
- Delgado, Oscar; Rodríguez, Felipe; Muncrief, Rachel (2017): Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe. International Council on Clean Transportation (ICCT). Berlin (White Paper). Online verfügbar unter http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf.
- Designwerk (2020): Futuricum Semi 40E Produktdaten. Hg. v. Designwerk Products AG. Online verfügbar unter https://www.futuricum.com/wp-content/uploads/Factsheet_Semi40E_Futuricum_Sattelzug_EN.pdf, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- Earl, Thomas; Mathieu, Lucien; Cornelis, Stef; Kenny, Samuel; Calvo Ambel, Carlos; Nix, James (2018): Analysis of long haul battery electric trucks in EU. Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives. 8th Commercial Vehicle Workshop, Graz, 17-18 Mai 2018.
- Eforce (2020): Eforce Produktdaten. Hg. v. E-Force One AG. Online verfügbar unter <https://www.eforce.ch/products/e-trucks>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- Ehret, Oliver (2020): Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven. Hg. v. C. A.M. DVGW.
- Emiss (2020): Emiss Produktdaten. Hg. v. Emiss Mobile Systems B.V. Online verfügbar unter <http://www.emoss.nl/en/electric-vehicles/full-electric-truck/>, zuletzt geprüft am 18.05.2020.

- Esoro (2018): Weltweit erster Wasserstoff-LKW mit Anhänger, der die LKW-Anforderungen für die Coop-Logistik erfüllen kann. Online verfügbar unter https://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet_Lastwagen_D.pdf.
- Eurostat (2020): Renewable Energy Statistics. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics#of_renewable_energy_used_in_transport_activities_in_2018, zuletzt aktualisiert am Januar 2020, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- Fehrenbach, Horst (2019): Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030. Kurzstudie zu den Potenzialen an Kraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse sowie biogenen Abfällen und Reststoffen. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU).
- Fehrenbach, Horst; Giegrich, Jürgen; Köppen, Susanne; Wern, Bernhard; Pertagnol, Joachim; Baur, Frank et al. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor. Abschlussbericht. Forschungskennzahl 3716 43 102 0. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH (IZES); Öko-Institut (ÖI) (Texte, 115/2019).
- Fritsche, Uwe; Fehrenbach, Horst; Köppen, Susanne; Adolf, Jörg; Liebig, Dorothea (2012): Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? Fakten, Trends und Perspektiven. Hg. v. Shell Deutschland Oil GmbH.
- Gnann, Till; Wietschel, Martin; Kühn, André; Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Plötz, Patrick et al. (2017): Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Fraunhofer ISI; Fraunhofer IML; PTV Transport Consult. Karlsruhe.
- Göpfert, Ingrid (2012): Entsorgungslogistik. In: Peter Klaus, Winfried Krieger und Michael Krupp (Hg.): Gabler Lexikon Logistik. 5. Aufl. 2012. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Gronalt, Manfred; Höfler, Leonhard; Humpl, Doris; Käfer, Andreas; Peherstorfer, Herbert; Posste, Martin et al. (2011): Handbuch intermodaler Verkehr. Kombiniertes Verkehr: Schiene - Straße - Binnenwasserstraße. 2. Aufl. Aachen: Shaker (Forschen, Gestalten, Anwenden).
- Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Görz, Wolf (2020a): StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Unter Mitarbeit von Öko-Institut, HHN, Fraunhofer IAO und ITP. Hg. v. Öko-Institut.
- Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Plötz, Patrick (2020b): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese. Hg. v. Öko-Institut, ifeu und Fraunhofer ISI.
- Harthan, Ralph; Repenning, Julia; Blanck, Ruth (2020): Treibhausgaserminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht). Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerarien IX“)“. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Climate Change, 12/2020), zuletzt geprüft am 14.06.2020.
- Heid, Bernd; Hensley, Russell; Knupfer, Stefan; Tschiesner, Andreas (2017): What's sparking electric-vehicle adoption in the truck industry? Hg. v. McKinsey. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/whats-sparking-electric-vehicle-adoption-in-the-truck-industry>.

