



My eRoads – Der Weg zu einem klimaneutralen Lkw-Verkehr

Autor:innen:

- Julius Jöhrens, Michel Allekotte, Florian Heining,
Hinrich Helms, Jascha Klimke, Julia Pelzeter, Dominik Räder



Erneuerbar
mobil

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Take-aways	4
Die Herausforderung	6
Treiber der Antriebswende: Vollkosten	10
Treiber der Antriebswende:Treibhausgasbilanz	13
Herausforderungen der Antriebswende: Fahrzeugverfügbarkeit	16
Herausforderungen der Antriebswende: Infrastruktur	18
Flottenentwicklung bei ambitioniertem Infrastrukturausbau	20
Einsatzgebiete der verfügbaren Antriebstechnologien	23
Der Infrastrukturausbau und seine Kosten	26
Treibhausgasminderungen durch die Elektrifizierung der Lkw-Flotte	30
Wichtige Annahmen	33
Literaturverzeichnis	34





- Eine rasche Antriebswende bei Lkw ist zentral für mittelfristige THG-Reduktionen im Straßengüterverkehr und der einzige Weg zur Erreichung der langfristigen THG-Neutralität. Es fehlen dafür aktuell aber sowohl regulatorische Anreize als auch technologische Pfadentscheidungen.
- Unter aktuellen Bedingungen sind elektrische Lkw noch auf staatliche Förderung angewiesen. Die Skalierung der Fahrzeugproduktion lässt für die kommenden Jahre aber erheblich sinkende Fahrzeugpreise erwarten, während der künftig fällige CO₂-Aufschlag bei der Maut den Betrieb von Diesel-Lkw verteuern wird. Ab etwa 2030 wird die Nutzung von Strom im Lkw daher auch ohne Förderung signifikant günstiger sein als die von Diesel.
- Brennstoffzellen-Lkw werden mittelfristig auch bei niedrigen H₂-Preisen voraussichtlich im Betrieb wesentlich teurer sein und nur dort eingesetzt werden, wo sie erhebliche betriebliche Vorteile versprechen. Im Vergleich zu Strom- und Dieselpreisen sind künftige H₂-Bezugskosten zudem tendenziell noch unsicherer (Aufbau neuer Märkte, hohe Unsicherheiten sowohl auf Angebots- als auch Nachfrageseite).
- Während für E-Lkw im Nah- und Regionalverkehr in der Regel betriebliche Ladeinfrastruktur ausreichen dürfte, ist öffentliche Ladeinfrastruktur eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von E-Lkw im Fernverkehr. Für sämtliche Lkw-Ladeinfrastrukturen sind in der Regel erhebliche Netzanschlusskapazitäten notwendig, deren Erweiterung mit Vorlaufzeiten verbunden ist. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, um die Antriebswende nicht auszubremsen.
- Die Marktdiffusion von E-Lkw wird spätestens ab 2030 voraussichtlich nicht mehr durch deren Wirtschaftlichkeit, sondern durch die Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur begrenzt sein.
- Unabhängig davon ist das Tempo der Antriebswende durch die Geschwindigkeit der Flottenerneuerung begrenzt. Im Ergebnis sind um 2030 über alle Größenklassen nur gut 10 % elektrische Lkw in der Flotte zu erwarten, bis 2035 könnte der Anteil auf etwa 50 % ansteigen.

- Oberleitungen auf stark befahrenen Korridoren können den Zwischenladebedarf an öffentlicher Schnellladeinfrastruktur dort erheblich senken und somit das Risiko verringern, dass die Flottendiffusion von Batterie-Lkw aufgrund von Skalierungsproblemen der Schnellladeinfrastruktur gebremst wird.
- Für Aufbau und Betrieb der Infrastruktur für Batterie-Lkw in Deutschland ist langfristig mit annuierten Kosten von ca. 1 Mrd. Euro jährlich zu rechnen, die sich etwa hälftig auf öffentliche stationäre Ladeinfrastruktur und Oberleitungsinfrastruktur aufteilen. Oberleitungen benötigen dabei aufgrund von Netzwerkeffekten eine höhere Vorfinanzierung, während die Kosten bei steigender Nutzerzahl nur noch geringfügig steigen.
- Die mit dem Oberleitungsausbau verbundenen Infrastrukturkosten liegen pro abgegebener elektrischer Kilowattstunde etwa dreimal so hoch wie diejenigen für Schnellladeinfrastruktur. Bei einer vollständigen Weitergabe an die Nutzer stünde die betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der Oberleitungstechnologie in Frage. Bei der Entscheidung über einen künftigen Ausbau von Oberleitungsinfrastruktur sollten jedoch auch weitere Aspekte, insbesondere praktische Hürden des Aufbaus und der Nutzung der Schnellladeinfrastruktur berücksichtigt werden.
- Während die THG-Emissionen des innerdeutschen Straßengüterverkehrs durch die Antriebswende langfristig (2045) über den gesamten Lebensweg der Fahrzeuge um ca. 80 % gemindert werden können, ist mittelfristig (2030) aufgrund der begrenzten Geschwindigkeit der Antriebswende lediglich eine Minderung von 10 % möglich (20 % in den Bilanzgrenzen des Verkehrssektors).
- Eine Minderung der THG-Emissionen um 43 % gegenüber dem heutigen Stand bis 2030, wie sie das Klimaschutzgesetz für den gesamten Verkehrssektor vorschreibt, kann durch den Straßengüterverkehr somit anteilig nur durch zusätzliche Maßnahmen der Verlagerung und Vermeidung von Lkw-Verkehr erreicht werden.



Etwa ein Drittel der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) des deutschen Verkehrssektors geht derzeit auf den Straßen-güterverkehr zurück. Er kommt damit auf einen Anteil von 6,7 % an den gesamten deutschen THG-Emissionen. Dem nach verfassungsrechtlicher Aufforderung nachgeschärftem Klimaschutzgesetz zufolge müssen die THG-Emissionen des Verkehrs bis zum Jahr 2030 auf 85 Mio. t CO₂-Äq. und bis zum Jahr 2045 auf null absinken. Dies ist aktuellen Untersuchungen zufolge nur durch breiten Einsatz erneuerbaren Stroms im Straßenverkehr möglich (Krail et al. 2021; Prognos AG et al. 2021), der eine rasche und massive Antriebswende sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr notwendig macht. Gleichzeitig sind tiefgreifende Maßnahmen zur Verlagerung und Vermeidung von Straßenverkehr erforderlich. Insbesondere für substantielle Verkehrsverlagerungen auf die Schiene ist aber eine Vielzahl komplexer und langwieriger Infrastrukturmaßnahmen notwendig und das gesamte Verlagerungspotenzial ist begrenzt (Nobis et al. 2016). Die Antriebswende muss daher voraussichtlich den Großteil der THG-Minderungen im Straßengüterverkehr erbringen.

Die Bundesregierung hat sich dementsprechend bereits zum Ziel gesetzt, dass in 2030 ein Drittel der Lkw-Fahrleistung elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe abgewickelt wird (Bundesregierung 2019). Wirksame Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels gibt es aber bisher nicht. Während die bisher gültigen CO₂-Zielwerte (Abgasemissionen im Flottendurchschnitt der Hersteller) für Lkw nur einen geringen Anreiz für die Einführung elektrischer Antriebe setzen, ist in der aktuell verhandelten Novelle eine Emissionsminderung von 45 % bis zum Jahr 2030 vorgesehen. Aufgrund weiterer Effizienzpotentiale bei Diesel-Lkw entspricht diese auf den Flottendurchschnitt bezogene Emissionsminderung nur einem Neuzulassungsanteil von E-Lkw von maximal etwa einem Drittel – entsprechend also einem weitaus geringeren E-Lkw-Bestand. Da auch strombasierte Kraftstoffe voraussichtlich knapp bleiben werden, stellt sich die Frage, auf welchem Wege ein deutlich schnellerer Markthochlauf elektrischer Antriebe erreicht werden kann.

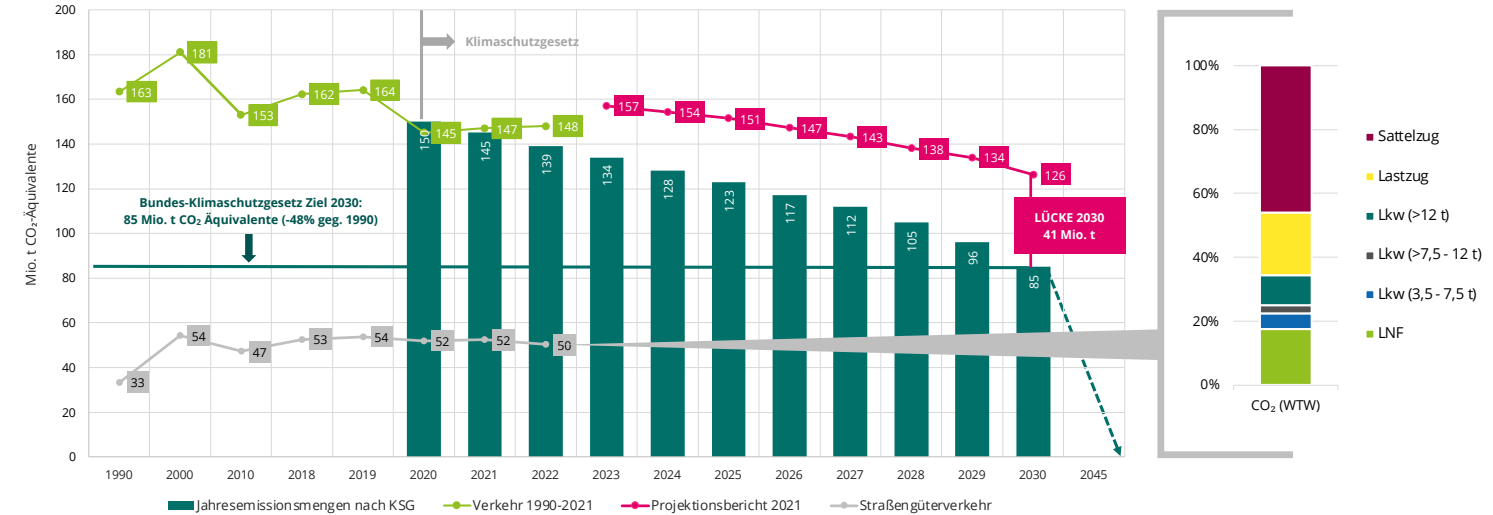


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen des deutschen Verkehrssektors – Realentwicklung, Vorgaben des Klimaschutzgesetzes und Aufteilung der Emissionen im Güterverkehr auf die Fahrzeugklassen. Eigene Abbildung nach (UBA 2022) und (TREMODO 2022).

Im Vorhaben „My eRoads“ haben wir gemeinsam mit den Projektpartnern PTV Transport Consult, Fraunhofer SCS und IKEM untersucht, welchen Beitrag die Einführung elektrischer Antriebe im Straßengüterverkehr kurz-, mittel- und langfristig

schiedene Einsatzprofile im innerdeutschen Lkw-Verkehr vergleichen (Jöhrens et al. 2022). Daraus ergeben sich mögliche Entwicklungen der Lkw-Flotte im Zeitraum bis zum Jahr 2045 und entsprechend der Bedarf an Energieversorgungsinfrastruktur.

„Die Antriebswende im Lkw-Verkehr ist zentral für mittelfristige THG-Reduktionen.“

Während weitgehend unstrittig ist, dass stationäre Ladeinfrastruktur für viele Anwendungen eine herausragende Rolle spielen wird (BMDV 2022), wird der Einsatz von H₂-Brennstoffzellen-Lkw und das dynamische Laden elektrischer Lkw über Oberleitungen kontrovers diskutiert. Die Ergebnisse von My eRoads geben für die hier anstehenden Pfadentscheidungen wichtige Hinweise.

zur THG-Reduktion leisten kann, welche Rahmenbedingungen und welche Infrastrukturen dafür notwendig sind. Auf Basis des deutschlandweiten Verkehrsmodells PTV Validate konnten wir die Vollkosten für verschiedene Antriebsoptionen für ver-

schiedene Einsatzprofile im innerdeutschen Lkw-Verkehr vergleichen (Jöhrens et al. 2022). Daraus ergeben sich mögliche Entwicklungen der Lkw-Flotte im Zeitraum bis zum Jahr 2045 und entsprechend der Bedarf an Energieversorgungsinfrastruktur.

