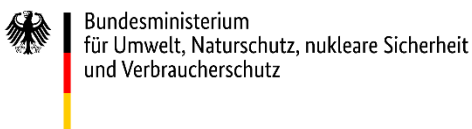

Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030

Teilbericht im Rahmen des Vorhabens
„Elektrifizierungspotential des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“

Julius Jöhrens, Michel Allekotte, Florian Heining, Hinrich Helms, Dominik Räder | ifeu
Nadine Köllermeier, Volker Waßmuth | PTV Transport Consult

Heidelberg / Karlsruhe, Januar 2022

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung	6
Abkürzungsverzeichnis	13
1 Hintergrund und Zielstellung	21
2 Methodik, Datengrundlagen und Annahmen	22
2.1 Einsatzprofile der Fahrzeuge	22
2.2 Technische Eignungsbewertung	24
2.2.1 Batterie-Lkw	24
2.2.2 Brennstoffzellen-Lkw	26
2.2.3 Oberleitungs-Lkw	26
2.3 Kostenannahmen	30
2.3.1 Fahrzeugpreise	31
2.3.2 Energiepreise	31
2.3.3 Infrastrukturkosten	33
2.3.4 Lkw-Maut	33
2.3.5 Sonstiges	34
2.4 Datengrundlagen für THG-Lebenswegbilanz	35
3 Wirtschaftliches Potential einzelner Antriebstechnologien ggü. Diesel-Lkw	37
3.1 Batterie-Lkw	37
3.2 Brennstoffzellen-Lkw	42
3.3 Oberleitungs-Lkw	45
3.4 Vergleich der Einzelpotentiale	50
3.4.1 Fahrleistung	50
3.4.2 Kostenbilanz für Lkw-Betreiber	51
3.4.3 Potentielle THG-Minderung	52
4 Kostenoptimaler Technologiemi	54
Literaturverzeichnis	59
Anhang	61
A1 Modellbeschreibung PTV Validate	61
A2 Abschätzung der Infrastrukturkosten	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ableitung typischer Tagesfahrweiten für die auf einzelnen Relationen durchgeführten Fahrzeug-Einsatzprofile	23
Abbildung 2: Verteilung der Tagesfahrweite über die bei der Modellierung zugrunde gelegten Einsatzprofile in den betrachteten Lkw-Klassen	24
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Eignungs- und Kostenbestimmung von Batterie-Lkw für einzelne Einsatzprofile	25
Abbildung 4: Zugrunde gelegtes Oberleitungsnetz mit einer Gesamtlänge von 3.050 km bzw. 1.450 km (reduziertes Netz)	28
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Eignungs- und Kostenbestimmung von Oberleitungs-Lkw für einzelne Einsatzprofile	29
Abbildung 6: Anteil der Fahrleistung (gleitender Mittelwert), die von Lkw > 26 t unter Oberleitung zurückgelegt wird	30
Abbildung 7: Maximal zu überbrückender Streckenabschnitt ohne Oberleitung bei Lkw > 26 t	30
Abbildung 8: Vollkosten für Batterie-Lkw verschiedener Größenklassen im Vergleich zu entsprechenden Diesel-Lkw; Bezugsjahr 2030	37
Abbildung 9: Wirtschaftliches Potential von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung	39
Abbildung 10: Wirtschaftliches Potential von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung, differenziert nach Tagesfahrweite für Lkw > 26 t	39
Abbildung 11: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Batterie-Lkw in Abhängigkeit des Strompreises im Jahr 2030	40
Abbildung 12: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Batterie-Lkw in Abhängigkeit des Diesel- bzw. CO ₂ -Preises im Jahr 2030	41
Abbildung 13: Wirtschaftliches Potential von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung für den Fall, dass die Lkw ausschließlich im Depot laden können und den Fall, dass die Lkw jederzeit zwischenladen können, sofern der Kostenvorteil der Batterie-Lkw trotz Einrechnung der Zeitkosten erhalten bleibt	42
Abbildung 14: Vollkosten für Brennstoffzellen-Lkw verschiedener Größenklassen im Vergleich zu entsprechenden Diesel-Lkw; Bezugsjahr 2030.	43
Abbildung 15: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Brennstoffzellen-Lkw nach Größenklassen im Jahr 2030 unter Annahme einer H ₂ -Produktion in Deutschland bzw. eines H ₂ -Imports	44
Abbildung 16: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Brennstoffzellen-Lkw in Abhängigkeit des H ₂ -Preises im Jahr 2030	44

Abbildung 17: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Brennstoffzellen-Lkw (Annahme: H ₂ -Produktion in Deutschland) in Abhängigkeit des Diesel- bzw. CO ₂ -Preises im Jahr 2030	45
Abbildung 18: Vollkosten für Oberleitungs-Lkw verschiedener Größenklassen im Vergleich zu entsprechenden Diesel-Lkw; Bezugsjahr 2030	46
Abbildung 19: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Oberleitungs-Lkw für die relevanten Größenklassen	47
Abbildung 20: Anteil wirtschaftlicher O-Lkw-Fahrleistung abhängig von Tagesfahrweite unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken	48
Abbildung 21: Gewählte Batteriegröße und Konfiguration der O-Lkw in Abhängigkeit des Oberleitungsanteils an der Strecke unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken	49
Abbildung 22: Summierte Fahrleistungen alternativ angetriebener Lkw für die betrachteten Einzelpotentiale	50
Abbildung 23: Summierte Differenzkosten der alternativ angetriebenen Lkw gegenüber Diesel-Lkw für die betrachteten Einzelpotentiale	51
Abbildung 24: Jährliche Treibhausgasemissionen der alternativ angetriebenen Lkw bei vollständiger Ausschöpfung der betrachteten Einzelpotentiale	53
Abbildung 25: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km	55
Abbildung 26: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km in Abhängigkeit der Tagesfahrweite	55
Abbildung 27: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines kürzeren Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von nur 1.450 km	56
Abbildung 28: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines kürzeren Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von nur 1.450 km in Abhängigkeit der Tagesfahrweite	56
Abbildung 29: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten für ein Oberleitungsnetz von 3.050 km Gesamtlänge und drei verschiedene Annahmen bezüglich der Zwischenlademöglichkeiten bei BEV-Lkw	57
Abbildung 30: Summierte Differenzkosten der alternativ angetriebenen Lkw gegenüber Diesel-Lkw für die betrachteten Technologieportfolios	58
Abbildung 31: Jährliche Treibhausgasemissionen der alternativ angetriebenen Lkw für die betrachteten Technologieportfolios	58
Abbildung 32: Wirtschaftliches Potential (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung	63

Abbildung 33: Wirtschaftliches Potential (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung, differenziert nach Tagesfahrweite für Lkw > 26 t	63
Abbildung 34: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Oberleitungs-Lkw für die relevanten Größenklassen	64
Abbildung 35: Anteil wirtschaftlicher O-Lkw-Fahrleistung (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) abhängig von Tagesfahrweite unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken	65
Abbildung 36: Gewählte Batteriegröße und Konfiguration der O-Lkw (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) in Abhängigkeit des Oberleitungsanteils an der Strecke unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken	65
Abbildung 37: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten (inkl. Infrastrukturkosten) bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km	66
Abbildung 38: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten (inkl. Infrastrukturkosten) bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km in Abhängigkeit der Tagesfahrweite	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auslegung der im Modell hinterlegten Batterie-Lkw	25
Tabelle 2: Auslegung der im Modell hinterlegten Brennstoffzellen-Lkw	26
Tabelle 3: Auslegung der im Modell hinterlegten Oberleitungs-Batterie-Lkw (O-BEV)	27
Tabelle 4: Auslegung der im Modell hinterlegten Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-HEV)	27
Tabelle 5: Fahrzeugpreise je Größenklasse und Technologie im Jahr 2030	31
Tabelle 6: Angenommene Energiepreise (ohne USt) für das Referenzjahr 2030.	32
Tabelle 7: Angenommene Infrastrukturumlagen auf die Energiepreise (ohne USt) für das Bezugsjahr 2030.	33
Tabelle 8: Mautsätze pro Größenklasse und Technologie	33
Tabelle 9: Sonstige Fixkosten in € ₂₀₂₀ /a	34
Tabelle 10: Sonstige variable Kosten in ct ₂₀₂₀ /km	34
Tabelle 11: Betriebsbedingte THG-Emissionen der Fahrzeuge [kg CO ₂ -Äq.]	35
Tabelle 12: CO ₂ -Emissionsfaktoren für die Herstellung der antriebspezifischen Zusatzkomponenten	36
Tabelle 13: THG-Emissionen durch die Herstellung der Basisfahrzeuge	36

Zusammenfassung

Bei der Entwicklung wirksamer Strategien zur drastischen Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) des Verkehrssektors rückt der Straßengüterverkehr zunehmend in den Fokus. Er ist mit knapp 50 Mt CO₂ pro Jahr für etwa ein Drittel der verkehrsbedingten Emissionen in Deutschland verantwortlich (mit steigender Tendenz). Im Gegensatz zum Personenverkehr, wo sich batterieelektrische Pkw mit Förderung bereits am Markt durchsetzen, fehlen beim Straßengüterverkehr teilweise noch marktreife technische Lösungen. Nach dem im Juni 2021 novellierten Klimaschutzgesetz sollen die Emissionen des gesamten Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 um etwa 45 % auf 85 Mt CO₂ jährlich zurückgehen. Die Bundesregierung wird diese immense Herausforderung auf Zielvorgaben und Maßnahmen für den Straßengüterverkehr herunterbrechen und dabei (jenseits der notwendigen Verlagerung auf die Schiene) u.a. entscheiden müssen, welche Rahmensetzungen für verschiedene Antriebstechnologien erfolgen sollen.