- Hölser, Thorsten (Hg.) (2018): LORENZ Leitfaden für Spediteure und Logistiker in Ausbildung und Beruf/ LORENZ 1. Grundwissen Spedition und Logistik. 26. Auflage, revidierte Ausgabe. Leverkusen: PMC Media House GmbH (DVZ Wissen, 26).
- Hölser, Thorsten (Hg.) (2019): LORENZ 2 Aufbauwissen Spedition und Logistik. Unter Mitarbeit von Hans Fischer, Ingo Hodea, Reinhard Lankes, Horst Manner-Romberg, Hermann Pikelj, Jürgen Ries et al. 21., komplett überarbeitete Auflage. Hamburg: Dt. Verkehrs-Verl.
- Hyundai (2020): World's First Fuel Cell Heavy-Duty Truck, Hyundai World's First Fuel Cell Heavy-Duty Truck, Hyundai XCIENT Fuel Cell, Heads to Europe for Commercial Use. Hg. v. Hyundai Hydrogen Mobility AG. Online verfügbar unter <https://hyundai-hm.com/2020/07/08/worlds-first-fuel-cell-heavy-duty-truck-hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use/>, zuletzt aktualisiert am 08.07.2020, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- Intrapan; BAG (2020): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2019/20. Hg. v. BMVI.
- Intrapan; BVU (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). München / Freiburg.
- Jöhrens, Julius; Rücker, Julius; Kräck, Jan; Allekotte, Michel; Helms, Hinrich; Biemann, Kirsten et al. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kosten und Umwelteffekten in der Einführungsphase - Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Unter Mitarbeit von ifeu, PTV, Fraunhofer IEE. Hg. v. ifeu.
- Kasten, Peter; Mottschall, Moritz; Köppel, Wolfgang; Degünther, Charlotte; Schmied, Martin; Wüthrich, Philipp (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher-Instituts für Technologie (KIT); Infraras AG. Dessau-Roßlau.
- KBA (2018): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Gesamtverkehr Dezember 2018 - VD 5. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- KBA (2019a): Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), 1. Januar 2019, FZ 25. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- KBA (2019b): Fahrzeugzulassungen FZ. Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 01. Januar 2019. FZ 13. Hg. v. KBA, zuletzt geprüft am 05.02.2020.
- Kemmler, Andreas; Kirchner, Almut; auf der Mauer, Alex; Ess, Florian; Kreidelmeyer, Sven; Piegesa, Alexander et al. (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030 10. März 2020. Prognos AG (Prognos); Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS); IINAS GmbH.
- Korn, Michael; Andreas Leupold; Christiane Schneider; Karl-Hans Hartwig; Helmut Daniels (2018): Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022. Endbericht. Unter Mitarbeit von Alfen Consult, AVISO, IVM und BUNG. Hg. v. BMVI.

- Kreidelmeyer, Sven; Dambeck, Hans; Krichner, Almut; Wünsch, Marco (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Unter Mitarbeit von Prognos AG (Prognos). Hg. v. BMWI.
- Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Görz, Wolf (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energiversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“. Öko-Institut (ÖI). Freiburg, Berlin, Darmstadt.
- Lanzinger, Ralf (2019): Nur 25 für E-Lkw geeignet. Hg. v. EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH. Online verfügbar unter <https://www.eurotransport.de/artikel/bundesweit-16-500-ladesaehlen-nur-25-fuer-e-lkw-geeignet-10654988.html>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2019, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- Lenz, Barbara; Lischke, Andreas; Knitschky, Gunnar; Adolf, Jörg; CEng, Felix; Stöver, Jana et al. (2010): Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Hg. v. Shell Deutschland Oil GmbH.
- Lobig, Anika; Liedtke, Gernot; Knörr, Wolfram (2017): Beitrag des Schienengüterverkehrs zur Energiewende. In: *Internationales Verkehrswesen* 69, S. 48–52, zuletzt geprüft am 31.05.2017.
- MAN (2018): MAN eTGM – vollelektrisch, flüsterleise und hocheffizient. Online verfügbar unter <https://www.truck.man.eu/de/de/lkw/etgm/etgm.html>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- MAN (2019): Erster vollelektrischer 40-Tonnen Sattelschlepper ausgeliefert. Hg. v. MAN Trucks & Bus Schweiz AG. Online verfügbar unter <https://mantruckandbus-blog.ch/innovativ-und-nachhaltig-man-truck-bus-schweiz-ag-liefert-den-ersten-vollelektrischen-40-tonnen-sattelschlepper/>, zuletzt aktualisiert am 02.05.2019.
- Mathieu, Lucien; Cornelis, Stef; Nix, James; Bannon, Eoin (2020): Recharge EU trucks: time to act! A roadmap for electric truck charging infrastructure deployment. Hg. v. T&E. Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_02_RechargeEU_trucks_paper.pdf.
- Minkos, Andrea; Dauert, Ute; Feigenspan, Stefan; Kessinger, Susan; Mues, Andrea (2020): Luftqualität 2019. Hg. v. UBA. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/hgp_luftqualitaet2019_bf.pdf.
- Mottschall, Moritz; Kasten, Peter; Kühnel, Sven; Minnich, Lukas (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut e.V. (ÖI). Dessau-Roßlau (Texte, 114/2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sensitivitaeten-zur-bewertung-der-kosten>.
- Mottschall, Moritz; Kasten, Peter; Rodríguez, Felipe (2020): Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective. Unter Mitarbeit von Öko-Institut und ICCT. Hg. v. Öko-Institut.
- Posada, Francisco; Badshah, Huzeifa; Rodriguez, Felipe (2020): In-use NOx emissions and compliance evaluation for modern heavy-duty vehicles in Europe and the United States. Hg. v. ICCT. Online verfügbar unter <https://theicct.org/sites/default/files/publications/In-use-NOx%20emissions-May2020.pdf>.

