

Einfluss der Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge auf das Energiesystem

Einfluss der Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge auf das Energiesystem

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

NEFTON 

Einfluss der Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge auf das Energiesystem

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

NEFTON 

Impressum

Herausgeber



Am Blütenanger 71
80995 München
+49 (0)89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Veröffentlicht am
01.08.2024

Autor:innen:

Veronika Engwerth
Katharina Sommer
Andreas Weiß

Review:

Florian Biedenbach
Daniel Battersby

Stellv. wissenschaftlicher Leiter

Dr.-Ing. Serafin von Roon

Geschäftsleitung

Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Christoph Pellingner
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Projektpartner

Neben der FfE e.V. sind unter der Leitung der Technischen Universität München (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik) die Partner MAN Truck & Bus SE, AVL Software and Functions GmbH, PRETTL Electronics GmbH, Technische Hochschule Deggendorf und das Fraunhofer ISE am Projekt beteiligt.

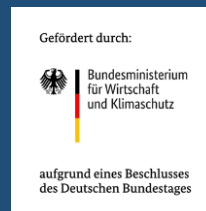
Bitte zitieren als

Engwerth, Veronika; Sommer, Katharina et al.: Einfluss der Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge auf das Energiesystem - FfE Discussion Paper 2024-02. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2024

ISSN: 2700-7111

Förderkennzeichen

Das Forschungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert (Förderkennzeichen: 01MV21004E).



Versionsnummer Vorlage: TL20230613

In diesem Discussion-Paper werden die möglichen Wechselwirkungen zwischen der Transformation des gesamtdeutschen Schwerlastverkehrs sowie dem Hochlauf des MCS-Ladens untersucht. Dazu werden drei verschiedene Transformationspfade für den Schwerlastverkehr modelliert. Darauf aufbauend erfolgt eine Abschätzung, welche Rolle MCS bei der Elektrifizierung des gesamten Schwerlastverkehrs einnehmen kann. Abschließend wird die Transformation des Schwerlastverkehrs in jene des gesamten Verkehrssektors eingeordnet. Die Analysen verdeutlichen, dass die Elektrifizierung des Subsektors schwerer Nutzfahrzeuge einen signifikanten Stellhebel darstellen, um CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu senken. Das Megawattladen stellt den technologischen Enabler dar, welcher batterieelektrische Nutzfahrzeuge aus Perspektive der Logistik gegenüber möglicher Alternativen konkurrenzfähig macht, da durch dieses das Laden in den üblichen Lenkzeitpausen möglich wird.

Elektrifizierung im Sektor der schweren Nutzfahrzeuge

Im Vor-Krisenjahr 2019 sind ca. 230 Tsd. Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 12 t sowie ca. 220 Tsd. Sattelschlepper auf deutschen Straßen unterwegs [1]. Diese sind für einen Endenergieverbrauch von 139 TWh, der fast ausschließlich fossil war, und THG-Emissionen von 35 Mio. t CO₂-Äq. verantwortlich¹. Um die deutschen Klimaschutzziele zu erreichen, müssen diese Emissionen der schweren Nutzfahrzeuge bis 2045 auf Nettonull reduziert werden [2]. Dieses ambitionierte Vorhaben kann nur durch einen Hochlauf klimafreundlicher Antriebssysteme gelingen, wobei im Jahr 2023 laut Herstellerprognose nur 2,5 % der schweren Nutzfahrzeuge (>12 t) über klimaneutrale Technologien verfügen [3]. Zur Beschleunigung der Transformation werden gesetzliche Richtlinien, wie die Flottengrenzwerte, beschlossen [4]. Diese geben vor, dass ab 2025 eine Reduktion um 15 % und ab 2030 eine Reduktion um 45 % bei den CO₂ Emissionen pro Kilometer erreicht wird (-65 % ab 2035, -90 % ab 2040). Die Reduktion bezieht sich dabei auf neue schwere Nutzfahrzeuge in Bezug auf Werte der Vergleichsflotte 2019/20.

Der Begriff der schweren Nutzfahrzeugen bezieht sich auf sämtliche Fahrzeuge mit einer Gesamtmasse über

¹ Eigene Berechnungen: Annahmen und Vorgehen vgl. Abschnitt 5.1

12 t sowie Sattelschlepper. Im Kontext des Wechsels von konventionell betriebenen Diesel-Fahrzeugen hin zu einem „klimaneutralen Antrieb“ ist vor allem das Energiespeichermedium für die Definition ausschlaggebend. Die wesentlich klimaneutralen möglichen Varianten sind batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge und Verbrennerfahrzeuge, welche mit synthetischen Kraftstoffen (sog. Synfuels) betrieben werden. Letztere gelten dann als „klimaneutral“, wenn der Kraftstoff durch erneuerbare Energien und unter Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre produziert werden, wodurch sie durch erneute Verbrennung maximal so viel CO₂ emittieren, wie im Herstellungsprozess dieser Kraftstoffe gebunden wird.