Kern der vorliegenden Studie ist eine vergleichende Betrachtung der wirtschaftlichen Potentiale verschiedener Lkw-Antriebstechnologien für das Jahr 2030. Unter Zugrundelegung voraussichtlicher technischer und wirtschaftlicher Entwicklungen bei den Antriebstechnologien haben wir berechnet, für welche Anwendungsfälle sich welche Antriebstechnologie im Jahr 2030 für die Lkw-Betreiber im Vergleich zum Diesel-Lkw rechnet und welche der verfügbaren Technologien jeweils mit den geringsten Kosten verbunden ist. Zudem umfasst die Untersuchung eine Quantifizierung der THG-Reduktionspotentiale unter Berücksichtigung von Betrieb, Energiebereitstellung und Herstellung der Lkw. Berücksichtigt haben wir dabei den batterieelektrischen Antrieb, den Brennstoffzellenantrieb und eine Stromversorgung per Oberleitung¹. Die Ergebnisse der Studie setzen wirtschaftliche und klimapolitische Potentiale der Lkw-Antriebstechnologien miteinander in Relation und zeigen sinnvolle Einsatzgebiete auf. Sie sollten hingegen nicht als Markthochlaufmodellierung unter konkreten Annahmen für zukünftige klimapolitische Maßnahmen missverstanden werden.

Die Vollkosten verschiedener Antriebstechnologien bestimmen wir auf Ebene einzelner Einsatzprofile und leiten daraus deutschlandweite Gesamtpotentiale ab. Da wir für das Betrachtungsjahr 2030 einen Massenmarkt für alternative Antriebe unterstellen, nehmen wir an, dass die aktuellen Fördermaßnahmen bis dahin ausgelaufen sind (keine Kaufprämien, keine Mautbefreiung). Zur Bestimmung der voraussichtlichen Anschaffungskosten der Antriebstechnologien im Jahr 2030 wurde ein komponentenbasiertes Modell verwendet und mit aktuellen Literaturquellen abgeglichen. Die Energiekosten orientieren sich an Annahmen der Nationalen Plattform Mobilität (NPM)², ebenso die Nichtberücksichtigung der Infrastrukturkosten einschließlich der Kosten für betriebliche Ladeinfrastruktur in den Nutzerkosten (eine mögliche Umlage wird als Sensitivität betrachtet).

Den notwendigen drastischen THG-Minderungen im Verkehrssektor stehen weiter steigende Emissionen des Lkw-Verkehrs entgegen.

Die Ergebnisse der Studie setzen wirtschaftliche und klimapolitische Potentiale der Lkw-Antriebstechnologien miteinander in Relation und zeigen sinnvolle Einsatzgebiete auf.

Die Vollkosten verschiedener Antriebstechnologien werden für einzelne Einsatzprofile berechnet und daraus deutschlandweite Gesamtpotentiale bestimmt.

¹ Diese Technologien wurden auch vom Bundesverkehrsministerium im „Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge“ vom November 2020 für vertiefte Untersuchungen und Praxistests ausgewählt.

² Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, AG1: [Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge - Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus Elektrifizierung](#). Dezember 2020.

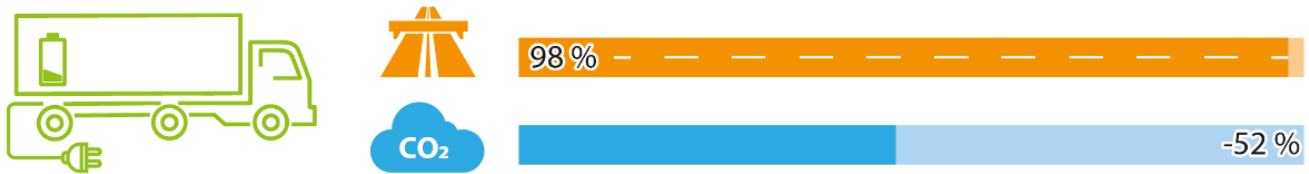
Für die ausschließliche Anwendung einzelner Antriebstechnologien ergab die Analyse der wirtschaftlichen Einsatzpotentiale¹ gegenüber Diesel-Lkw für das Jahr 2030 folgende Erkenntnisse:

Direktstromantriebe (Batterie- und Oberleitungs-Lkw) verursachen bei aus heutiger Sicht erwarteten Strompreisen erheblich geringere Energiekosten als Diesel-Lkw. Brennstoffzellen-Lkw können hingegen nur bei sehr optimistischen Annahmen bezüglich der Wasserstoffpreise im Jahr 2030 Betriebskosteneinsparungen gegenüber Diesel-Lkw realisieren.

Energiekosten sind künftig der wichtigste Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Lkw.

Trotz auch im Jahr 2030 noch deutlich höherer Anschaffungskosten kann von Batterie-Lkw im Basisfall für nahezu alle betrachteten Einsatzprofile ein Vollkostenvorteil gegenüber Diesel-Lkw erwartet werden. Batterie-Lkw rechnen sich aus Nutzersicht dann also durchweg auch ohne Fördermaßnahmen. Die Höhe des Kostenvorteils hängt aber auf Fernstrecken stark davon ab, ob durch eine Zwischenladung sehr große Batterien vermieden werden können. Zudem haben die zu erwartenden Strompreise für die Zwischenladung einen großen Einfluss auf die wirtschaftliche Eignung solcher Profile für Batterie-Lkw.²

Batterie-Lkw weisen Kostenvorteile in unterschiedlicher Höhe für fast alle Einsatzprofile auf.



Anteil der innerdeutschen Lkw-Kilometer, bei denen die neue Technologie 2030 günstiger sein wird als Diesel-Lkw

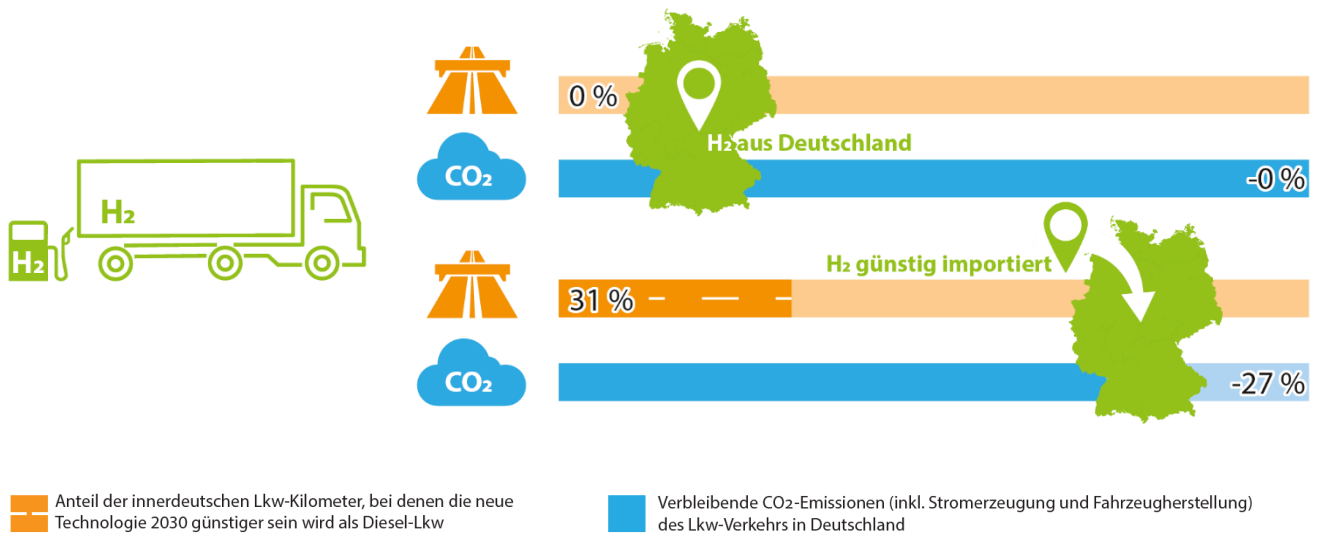
Verbleibende CO₂-Emissionen (inkl. Stromerzeugung und Fahrzeugherstellung) des Lkw-Verkehrs in Deutschland

Für Brennstoffzellen-Lkw gibt es nur bei Annahme sehr günstigen Import-Wasserstoffs (zum Preis von 4,57 €/kg_{H₂}) ein wirtschaftliches Einsatzpotential gegenüber Diesel-Lkw, das bei etwa 31 % der innerdeutschen Lkw-Fahrleistung liegt. Werden Brennstoffzellen-Lkw hingegen mit in Deutschland hergestelltem Wasserstoff betrieben, so haben sie mittelfristig kein wirtschaftliches Anwendungspotential.

Brennstoffzellen-Lkw finden nur im Falle sehr geringer H₂-Kosten Anwendungsnischen.