Kernfragen von My eRoads:

- Welcher TechnologiemiX ist für klimafreundlichen Lkw-Verkehr betrieblich und wirtschaftlich sinnvoll?
- Welcher Infrastrukturausbau ist dafür zu welchem Zeitpunkt notwendig?
- Welche Infrastrukturkosten sind zu erwarten und wie relevant sind sie?



Betrachtete Antriebskonfigurationen von Lkw ($\geq 3,5$ t)

- Diesel-Lkw: Die fossile Referenz mit einer angenommenen Effizienzsteigerung der Neufahrzeuge von 2 % p.a. bis 2030 (1 % p.a. nach 2030)
- Batterieelektrische Lkw (battery-electric vehicles – BEV): Stationär geladene Elektro-Lkw mit Reichweiten zwischen 100 km (BEV100) und 600 km (BEV600). Sie laden hauptsächlich im Depot¹ und nehmen abhängig vom Einsatzprofil zusätzlich öffentliche Ladeinfrastruktur in Anspruch.
- Brennstoffzellen-Lkw (fuelcell electric vehicles – FCEV): H₂-betriebene Lkw mit einer Brennstoffzelle und einer Pufferbatterie, die ausschließlich an öffentlichen Tankstellen H₂ tanken.
- Vollelektrische Oberleitungs-Lkw (O-BEV): Mit Stromabnehmern ausgestattete Batterie-Lkw, die neben stationärer Ladung im Depot auch aus der Oberleitung Energie² aufnehmen können. Ihre Reichweite im Batteriebetrieb variiert zwischen 50 km (O-BEV50) und 300 km (O-BEV300).
- Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-HEV): Diesel-Hybrid-Fahrzeuge, die unter Oberleitung und in deren unmittelbarem Umfeld elektrisch fahren können, ansonsten aber einen Dieselantrieb nutzen.

1 Lkw ≤ 12 t laden ausschließlich im Depot. Lkw 12–26 t: beziehen langfristig im Durchschnitt ca. 95 %, > 26 t ca. 75 % der Energie aus dem eigenen Depot

2 Oberleitungs-Lkw entnehmen im Durchschnitt 2030 ca. 75 % der Energie aus der Oberleitung, 2045 sind es zwischen 60 % für Lkw ≤ 26 t und 70 % für Lkw > 26 t

"Für die Antriebswende im Lkw-Fernverkehr fehlen aktuell sowohl die regulatorischen Anreize als auch technologische Pfadentscheidungen."





Die Vollkosten (TCO) des Lkw-Betriebs umfassen alle Kostenpunkte, die sich für den Betreiber des Fahrzeugs aus dem Betrieb ergeben. Sie umfassen die Finanzierungskosten des Fahrzeugs selbst, die Energiekosten, Mautgebühren sowie eine Reihe kleinerer Kostenkomponenten, die vom Einsatz des Fahrzeugs abhängen (insbesondere Wartung, zusammengefasst als „variable Kosten“) oder davon unabhängig anfallen (Steuern, Unterstellung des Fahrzeugs, ... zusammengefasst als „Fixkosten“). Angesichts allgemein geringer Gewinnmargen in der Logistik spielen die Vollkosten für Kaufentscheidungen von Lkw-Betreibern neben der technischen Zuverlässigkeit der

Fahrzeuge in der Regel eine zentrale Rolle (Göckeler und Hacker 2022).

Aufgrund ihrer hohen Effizienz haben Elektro-Lkw zumeist deutlich geringere Energiekosten. Ihre Anschaffungspreise betragen heutzutage in der Regel jedoch noch ein Mehrfaches derer von Diesel-Lkw (ca. 2- bis 4-faches bei BEV, bei FCEV noch mehr³). Die höheren Anschaffungskosten werden aktuell zu 80 % durch das KsNI-Förderprogramm abgedeckt, zudem sind sie bis auf weiteres von der Lkw-Maut befreit. Damit erreichen Elektro-Lkw bereits heutzutage in vielen Fällen einen Vollkostenvorteil.

³ Übersicht über modellierte Anschaffungspreise von E-Lkw im [My eRoads-Onlinetool](#)

2

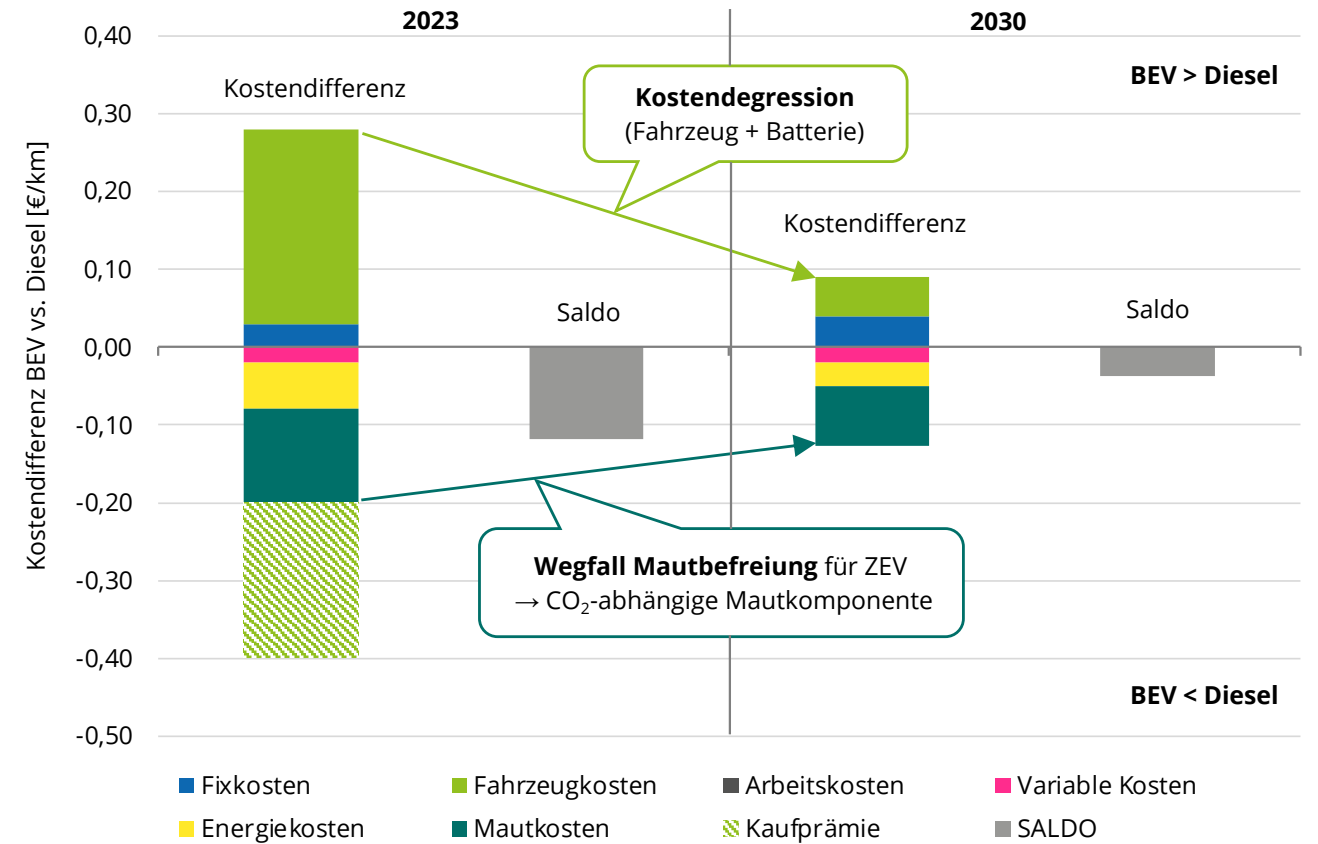


Abbildung 2: Beispielrechnung für die Kostenstruktur einer Sattelzugmaschine im Fernverkehr (Jahresfahrleistung: 105.000 km) mit batterieelektrischem Antrieb (540 kWh) und Dieselantrieb, heute und 2030.

In den kommenden Jahren ist durch die Skalierung der E-Lkw-Produktion mit erheblich sinkenden Fahrzeugpreisen zu rechnen, die in „My eRoads“ auf Grundlage einer breiten Literaturrecherche abgeschätzt wurden (Jöhrens et al. 2022). Zudem hat die Bundesregierung beschlossen, gemäß der novellierten Eurovignettenrichtlinie einen CO₂-basierten Aufschlag auf die Lkw-Maut

"In 2030 wird die Nutzung von Strom im Lkw auch ohne Förderung signifikant günstiger sein als die von Diesel."

zu erheben. Diese beiden Effekte führen bei gegenüber dem heutigen Stand gleichbleibenden Energiepreisen dazu, dass Elektro-Lkw im Jahr 2030 voraussichtlich auch ohne Förderung in der Regel einen Vollkostenvorteil haben werden.

Ein Vergleich der erwarteten Vollkosten verschiedener Lkw-Antriebstechnologien im Jahr 2030 für typische Einsatzprofile gibt wichtige Hinweise auf ein mittelfristig kosteneffizientes Antriebsangebot (Abbildung 3). Wir betrachten hier die Gesamtheit aller Fahrten von Lkw > 26 t zGG, die für die jeweilige Antriebstechnologie technisch in Frage kommen (das Einsatzgebiet von O-BEV ist entsprechend der Infrastrukturannahmen für 2030 limitiert, siehe [Abschnitt 5](#)). Für die Energiekosten wurde das Preisniveau „Referenz“ zugrunde gelegt (alle Kostenannahmen siehe Anhang). Der angenommene Wasserstoffpreis von 6 €/kg bezieht sich auf Import-Wasserstoff, wobei der Großhandelspreis etwa die Hälfte davon ausmacht. Dieser stellt somit auch langfristig betrachtet eine eher optimistische Größenordnung dar (Wietschel et al. 2023).



3

Beim Klimaschutz drängt die Zeit. Schon in dieser Dekade müssen wir THG-Emissionen in allen Sektoren massiv senken (siehe Abschnitt 1). Es ist daher von großer Bedeutung, welche THG-Minderungen die in den kommenden Jahren zugelassenen Lkw mit alternativem Antrieb gegenüber Diesel-Lkw erreichen können. Aufschluss darüber gibt ein ökobilanzieller Vergleich von Lkw mit unterschiedlichen Antriebstechnologien, der neben den direkten Emissionen auch solche durch die Energiebereitstellung sowie die Herstellung und Entsorgung von Fahrzeugen und Infrastruktur einbezieht⁴.

⁴ Das deutsche Klimaschutzgesetz bezieht sich lediglich auf Emissionen aus deutschem Territorium. Emissionen aus Energiebereitstellung und Fahrzeugherstellung können teilweise im Ausland anfallen und sind somit nicht vollständig vom deutschen Treibhausgasinventar erfasst. Nichtsdestotrotz sind auch diese Emissionen wichtig, da Klimaschutz eine globale Aufgabe ist.

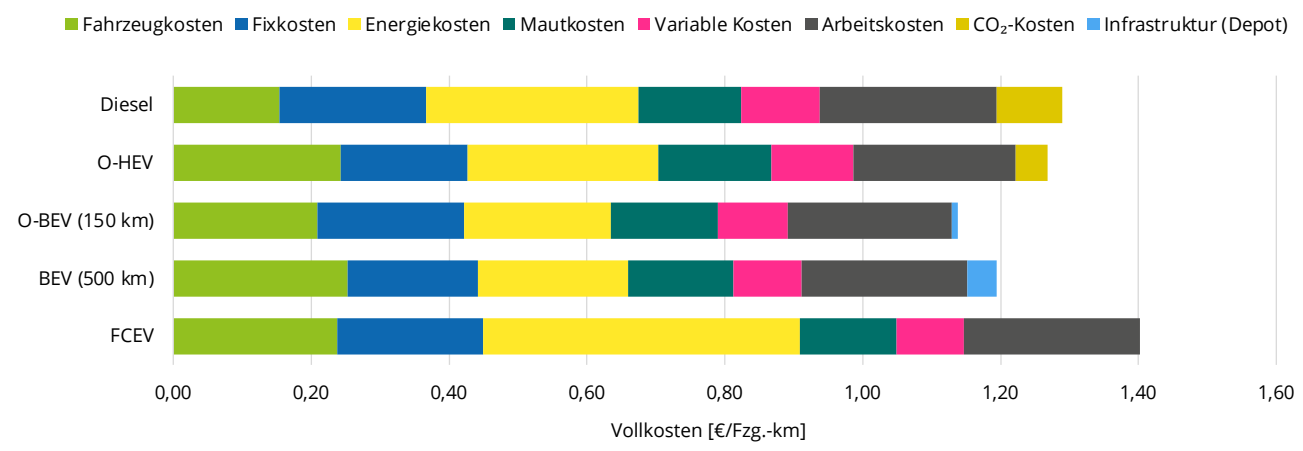


Abbildung 3: Vollkosten von Sattelzugmaschinen im deutschen Fernverkehr, Bezugsjahr 2030, keine Kaufprämien und keine Mautbefreiung für E-Lkw. Die zugrunde liegenden Kostenannahmen sind im Anhang dokumentiert.