Studien zeigen, dass batterieelektrische Fahrzeuge in den meisten Fällen die kostengünstigste klimaneutrale Option darstellen [5]. Wasserstoff- und Synfuelbetriebene Fahrzeuge haben jedoch den großen Vorteil, dass die Aufnahmen des Energiespeichermediums, ähnlich zum klassischen Tanken der Diesel-Fahrzeuge verläuft, wodurch für die Fahrt nur ein geringfügiger zeitlicher Verzug resultiert und kommerzielle Nutzfahrzeuge somit maximal zur Erbringung ihrer Wirtschaftsleistung, dem Transport von Mensch und Gut, genutzt werden können. Batterieelektrische Nutzfahrzeuge sind durch die direkte Nutzung der Energie besonders energieeffizient. Hohe Verluste durch etwaige Energieumwandlungsprozesse entfallen. Jedoch sind diese mit der Herausforderung hoher Ladezeiten konfrontiert, da eine ähnlich schnelle Energieübertragung, wie bei Wasserstoff oder Synfuels, technisch heute noch nicht möglich ist. Ein erster Schritt, um batterieelektrische Nutzfahrzeuge auch im Kontext der Ladezeiten konkurrenzfähig zu machen ist das sogenannte Megawattladen, gleichbedeutend zum Hochleistungsladen. Ein Ladesystem mit der Ladeleistung von 1 MW ermöglicht bei einem schweren Nutzfahrzeug das Nachladen von Energie für ca. 400 km in nur 45 Minuten, wodurch das „Volltanken“ innerhalb der für Fahrer gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitpause² möglich wird.

Ein technisch komplexer Prozess wie das Megawattladen führt jedoch auch zu Herausforderungen für das Energiesystem. Die wichtigsten hier zu nennenden Punkte sind die Netzintegration und die Energiebeschaffung. Im Kontext der Netzintegration besteht die große Herausforderung, dass Ladesysteme im Megawatt-Bereich nicht die typischen Anschlussleistungen klassischer Ladesysteme aufweisen, wodurch enorme

² Nach Verordnung (EG) Nr. 561/2006 muss nach spätestens 4,5 Stunden Lenkzeit eine Pause von mindestens 45 Minuten eingelegt werden [6].

Netzanschlusserweiterungen und Netzausbau notwendig werden. Große, zentrale Raststätten und Autohöfe benötigen mehrere Megawatt an Anschlussleistung und müssen dadurch in das Mittel- bis Hochspannungsnetz angeschlossen werden. Ein Prozess, welcher von Planung bis Umsetzung ca. 5 - 10 Jahre in Anspruch nehmen kann [7]. Auch die Energiebeschaffung wird herausfordernd, da das Mobilitätsverhalten des Logistik-/Transportwesens größtenteils an den menschlichen Tag-/Nacht-Rhythmus gebunden ist und somit in einer Häufung notwendiger Ladevorgänge zur Mittagszeit führt, wenn viele Fahrer ihre Lenkzeitpause einlegen. Es resultiert eine hohe Ladegleichzeitigkeit, welche im Hinblick auf ein voll-elektrisches System in Deutschland zu mehreren Gigawatt zeitgleicher Ladeleistung, nur durch Nutzfahrzeuge, führen kann. Eine Größenordnung, welche heute und besonders zukünftig im durch volatile Energieerzeugung geprägten Energiesystem eine enorme Herausforderung darstellt. Um diese Herausforderungen zu adressieren, ist es besonders relevant, fundierte Szenarien und Prognosen zum Hochlauf klimaneutraler Nutzfahrzeuge zu analysieren. Um mit klimaneutralen schweren Nutzfahrzeugen die Transportaufgaben des heutigen Bestandes zu erfüllen, wird angenommen, dass eine Betankung bzw. eine Vollladung innerhalb der vorgegebenen Pausenzeit von 45 Minuten erfolgen kann [6]. Für batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge kann dies die Verfügbarkeit von MCS-Technologien erfordern.