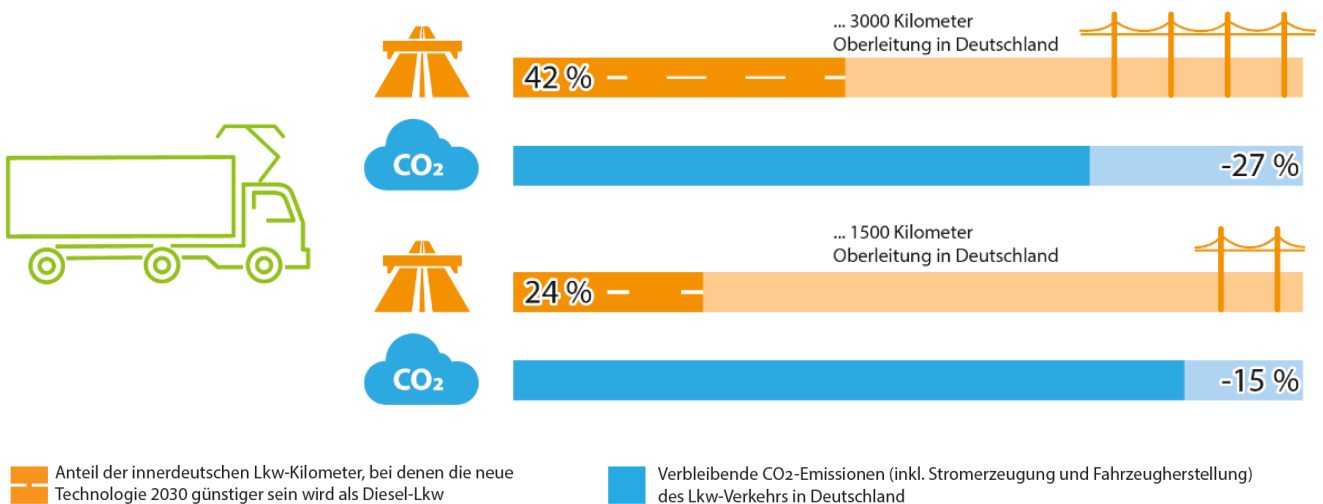
¹ Unter einem „wirtschaftlichen Einsatzpotential“ wird hier der Fahrleistungsanteil solcher Einsatzprofile verstanden, bei denen neu zugelassene Lkw mit alternativem Antrieb im Jahr 2030 einen Vollkostenvorteil (TCO) gegenüber einem Diesel-Neufahrzeug realisieren können. Die Größe bildet somit die aus heutiger Sicht wahrscheinliche Realität auf dem Fahrzeugmarkt im Jahr 2030 ab und nicht die voraussichtliche Technologieverteilung im Fahrzeugbestand dieses Jahres. Aufgrund der begrenzten Erneuerungsgeschwindigkeit der Fahrzeugflotte ist davon auszugehen, dass der Anteil alternativ angetriebener Lkw im Bestand deutlich niedriger liegen wird als die nachfolgend gezeigten Potentiale.

² Im ersten Teilbericht dieses Vorhabens („Potentialanalyse Batterie-Lkw“) wurden die Strompreise für Zwischenladung mit hoher Leistung empirisch abgeleitet und sind deutlich höher als die hier zugrunde gelegten Annahmen der NPM. Daraus ergibt sich ein höheres Potential in der vorliegenden Untersuchung.



Oberleitungs-Lkw können in Abhängigkeit von der Länge des Oberleitungsnetzes vor allem auf langen Strecken wirtschaftliche Vorteile gegenüber Diesel-Lkw erzielen. Bei einem angenommenen Basisnetz von 3.050 km Länge auf deutschen Autobahnen erreichen O-Lkw für 42 % der Gesamtfahrleistung¹ einen Kostenvorteil gegenüber Diesel-Lkw. Bezogen auf Einsatzprofile prinzipiell geeigneter Fahrzeugklassen (Lkw > 12 t), die das Oberleitungsnetz berühren, sind es 77 % der Fahrleistung. Bei Annahme eines weniger stark ausgebauten Netzes von 1.450 km Länge sind es 24 % der Gesamtfahrleistung bzw. 57 % der Fahrleistung geeigneter Fahrzeugklassen auf Einsatzprofilen mit Oberleitungskontakt. Rein elektrische Oberleitungs-Lkw (O-BEV) sind im Zeithorizont 2030 dabei in der Regel kostenseitig vorteilhafter als Diesel-Hybridfahrzeuge (O-HEV).

Oberleitungs-Lkw zeigen im Einzugsbereich eines Oberleitungs-Basisnetzes stabile Kostenvorteile für mittlere und lange Strecken.



¹ Für die O-Lkw-Technologie kommen nur Fahrzeuge mit zGG > 12 t in Frage. Davon entfallen je nach Netzlänge und Fahrzeugklasse etwa 40-70 % der Fahrleistung auf Einsatzprofile, die mindestens an einer Stelle Kontakt mit dem angenommenen Oberleitungsnetz haben.

Für die theoretisch erzielbaren THG-Minderungen durch Einsatz der einzelnen Technologien im Jahr 2030 bedeutet dies folgendes: Batterie-Lkw haben aufgrund ihres hohen wirtschaftlichen Potentials und vergleichsweise hoher spezifischer Minderungen das mit Abstand höchste absolute CO₂-Minderungspotential, das auch unter Berücksichtigung der Fahrzeugherstellung etwa 52 % der Emissionen des Referenzfalls entspricht. Bei Brennstoffzellen-Lkw ergibt sich bei Nutzung von in Deutschland erzeugtem Elektrolysewasserstoff kein wirtschaftliches Potential und somit auch keine THG-Minderung. Bei Nutzung importierten, vollständig erneuerbaren Wasserstoffs könnten spezifische THG-Minderungen von bis zu 71 % pro Fahrzeug-km und damit unter Berücksichtigung des wirtschaftlichen Potentials Minderungen der Gesamtemissionen von bis zu 27 % erreicht werden¹. Dieses Szenario weist jedoch offene Fragen bezüglich der Umsetzbarkeit, Nachhaltigkeit und Klimateffizienz auf. Eine Vergleichbarkeit mit den Szenarien, die den nationalen Strommix nutzen, ist durch die ausschließliche Berücksichtigung erneuerbaren Stroms nicht gegeben. Oberleitungs-Lkw erreichen in ihrem Anwendungsbereich hohe spezifische Minderungen von durchschnittlich 54 % (vergleichbar mit BEV) und können bezogen auf die Gesamtemissionen je nach Netzausbau zwischen 15 % und 27 % Emissionseinsparung erzielen. Bei allen vorgenannten Minderungspotentialen handelt es sich um theoretische Obergrenzen, die nur im Falle einer vollständigen Ausschöpfung des jeweiligen wirtschaftlichen Potentials im Jahr 2030 realisiert werden könnten.

Durch Batterie-Lkw können bei Ausschöpfung des wirtschaftlichen Potentials in 2030 theoretisch mehr als die Hälfte der THG-Emissionen (inkl. Fahrzeugherstellung) des innerdeutschen Lkw-Verkehrs eingespart werden.

Zur Berechnung eines kostenoptimalen Antriebsportfolios für den Lkw-Verkehr im Jahr 2030 wurden alle betrachteten Technologien hinsichtlich ihrer Vollkosten auf Ebene einzelner Fahrzeugeinsatzprofile verglichen. Dabei wurde ein Oberleitungsnetz von 3.050 km Länge unterstellt. Es zeigt sich, dass BEV-Antriebe den resultierenden Technologiemix dominieren (etwa 68 % der Fahrleistung). Auf langen Strecken mit hinreichendem Oberleitungsanteil werden sie durch O-Lkw (überwiegend O-BEV) ergänzt, die hier gegenüber BEV einen Kostenvorteil erreichen können.



Anteil der innerdeutschen Lkw-Kilometer, bei denen die neue Technologie 2030 günstiger sein wird als Diesel-Lkw

Verbleibende CO₂-Emissionen (inkl. Stromerzeugung und Fahrzeugherstellung) des Lkw-Verkehrs in Deutschland

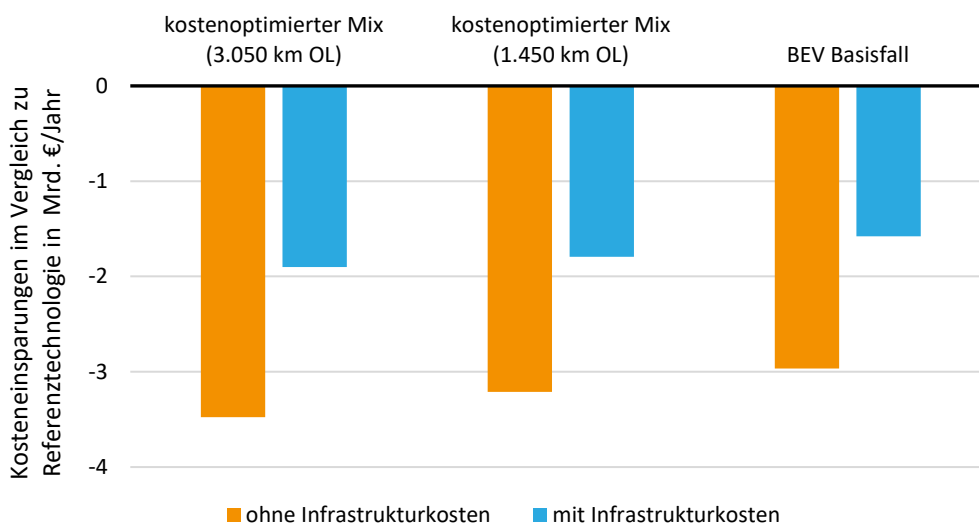
¹ Angenommen wird hier ein Import aus der MENA-Region über Pipeline, wobei für die H₂-Elektrolyse dort zu zwei Dritteln Windstrom und zu einem Drittel PV-Strom zum Einsatz kommen. Dies führt zu spezifischen THG-Minderungen gegenüber Diesel-Lkw pro Fzg.-km von etwa 70 %. Die Infrastruktur für EE-Erzeugung und Elektrolyse sind in die THG-Bilanz eingeschlossen.