Lkw, die direkt Strom aus dem Netz nutzen können, werden demnach um etwa 7-12 % geringere Vollkosten aufweisen als Diesel-Lkw. Vollelektrische Oberleitungs-Lkw sind dabei am kostengünstigsten, da sie die effiziente Stromnutzung mit einer vergleichsweise kleinen Traktionsbatterie erreichen. Brennstoffzellen-Lkw haben dagegen auch 2030 noch ca. 9 % höhere Vollkosten als Dieselfahrzeuge, auch bei den relativ optimistischen Annahmen zum Preis für importiertes H₂.

"Brennstoffzellen-Lkw werden voraussichtlich auch bei niedrigen H₂-Preisen ohne Förderung mittelfristig nicht konkurrenzfähig sein."

Die voraussichtliche mittelfristige Vollkostenbilanz dürfte somit als Treiber für die Umstellung der Lkw-Flotte auf direktelektrische Antriebe wirken. Zu beachten ist die zentrale Rolle der Energiepreise in der Kostenbilanz. Änderungen im Verhältnis zwischen Diesel- und Strompreis, sei es durch

die Entwicklung der Energiemärkte oder durch regulatorisch oder fiskalisch bedingte Anpassungen an staatlich bestimmten Preisbestandteilen, haben unmittelbare Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Technologien. Zudem sind die Infrastrukturkosten hier nicht berücksichtigt, die eine systemische Betrachtung erfordern (siehe Abschnitt 8).

Technisch gesehen ist es denkbar, Diesel-Lkw zukünftig ganz oder teilweise mit strombasiertem Dieselkraftstoff (sogenanntem „eFuel“) zu betreiben. Die CO₂-Vermeidungskosten solcher Kraftstoffe werden für den Fall einer großmaßstäbigen Produktion derzeit im Bereich von 1000 €/t abgeschätzt (Ueckerdt und Odenweller 2023). Dies liegt erheblich über den hier angenommenen CO₂-Kosten von Diesel (200 €/t). Der Einsatz von eFuel für Diesel-Lkw würde somit zu einer drastischen Erhöhung der Vollkosten von Diesel-Lkw führen, die damit weiter an Konkurrenzfähigkeit mit batterieelektrischen Antrieben verlieren würden. Er wird in diesem Papier nicht näher betrachtet.

Wie schon bei der vorangegangenen Kostenbilanz betrachten wir hier als Bezugsjahr 2030, da den Herstellerankündigungen zufolge in diesem Zeithorizont ein signifikanter Elektroanteil an den Lkw-Neuzulassungen zu erwarten ist und die THG-Bilanz somit faktische Relevanz hat. Die Datenbasis hierfür ist in (Helms et al. 2022) doku-

"Die Klimawirkung eines Batterie-Lkw wird in 2030 nur etwa halb so hoch sein wie beim Diesel-Lkw."

mentiert, wobei gemäß (Prognos AG et al. 2021) ein gleitender Strommix ab 2030 über die Lebensdauer mit einem Anteil erneuerbaren Stroms von 72 % im Jahr 2030 unterstellt wurde. Dies liegt etwas unterhalb des Ziels der Bundesregierung von 80 % für 2030, kann aber angesichts der großen Herausforderung beim Ausbau erneuerbarer Energieerzeugung dennoch als ambitioniert gelten (2022: 46 % EE-Strom). Die Art der zukünftigen Wasserstoffbereitstellung für internationale Märkte, insbesondere der mittelfristige Anteil vollständig EE-basierten „grünen“ Wasserstoffs, ist derzeit nicht sicher abzusehen. Für die THG-Emissionen von Brennstoffzellen-Lkw wird daher eine Bandbreite angenommen: Im günstigsten Fall handelt es sich um vollständig grünen Wasserstoff⁵, im ungünstigen Fall wird der Wasserstoff elektrolytisch unter Zugrundelegung des deutschen Strommixes hergestellt (gepunkteter Bereich des Balkens in Abbildung 4). Die Infrastruktur der Energieübertragung (also Oberleitungen, Ladestationen und H₂-Tankstellen) spielen bei größeren Nutzer-

flotten kaum eine Rolle in der Klimabilanz (siehe auch Helms et al. 2022).

Im Bilanzraum des Verkehrssektors (Tank to wheel) zählen nur die Auspuffemissionen – alle rein elektrischen Antriebstechnologien werden dort mit null angerechnet, vermeiden die Emissionen also vollständig. Doch auch unter Einbezug von Strombereitstellung und Fahrzeugherstellung (siehe Abbildung 3) haben batterieelektrische Sattelzüge (40 t zGG) nur etwa halb so hohe THG-Emissionen wie das Diesel-Pendant. O-HEV können nur unter oder in der Nähe einer Oberleitung elektrisch fahren, so dass sie in üblichen Einsatzprofilen voraussichtlich weiterhin einen relevanten Dieselverbrauch haben werden und somit in der THG-Bilanz etwas höher liegen. Bei O-BEV sind die Herstellungsemissionen aufgrund der kleineren Batterie dagegen geringer, so dass die THG-Bilanz sogar noch etwas besser ist als bei reinen BEV.

Der Betrieb von Brennstoffzellen-Lkw zieht durch die Umwandlungsverluste bei der Elektrolyse (ca. 30 %) sowie bei der Rückverstromung des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle (ca. 45 %) einen weitaus höheren Strombedarf pro km und somit auch höhere Treibhausgasemissionen nach sich. Wird Wasserstoff mit dem erwarteten Strommix des Jahres 2030 in Deutschland produziert, ist die THG-Bilanz des Brennstoffzellen-Lkw damit nur geringfügig positiver als die des Diesel-Lkw und vergleichbar mit einer H₂-Produktion über Erdgasdampfreformierung (Helms et al. 2022). Der Brennstoffzellenantrieb kann somit mittelfristig in einer Lebenswegbetrachtung nur dann signifikante THG-Reduktionen bei Lkw bewirken, wenn gleichzeitig signifikante erneuerbare Importe zu attraktiven Marktpreisen angeboten werden.

⁵ Hier unter Annahme einer Produktion in der MENA-Region und Transport per Pipeline nach Europa

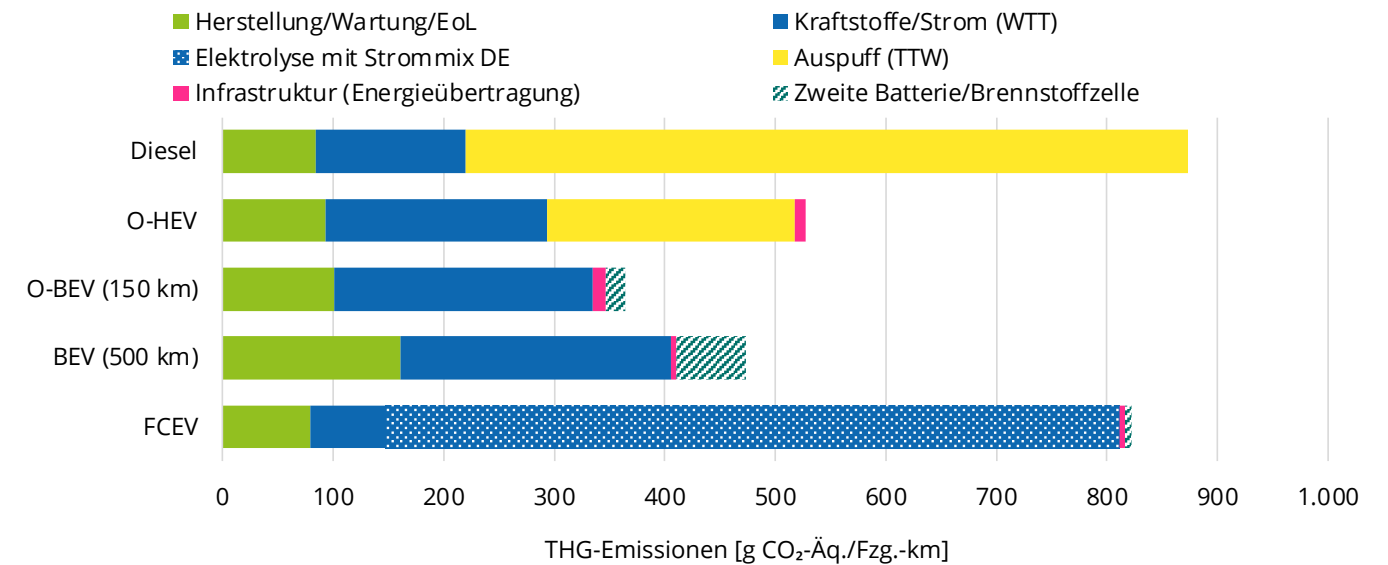


Abbildung 4: Treibhausgasemissionen (g CO₂/Fzg.-km) von Sattelzugmaschinen im deutschen Fernverkehr, Baujahr 2030 (Umlegung der Herstellungsemissionen auf die erwartete Lebensdauer). Datenbasis: (Helms et al. 2022)⁶

Ob entsprechende Erzeugungskapazitäten und Transportmöglichkeiten bis 2030 aufgebaut werden können, ist jedoch fraglich. Zudem muss sichergestellt werden, dass neben dem wirtschaftlich und technisch anspruchsvollen Technologiehochlauf auch Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich politischer, sozialer und ökologischer Anforderungen eingehalten werden. Hierzu sollte insbesondere das Potenzial zur heimischen Nutzung des erneuerbaren Stroms in den Herkunftsländern bereits genutzt werden, bevor der Strom unter Energieverlusten zu Wasserstoff umgewandelt und exportiert wird.

⁶ Die Reichweite des O-BEV und BEV wurde an die Kostenbilanz in Abbildung 2 angepasst.



HERAUSFORDERUNGEN DER ANTRIEBS- WENDE: FAHRZEUGVERFÜGBARKEIT

Während Elektrofahrzeuge im Pkw-Bereich in Deutschland bereits seit einigen Jahren in Großserie verfügbar sind und relevante Anteile an den Neuzulassungen haben (26 % BEV- und PHEV-Pkw im Jahr 2021), gab es bei Lkw in Deutschland bisher lediglich Prototypen oder Kleinserien⁷. Beginnend mit den unteren Nutzfahrzeugsegmenten beginnt sich das nun zu ändern: Bei den Fahrzeugen im Bereich 3,5-7,5 t zGG erreichten batterieelektrische Fahrzeuge mit 7 % im Jahr 2022 bereits einen relevanten Anteil an den Neuzulassungen. Batteriefahrzeuge dieser Größenklasse benötigen nur vergleichsweise geringe Reichweiten und sind damit kostenseitig gegenüber Dieselfahrzeugen konkurrenzfähiger als größere elektrische Lkw. Zudem werden sie häufig in städtischen Gebieten eingesetzt und können den Vorteil ihres dort besonders effizienten Antriebs gut ausspielen.

Bei den größeren Fahrzeugklassen sind bisher lediglich Elektro-Anteile im Promillebereich zu verzeichnen.

Offiziellen Ankündigungen der Lkw-Hersteller zufolge, die im Rahmen sogenannter Cleanroomgespräche durch die NOW GmbH weiter spezifiziert wurden (NOW GmbH 2023), dürfte in den Jahren ab 2025 ein relevanter Absatz elektrischer N3-Nutzfahrzeuge (> 12 t zGG) beginnen. Während der erwartete Anteil in 2025 noch bei etwa 10 % liegt, soll er bis 2030 auf etwa 75 % steigen, drei Viertel davon Batteriefahrzeuge. Dies liegt deutlich über den Vorgaben der aktuell durch die EU-Kommission vorgeschlagenen CO₂-Zielwerte für Lkw. Im europäischen Vergleich werden für Deutschland dabei höhere elektrische Anteile erwartet, was insbesondere auf einen höheren erwarteten Anteil von Brennstoffzellen-Lkw zurückgeht.

4

⁷ Zusätzlich gab es einzelne Aktivitäten in größerem Maßstab, allen voran die Einführung des „StreetScooters“ bei der Deutschen Post.