1.1 Transformationspfade für den Schwerlastverkehr

Im Rahmen des Projektes NEFTON wurden drei verschiedene Transformationspfade bzw. Szenarien für den Schwerlastverkehr entworfen und modelliert. Im Szenario *HeavyMarket35* (*HM35*) werden die Technologieanteile der Neuzulassungen der schweren Nutzfahrzeuge entsprechend der Studie „Market development of climate-friendly technologies in heavy-duty road freight transport in Germany and Europe“ der NOW GmbH angenommen [3]. Es wird davon ausgegangen, dass ab dem Jahr 2035, ab dem u. a. nur noch klimaneutrale PKW neu zugelassen werden dürfen [8]. Äquivalent wurde daraus abgeleitet dass in den Szenarien schwere Nutzfahrzeuge ebenso ausschließlich mit klimaneutralen Antrieben zugelassen werden. Dabei werden sowohl batterieelektrische als

auch Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt. Im Gegensatz dazu wird in den Szenarien *AllElectric35* (*AE35*) und *AllElectric40* (*AE40*) ausschließlich auf batterieelektrische schwere Lkw und Sattelschlepper gesetzt. Die Transformationsgeschwindigkeit bzw. der Anteil klimaneutraler Neuzulassungen des Szenarios *AllElectric35* ist dabei identisch zu *HeavyMarket35*. In *AllElectric40* sind erst im Jahr 2040 alle neuzugelassenen schweren Nutzfahrzeuge batterieelektrisch, was u. a. auch in anderen Szenarioanalysen angenommen wird [9].

Zur Modellierung der Transformationspfade wird das FfE-Verkehrsmodell TraM verwendet, das z. B. auch in [10], [11] verwendet und detailliert beschrieben wird. TraM bildet den zukünftigen Endenergieverbrauch des Verkehrssektors nach Verkehrsträgern bzw. Fahrzeugklassen und Energieträgern ab. Somit kann auch die Transformation von Lkws mit zulässiger Gesamtmasse über 12 t und Sattelschleppern differenziert betrachtet werden kann. Der Bilanzrahmen umfasst dabei die Energieträger Benzin, Diesel, Gas, elektrische Energie und Wasserstoff. Der Straßenverkehr, der auch schwere Nutzfahrzeuge beinhaltet, wird dabei bottom-up über eine Neuzulassungs- und Außerbetriebsetzungslogik (Stock-and-Flow) abgebildet. Der Fahrzeugbestand nach Alter und Energieträger ist dabei die Ausgangsbasis (Stock). Durch die jährliche Neuzulassung von Fahrzeugen, für die je Szenario verschiedene Anteile der Antriebsarten vorgegeben werden können, und die Außerbetriebsetzung alter Fahrzeuge, ändert sich der Fahrzeugbestand über die Zeit bis ins Zieljahr der Modellierung (Flow). Die Verkehrsleistung der Neuzulassungen im Güterverkehr (inklusive schwere Nutzfahrzeuge) wird dabei basierend auf der zu erwartenden Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes (BIP) fortgeschrieben. Darüber hinaus kann auch ein Modal Shift auf die Schiene modelliert werden. Dies bedeutet, dass ein gewisser Anteil der Verkehrsleistung der Fahrzeuge wird auf die Schiene verlagert wird. Auf Basis des jährlich berechneten Fahrzeugbestandes ergibt sich in Kombination mit den spezifischen Verbräuchen, den jährlichen Fahrleistungen und Kapazitätsfaktoren die Verkehrsleistung bzw. der Endenergieverbrauch je Fahrzeugklasse und Energieträger.³

³ Teil des Bilanzrahmens der Modellierung sind Fahrzeuge der EU-Fahrzeugklasse N§ (für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen) sowie Sattelschlepper. Nicht betrachtet werden land-

und forstwirtschaftliche Zugmaschinen und sonstige Kfz (z. B. Feuerwehr-Einsatzwagen).

1.2 Datengrundlage

Der nachfolgende Abschnitt widmet sich der Datengrundlage und der Parametrierung der Szenarien, in denen die Transformation von 2019 bis zum Zieljahr der Klimaneutralität 2045 modelliert wird. Die für diesen Zeitraum angenommene Prognose des BIP, die zur grundlegenden Fortschreibung der Neuzulassungsanzahl dient, stammt aus [12]. In Tabelle 1 ist die Datengrundlage zur Modellierung der Entwicklung und der Charakteristik des Fahrzeugbestandes aufgeführt.

Tabelle 1: Datengrundlage der Modellierung des Schwerlastverkehrs

Kennwert	Quellen
Bestand nach Alter, Fahrzeugklasse und Energieträger	[13], [14], [15], [16], [17]
Neuzulassungen	[18]
Kapazitätsfaktor	[19]
Strecken	[20], [21]
Spezifische Verbräuche	[22], [23]

Für Elektrofahrzeuge werden die spezifischen Verbräuche aus [22] mit Ladeverlusten von 10 % beaufschlagt. Um die Verkehrsleistung konsistent mit der Neuzulassungs- und Außerbetriebsetzungslogik zu modellieren, werden innerhalb der Fahrzeugklassen über die Energieträger hinweg einheitliche Fahrleistungen angenommen. Die Überführung der Unterteilung des Bestandes von Nutzlast auf zulässige Gesamtmasse basiert auf [17]. Für eine realistischere

Darstellung der Austauschraten wird für die Neuzulassungsanzahl im Startjahr das zehnjährige Mittel von 2013 bis 2022 verwendet.