Dieselantrieb und Brennstoffzellenantrieb sind im kostenoptimierten Technologiemitmix nicht vertreten. Bei Annahme in Deutschland produzierten Wasserstoffs ergibt sich eine Kostenslücke von etwa 30-40 % zu Batterie- und Oberleitungs-Lkw, so dass auch deutlich günstigere Energiepreisentwicklungen als hier angenommen keine Änderung erwarten lassen. Kann mit Importwasserstoff ein besonders günstiger Preis realisiert werden (Annahme: 4,57 €/kg_{H2}), so erreichen Brennstoffzellen-Lkw zumindest für einen gewissen Teil der Einsatzprofile annähernd Kostenparität gegenüber Batterie-/Oberleitungs-Lkw. Für 24 % der Gesamtfahrleistung beträgt der Kostennachteil weniger als 5 %. Die Kostenunterschiede aller alternativen Antriebe zum Diesel-Lkw hängen stark von den künftigen CO₂- und Strompreisen ab.

Ein Mix aus Batterie-Lkw und Oberleitungs-Lkw wird für Lkw-Betreiber voraussichtlich mit den geringsten Kosten verbunden sein.

Lkw-Betreiber können bei Realisierung des kostenoptimalen Technologieportfolios (und unveränderten Rahmenbedingungen) gegenüber dem Referenzfall TCO-Einsparungen von jährlich ca. 3,5 Mrd. € erwarten. Wird kein Oberleitungsausbau angenommen und werden folglich ausschließlich Batterie-Lkw eingesetzt, so verringert sich der jährliche Kostenvorteil der Betreiber um etwa 500 Mio. €. Die Einsparungen steigen also mit zunehmendem Oberleitungsausbau, liegen aber in Anbetracht der Unsicherheiten in allen Fällen auf ähnlichem Niveau. Eine vollständige Umlage der Infrastrukturkosten auf die Betreiber hat jeweils in etwa eine Halbierung der Einsparungen zur Folge.

Durch vollständigen Umstieg auf direkte Stromnutzung könnten Lkw-Betreiber mehrere Mrd. Euro jährlich einsparen.

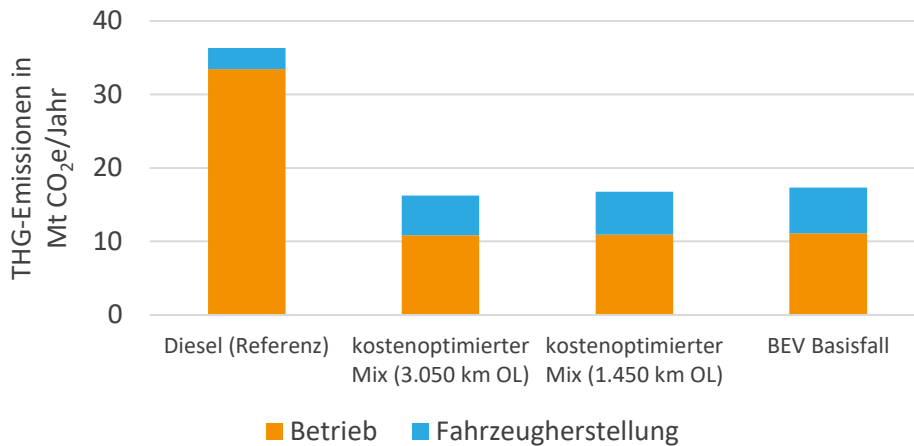


Jährliche Einsparungen der Lkw-Betreiber bei Realisierung der drei kostengünstigsten Technologieportfolios (Bezugsjahr 2030). Werden die Infrastrukturkosten auf die Betreiber umgelegt, so reduzieren sich die Einsparungen auf die blauen Balken (eigene Berechnungen).

Alle kostenoptimierten Technologieportfolios erreichen THG-Einsparungen gegenüber der Diesel-Referenz zwischen 52 % und 55 % (inkl. Energiebereitstellung und Fahrzeugherstellung) und gut 65 % in einer reinen Well-to-Wheel-Betrachtung. Das entspricht einem absoluten THG-Minderungspotential von ca. 20 Mt jährlich¹. Die Fahrzeugherstellung gewinnt bei den Emissionen v.a. durch den Batteriebedarf der elektrischen Flotte an Bedeutung (etwa 35 % Anteil der Herstellung ggü. 8 % in der Diesel-Referenz). Durch ein Oberleitungssystem lassen sich jährlich bis zu 14,5 GWh Batteriekapazität einsparen (entspricht 26 % bezogen auf die gesamte Lkw-Flotte).

Bei Realisierung des kostengünstigsten Technologiemixes könnten theoretisch gut die Hälfte der THG-Emissionen gegenüber Diesel-Lkw eingespart werden.

¹ Auch hier handelt es sich um ein theoretisches Potential, das die begrenzte Geschwindigkeit der Flottenenerneuerung nicht berücksichtigt.



Jährliche Treibhausgasemissionen der alternativ angetriebenen Lkw für die betrachteten Technologieportfolios (eigene Berechnungen).

Die berechneten THG-Minderungspotentiale unterstreichen, dass selbst bei vollständiger und unmittelbarer Ausschöpfung der wirtschaftlichen Potentiale alternativer Antriebstechnologien im Jahr 2030 weiterhin erhebliche CO₂-Emissionen durch neu zugelassene Lkw verursacht werden, die dann aber in der Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung entstehen. Insbesondere Maßnahmen zur Verringerung der Transportleistung (Vermeidung) und Verlagerung auf den systemisch effizienteren Verkehrsträger Schiene sind damit weiterhin entschieden voranzutreiben, um die gesteckten Klimaziele erreichen zu können. Zusätzlich bleibt die Defossilisierung der Herstellungsprozesse und Energieerzeugung auch nach 2030 eine wichtige Aufgabe.

Aus den Ergebnissen ziehen wir für die Gestaltung der Antriebswende im Straßengüterverkehr folgende Schlussfolgerungen:

- Die Gesamtfahrleistung und das Wirtschaftlichkeitspotential werden stark vom Lkw-Segment > 26 t bestimmt. Insbesondere für dieses Segment müssen in den nächsten Jahren daher Fahrzeuge und Infrastruktur für alternative Antriebe entwickelt werden.
- Batterie-Lkw dürften zukünftig das Rückgrat eines kosteneffizienten Straßengüterverkehrs bilden; die Ergebnisse der Studie sind diesbezüglich sehr robust. Ein bedarfsgerechter Ausbau von Ladeinfrastruktur im betrieblichen Bereich (v.a. in Depots und an Laderampen) sollte daher entschieden vorangetrieben werden.
- Mit öffentlichen Hochleistungsschnellladern ist prinzipiell der Einsatz von Batterie-Lkw im Fernverkehr auch auf längeren Strecken möglich. Die dafür benötigten Batterie-Lkw mit Reichweiten von etwa 500 km könnten 2030 kostenseitig gegenüber Diesel-Lkw in vielen Fällen konkurrenzfähig sein, wobei die Kosten aufgrund der großen Batterien voraussichtlich relativ eng beieinanderliegen werden. Die Stromkosten insbesondere für schnelles Zwischenladen mit hoher Leistung sind dabei eine wichtige Variable.
- Die Stromversorgung per Oberleitung kann für einen Teil dieser Einsatzprofile leichte Kostenvorteile gegenüber dem Einsatz von Batterie-Lkw mit Hochleistungszwischenladung bieten. Sowohl Systemkosten als auch THG-Emissionen von batterieelektrischen Szenarien mit und ohne Einsatz von Oberleitungen liegen allerdings relativ nah beieinander. Bei der Frage, ob Oberleitungen zukünftig eine sinnvolle Ergänzung für die Stromversorgung von Lkw sein können, spielen jedoch weitere Aspekte eine wichtige Rolle, insbesondere

Die Ergebnisse zeigen die Grenzen möglicher THG-Minderungen durch einen ausschließlichen Antriebswechsel. Vermeidung und Verlagerung sind für die Erreichung der Klimaziele voraussichtlich elementar.

Last- und Sattelzüge dominieren Fahrleistung und THG-Emissionen.

Batterie-Lkw müssen künftig eine zentrale Rolle spielen.

Der Preis für das Hochleistungszwischenladen ist für Batterie-Lkw im Fernverkehr von großer Bedeutung.

Die Sinnhaftigkeit von Oberleitungen für Lkw hängt nicht nur von wirtschaftlichen, sondern zusätzlich von etlichen betrieblichen und energie-systemischen Aspekten ab.