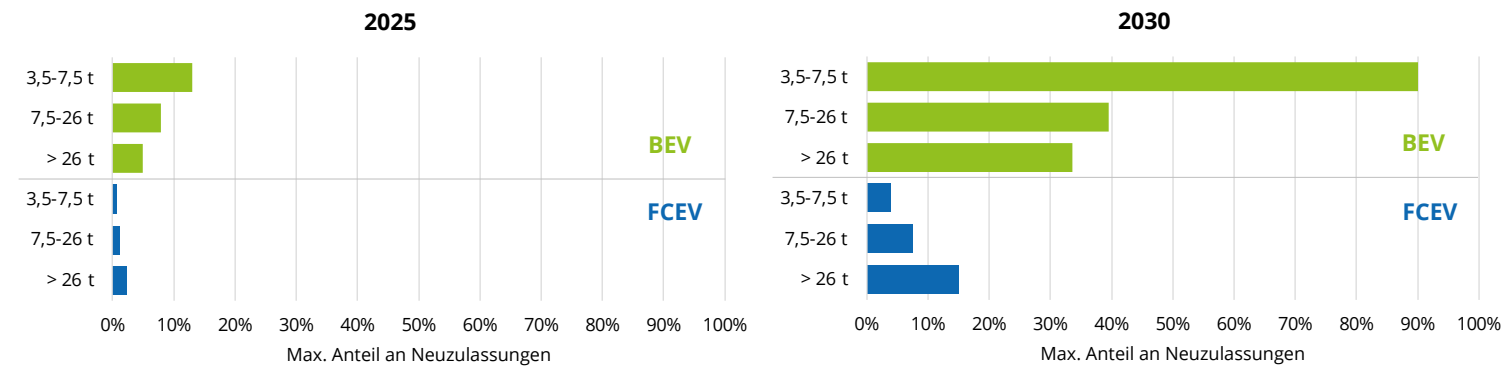


Abbildung 5: Fahrzeugverfügbarkeit - maximaler Anteil an Neuzulassungen nach Technologie und Größenklasse (von Herstellerankündigungen abgeleitet)

Der aktuelle Vorschlag der EU-Kommission fordert für 2030 eine Senkung der THG-Emissionen um 45 % gegenüber 2019 und impliziert damit angesichts von Effizienzpotentialen bei konventionellen Antrieben einen Anteil von nur etwa 30 % bei den ZEV⁸-Neuzulassungen. Dieser Vorschlag wird von der europäischen Vereinigung

"Für 2030 planen die Hersteller, dass ungefähr jeder zweite verkaufte Lkw elektrisch ist. Das ist weitaus ambitionierter als die derzeit geplante Regulatorik"

der Fahrzeughersteller unter Verweis auf die infrastrukturellen Anforderungen als sehr ambitioniert bezeichnet (ACEA 2023), obgleich er deutlich unterhalb der herstellereigenen Ziele liegt. Es bleibt somit offen, ob die Planungen der Hersteller eine hinreichende Fahrzeugverfügbarkeit für einen schnellen Hochlauf elektrischer Antriebe

gewährleisten – dies ist ein potentielles Nadelöhr für eine schnelle Antriebswende im Straßengüterverkehr.

Eine begrenzte Fahrzeugverfügbarkeit gerade in den unmittelbar bevorstehenden Jahren kann die Elektrifizierung des Fahrzeugbestands erheblich ausbremsen, da jedes Jahr nur ein Bruchteil von etwa 11 % der Lkw-Flotte erneuert wird. Legt man die prognostizierten Verkaufszahlen der Hersteller zugrunde, so könnte im Jahre 2030 etwa jeder 6-te Lkw elektrisch fahren – das Ziel der Bundesregierung von einem Drittel elektrischer Fahrleistung⁹ würde selbst unter dieser ambitionierten Annahme deutlich verfehlt. Brennstoffzellenfahrzeuge sind angesichts ihres bereits bei den Neuzulassungen geringen Anteils in diesem Zeitraum nicht in relevanten Mengen im Bestand zu erwarten.

⁸ ZEV = Zero-emission vehicle

⁹ Im Ziel der Bundesregierung ist auch Fahrleistung auf Basis strombasierter Kraftstoffe eingeschlossen. Diese werden nach aktuellem Stand jedoch nicht zu für den Straßengüterverkehr konkurrenzfähigen Kosten zur Verfügung stehen.



HERAUSFORDERUNGEN DER ANTRIEBSWENDE: INFRASTRUKTUR

Betriebliche Ladeinfrastruktur dürfte vor allem in der ersten Marktphase das Rückgrat der Energieversorgung für Lkw sein. Befragungen von Logistikern zeigen, dass eine gewisse Skepsis in Bezug auf die zu erwartende Leistungsfähigkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur für Lkw besteht. Zudem sind die Unsicherheiten bei den Energiekosten an betrieblicher Ladeinfrastruktur geringer.

Im Bereich von Fahrleistungen bis etwa 300 km pro Tag ist davon auszugehen, dass betriebliche Ladeinfrastruktur den überwiegenden Teil des Ladebedarfs decken kann. Die Errichtung von Ladeinfrastruktur wird derzeit mit einem Bundeszuschuss von 80 % der Kosten auch großzügig gefördert. Bei der Umsetzung bestehen aber

eine Reihe von Herausforderungen, insbesondere ein oftmals langer Planungsvorlauf und Kostenunsicherheiten beim Netzanschluss. Hier sind vor allem die lokalen Energieversorger gefragt, Unternehmen umfassend zu beraten und ggf. erforderliche Netzausbaumaßnahmen effizient zu planen und zu priorisieren. Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Auswahl geeigneter Touren für frühe Anwendungen und ggf. die Optimierung der Flottendisposition für den Einsatz elektrischer Lkw. Eine generelle Verzögerung des Markthochlaufs durch Herausforderungen bei der betrieblichen Ladeinfrastruktur kann ohne die Analyse orts aufgelöster Daten zu den Netzanschlüssen nicht quantifiziert werden.

Anders sieht es bei der öffentlichen Ladeinfrastruktur für Lkw aus. Hier bildet die derzeit noch in Abstimmung befindliche europäische Infrastrukturverordnung AFIR den Rahmen für den Ausbau. Sie sieht einen Maximalabstand von Hochleistungsladepunkten und H₂-Tankstellen entlang des TEN-T-Netzes vor. Die Bundesregierung plant im Rahmen des Masterplans Ladeinfrastruktur II u.a. die Ausschreibung eines initialen Ladenetzes für Lkw (BMDV 2022). Die Verfügbarkeit von Lkw-tauglichen Schnellladepunkten entlang der

Fernverkehrsachsen ist bei Langstreckenverkehren maßgeblich für die technische Einsatzmöglichkeit von Batterie-Lkw. Der flächendeckende Aufbau Lkw-gerechter Hochleistungsinfrastruktur birgt eine Reihe von Herausforderungen, wie z.B. Planungsvorläufe für den Netzanschluss und die Verfügbarkeit geeigneter Flächen. Während die AFIR für eine Mindestversorgung mit Ladepunkten und H₂-Tankstellen europaweit klare Vorgaben macht, sind dort für das dynamische Laden (z.B. über Oberleitungen) bisher lediglich Prüf- und

Standardisierungsaufträge zu finden. In „My eRoads“ wurde daher ein national bestimmter Ausbaupfad für Lkw-Oberleitungen anhand der Ergebnisse von (Jöhrens et al. 2020) angenommen, aber auch eine Entwicklung ohne eine solche Infrastruktur zum Vergleich betrachtet. Der Ausbau öffentlicher Infrastruktur stellt eine wichtige Randbedingung für die Analysen zur Flottenentwicklung in den nachfolgenden Abschnitten dar.

"Während für E-Lkw im Nah- und Regionalverkehr in der Regel betriebliche Ladeinfrastruktur ausreichen dürfte, ist öffentliche Ladeinfrastruktur eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von E-Lkw im Fernverkehr."

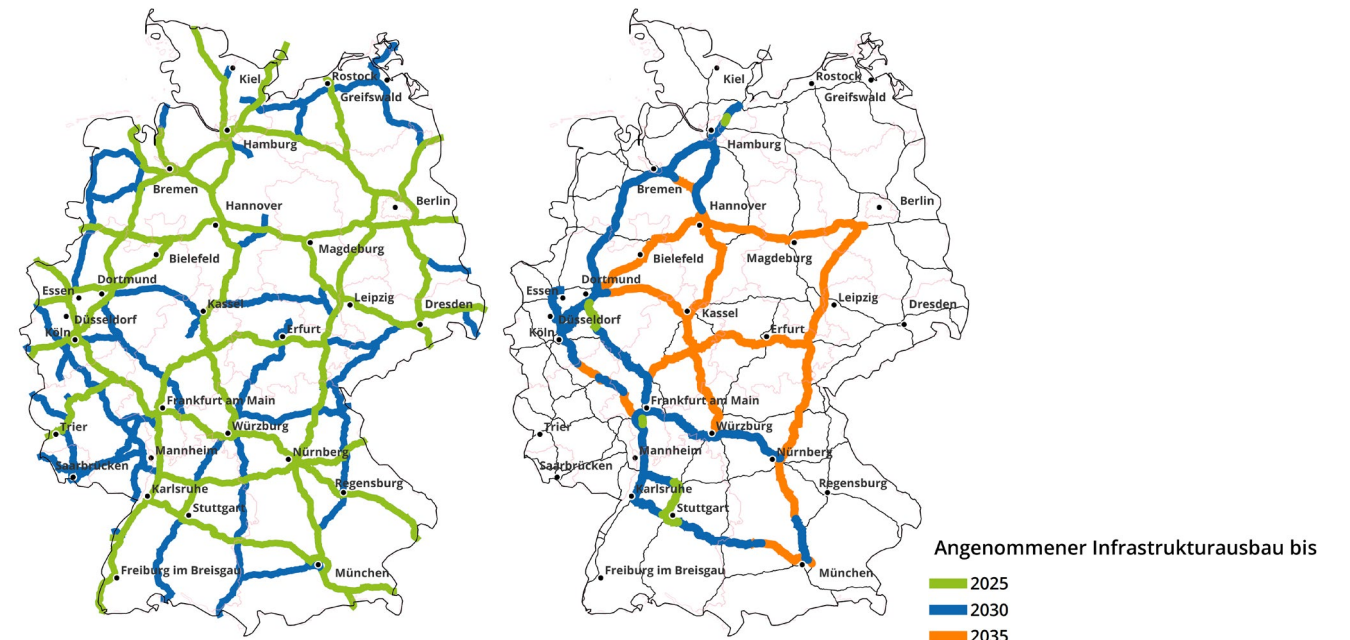


Abbildung 6: Angenommener Infrastrukturausbau für öffentliche Schnellladeinfrastruktur (links) und Lkw-Oberleitungen (rechts) zu den Zeitpunkten 2025 (grün), 2030 (blau) und 2035 (orange, nur Oberleitungen).

5



Um die Entwicklung der Lkw-Flotte zu berechnen, leiten wir basierend auf dem deutschlandweiten Verkehrsmodell PTV Validate Einsatzprofile in Deutschland verkehrender Lkw ab (Jöhrens et al. 2021). Die in Validate zugrundegelegte Entwicklung der Verkehrsnachfrage beruht dabei auf dem Szenario „GreenLate“ des RESCUE-Projekts (Günther et al. 2019) und legt auch längerfristige Maßnahmen zur Verringerung der Verkehrsnachfrage zugrunde. Für jedes Lkw-Einsatzprofil wird im Modell zunächst geprüft, mit welchen Fahrzeugkonfigurationen diese rein technisch (bei gegebenem Infrastrukturausbau) bewältigt werden können. Für Batteriefahrzeuge wird hierbei z.B. die minimal notwendige Batteriekapazität bestimmt. Die technisch möglichen Varianten werden dann einem Vollkostenvergleich aus Betreibersicht unterzogen und das jeweils kostengünstigste Einsatzprofil ausgewählt. Damit wird eine rein ökonomisch getriebene Kaufentscheidung der Betreiber simuliert. Die Infrastrukturkosten bleiben hier zunächst unberücksichtigt, da unklar ist, wann, wie und in welchem Umfang diese weitergegeben werden können. Im [Abschnitt 8](#) wird dann der Einfluss einer möglichen Infrastrukturumlage auf die Flottenentwicklung dargestellt.