Abbildung 1 zeigt die Neuzulassungsanteile nach Energieträger. Diese ergeben sich aus Storylines der Szenarien, die zu Beginn des Kapitels eingeführt wurden. Für den Modal Shift von Lkw-Verkehr auf die Schiene wird angenommen, dass dieser dem Mittelwert aus den politischen Zielen der Eröffnungsbilanz und Abschätzungen der Nationalen Plattform Zukunft Mobilität entspricht [24], [25]. Es resultiert einer Verlagerung von ca. 4 % der Verkehrsleistung der neu zugelassenen Lkw pro Jahr auf die Schiene.

Das Modellergebnis des Fahrzeugbestandes nach Energieträger je Szenario ist in Abbildung 2 dargestellt. Durch die Fortschreibung der Neuzulassungsanzahl mit der BIP-Prognose steigt diese bis ins Zieljahr deutlich an. Maßnahmen, die diesem Effekt entgegenwirken, sind der zuvor beschriebene Modal Shift auf die Schiene sowie der Einbruch des BIP durch die Coronapandemie. In den Szenarien *AE35* und *HM35* verfügen im Jahr 2035 ca. 80 % der schweren Lkw und Sattelzüge über klimaneutrale Antriebe. Im Szenario *AE40*, dessen Transformationsgeschwindigkeit etwas langsamer ist, sind es ca. 75 %. Im Zieljahr der Klimaneutralität in Deutschland ist in beiden ambitionierten Szenarien der gesamte Bestand transformiert, wohingegen in *AE40* noch ca. 17 Tsd. fossile Fahrzeuge auf deutschen Straßen verkehren. Während in *AE35* und *AE40* nur elektrische Fahrzeuge zum Einsatz kommen, werden in *HM35* auch Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt, deren Bestand bis ins Jahr 2045 auf ca. 125 Tsd. Fahrzeuge anwächst.

Neuzulassungsanteile nach Energieträgern

In Deutschland | Im Segment schwere LKW (zGM > 12 t) und Sattelzüge

■ Diesel ■ El. Energie ■ Wasserstoff

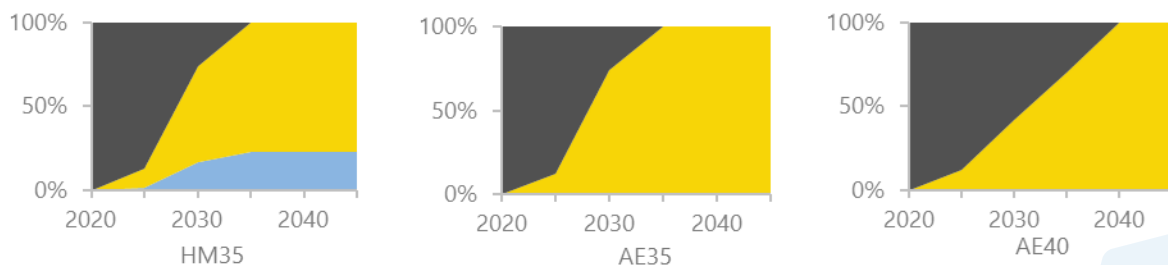


Abbildung 1: Neuzulassungsanteile nach Energieträger für schwere Nutzfahrzeuge je Szenario

Fahrzeugbestand nach Energieträgern

in Tsd. | DE | Im Segment schwere LKW(zGM > 12 t) und Sattelzüge

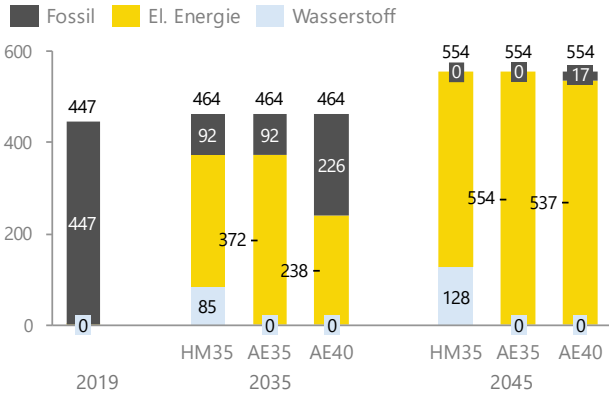


Abbildung 2: Fahrzeugbestand nach Energieträgern für schwere Nutzfahrzeuge je Szenario

Der aus dem Bestand resultierende Endenergieverbrauch ist in Abbildung 3 dargestellt. Durch die geringeren spezifischen Verbräuche von elektrischen Nutzfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen sowie durch technologischen Fortschritt geht der Endenergieverbrauch der schweren Nutzfahrzeuge trotz des deutlichen Wachstums des Bestandes szenarioabhängig um 37 bis 50 % zurück. Der Biomasseanteil entsteht durch die Beimischung von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen (z. B. E5/E10). Daher ist der Biomasseanteil nicht im Fahrzeugbestand erkennbar (Abbildung 2), aber im Endenergieverbrauch (Abbildung 3). Der Biomasseanteil wird dabei auf den heutigen Anteil an den flüssigen Kohlenwasserstoffen gedeckelt, um das Biomassepotenzial über alle Sektoren hinweg künftig einzuhalten.