- die betriebliche Realisierbarkeit und Skalierbarkeit stationären Hochleistungsschnellladens entlang der Fernstraßen bei hohen Durchdringungsraten von Batterie-Lkw (Flächenverfügbarkeit, betriebliche Resilienz, Netzintegration etc.)
- Auswirkungen auf das Energiesystem und die Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen
- die Konsequenzen verschiedener Ressourcenbedarfe der Antriebstechnologien und ihrer Infrastruktur, insbesondere der Rohstoffe für Traktionsbatterien
- die Konsequenzen längerfristiger Verkehrsverlagerung auf die Schiene für sinnvolle Endausbauzustände von Infrastrukturen des Straßengüterverkehrs
- Batterie-Lkw und rein elektrische Oberleitungs-Lkw (O-BEV) weisen grundsätzlich ähnliche Fahrzeugarchitekturen auf und sind für den Einsatz im Fernverkehr gleichermaßen darauf angewiesen, dass erhebliche elektrische Anschlusskapazitäten an den Bundesfernstraßen bereitgestellt werden. Ein entschiedenes Vorantreiben dieser Fahrzeugtechnologien in Richtung Massenmarkt sowie der netztechnischen Voraussetzungen für ihre jeweiligen Infrastrukturen stellen daher nach aktuellem Kenntnisstand No-Regret-Optionen für staatliches Handeln dar. Dazu gehört auch die zügige Umsetzung großer Pilotvorhaben für diese Technologien, wie sie im Rahmen der sogenannten „Innovationskorridore“ durch das BMDV geplant werden.
- Brennstoffzellen-Lkw werden aus heutiger Sicht mittelfristig jenseits von Nischenanwendungen¹ zumindest für Verkehre in Deutschland nur mit fortdauernden staatlichen Eingriffen konkurrenzfähig zu betreiben sein. Der Einsatz von Elektrolysewasserstoff aus nationaler Produktion ist bis 2030 nicht wirtschaftlich und die Verfügbarkeit günstigen Import-Wasserstoffs aus erneuerbaren Energien muss angesichts starker Nutzungskonkurrenzen mittelfristig als fraglich angesehen werden. Die erzielbaren THG-Minderungen sind in einer Lebenswegbetrachtung zudem mittelfristig aufgrund der hohen Konversionsverluste nur bei nahezu vollständig erneuerbarer H₂-Erzeugung mit denen von mit nationalem Strommix betriebenen Batterie-Lkw vergleichbar. Andererseits versprechen sich viele Lkw-Betreiber angesichts mangelnder Erfahrungen mit Ladeinfrastruktur und darauf abgestimmter Einsatzplanung betriebliche Vorteile durch den Einsatz von Brennstoffzellen-Lkw. Um die klimapolitische Effektivität und die systemische Kosteneffizienz der Antriebswende sicherzustellen, sollte der Schwerpunkt staatlichen Handelns in den kommenden Jahren jedoch darauf liegen, direkte Stromnutzung im Lkw-Verkehr für breite Marktsegmente zu ermöglichen und insbesondere betrieblichen Bedenken von Lkw-Betreibern durch umfangreiche Praxistests und ggf. Übernahme von Risiken zu begegnen.

Der Anschluss des Fernstraßennetzes an die Stromnetze und die großmaßstäbliche Pilotierung von Batterie- und Oberleitungs-Lkw stellen No-Regret-Optionen staatlichen Handelns dar.

Brennstoffzellen-Lkw werden voraussichtlich nur im Falle fortdauernder staatlicher Eingriffe für größere Teile des innerdeutschen Transportmarktes konkurrenzfähig zu betreiben sein.

Die vorliegende Untersuchung setzt wirtschaftliche und klimapolitische Potentiale verschiedener Lkw-Antriebstechnologien miteinander in Relation und zeigt sinnvolle Einsatzgebiete auf. Um aus den Ergebnissen realistisch erreichbare Treibhausgaseinsparungen bis 2030 abzuleiten, ist eine Markthochlaufmodellierung unter konkreten Annahmen für zukünftige klimapolitische Maßnahmen auf der Zeitachse notwendig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Zusätzlich sind weitere Erkenntnisse durch die Betrachtung infrastruktureller Restriktionen zu erwarten, die im weiteren Verlauf des Vorhabens „My eRoads“ geplant ist.

¹ Solche Nischen können beispielsweise entstehen, wenn Brennstoffzellen-Lkw mit lokal erzeugtem Wasserstoff betankt werden, der mangels Transportinfrastruktur nicht zu Marktpreisen angeboten werden kann.

Executive Summary

In the development of effective strategies to drastically reduce greenhouse gas (GHG) emissions from the transport sector, road freight transport is increasingly coming into focus. At just under 50 Mt CO₂ per year, it is responsible for around one third of transport-related emissions in Germany (with an upward trend). In contrast to passenger transport, where battery electric cars are already gaining market acceptance with subsidies, there is still a lack of market-ready technical solutions for road freight transport. According to the Federal Climate Change Act amended in June 2021, emissions from the entire transport sector are to be reduced by around 45% to 85 Mt CO₂ per year by 2030. The German government will have to break down this immense challenge into targets and measures for road freight transport and decide (beyond the necessary shift to rail), among other things, what framework should be established for various drive technologies.

The core of this study is a comparative analysis of the economic potential of various truck drive technologies for the year 2030. Based on expected technical and economic developments in drive technologies, we have calculated for which applications which drive technology will be profitable for truck operators in 2030 compared to diesel trucks and which of the available technologies is associated with the lowest costs in each case. In addition, the study includes a quantification of the GHG reduction potentials, taking into account the operation, energy supply and production of the trucks. We considered battery electric drive, fuel cell drive and a power supply via overhead line¹. The results of the study relate the economic and climate policy potential of truck drive technologies to each other and show suitable areas of application. However, they should not be misinterpreted as market ramp-up modelling under concrete assumptions for future climate policy measures.

The full costs of various drive technologies are determined at the level of individual mission profiles and the total potentials for Germany are derived from this. Since we suppose a mass market for alternative drive systems in 2030, we assume that the current subsidies will have expired by then (no purchase rebates, no toll exemptions). To determine the expected acquisition costs of the drive technologies in 2030, a component-based model was used and compared with current literature sources. The energy costs are based on assumptions of the National Platform Future of Mobility (NPM)², as is the exclusion of infrastructure costs, including the costs for operational charging infrastructure in the user costs (a possible levy is considered as a sensitivity).

The necessary drastic GHG reductions in the transport sector are contrasted by further increases in emissions from truck traffic.

The results of the study relate the economic and climate policy potential of truck drive technologies to each other and show suitable areas of application.

The full costs of various drive technologies are calculated for individual application profiles and the total potentials for Germany are derived on this basis.

¹ These technologies were also considered by the Federal Ministry of Transport in the "Overall Concept for Climate-Friendly Commercial Vehicles" ([„Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge“](#)) of November 2020 for in-depth studies and practical tests.

² National Platform Future of Mobility, AG1: [Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge - Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus Elektrifizierung](#), December 2020.

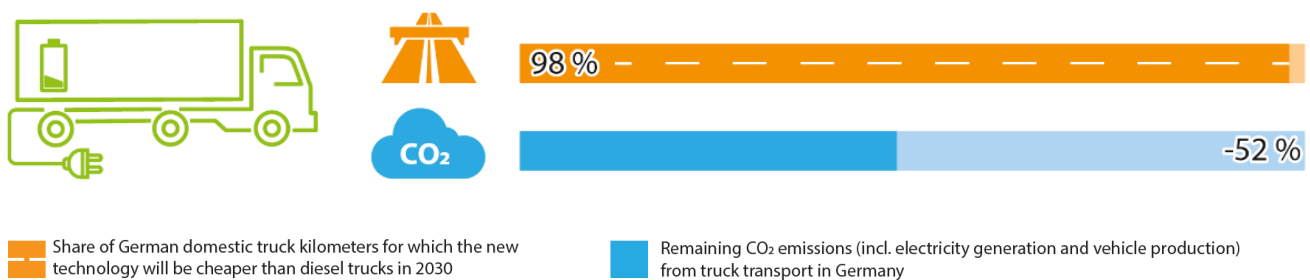
For the exclusive application of individual drive technologies, the analysis of the economic application potentials¹ compared to diesel trucks for the year 2030 resulted in the following findings:

Drives directly using electricity (battery and overhead line trucks) cause significantly lower energy costs than diesel trucks at electricity prices expected from today's perspective. Fuel cell trucks, by contrast, can only realize operating cost savings compared to diesel trucks in 2030 under very optimistic assumptions regarding hydrogen prices.

In the future, energy costs will be the most important factor for the profitability of trucks.

Despite significantly higher acquisition costs even in 2030, battery electric trucks can be expected to have a full-cost advantage over diesel trucks in the base case for almost all the application profiles considered. From the user's point of view, battery electric trucks will then be consistently profitable even without subsidy measures. However, the level of the cost advantage on long-distance routes depends to a large extent on whether very large batteries can be avoided by means of intermediate charging. In addition, the expected electricity prices for intermediate charging have a major influence on the economic suitability of such profiles for battery electric trucks.²

Battery electric trucks have cost advantages to varying degrees for almost all application profiles.

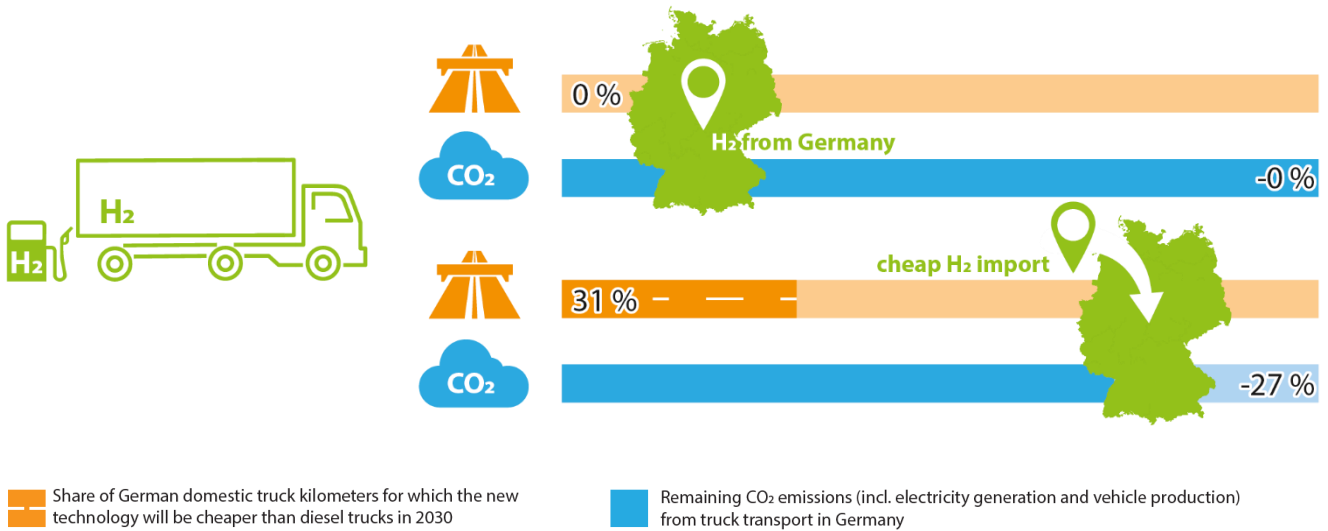


For fuel cell trucks, there is only an economic application potential compared to diesel trucks assuming very cheap imported hydrogen (at a price of 4.57 €/ kgH₂). In this case, the economic application potential is about 31 % of the domestic truck mileage.