Wir legen einen Ausbau der Infrastruktur für alle betrachteten Antriebstechnologien (siehe [Abschnitt 5](#) Infrastrukturvoraussetzungen) und eine Marktverfügbarkeit der Fahrzeuge entsprechend der von den Herstellern kommunizierten Ziele zugrunde (siehe [Abschnitt 5](#) Fahrzeugverfügbarkeit). Für die Energiepreise nehmen wir im Referenzfall an, dass sich Strom- und Dieselpreise mittelfristig wieder auf das Preisniveau vor der Energiekrise 2022 einpendeln werden. Bei den Dieselpreisen wird allerdings aufgrund der prognostizierten Ölpreisentwicklung und der erwarteten Angleichung

bei der Besteuerung von Flüssigkraftstoffen ein moderater Preisanstieg unterstellt. Der angenommene H₂-Preis von 6 €/kg an der Tankstelle unterstellt die Nutzung von Import-Wasserstoff.

Der Strompreis variiert wie bei Industriestrompreisen üblich nach Bandbreite. Die Bandbreite (IA bis IG) wird von der jährlichen Abnahmemenge an einem Zähler bestimmt. Bei der Ladeinfrastruktur wird ein Zähler pro Ladestandort angenommen. Aufgrund der zunehmenden Anzahl an Ladepunkten über die Zeit (und damit der abgenommenen Energiemenge pro Ladestandort) sinkt also der Strompreis (gemittelt über Deutschland pro Jahr, iteratives Vorgehen im Modell). Bei der Oberleitung wird ein Zähler pro Mittelspannungsring (Bündelung über 30 km) angenommen. Die Bandbreiten wurden aus (Eurostat 2020) übernommen und an die Industriestrompreise aus (BDEW 2022) (im Referenzfall für das Jahr 2021, abzüglich der weggefallenen EEG-Umlage) angepasst.

Für den CO₂-Preis im Rahmen der für 2024 angekündigten CO₂-differenzierten Maut wird ein Startwert von 100 €/t angenommen, der bis 2030 auf 200 €/t ansteigt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Batteriepreis, hier ziehen wir im Basisfall die Projektion von BNEF heran. Alle Kostenannahmen sind im Anhang zusammengestellt.

6

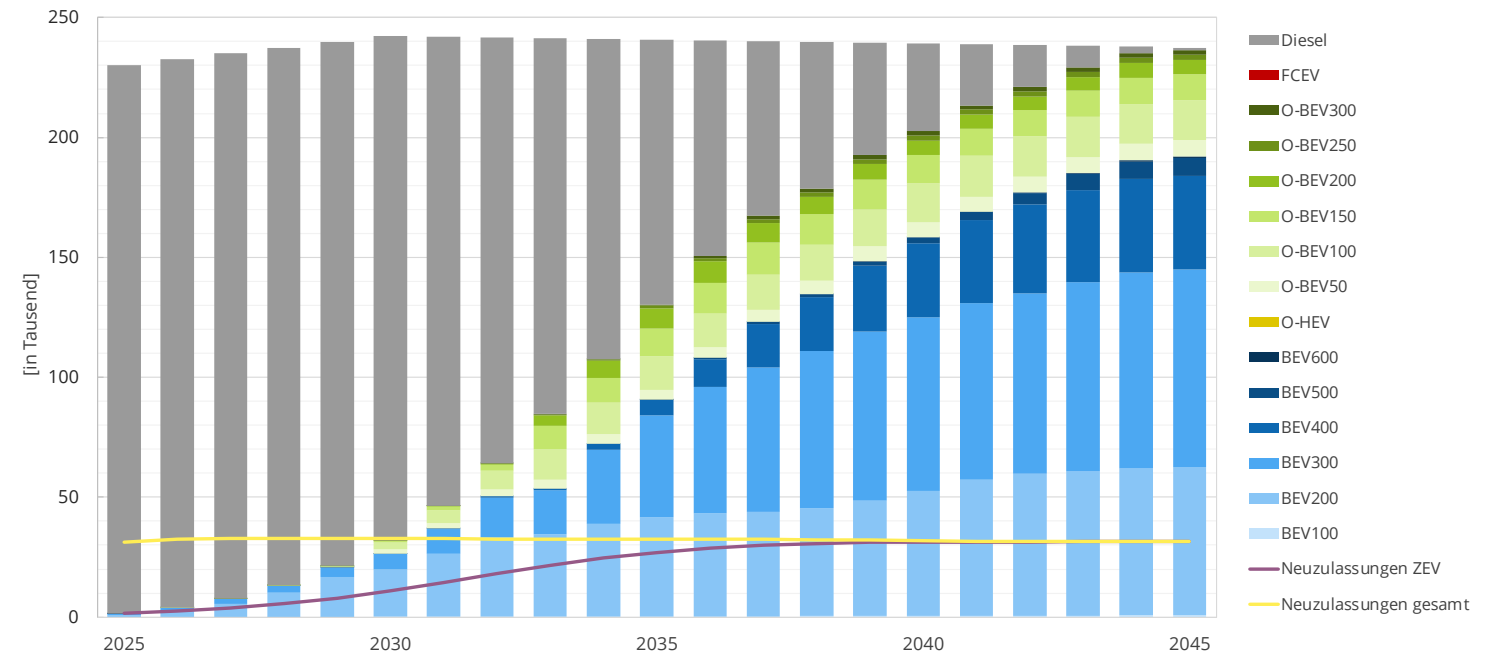


Abbildung 7: Entwicklung der Lkw-Flotte > 26 t zGG im Bestand im Zeitraum 2025–2045; Energiepreisszenario: Referenz. „BEV100“ entspricht 100 km Reichweite, „BEV200“ 200 km usw. Modellergebnisse InGRID.

Der Markthochlauf von Nullemissionsfahrzeugen folgt unter diesen Randbedingungen dem zu erwartenden Fahrzeugangebot. Beispielhaft ist in [Abbildung 7](#) die Entwicklung für die größte Lkw-Klasse (> 26 t) dargestellt¹⁰, bei der im Jahr 2030 etwa ein Drittel der Neuzulassungen einen

zellenfahrzeuge sind aufgrund der vergleichsweise hohen Energiekosten in diesem Zeitraum nicht konkurrenzfähig (siehe [Abschnitt 2](#)), bei Oberleitungs-Lkw ist die erwartete Infrastrukturverfügbarkeit für eine starke Durchdringung in 2030 noch zu gering.

„Die Marktdiffusion von E-Lkw wird spätestens ab 2030 voraussichtlich nicht mehr durch deren Wirtschaftlichkeit, sondern durch die Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur begrenzt sein.“

elektrischen Antrieb haben. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Batteriefahrzeuge mit einer vergleichsweise geringen Reichweite von 200-300 km, die in weniger anspruchsvollen Profilen zum Einsatz (begrenzte Tagesfahrweiten) kommen und den größten Kostenvorteil gegenüber ihren Diesel-Pendants aufweisen. Brennstoff-

Mit fortschreitender Zeit und sinkenden Batteriepreisen kommen dann zunehmend Fahrzeuge mit größeren Reichweiten in den Markt, deren spezifischer Kostenvorteil gegenüber Diesel-Lkw geringer ist. Hier spielt auch der angenommene Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur eine Rolle, der den Einsatz von Batterie-Lkw auf manchen Strecken erst ab 2030 ermöglicht (siehe [Abschnitt 5](#)). Zudem wird etwa die Hälfte des angenommenen Oberleitungsnetzes erst Anfang der 2030er Jahre gebaut und dadurch das technische Einsatzpotential von O-Lkw stark erweitert, was die verzögerte Diffusion dieser Technologie erklärt.

¹⁰ Die Modellergebnisse für alle Fahrzeugklassen sind online im [interaktiven Szenariexplorer](#) verfügbar.

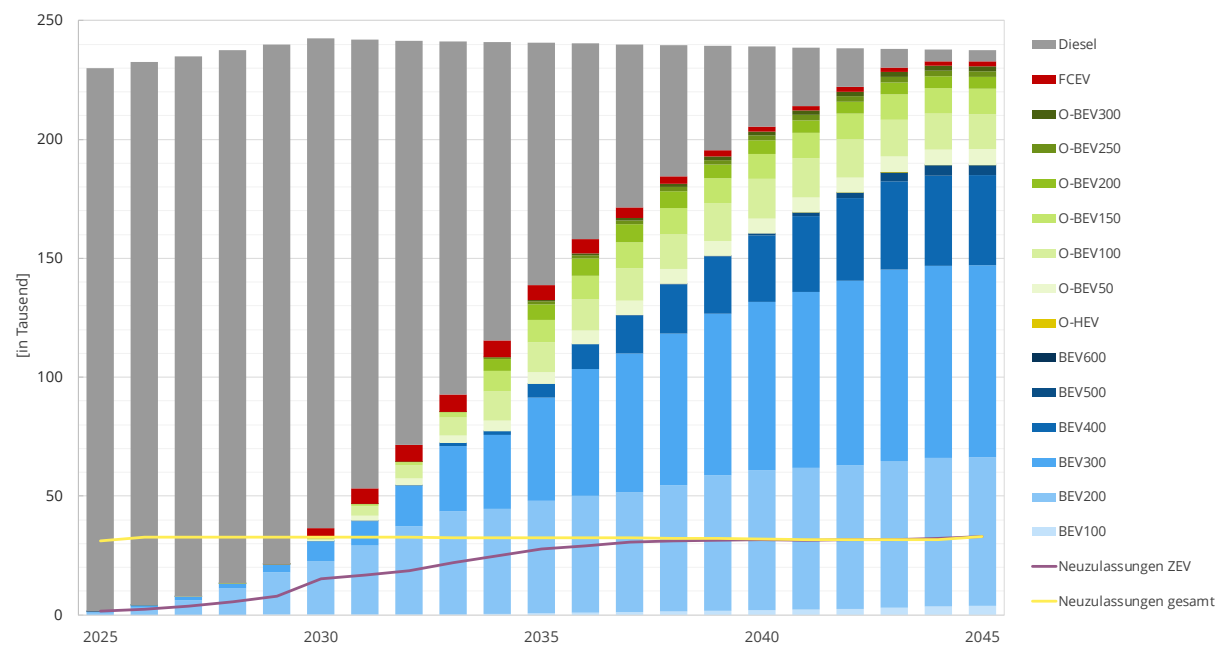


Abbildung 8: Entwicklung der Lkw-Flotte > 26 t zGG im Bestand im Zeitraum 2025–2045; Energiepreisszenario: Krise. „BEV100“ entspricht 100 km Reichweite, „BEV200“ 200 km usw. Modellergebnisse InGRID.

Der Fahrzeugbestand folgt den Neuzulassungen mit deutlicher Verzögerung. Im Jahr 2030 ist mit etwa 12 % Elektro-Lkw im Bestand zu rechnen, was somit auch in etwa dem elektrischen Anteil an der Fahrleistung in diesem Jahr entspricht. Mittelfristig müssen also weiterhin vor allem Maßnahmen der Verkehrsvermeidung, -verlagerung und der effizienten Abwicklung die Einhaltung der Klimaziele sicherstellen. In den Folgejahren steigt der elektrische Bestand bei Neuzulassungsraten von über 50 % aber deutlich an und erreicht im Jahr 2040 etwa 90 % der gesamten Lkw-Flotte.

Um die Auswirkungen volatiler Energiemärkte abzubilden, wurde die Flottenentwicklung zusätzlich mit einem weiteren Energiepreisszenario berechnet, das eine Verstetigung des durch die Energiekrise

des Jahres 2022 entstandenen Preisgefüges abbildet (Abbildung 8). Diesel ist dabei gegenüber der Referenzentwicklung um 0,45 €/Liter teurer, was in 2030 einem prozentualen Aufschlag von 30 % entspricht. Der Strompreis ist gegenüber der Referenz um 86 % erhöht¹¹. Auch unter diesen Bedingungen ergibt sich mit im Mittel ca. 7 % weiterhin ein klarer Kostenvorteil des elektrischen Antriebs und das angenommene Marktangebot an elektrischen Lkw wird ausgeschöpft. Sollte der Wasserstoffpreis konstant bleiben, entstünde hier ein komparativer Kostenvorteil, so dass hier dann in geringem Umfang auch Brennstoffzellen-Lkw in die Flotte kommen. Diese würden in einem solchen Szenario vor allem die langen Tagesfahrweiten von über 400 km abdecken.

¹¹ Die absolute Erhöhung variiert je nach Bandbreite.