Endenergieverbrauch nach Energieträgern

in TWh | DE | Im Segment schwere LKW (zGM > 12 t) und Sattelzüge

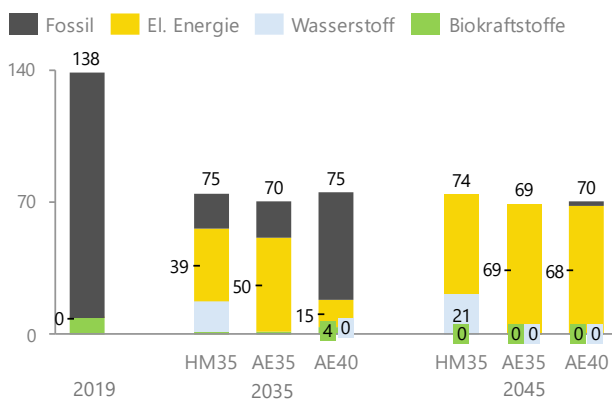


Abbildung 3: Endenergieverbrauch nach Energieträgern für schwere Nutzfahrzeuge je Szenario

1.3 Die Rolle von MCS in der Transformation

Zur Abschätzung der Rolle von MCS in der Transformation des Schwerlastverkehrs wird angenommen, dass MCS insbesondere dann relevant ist, wenn batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge während einer Fahrt, z. B. in der Lenkpause des Fahrers, zwischengeladen werden müssen, um das Fahrtziel der Transportaufgabe erreichen zu können. Dazu wurden zum einen Fahrweiten kumuliert nach Ankunftsdatum für Sattelschlepper entsprechend „Kraftfahrzeuge in Deutschland 2010 (KiD 2010)“ ausgewertet [26]. Dabei wurde auf Daten aus [27] zurückgegriffen. Da Sattelschlepper deutlich höhere Jahresfahrleistungen [20], aufweisen und somit besonders MCS-relevant sind, werden priorisiert die Fahrleistungen dieser analysiert. Das Ergebnis ist Abbildung 4 zu entnehmen. Das Histogramm verdeutlicht, dass die meisten Fahrweiten zwischen 200 km und 600 km liegen. Bei herkömmlichen Batteriegrößen und verpflichtenden Lenkpausen nach 4,5 Stunden sind insbesondere Strecken über 400 km für das Laden mittels MCS relevant. Über dieser Grenze liegt ca. der Hälfte der Fahrten.

Tagesfahrleistungen der Sattelzüge nach KiD 2010

Anzahl | Im Segment Sattelzüge

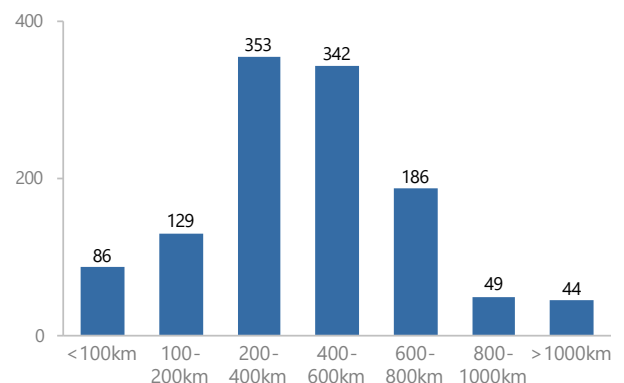


Abbildung 4: Tagesfahrleistungen (approximiert durch Fahrweiten kumuliert nach Ankunftsdatum) für Sattelzüge nach KiD 2010

Weiterführend wurde der Bestand aus Abbildung 2 mit Hilfe von Auswertungen aus [9] in tägliche Fahrweiten unter und über 400 km eingeteilt. Dabei wurde nach Sattelschleppern und Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 12 t unterschieden. Im Zuge der Auswertung wurde angenommen, dass sich das Verhältnis über den modellierten Zeitraum hinweg nicht ändert. Das Ergebnis ist Abbildung 5 zu entnehmen. Während ca. 47 % der Sattelschlepper tägliche Fahrweiten über 400 km aufweisen, sind es bei den Lkw mit zulässiger Masse über 12 t lediglich ca. 17%.