Fuel cell trucks will only find application niches in the case of very low H₂ costs.

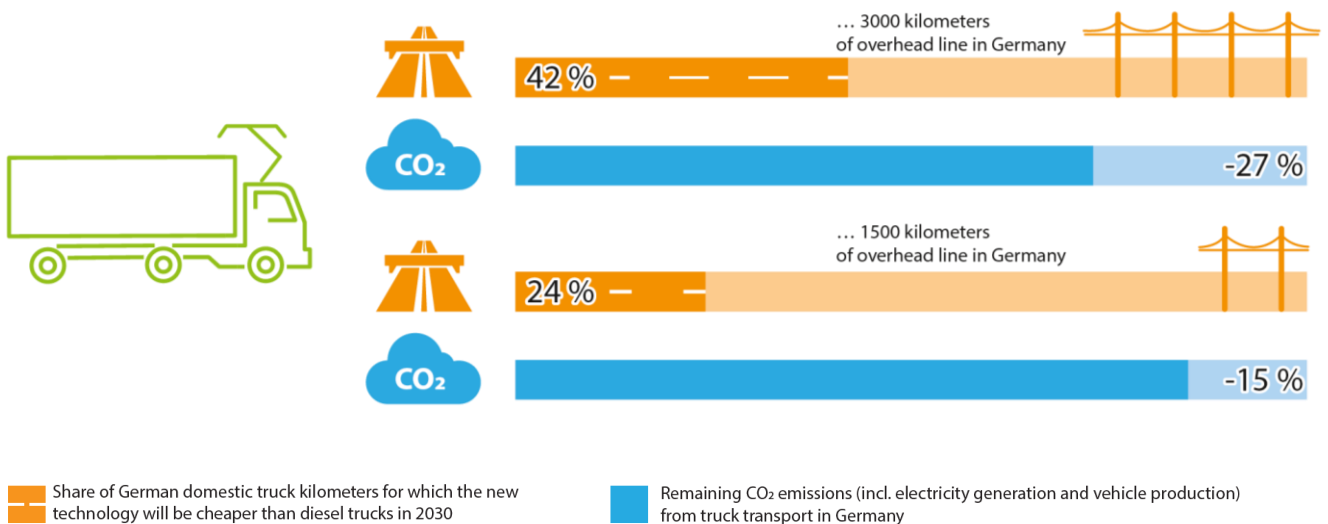
¹ The term "economic application potential" is used here to refer to the mileage share of application profiles in which newly registered trucks with alternative drive systems can realize a total cost of ownership (TCO) advantage over a new diesel vehicle in 2030. The parameter thus represents the probable reality on the vehicle market in 2030 from today's perspective and not the anticipated technology distribution in the vehicle stock of that year. Due to the limited renewal rate of the vehicle fleet, it can be assumed that the share of alternatively powered trucks in the stock will be significantly lower than the potentials shown below.

² In the first interim report of this project ("Potentialanalyse Batterie-Lkw"), the electricity prices for intermediate charging with high power were derived empirically and are significantly higher than the NPM assumptions used here. This results in a higher potential in the present study.



Depending on the length of the overhead line network, catenary trucks can achieve cost advantages over diesel trucks, especially on long routes. Assuming a basic network of 3,050 km on German highways, catenary trucks realize a cost advantage over diesel trucks for 51 % of the total mileage¹. In relation to those application profiles that touch the overhead line network, it is 77 % of the mileage (trucks > 12 t). Assuming a less developed network of 1,450 km, it is 29 % of the total mileage or 57 % of the mileage of usage profiles with contact to the overhead line. In the 2030 time horizon, purely electric overhead line catenary trucks (O-BEV) generally have a higher cost advantage than diesel hybrid vehicles (O-HEV).

In the catchment area of an overhead line base network, catenary trucks show stable cost advantages for medium and long distances.



¹ Only vehicles with a gross vehicle weight > 12 t are eligible for catenary truck technology. Depending on the length of the network and vehicle class, about 40-70 % of the mileage is accounted for by application profiles that have contact with the assumed overhead line network at at least one point.

For the theoretically achievable GHG reductions through the use of the individual technologies in 2030, this means the following: Battery electric trucks have by far the highest absolute CO₂ reduction potential due to their high economic potential and comparatively high specific reductions, corresponding to about 52 % of the emissions of the reference case even under consideration of vehicle production. In the case of fuel cell trucks, the use of electrolysis hydrogen produced in Germany results in no economic potential and thus no GHG reduction. Using imported, fully renewable hydrogen, specific GHG reductions of up to 71 % per vehicle km could be achieved and thus, taking into account the economic potential, reductions in total emissions of up to 27 %¹. However, this scenario has open questions regarding feasibility, sustainability and climate efficiency. Comparability with the scenarios using the national electricity mix is not given due to the exclusive consideration of renewable electricity. In their field of application, catenary trucks achieve high specific reductions of 54 % on average (comparable to BEVs) and can achieve emission savings between 9 % and 19 % in relation to total emissions, depending on the network length. All of the above-mentioned reduction potentials are theoretical upper limits that could only be realized if the respective economic potentials were fully exploited in 2030.

Battery trucks can theoretically save half of GHG emissions (incl. vehicle production) of domestic truck traffic in 2030 if the economic potential is exploited.

To calculate a cost-optimal drive portfolio for truck traffic in 2030, all technologies considered were compared in terms of their full costs at the level of individual vehicle usage profiles. An overhead line network of 3,050 km in length was assumed. It can be seen that BEV drives dominate the resulting technology mix (about 68% of the mileage). On long routes with a sufficient share of overhead lines, they are supplemented by catenary trucks (predominantly O-BEVs), which can achieve a cost advantage compared to BEVs.



Share of German domestic truck kilometers for which the new technology will be cheaper than diesel trucks in 2030

Remaining CO₂ emissions (incl. electricity generation and vehicle production) from truck transport in Germany

Diesel drive and fuel cell drive are not represented in the cost-optimized technology mix. Assuming hydrogen produced in Germany, there is a cost gap of about 30-40 % to battery electric and catenary trucks, so that even significantly more favourable energy price developments than assumed here do not lead to any change. If a particularly low price can be realized with imported hydrogen (assumption: 4.57 €/kg_{H₂}), fuel cell trucks achieve nearly cost parity with battery electric/catenary trucks, at least for a certain share of the usage profiles. For 24 % of the total mileage, the cost disadvantage is less than 5%. The cost dif-

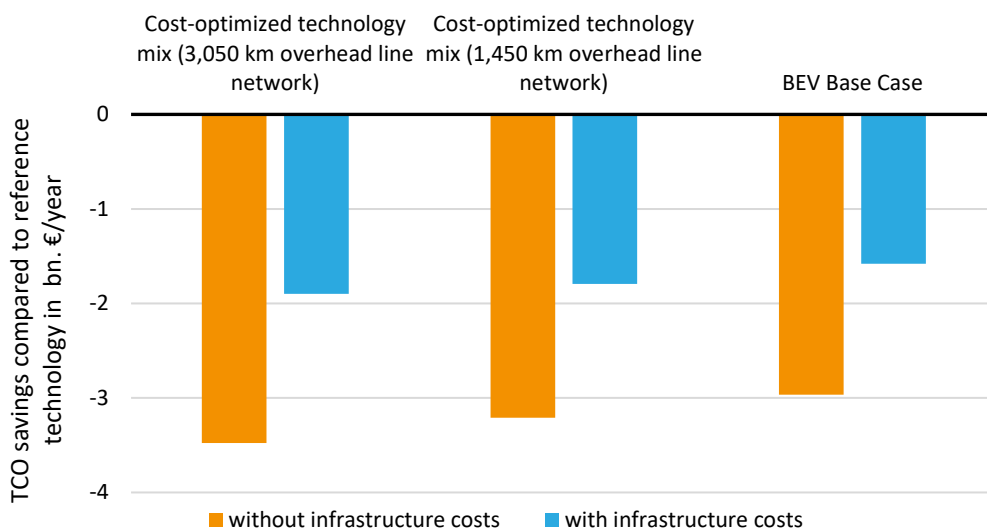
A mix of battery electric trucks and overhead line catenary trucks is expected to be the least costly for truck operators.

¹ Assumed here is an import from the MENA region via pipeline, with two-thirds wind power and one-third PV power being used for H₂ electrolysis there. This leads to specific GHG reductions compared to diesel trucks per vehicle km of about 70 %. The infrastructure for RE generation and electrolysis are included in the GHG balance.

ferences between all alternative drive systems and diesel trucks depend heavily on future CO₂ and electricity prices.

Truck operators can expect annual TCO savings of around 3.5 billion € compared with the reference case if the cost-optimal technology portfolio is realized (and the framework conditions remain unchanged). If no overhead line expansion is assumed and battery electric trucks are used exclusively, the operators' annual cost advantage is reduced by about 500 million €. The cost savings thus increase with overhead line expansion, but are nevertheless at a similar level taking into account the uncertainty. A complete allocation of the infrastructure costs to the operators halves the cost savings in all cases.