Da die Technologiewahl im Modell für einzelne geographisch verortete Einsatzprofile erfolgt, kann die Diffusion elektrischer Antriebe für einzelne Strecken über die Zeitachse verfolgt werden. Da kostenbasiert im Referenzszenario keine Brennstoffzellen-Lkw zu erwarten sind, ist die Entwicklung in Abbildung 7 lediglich für Batterie-Lkw (BEV) und Oberleitungs-Lkw (O-BEV) dargestellt. Demnach werden Batterie-Lkw zunächst bevorzugt in Ballungsräumen eingesetzt,

teil von Batterie-Lkw gegenüber Dieselfahrzeugen den zunehmenden Einsatz von Batterie-Lkw auf der Fernstrecke. Etwa ab diesem Zeitpunkt ist annahmegemäß auch Oberleitungsinfrastruktur auf den Hauptachsen zwischen Hamburg, dem Ruhrgebiet, dem Rhein-Main-Gebiet und Karlsruhe verfügbar, bis 2035 wird das Netz weiter ausgebaut. In der Folge kommen auf diesen Strecken in größerem Umfang O-Lkw zum Einsatz.

„Oberleitungen auf stark befahrenen Korridoren können den Zwischenladebedarf an öffentlicher Schnellladeinfrastruktur dort erheblich senken.“

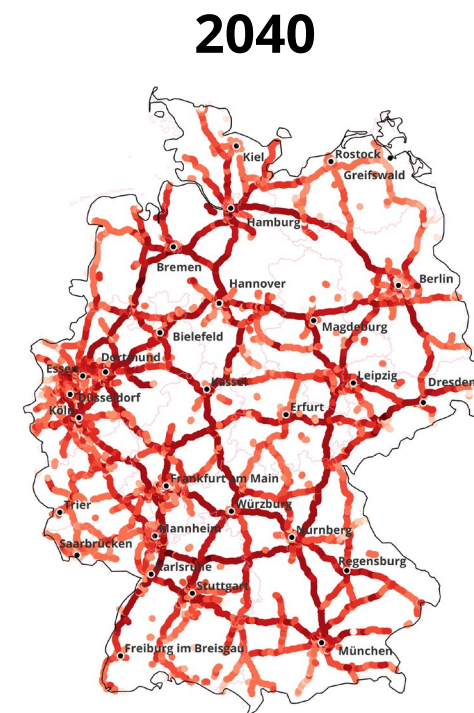
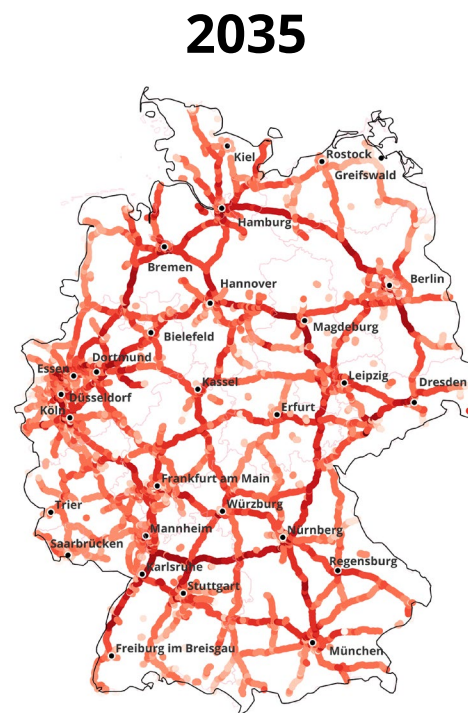
vor allem im Ruhrgebiet und im Rhein-Neckar-Raum. Dort findet sich eine relativ hohe Dichte geeigneter Einsatzprofile, die hauptsächlich mit Depot-Ladeinfrastruktur realisierbar ist. Die Verfügbarkeit einer Basisversorgung an öffentlicher Lkw-Ladeinfrastruktur auf dem gesamten TEN-T-Netz ermöglicht ab etwa 2030 zusammen mit einem wachsenden relativen Kostenvor-

Im direkten Vergleich mit Korridoren ohne Oberleitungsinfrastruktur (z.B. der Verbindung Hamburg-Berlin) ist die Befahrungsstärke von Batterie-Lkw auf Oberleitungskorridoren deutlich geringer. Nichtsdestotrotz verbleiben dort relevante Verkehre an Batterie-Lkw, die auch eine öffentliche Ladeinfrastruktur benötigen. Da nur für innerdeutsche Verkehre eine kostenbasierte Technologiewahl modelliert wurde, sind internationale Verkehre hier nicht eingeschlossen. Für deren Antriebswahl dürfte nicht zuletzt die im angrenzenden Ausland verfügbare Infrastruktur relevant sein, insbesondere die von Oberleitungen.

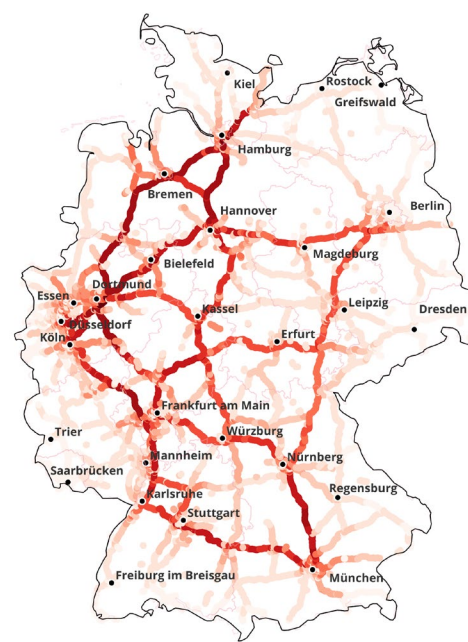


EINSATZGEBIETE DER VERFÜGBAREN ANTRIEBSTECHNOLOGIEN

Batterie-Lkw



Oberleitungs-Lkw



Angenommene Fahrten von Elektro-Lkws pro Tag pro Abschnitt

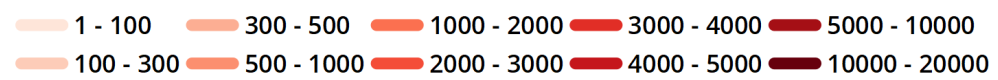
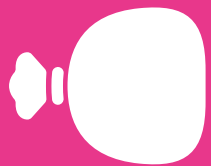


Abbildung 9: Verkehrsaufkommen mit Batterie-Lkw (oben) und O-Lkw (unten) pro Tag im Referenzszenario im Zeitraum 2025-2040



Voraussetzung für die im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Flottenentwicklung ist der Aufbau von stationärer Ladeinfrastruktur, Oberleitungen und/oder H₂-Tankstellen wie in [Abschnitt 5](#) beschrieben. Diese Infrastruktur wird zusätzlich durch internationale Lkw-Verkehre genutzt, die nicht Gegenstand der berechneten Flottenentwicklung sind. Zur Abschätzung dieser Verkehre werden Daten zu internationalen Güterverkehrsströmen aus dem Modell TraViMo zugrunde gelegt¹² (Allekotte et al. 2022) und vereinfachende Annahmen auf Basis von (Ragon et al. 2022) zu deren zukünftiger Verteilung auf die Antriebstechnologien getroffen¹³. Aus der gesamten Flottendurchdringung elektrischer Antriebe in jedem einzelnen Jahr (siehe [Abschnitt 6](#)) ergibt sich wiederum die notwendige Auslegung der Infrastrukturen. Aus den Abstandsvorgaben des AFIR-Vorschlags ergeben sich für den Zeitraum zwischen 2025 und 2030 90 Ladestandorte und ab 2030 123 Ladestandorte.

Es zeigt sich (Abbildung 10), dass der Bedarf an öffentlichen Ladepunkten erst mit einer

gewissen Verzögerung zur Flottendurchdringung von Batterie-Lkw anzieht. Dies liegt am anfänglich hohen Anteil von Fahrzeugen mit eher regionalen Einsatzprofilen und entsprechend kürzeren Reichweiten, die fast ausschließlich auf betriebliche Ladeinfrastruktur zurückgreifen (nicht dargestellt). Ab etwa 2030 steigt der Bedarf an öffentlichen Ladepunkten zusätzlich stark durch international verkehrende Batteriefahrzeuge. Bei der Oberleitungsinfrastruktur sind die Netzwerkeffekte stärker ausgeprägt als bei der stationären Infrastruktur: Die Nutzung der ersten Oberleitungsstrecken direkt nach ihrer Errichtung ist verhältnismäßig gering, da der mögliche Einsatz der O-Lkw noch lokal begrenzt ist und oberleitungstaugliche Fahrzeuge erst langsam in die Flotte kommen. Dementsprechend ist der spezifische Leistungsbedarf pro Oberleitungs-km in diesem Zeitraum vergleichsweise gering. Zwischen 2030 und 2035 zieht die Nutzung dann stark an, wobei der langfristige Leistungsbedarf erheblich dadurch bestimmt wird, in welchem Maße das Oberleitungsnetz auch durch internationale Verkehre genutzt wird.

8

¹² Die so ermittelte Fahrleistung internationaler Verkehre entspricht etwa einem Drittel der Gesamtfahrleistung von Lkw > 3,5 t zGG in Deutschland.

¹³ 2030: 7 % ZEV im Bestand, davon 96 % BEV, 3 % O-BEV und 1 % FCEV
2040: 78,5 % ZEV im Bestand, davon 78 % BEV, 18 % O-BEV und 4 % FCEV

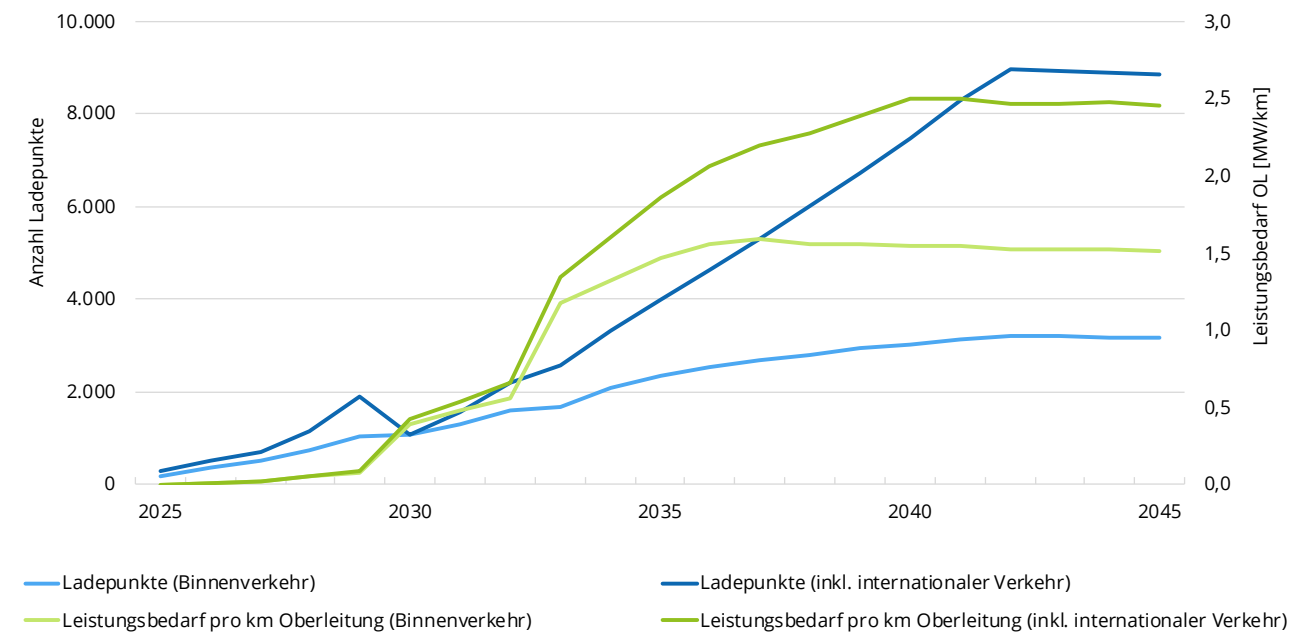


Abbildung 10: Ausbauzustand der öffentlichen Energieversorgungsinfrastruktur (Ladepunkte¹⁴ und Oberleitung) im Zeitverlauf

Dieser Infrastrukturaufbau ist mit erheblichen Kosten verbunden, die sich vor allem aus Hardware- und Installationskosten, Baukosten, Netzanschlusskosten sowie Betriebskosten zusammensetzen. Beim Netzanschluss können gemäß (Bürges und Kippelt 2021) je nach benötigter

"Die annuitätischen Kosten von Schnelllade- und Oberleitungsinfrastruktur liegen langfristig in ähnlicher Größenordnung. Die Art ihrer Finanzierung ist entscheidend für den Vollkostenvergleich verschiedener Antriebskonfigurationen."