Bestand nach täglicher Fahrweite

Anzahl | DE | Im Segment schwere LKW (zGM > 12 t) und Sattelzüge

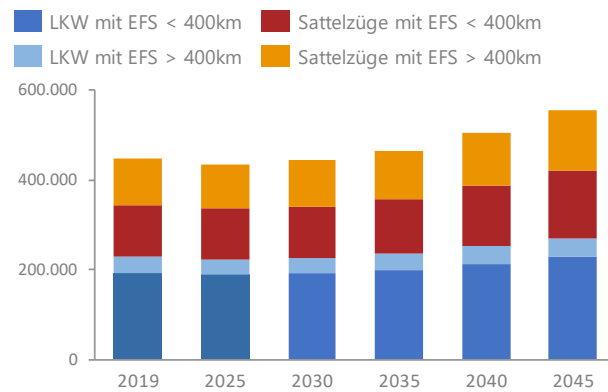


Abbildung 5: Bestand für schwere Nutzfahrzeuge nach Fahrweite (EFS = Einzelfahrtstrecke)

Der Stromverbrauch aus Abbildung 3 verteilt sich wie in Abbildung 6 dargestellt auf diese vier Kategorien. Der Großteil des Strombedarfs (ca. 85 %), entfällt im Zieljahr 2045 in allen Szenarien auf die Sattelschlepper, knapp über die Hälfte dabei auf Fahrzeuge mit täglichen Fahrweiten über 400 km.

Stromverbrauch des schweren Nutzlastverkehrs

in TWh | DE | Unterteilt nach Einzelfahrtstreckenlänge (EFS)

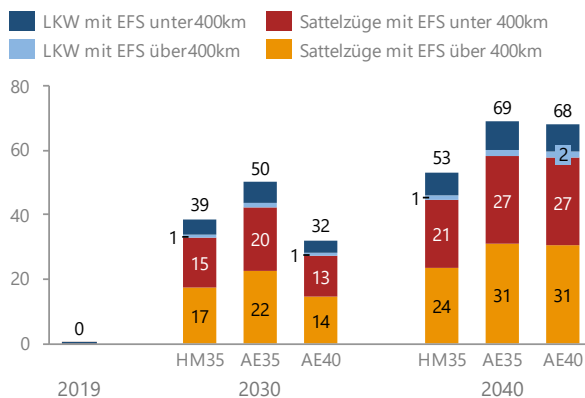


Abbildung 6: Stromverbrauch der schweren Nutzfahrzeuge nach täglichen Fahrweiten je Szenario

Bei den Lkw mit zulässiger Gesamtmasse über 12 t entfällt im Zieljahr lediglich ca. 17 % des Strombedarfes auf Fahrzeuge mit täglichen Fahrweiten über 400 km. Ursache für diese Unterschiede sind u. a. die höhere mittlere Jahresfahrleistung von Sattelschleppern. Im Jahr 2019 lag diese bei ca. 93.000 km, wohingegen sie für Lkw mit zulässiger Gesamtmasse über 7,5 t nur 38.000 km betrug [23]. Auch trägt der im Vergleich zu den Lkw mit zulässiger Gesamtmasse über 12 t um ca. 17 % höhere spezifische Verbrauch

⁴ In den Szenarien AllElectric35 und AllElectric40, in denen keine Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt werden, wird diese Annahme dabei auch auf die anderen Verkehrsträger bzw. Fahrzeugklassen

der batterieelektrischen Sattelschlepper zu deren höheren Strombedarf bei [22].

Unter der Annahme, dass elektrische Lkw und Sattelschlepper im Depot vollgeladen starten, muss voraussichtlich erst nach 400 km nachgeladen werden. Dieses Zwischenladen kann an öffentlichen MCS Ladestationen erfolgen. Auf Basis von Abbildung 4 wird vereinfacht angenommen, dass Fahrzeuge mit Fahrweiten über 400 km 50 % ihres Ladebedarfs an öffentlichen MCS Ladestationen abdecken müssen. Aus dieser Annahme ergibt sich für das Zieljahr 2045 ein Strombedarf an öffentlichen MCS Ladestationen von ca. 15 TWh. MCS Laden von Fahrzeugen mit geringeren Fahrtweiten und der Einsatz von MCS im Depot wurden bei dieser vereinfachten Betrachtung vernachlässigt.

1.4 Einordnung ins Energiesystem

In Deutschland hat der Verkehrssektor einen Anteil von 27 % am gesamten Endenergieverbrauch, wobei ein großer Anteil dabei auf die schweren Nutzfahrzeuge zurückzuführen ist [28]. Im Kontext der Transformation des gesamten Verkehrssektors steigt die Bedeutung der schweren Nutzfahrzeuge über die Jahre hinweg an, wobei für die anderen Verkehrsträger bzw. Fahrzeugklassen Transformationspfade entsprechend [29] angenommen werden.⁴ Der Endenergieverbrauch nach Verkehrsträger ist für das Szenario AE35 in Abbildung 7 dargestellt. Im Startjahr 2019 liegt der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge am Endenergieverbrauch mit ca. 22 % an zweiter Stelle hinter den PKW, deren Anteil bei ca. 59 % liegt. An dritter Stelle liegen Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse unter 12 t. Bis ins Zieljahr steigt der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge am Endenergieverbrauch auf ca. 31 %, wohingegen der Anteil der PKW auf 41 % zurück geht. Grund dafür sind die stärkeren Effizienzsteigerungen im PKW-Verkehr durch den Energieträgerwechsel, sowie die Fortschreibung der Lkw-Neuzulassungen über die steigende BIP-Prognose, wohingegen die Bevölkerungsprognose, die für den Personenverkehr verwendet wird, annähernd stagniert, woraus ein ebenso gleichbleibender Anteil an elektrischen Pkw resultiert.