Truck operators could save several billion euros a year by switching completely to direct electricity use.

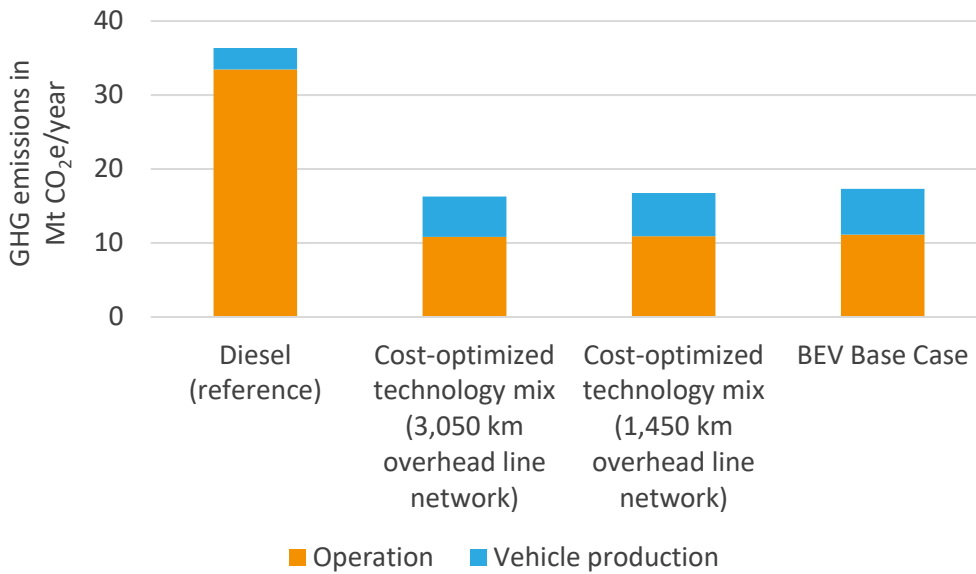


Annual savings for truck operators if the three most cost-effective technology portfolios are implemented (reference year 2030). If the infrastructure costs are allocated to the operators, the savings are reduced to the blue bars (own calculations).

All cost-optimized technology portfolios achieve GHG savings between 52 % and 55 % compared to the diesel reference (including energy supply and vehicle production) and a good 65 % in a pure well-to-wheel consideration. This corresponds to an absolute GHG reduction potential of around 20 Mt per year¹. Vehicle production is gaining in importance in terms of emissions, mainly due to the battery requirements of the electric fleet (approx. 35 % share of production compared to 8 % in the diesel reference). An overhead line system can save up to 14.5 GWh of battery capacity per year (equivalent to 26 % of the total truck fleet).

By implementing the most cost-effective technology mix, a good half of the GHG emissions could theoretically be saved compared to diesel trucks.

¹ Again, this is a theoretical potential that does not take into account the limited fleet renewal rate.



Annual greenhouse gas emissions of alternative drive trucks for the technology portfolios considered (own calculations).

The calculated GHG reduction potentials underline that even if the economic potential of alternative drive technologies is fully and directly exploited in 2030, significant CO₂ emissions will continue to be caused by newly registered trucks. These emissions will then arise in vehicle production and energy provision. In particular, measures to reduce transport performance (avoidance) and shift to the systemically more efficient rail mode of transport must therefore continue to be driven forward decisively in order to be able to achieve the climate targets that have been set. In addition, the defossilization of manufacturing processes and energy generation will remain an important mission even after 2030.

The results show the limits of possible GHG reductions through an exclusive change of drives. Avoidance and modal shift are expected to be elementary for achieving the climate targets.

From the results, we draw the following conclusions for the shaping of the drive train transition in road freight transport:

- The total mileage and the economic potential are dominated by the truck segment > 26 t. For this segment in particular, vehicles and infrastructure for alternative drive systems must therefore be developed in the coming years.
- Battery electric trucks are likely to form the backbone of cost-efficient road freight transport in the future; the results of the study are very robust in this respect. A demand-driven expansion of charging infrastructure in the operational area (especially in depots and at loading ramps) should therefore be decisively promoted.
- With public high-power fast chargers, the use of battery electric trucks in long-distance transport is possible in principle, even over longer distances. The battery electric trucks required for this with ranges of around 500 km could be cost-competitive with diesel trucks in many cases in 2030, although the costs are almost comparable due to the large batteries. Electricity costs, especially for fast high-power intermediate charging, are an important variable in this context.
- For some of these application profiles, power supply via overhead lines may offer slight cost advantages over the use of battery electric trucks with high-power intermediate charging. Yet, both system costs and GHG emissions of battery electric scenarios with and without the use of overhead lines are relatively close. However, other aspects play an important role in the question of whether overhead lines can be a sensible addition to the power supply for trucks in the future, in particular

Trucks and tractor-trailers dominate mileage and GHG emissions.

Battery electric trucks must play a central role in the future.

The price of high-power intermediate charging is of great importance for battery electric trucks in long-distance transport.

The usefulness of overhead lines for trucks depends not only on economic aspects, but also on a number of operational and energy-system aspects.

- operational feasibility and scalability of stationary high-power fast charging along interstate highways at high penetration rates of battery electric trucks (area availability, operational resilience, grid integration, etc.)
- impact on the energy system and the provision of flexibility options
- the consequences of different resource requirements of the drive technologies and their infrastructure, especially of the raw materials for traction batteries
- the consequences of longer-term modal shift to rail for sensible final expansion states of road freight transport infrastructures
- Battery electric trucks and purely electric overhead line catenary trucks (O-BEV) have fundamentally similar vehicle architectures and are equally dependent on the provision of considerable electrical connection capacities on federal highways for use in long-distance transport. According to the current state of knowledge, a decisive push of these vehicle technologies towards the mass market as well as the technical upgrading of the grid for their respective infrastructures therefore represent no-regret options for government action. This also includes the rapid implementation of large-scale pilot projects for these technologies, such as those planned by the German Federal Ministry of Transport within the framework of the so-called "innovation corridors".
- From today's perspective, beyond niche applications¹, fuel cell trucks will only be able to operate competitively in the medium term, at least for transport in Germany, with continued government intervention. The use of electrolysis hydrogen from national production is not economically viable until 2030, and the availability of inexpensive import hydrogen from renewable energies must be regarded as questionable in the medium term in view of strong competition for use. Moreover, the achievable GHG reductions in a life cycle assessment are in the medium term, due to the high conversion losses, only in the case of almost completely renewable H₂ generation comparable with those of battery electric trucks powered by the national electricity mix. On the other hand, many truck operators expect operational advantages from the use of fuel cell trucks due to a lack of experience with charging infrastructure and the corresponding operational planning. However, in order to ensure the climate policy effectiveness and systemic cost efficiency of the drive train transition, the focus of government action in the coming years should be on enabling the direct use of electricity in truck transport for a broad range of market segments and, in particular, on addressing operational concerns of truck operators through extensive practical tests and, if necessary, the takeover of risks.

This study compares the economic and climate policy potentials of different truck drive technologies and identifies sensible areas of application. In order to determine realistically achievable greenhouse gas savings by 2030 from the results, market ramp-up modelling under concrete assumptions for future climate policy measures on the time axis is necessary. Further research is needed in this area. In addition, further findings can be expected from the consideration of infrastructural restrictions, which is planned in the further course of the "My eRoads" project.

The connection of the highway network to the power grids and the large-scale piloting of battery electric and catenary trucks represent no-regret options for government action.

Fuel cell trucks will probably require continuous government intervention for competitive operation in most parts of the domestic German transport market.

¹ Such niches can arise, for example, when fuel cell trucks are fueled with locally produced hydrogen that cannot be offered at market prices due to a lack of transportation infrastructure.

Abkürzungsverzeichnis

AFI-Richtlinie	EU-Richtlinie über den Infrastrukturaufbau für alternative Kraftstoffe
BEV	Battery electric vehicle (Batteriefahrzeug)
EE	Erneuerbare Energien
FCEV	Fuel-cell electric vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
Fzg.	Fahrzeug
HEV	Hybrid electric vehicle (Hybridfzg. mit Elektro- und Verbrennungsmotor)
LIS	Ladeinfrastruktur
Lkw	Lastkraftwagen
MENA-Region	Middle East & North Africa
NPM	Nationale Plattform "Zukunft der Mobilität"
O-BEV	Oberleitungs-Batteriefahrzeug (=BEV mit Stromabnehmer)
O-HEV	Oberleitungs-Hybridfahrzeug (=HEV mit Stromabnehmer)
OL	Oberleitung
O-Lkw	Oberleitungs-Lkw (Oberbegriff für O-BEV und O-HEV)
Pkw	Personenkraftwagen
TCO	Total Cost of Ownership (Vollkosten für Fahrzeugbetreiber)
TEN-T	Trans-European Network for Transport
THG	Treibhausgase
USt	Umsatzsteuer

1 Hintergrund und Zielstellung

Im Vorhaben „My eRoads“ wird eine integrierte Elektrifizierungs- und Infrastruktur-Roadmap für Nutzfahrzeuge mit verschiedenen elektrischen Antriebskonzepten entwickelt. Mit dieser Roadmap soll die öffentliche Hand bei der Priorisierung des Aufbaus von öffentlicher Energieversorgungsinfrastruktur für Nutzfahrzeuge unterstützt werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Regional- und Fernverkehr. Zum einen hat sich in diesen Entfernungsklassen (im Gegensatz zum Batterie-Lkw im Güternahverkehr) bisher noch keine klare Vorzugstechnologie abgezeichnet. Zum anderen wird der Bedarf an öffentlicher Energieversorgungsinfrastruktur hier deutlich höher eingeschätzt als im Nahverkehr.