- Renault (2018): Renault Trucks präsentiert zweite Generation von Elektro-Lkw. Hg. v. Renault Trucks. Online verfügbar unter <https://www.renault-trucks.de/pressemitteilungen/renault-trucks-prasentiert-die-zweite-generation-von-elektro-lkw-eine.html>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- Rivard, Etienne; Trudeau, Michel; Zaghbi, Karim (2019): Hydrogen Storage for Mobility. A Review. In: *Materials* 12 (12), S. 1973. DOI: 10.3390/ma12121973.
- Rodriguez, Felipe (2019): CO2 standards for Heavy-Duty Vehicles in the European Union. International Council on Clean Transportation (ICCT) (POLICY UPDATE).
- Scania (2020a): BEV. Battery electric truck. Hg. v. Scania CV AB. Online verfügbar unter <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.
- Scania (2020b): Norwegian wholesaler ASKO puts hydrogen powered fuel cell electric Scania trucks on the road. Online verfügbar unter <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2020/norwegian-wholesaler-asko-puts-hydrogen-powered-fuel-cell-electric-scania-trucks-on-the-road.html>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2020.
- Schaal, Sebastian (2020a): Bosch: Erste Brennstoffzellen-Kunden für Lkw und Pkw. Hg. v. Rabbit Publishing GmbH. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2020/01/29/bosch-erste-bz-kunden-fuer-lkw-und-pkw/>, zuletzt aktualisiert am 29.01.2020.
- Schaal, Sebastian (2020b): Brennstoffzellen-Lkw von VDL im Praxistest. Hg. v. Rabbit Publishing GmbH. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2020/04/09/brennstoffzellen-lkw-von-vdl-im-praxis-test/>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.
- Schulte, Christof (2016): Logistik. 7. Aufl. München: Vahlen.
- Schwemmer, Martin (2016): TOP 100 der Logistik 2016/2017. Hg. v. Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS und DVV Media Group. Hamburg, Nürnberg.
- Siemens AG (2012): Abschlussbericht ENUBA. Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Version vom 31.08.2012.
- Siemens AG (2017): Siemens demonstrates first eHighway system in the U.S. Press Release. Hg. v. Siemens AG. Online verfügbar unter <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-demonstrates-first-ehighway-system-us>, zuletzt aktualisiert am 08.11.2017, zuletzt geprüft am 29.07.2020.
- Siemens AG; Technische Universität Dresden; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Verkehrssystemtechnik (2016): ENUBA 2. Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Version V3 vom 31. August 2016. Siemens AG; Technische Universität Dresden; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Verkehrssystemtechnik.
- Stock, Wilfried; Bernecker, Tobias (2014): Verkehrsökonomie. Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft. 2., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02308-9>.
- UBA (2020): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2019. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- VDA (2017): Quo vadis, Diesel? 11 Fragen und Antworten zur Dieselseitechnologie. Hg. v. VDA.

- Volvo Trucks (2020a): Volvo FE Electric Produktdaten. Hg. v. Volvo Group Trucks Central Europe GmbH. Online verfügbar unter <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/classic-trucks/volvo-fe/volvo-fe-electric.html>.
- Volvo Trucks (2020b): Volvo FL Electric Produktdaten. Hg. v. Volvo Group Trucks Central Europe GmbH. Online verfügbar unter <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/classic-trucks/volvo-fl/volvo-fl-electric.html>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- VW (2018): Der Volkswagen Konzern bekennt sich mit einem klaren Plan zu den Klimaschutzziele von Paris. Hg. v. Volkswagen AG. Online verfügbar unter <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2018/12/volkswagen-accepts-climate-responsibility.html#>, zuletzt geprüft am 27.07.2020.
- Werwitzke, Cora (2019): Nagel-Group testet E-Lkw Futuricum Semi 40E. Hg. v. Rabbit Publishing GmbH. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2019/11/23/nagel-group-testet-e-lkw-futuricum-semi-40e/>, zuletzt aktualisiert am 23.11.2019.
- Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik (ISI); Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML); PTV Transport Consult; TU Hamburg-Harburg; M-Five. Karlsruhe.