übertragen. Somit werden in diesen Szenarien die Neuzulassungsanteile für Brennstoffzellenfahrzeuge nach [29] auf batterieelektrische Fahrzeuge übertragen.

Endenergieverbrauch nach Verkehrsträger

in TWh | Deutschland | Verkehrssektor | Szenario AE35

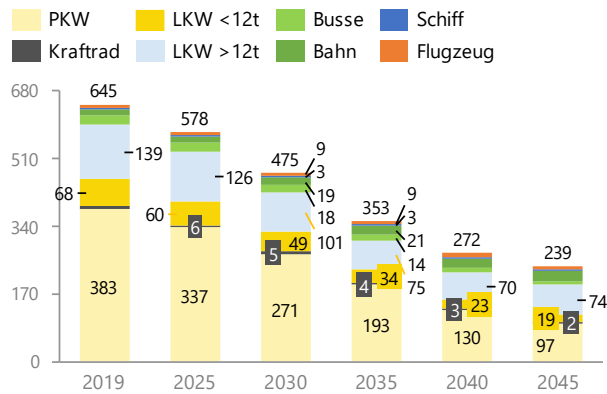


Abbildung 7: Endenergieverbrauch nach Verkehrsträger für den gesamten Verkehrssektor im Szenario AllElectric35

Die aus diesen Prognosen resultierende Stromnachfrage des Schwerlastverkehrs, die in Abbildung 3 und Abbildung 6 bereits thematisiert wurde, erreicht dabei bezogen auf die Stromnachfrage des gesamten Verkehrssektors, einen Anteil von ca. 30 %. Abbildung 8 verdeutlicht diese Stromnachfrage des gesamten Verkehrssektors nach Energieträger für das Szenario AE35.

Endenergieverbrauch nach Energieträgern

in TWh | DE | Verkehrssektor | Szenario AE35

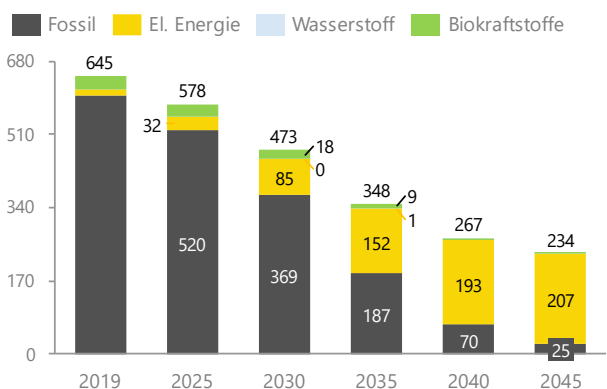


Abbildung 8: Endenergieverbrauch nach Energieträger für den gesamten Verkehrssektor im Szenario AllElectric35

Im modellierten Szenario resultiert aus Effizienzsteigerung im Verkehrssektor ein insgesamt deutlich verminderter Endenergieverbrauch mit einer eindeutigen Fokussierung auf dem Direktverbrauch elektrischer Energie.

Fazit

Um den Wandel hin zum klimaneutralen Energiesystem unter den in den Szenarien modellierten Rahmenbedingungen zu schaffen sind sowohl ein schneller Wechsel auf elektrische Antriebe als auch der Ausbau der EE-Anlagen notwendig. Die Analysen verdeutlichen, dass der Subsektor schwerer Nutzfahrzeuge im Verkehrssektor ein enormes Potenzial zur Einsparung von CO₂-Emissionen aufweist. Auch wird deutlich, dass im Kontext elektrischer Nutzfahrzeuge sowohl das Laden im Depot als auch das öffentliche MCS-Laden relevant sein werden, da ein großer Teil der Nutzfahrzeuge ihren Ladebedarf nicht ausschließlich an einer der beiden Standorte decken kann (vgl. Anteil an Fahrzeugen mit >400 km täglicher Fahrleistung in Abbildung 4).