Leistungsklasse verschiedene Anschlusstopologien berücksichtigt werden. Die Kosten entstehen dabei zwar prinzipiell direkt beim Infrastrukturaufbau, die Infrastruktur kann danach aber in der Regel über viele Jahre genutzt werden. Für eine Darstellung der mit der Nutzung verbundenen Infrastrukturkosten bietet sich da-

her eine annuitätische Umlegung der Infrastrukturkosten unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Lebensdauern an. Die mit der Nutzung eines Oberleitungsnetzes verbundenen jährlichen Infrastrukturkosten (Abbildung 11) steigen dann aufgrund des Initialaufwands für den Netzaufbau vor al-

lem anfänglich stark an, ändern sich aber trotz weiterer Zunahme der O-Lkw-Flotte nach 2030 nur noch geringfügig. Die Kosten für öffentliche stationäre Ladeinfrastruktur steigen dagegen auch nach 2030 mit der Nachfrage durch weitere Batterie-Lkw weiter und liegen am Ende absolut gesehen in etwa auf gleichem Niveau wie die Kosten der Oberleitungsinfrastruktur. Bezogen auf die abgegebene Energiemenge liegen die Kosten der Oberleitungsinfrastruktur allerdings etwa dreimal so hoch wie bei stationärer Schnellladeinfrastruktur. Die Kosten der Wasserstofftankstellen (nur im Flottenszenario mit Krisenpreisen für Diesel und

¹⁴ 2025–2029: 90 Ladestandorte, ab 2030: 123 Ladestandorte, von denen im Jahr 2045 die Hälfte zwischen 0 und 50 Ladepunkten, ein Fünftel zwischen 50 und 100 Ladepunkten und der Rest zwischen 100 und 350 Ladepunkten besitzt.

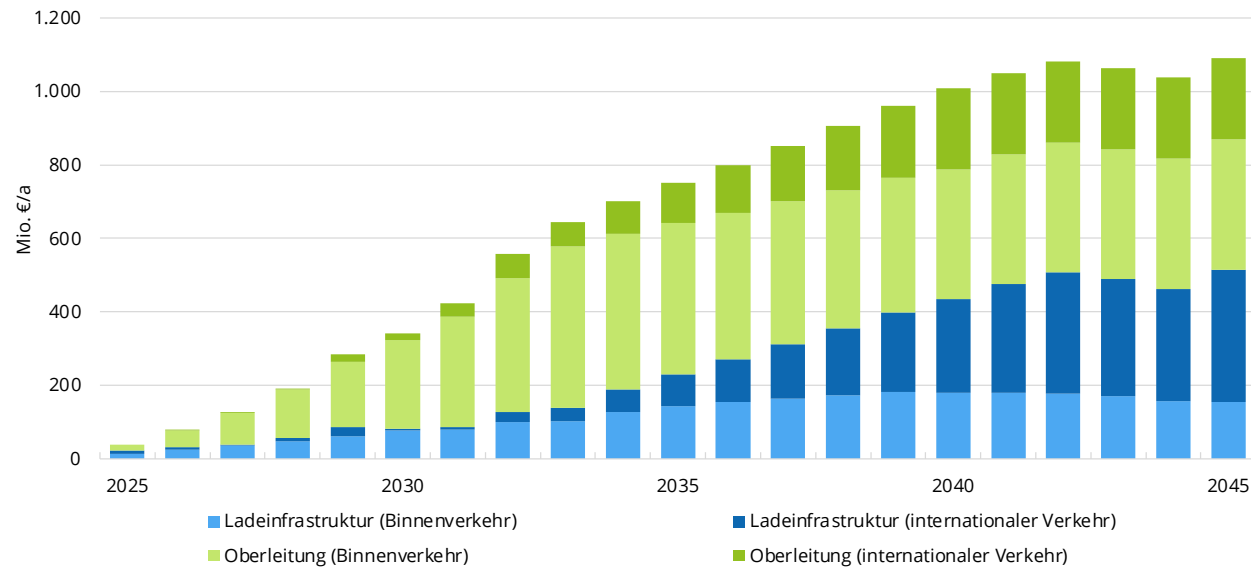


Abbildung 11: Infrastrukturkosten im Referenzszenario – öffentliche Ladeinfrastruktur und Oberleitung (Annuitäten)

Strom, daher nicht in Abbildung 11 zu sehen) liegen aufgrund der kleinen Dimensionierung wegen der geringen Durchdringung mit Brennstoffzellen-Lkw im Szenario deutlich unter den Kosten der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur (kumulierte Annuitäten auch nach 2030 lediglich im niedrigen zweistelligen Millionenbereich).

In [Abschnitt 6](#) wurde die Flottenentwicklung ohne Umlegung der Infrastrukturkosten betrachtet. Dies entspricht einem Szenario, in dem der Infrastrukturaufbau und -betrieb entweder auf den gesamten Straßengüterverkehr unterschiedslos umgelegt wird (z.B. über die Maut) oder direkt staatlich finanziert wird. Müssen die Flot-

ten der einzelnen Antriebstechnologien die Kosten der jeweils benötigten Infrastrukturen jedoch selber tragen, so kann dies Rückwirkungen auf den Kostenvergleich der Technologien und somit letztlich auf die Technologiewahl haben. Dabei ist nicht zuletzt die zeitliche Dimension der Umlegung bedeutsam: Wenn von einer kleinen Anzahl an Nutzenden in der Einführungsphase eine vollständige Refinanzierung der Infrastrukturkosten verlangt wird, so wird sich dies in der Regel prohibitiv auf die Einführung sämtlicher alternativer Antriebstechnologien auswirken. Auch ist entscheidend, in welchem Umfang die Infrastrukturen künftig für grenzüberschreitende Verkehre genutzt werden.

Tabelle 1: Resultierende Infrastrukturumlagen auf die Energiepreise im Falle einer technologiespezifischen Umlage der Infrastrukturkosten¹⁵

	Umlage für öff. LIS ab 2035	Umlage für OL ab 2035
Betrachtung nur innerdeutscher Verkehre	2035: 3,9 ct/kWh	14,5 ct/kWh bis 2040
	2040: 3,4 ct/kWh	11 ct/kWh nach 2040
	2045: 2,6 ct/kWh	
Berücksichtigung internationaler Verkehre¹⁶	2035: 3,5 ct/kWh	11,5 ct/kWh bis 2040
	2040: 3,7 ct/kWh	8 ct/kWh nach 2040
	2045: 3,8 ct/kWh	

In Tabelle 1 sind resultierende Infrastrukturumlagen für den Fall einer vollständigen nutzerbasierten Refinanzierung der Infrastruktur bis zum Jahr 2045 angegeben. Annahme ist hier, dass die Infrastrukturumlage ab 2030 eingeführt wird und in 2035 ihre volle Höhe erreicht, um die erste Phase der Marktentwicklung nicht abzuwürgen. Unabhängig davon, ob internationale Verkehre eingerechnet werden, müssten O-Lkw pro kWh einen deutlich größeren Betrag zur Nutzung der Infrastruktur entrichten. Die Umlage ist zwar geringer, wenn man internationale Verkehre miteinbezieht, bleibt aber mindestens doppelt so hoch wie die analog fällige Umlage für BEV für die Ladeinfrastruktur. Bei rein kostenbasierter Technologiewahl würden O-Lkw auf nahezu allen Relationen durch eine solche Um-

lage (innerdeutsch und international) im Vergleich zu BEV unwirtschaftlich. BEV dominieren dann das Antriebsportfolio fast vollständig. Eine technologiespezifische Umlegung der vollen Infrastrukturkosten führt also zu prohibitiv höheren Betriebskosten für O-Lkw im Vergleich zu BEV und der im Referenzszenario beobachtete Kostenvorteil auf einigen, besonders langen Relationen entfällt. Dennoch können betriebliche, planerische oder ökologische Gründe den Aufbau eines Oberleitungsnetzes volkswirtschaftlich sinnvoll machen – beispielsweise dann, wenn sich Engpässe bei zentralen Rohstoffen für die Batterieherstellung abzeichnen sollten. In diesem Fall sollten die Kosten für das Oberleitungsnetz jedoch zumindest teilweise auch vom Gesamtverkehr getragen werden.

¹⁵ Annahme: Phase-in der Infrastruktur-Umlage ab 2030, volle Höhe ab 2035

¹⁶ Für grenzüberschreitende Verkehre (deren Flottenentwicklung nicht kostenbasiert modelliert wurde) wird vereinfachend ein ähnlicher Technologiemix wie für innerdeutsche Verkehre angenommen.

Zentrales Ziel der Antriebswende ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen aus dem Straßenverkehr (siehe Abschnitt 3). Abbildung 12 zeigt die THG-Emissionen des innerdeutschen Straßengüterverkehrs im Zeitraum von 2025 bis 2045 für die in Abschnitt 6 dargestellte Flottenentwicklung (Referenzfall). Für die Entwicklung in der Energiewirtschaft haben wir dabei ein Szenario zur Erreichung der Treibhausgasneutralität in Deutschland 2045 angenommen (Prognos AG et al. 2021), das bis 2030 einen Anstieg der erneuerbaren Stromerzeugung auf knapp 73 % vorsieht¹⁷. Zusätzlich zu den Wheel-to-Wheel-Emissionen haben wir auch noch die mit der Fahrzeugherstellung¹⁸ und überschlägig der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur¹⁹ verbundenen Emissionen bilanziert. Diese Emissionen haben wir dabei jeweils auf die erwartete Lebensdauer der Komponenten bzw. Fahrzeuge umgelegt. Da die Bereitstellung zahlreicher Ressourcen und etlicher Vorprodukte für die Fahrzeuge und Infrastruktur nicht in Europa stattfindet, haben wir hier als konservative Annahme eine gleichbleibende THG-Intensität dieser Vorprodukte unterstellt.

Die Gesamtemissionen des im Projekt modellierten innerdeutschen Straßengüterverkehrs mit Fahrzeugen > 3,5 t zGG betragen damit 2025 etwa 30 Mt CO₂-Äquivalente (siehe Abbildung 12). Durch die Elektrifizierung sinken diese Emissionen bis 2045 auf gut 6 Mt CO₂-Äq. Der Rückgang der Emissionen beschleunigt sich jedoch aufgrund des notwendigen Infrastruktur- und Fahrzeughochlaufs erst nach 2030 deutlich. Die THG-Einsparungen gehen dabei im Kern auf die vermiedenen Well-to-Wheel Emissionen der Dieselnutzung („Diesel“), also die Ausflottung der Dieselfahrzeuge zurück. Entsprechend ist der Rückgang der direkten Abgasemissionen der Diesel-Lkw, die dem Bilanzraum des Verkehrs in Deutschland entsprechen, viel deutlicher: Diese Emissionen sinken für den innerdeutschen Lkw-Verkehr von gut 23 Mt 2025 auf gut 1 Mt CO₂-Äq und betragen damit 2045 nur noch 4 % des Ausgangsniveaus. Die verbleibenden Abgasemissionen entstehen dann nur noch durch Altfahrzeuge mit einer langen Lebensdauer. Diese müssten zur Erreichung der vollständigen Treibhausgasneutralität im Verkehrssektor mit erneuerbaren synthetischen Kraftstoffen betrieben werden.

9

¹⁷ Zur Quantifizierung wurden die Daten aus (Hill et al. 2020) verwendet

¹⁸ Siehe (Jöhrens et al. 2022); die Herstellung der Batterien wurde für diese Darstellung mit aktualisierten Daten neu modelliert.

¹⁹ Berücksichtigt wurden allein die Komponenten der Energieübertragung ab dem Mittelspannungsnetz, siehe (Helms et al. 2022)

Im Betrachtungszeitraum steigen jedoch die mit der Herstellung der Fahrzeuge verbundenen Emissionen leicht an, da die Herstellung von BEV und O-BEV insbesondere aufgrund der Batterien mit deutlich höheren Klimagasemissionen verbunden ist. Auch die Emissionen der Strombereitstellung („Strom BEV“) steigen zunächst durch den wachsenden Strombedarf aus dem Straßenverkehr. Ab 2038 gehen sie dann aber aufgrund des Ausbaus erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten in Deutschland wieder leicht zurück. 2045 verbleiben unter diesen Annahmen in einer LCA-Betrachtung dennoch weiterhin etwa 21 % der THG-Emissionen des inländischen

Straßengüterverkehrs von 2025. Diese entstehen jedoch derzeit häufig außerhalb Deutschlands. Es handelt sich dabei vor allem um die infrastrukturbedingten Emissionen der erneuerbaren Stromerzeugung (also Herstellung von z.B. Windrädern und Photovoltaikanlagen) und die Emissionen der Fahrzeugherstellung. Der Aufbau der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur fällt dabei nur wenig ins Gewicht. Vielmehr kann ein dichtes Netz an Lade- und Oberleitungsinfrastruktur sogar die notwendigen Batteriekapazitäten im System und damit auch Treibhausgasemissionen und Bedarf an knappen Ressourcen senken.