Die Auswirkungen von drei verschiedenen Transformationspfaden des Schwerlastverkehrs auf den Endenergieverbrauch wurden mit Hilfe eines Sektormodells analysiert. Alle drei Szenarien verdeutlichen dabei die Bedeutung einer direkten Elektrifizierung. Grundsätzlich ist dabei zu berücksichtigen, dass auch diese Modellierung Limitationen aufweist. Genauere Fahrt-Daten inkl. der Berücksichtigung von Einzel-fahrt-Distanzen, -Dauern und Standzeiten können die Pfade noch deutlich verändern. Da die Modellierung aus Perspektive der Fahrzeuge respektive Mobilitätsbedarfe erfolgt, stellt die Verfügbarkeit der entsprechend notwendigen Ladeinfrastruktur den größten Stellhebel für etwaige Anpassungen in der Modellierung dar.

Die Verfügbarkeit des Megawattladens hat beim Erreichen der Hochlaufziele und damit der Transformation des Schwerlastverkehrs einen signifikanten Einfluss. Ladezeiten unter 45 min ermöglichen die Aufrechterhaltung bestehender Logistikabläufe und Transportleistungen. Die Technologie stellt einen Enabler dar, welcher eine vollständige Elektrifizierung der schweren LKW und Sattelschlepper ermöglichen könnte, wodurch die Alternative in Form von Brennstoffzellen-Antriebe aus diesem Subsektor verdrängt werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] KBA: Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2020 ggü. dem 1. Januar 2019. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.
- [2] Klimaschutzgesetz 2021. In: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>. (Abruf am 2021-08-05); Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2021.
- [3] Market development of climate-friendly technologies in heavy-duty road freight transport in Germany and Europe - Evaluation of the 2022 Cleanroom Talks with truck manufacturers. Berlin: NOW GmbH, 2023.
- [4] Verordnung 2019/1242 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge (Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge). Ausgefertigt am 2024-04-26; Brüssel: Europäische Union, 2024.
- [5] Basma, Hussein: A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. Berlin: International Council on Clean Transportation (ICCT), 2023.
- [6] Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnungen (EWG) Nr. 3821/85 und (EG) Nr. 2135/98 des Rates sowie zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates. Brüssel: Europäisches Parlament und Rat, 2006.
- [7] Blume, Yannic et al.: Einfluss des Hochlaufs batterieelektrischer Nutzfahrzeuge auf die Verteilnetzplanung - FfE Discussion Paper 2023-01. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2023.
- [8] REGULATION (EU) 2023/851 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition (REGULATION (EU) 2023/851). Ausgefertigt am 2023-04-19, Version vom 2023-02-14; Brüssel: Europäische Union, 2023.
- [9] Göckeler, Katharina: StartES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Freiburg: Öko-Instut e.V., 2023.
- [10] Kigle, Stephan: Bayernplan Energie 2040 - Wege zur Treibhausgasneutralität - Abschlussbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2023.
- [11] Engwerth, Veronika: Modeling Transformation Pathways of European Final Energy Consumption in the Transport and Buildings Sector Using Country Clustering. In: Energy Technology 2024, 2300951. Weinheim: Wiley-VCH GmbH, 2024.
- [12] Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2021.
- [13] Fahrzeugzulassungen Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen - 1.Januar 2020; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.
- [14] Fahrzeugzulassungen Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen - 1.Januar 2020; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.
- [15] Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter - 1.Januar 2020; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.
- [16] Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2020; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.
- [17] Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) - 1.Januar 2020; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.
- [18] Fahrzeugzulassungen (FZ) - Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) - Jahr 2022; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2023.

- [19] Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr - Mittelfristprognose Winter 2020/21. München/Köln: INTRAPLAN Consult GmbH, 2021.
- [20] Verkehr in Kilometern (VK) Zeitreihe Jahre 2014-2020; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2021.
- [21] Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change (TRACCS); Thessaloniki: EMISIA SA, 2013.
- [22] Pichlmaier, Simon: Ecological Assessment of Scenarios for the Energy Supply of the German Transport Sector. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München (TUM): München, 2022.
- [23] Verkehr in Zahlen 2020/2021 - 49. Jahrgang; Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2020.
- [24] Eröffnungsbilanz Klimaschutz. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022.
- [25] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1 "Klimaschutz im Verkehr": AG1-Bericht - Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2021.
- [26] Wermuth, Manfred: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010) - Schlussbericht. Braunschweig: Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, 2012
- [27] Fattler, Steffen: Economic and Environmental Assessment of Electric Vehicle Charging Strategies. Dissertation. Herausgegeben durch die TU München, geprüft von Wagner, Ulrich & Wietschel, Martin: München, 2021.
- [28] Dossow, Patrick et al.: Application-oriented energy and emission balances for Europe. München: FfE, 2021.
- [29] Engwerth, Veronika: Modeling Transformation Pathways of European Final Energy Consumption in the Transport and Buildings Sector Using Country Clustering. In: Energy Technology 2024, 2300951. Weinheim: Wiley-VCH GmbH, 2024.