„Langfristig (2045) kann die Antriebswende die THG-Emissionen der deutschen Lkw-Flotte in einer Lebenswegbetrachtung um ca. 80 % mindern – die Vermeidung der restlichen Emissionen erfordert eine tiefgreifende Dekarbonisierung internationaler Lieferketten der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung.“

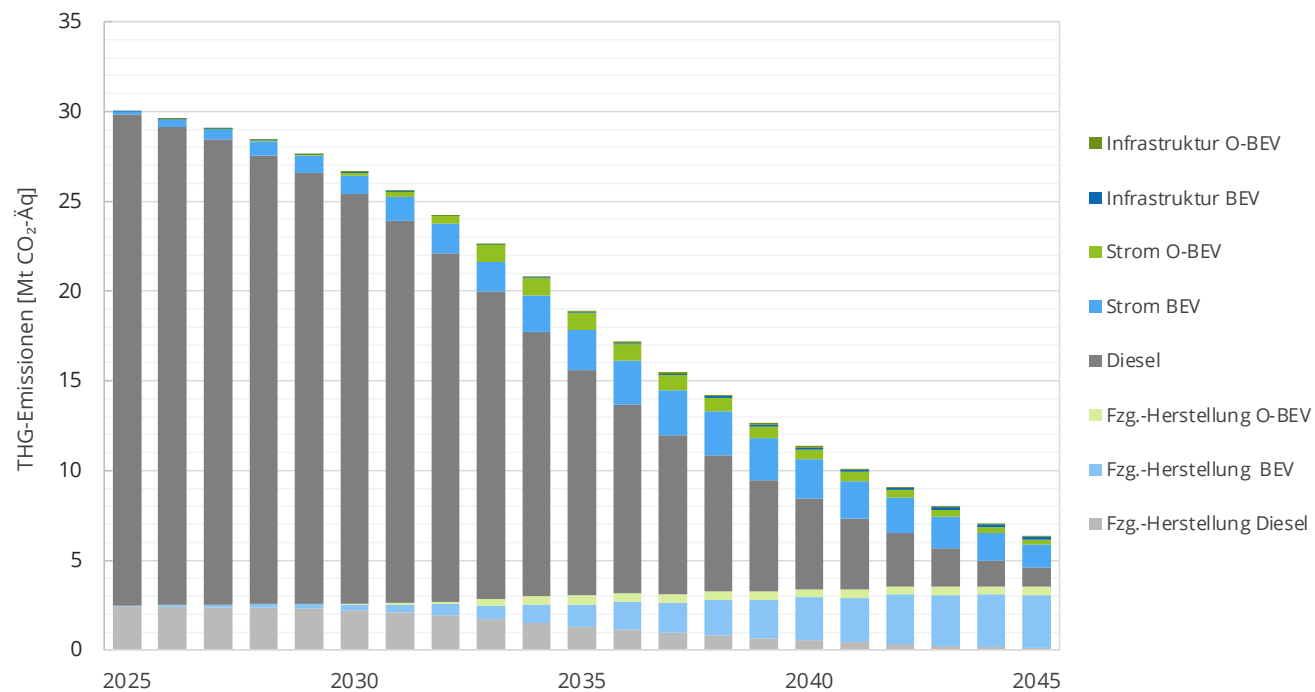


Abbildung 12: Treibhausgasemissionen im Referenzszenario

Die Ergebnisse zeigen damit einerseits, dass Deutschland die Vermeidung von fast 80 % der mit dem Straßengüterverkehr verbundenen Klimagasemissionen durch eine ambitionierte Antriebswende selbst in der Hand hat. Andererseits sind in einer umfassenden Lebenswegbetrachtung auch 2045 noch erhebliche Emissionen indirekt mit einem elektrifizierten Straßengüterverkehr verbunden. Dies liegt u.a. an globalen Lieferketten und Produktionsprozessen, die teilweise auch außerhalb der deutschen Bilanzgrenzen stattfinden. Um auch diese Emissionen zu senken, müssen globale Anstrengungen zur Defossilisierung des Abbaus und der Weiterverarbeitung von Ressourcen sowie von globalen Transport- und Produktionsprozessen unternommen bzw. diese Prozesse nach Deutschland

oder Europa verlagert werden. Hier haben Politik sowie deutsche Fahrzeughersteller und Infrastrukturbetreiber jedoch auch weitreichende Möglichkeiten der Einflussnahmen. So wird nach der jüngst verabschiedeten Batterieverordnung zunächst ab etwa 2024 eine obligatorische Erklärung zum CO₂-Fußabdruck verlangt, die dann ab ca. 2027 durch eine Obergrenze für den CO₂-Fußabdruck ergänzt wird. Zusätzlich gelten 2027 auch Mindestrückgewinnungsraten für das Recycling zentraler Zellmaterialien. Auch ein EU „Carbon Border Adjustment Mechanism“ könnte stärkere Anreize zur klimafreundlichen Herstellung von Vorprodukten schaffen. Zusätzlich können Unternehmen eigene Maßnahmen ergreifen, um auf ihre Lieferketten Einfluss zu nehmen.

	2025	2030	2040	2045	Erläuterungen
Transportleistung im inner-deutschen Straßengüterverkehr [Mrd. tkm]	382	402	397	394	Szenario „GreenLate“ aus RESCUE (Günther et al. 2019)
Anschaffungspreis (vgl. mit Diesel-Lkw), exemplarisch für Lkw > 26 t					
BEV500	+121 %	+59 %	+17 %	+ 13 %	Kostengerüst abgeleitet im Teilbericht (Jöhrens et al. 2022)
O-BEV150	+75 %	+23 %	- 8 %	-10 %	
FCEV	+ 94 %	+41 %	+9 %	+6 %	
O-HEV	+101 %	+54 %	+28 %	+26 %	
Energieverbrauch					
Diesel-Lkw [l/km]	0,33	0,3	0,27	0,26	Energieverbrauch abgeleitet im Teilbericht (Jöhrens et al. 2022)
BEV500 [kWh/km]	1,38	1,32	1,28	1,27	
O-BEV150 [kWh/km]	1,4	1,32	1,29	1,27	
FCEV [kg/km]	0,079	0,071	0,067	0,065	
O-HEV (Diesel- bzw. Oberleitungsmodus)					
[kWh/km]	1,44	2,36	1,32	1,3	
[l/km]	0,29	0,26	0,24	0,23	
Dieselpreis [€/l] (inkl. CO ₂ -Preis)	1,25	1,48	1,80	1,92	Für Dokumentation zu Energiepreisen und Infrastrukturkosten siehe (Pelzeter et al. 2023)
CO₂-Preis Diesel [€/t]	117	200	400	500	
Strompreis ohne Infrastrukturumlage [€/kWh]					
Depot	0,15	0,15	0,15	0,15	
Öffentlich	0,14	0,14	0,09	0,09	
Oberleitung	0,15	0,14	0,12	0,12	
Infrastrukturumlage [€/kWh]					
Depot	0,01	0,03	0,02	0,02	
Öffentlich	0,11	0,05	0,04	0,04	
Oberleitung	0,12	0,12	0,08	0,08	
H2-Preis (Import) [€/kg]	10,0 €	6,8 €	6,8 €	6,8 €	
Lkw-Maut [€/km] für Fzge. > 26 t	0,187	0,187	0,187	0,187	Mautsatz 2022 (Infrastruktur, Luft, Lärm)

Alle Preise in €₂₀₂₀ und ohne MwSt.

- ACEA (2023): Truck and bus CO₂ standards: ambition levels for all stakeholders must be aligned. ACEA - European Automobile Manufacturers' Association.
- Allekotte, M.; Heidt, C.; Knörr, W. (2022): Modellintegration des Transport-Visualisierungsmodells (TraViMo) und dem Transport Emission Model (TREMOM). Umweltbundesamt.
- BDEW (2022): BDEW-Strompreisanalyse April 2022 - Haushalte und Industrie. Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V.
- BMDV (2022): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung. Bundesministerium für Digitales und Verkehr.
- Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.
- Burges, K.; Kippelt, S. (2021): Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for batteryelectric long-haul trucks. Transport & Environment.
- Eurostat (2020): Electricity prices components for non-household consumers - annual data (from 2007 onwards). Energy statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_205_C/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_price.nrg_pc. (19.04.2022).
- Göckeler, K.; Hacker, F. (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien - Policy Brief. Öko-Institut; Hochschule Heilbronn.
- Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P.; Purr, K. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE. Umweltbundesamt.
- Helms, H.; Biemann, K.; Jöhrens, J.; Bruch, B. (2022): Strategies and climate impacts for infrastructure ramp up for the defossilisation of road freight transport. Vienna Motor Symposium 2022.
- Hill, N.; Amaral, S.; Morgan-Price, S.; Nokes, T.; Bates, J.; Helms, H.; Fehrenbach, H.; Biemann, K.; Abdalla, N.; Jöhrens, J.; Cotton, E.; German, L.; Harris, A.; Ziem-Milojevic, S.; Haye, S.; Sim, C.; Bauen, A. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final Report for the European Commission, DG Climate Action. Ricardo Energy & Environment, ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung, E4tech. Didcot.
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. ifeu, PTV Transport Consult.
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Schillinger, M.; Thienel, M.; Dürrbeck, K.; Schwemmer, M.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2021): Potentialanalyse für Batterie-Lkw - Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. ifeu, Fraunhofer SCS, PTV Transport Consult.
- Jöhrens, J.; Waßmuth, V.; Rücker, J.; Kräck, Jan; Helms, H.; Biemann, K.; Schillinger, M.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020–2030. ifeu, PTV Transport Consult, Fraunhofer IEE. Heidelberg.
- Krail, M.; Speth, D.; Wietschel, M. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, TU Berlin, Energy and Resources.
- Nobis, C.; Schulz, A.; Köhler, K.; Bergk, F.; Dünnebeil, F. (2016): Alltagsmobilität: Verlagerungspotenziale auf nicht motorisierte und öffentliche Verkehrsmittel im Personenverkehr. DLR, ifeu, LBST, DBFZ.
- NOW GmbH (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr - Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.
- Pelzeter, J.; Heining, F.; Allekotte, M. (2023): Annahmen zu Energiepreisen und zu Infrastrukturkosten im Technologiewahlmodell InGRID.
- Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- Ragon, P.-L.; Mulholland, E.; Basma, H.; Rodríguez, F. (2022): A review of the AFIR proposal: Public infrastructure needs to support the transition to a zero-emission truck fleet in the European Union. ICCT.
- TREMOM (2022): Transport Emission Model. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. <https://www.ifeu.de/methoden-tools/modelle/tremom/>
- UBA (2022): Klimaschutz im Verkehr - Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland im Sektor Verkehr des Klimaschutzgesetzes (KSG). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-lademobilitaet/klimaschutz-im-verkehr>. (01.05.2022)
- Ueckerdt, F.; Odenweller, A. (2023): E-Fuels - Aktueller Stand und Projektionen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Wietschel, M.; Weißenburger, B.; Rehfeldt, M.; Lux, B.; Zheng, L.; Meier, J. (2023): Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse. HYPAT Working Paper 01/2023. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Herausgeber

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Tel.: +49 6221-47 67-0

ifeu@ifeu.de

www.ifeu.de

Autor:innen

Julius Jöhrens, Michel Allekotte, Florian Heining, Hinrich Helms,
Jascha Klimke, Julia Pelzeter, Dominik Räder

Stand

Oktober 2023

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten im Projekt „My eRoads“. Das Projekt wurde im Rahmen des Förderprogramms „Erneuerbar mobil“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen FKZ 16EM4006-1 gefördert.

Gestaltung

tippingpoints GmbH

Bildquellen

Fotos/Bilder: unter Verwendung von iStock und unsplash.com

Grafiken

eigene Abbildungen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Erneuerbar
mobil