Als Grundlage für die Infrastruktur-Roadmap werden zunächst wirtschaftliche Einsatzpotentiale in Frage kommender Antriebstechnologien für den innerdeutschen Güterverkehr abgesteckt. Ergebnisse für Batterie-Lkw wurden zusammen mit einer detaillierten Dokumentation der Vorgehensweise bereits als Teilbericht im Juli 2021 veröffentlicht (Jöhrens et al. 2021). Der vorliegende Bericht setzt darauf auf und verallgemeinert die Vorgehensweise, um eine vergleichende Analyse der Potentiale von Batterie-Lkw, Brennstoffzellen-Lkw und Oberleitungs-Lkw zu ermöglichen.

Die Studie gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden Methodik und wichtige Annahmen kompakt beschrieben. Für ausführlichere Erläuterungen wird an verschiedenen Stellen auf den ersten Teilbericht des Vorhabens verwiesen. Darauf folgend werden zunächst die ermittelten wirtschaftlichen Potentiale der einzelnen Antriebstechnologien gegenüber dem Dieselantrieb im Bezugsjahr 2030 vorgestellt (Kapitel 3.1 bis 3.3) und hinsichtlich der Differenzkosten sowie der jährlichen Treibhausgasreduzierung verglichen (Kapitel 3.4). Sodann werden aus Vollkostensicht optimierte gemischte Portfolios der betrachteten Technologien für das Jahr 2030 abgeleitet und ebenfalls bezüglich Kosten und THG-Minderungen untereinander und mit den Einzelpotentialen verglichen (Kapitel 4).

Die Ergebnisse zeichnen ein differenziertes Bild der voraussichtlichen wirtschaftlichen Einsatzpotentiale verschiedener alternativer Lkw-Antriebe im Jahr 2030. Sie stellen somit eine Grundlage für den anstehenden Diskurs zur politischen Instrumentierung der Antriebswende im Straßengüterverkehr dar. Zudem können basierend auf den Ergebnissen im weiteren Verlauf des Vorhabens sinnvolle Ausbaupfade für Lade- und Oberleitungsinfrastruktur sowie Wasserstofftankstellen abgeleitet werden.

Das Wechselspiel zwischen Transportmarkt, Fahrzeugmarkt und regulatorischen Anforderungen bildet einen wichtigen Hintergrund zum Verständnis der vorliegenden Studie. Hierzu sei insbesondere auf den ersten Teilbericht des StratES-Projekts (Göckeler et al. 2020) verwiesen sowie hinsichtlich des Marktumfelds für Batterie-Lkw auf den ersten Teilbericht dieses Forschungsvorhabens (Jöhrens et al. 2021).

2 Methodik, Datengrundlagen und Annahmen

2.1 Einsatzprofile der Fahrzeuge

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen dieser Studie werden auf Basis des deutschlandweiten Verkehrsmodells PTV Validate sowie diverser Statistiken zum Nutzfahrzeugverkehr in Deutschland Lkw-Einsatzprofile abgeleitet. Im Einzelnen ist das Vorgehen im Teilbericht „Potentialanalyse für Batterie-Lkw“ dieses Vorhabens dokumentiert (Jöhrens et al. 2021). Es werden in dieser Studie ausschließlich innerdeutsche Transporte betrachtet.

Grundlage für die Abbildung des Straßengüterverkehrs für diese Studie im Verkehrsmodell PTV Validate sind die für das Jahr 2030 prognostizierten Verflechtungsmatrizen (BVU et al. 2014). Die in diesen Matrizen enthaltenen Güterströme werden in Validate auf Fahrzeugbewegungen zwischen einzelnen Quell- und Zielbezirken in Deutschland, d. h. auf einzelne Relationen umgelegt. Das Modell berechnet dabei pro Güterabteilung die Größenklasse der auf jeder Relation eingesetzten Lkw sowie deren bevorzugte Route¹. Das Ergebnis ist eine Datenbank der täglichen Fahrten von Lkw im innerdeutschen Verkehr. Für diese Fahrten können anhand der Route für verschiedene Fahrzeugklassen und Antriebstechnologien jeweils Energieverbräuche und Reisezeiten berechnet werden. Das Modell macht allerdings keine Aussage darüber, wie das Einsatzprofil eines gegebenen Fahrzeugs aussieht, welche Fahrten es also typischerweise an einem Tag absolviert. Da dies entscheidend für die Eignung der Fahrzeuge zur Umstellung auf Elektroantrieb ist, werden hierzu Annahmen getroffen.

Eine zentrale Information für gleich mehrere Eignungsparameter stellen die jährliche Fahrleistung der Fahrzeuge sowie die mittlere Tagesfahrweite dar. Diese beiden Größen sind im Modell durch die Annahme von 240 Arbeitstagen pro Jahr miteinander verknüpft. Die Jahresfahrleistung entscheidet über den Anteil der Fixkosten eines Fahrzeugs an den Gesamtkosten. Die mittlere Tagesfahrleistung ist maßgeblich für die benötigte Reichweite der Fahrzeuge. Die tägliche Fahrleistung entspricht i. d. R. nicht der Relationslänge, denn ein Lkw macht meist mehrere Fahrten pro Tag und ist dabei im Allgemeinen auf verschiedenen Relationen unterwegs. Die mittlere Tagesfahrleistung von Verkehren auf einer Relation wird aus Statistiken der Fahrleistungserhebung abgeleitet (BASt 2017). Das Vorgehen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Für die Berechnungen in dieser Studie wurden hinsichtlich der Einsatzprofile dieselben Annahmen getroffen wie in der zuvor publizierten Studie „Potentialanalyse für Batterie-Lkw“ im gleichen Vorhaben (Jöhrens et al. 2021), sie sind dort im Kapitel 3.4 dokumentiert. Für die hier vorgenommene Verallgemeinerung der Analyse auf verschiedene Antriebstechnologien sind je nach Technologie einige Punkte zu beachten, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden.

¹ Im Allgemeinen werden mehrere mögliche Routen für den Verkehr auf je einer Relation genutzt.

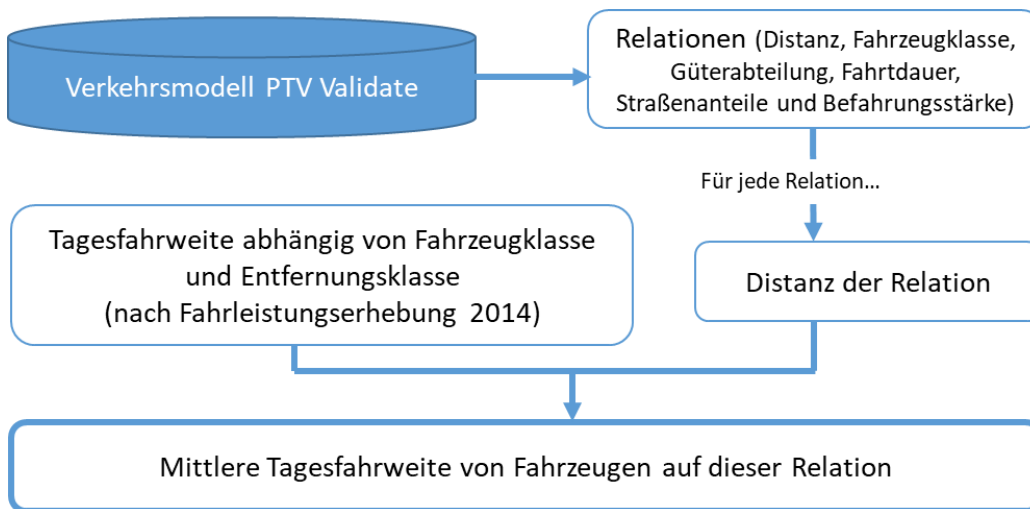


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ableitung typischer Tagesfahrweiten für die auf einzelnen Relationen durchgeführten Fahrzeug-Einsatzprofile (eigene Darstellung)

Von großer Relevanz für die Ergebnisse dieser Studie ist die Verteilung der Tagesfahrleistung in den einzelnen Lkw-Klassen, die sich aus der oben beschriebenen Ableitung der Einsatzprofile ergibt (Abbildung 2). Während Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von weniger als 12 Tonnen nur in Ausnahmefällen mehr als 200 km pro Tag zurücklegen, weisen größere Lkw ein breiteres Spektrum von Tagesfahrweiten auf. Bei Lkw > 26 t wird mehr als die Hälfte der Gesamtfahrleistung in Fahrprofilen mit mehr als 400 km Tagesfahrweite zurückgelegt.

Im ersten Teilbericht dieses Vorhabens („Potentialanalyse Batterie-Lkw“) wurden Fahrten von Lastzügen zunächst unberücksichtigt gelassen, da diese in der Verkehrsdatengrundlage entsprechend des zulässigen Gesamtgewichtes der Zugfahrzeuge den Fahrzeuggrößenklassen zugeordnet werden (und nicht entsprechend des zulässigen Gesamtgewichtes des gesamten Gespanns). Dadurch konnten die getroffenen größenklassenspezifischen Annahmen (z.B. zu den Fahrzeugkosten und Energieverbräuchen) nicht auf diese Fahrten angewendet werden. Um dieses Potential dennoch untersuchen zu können, wurden für die vorliegende Untersuchung die Fahrten von Lastzügen aus den Größenklassen < 26 t in die der Lkw > 26 t verschoben. Für die Identifizierung dieser Fahrten wurde die Fahrweitenverteilung von Sattelzügen aus den Verkehrsdaten und die Jahresfahrleistung von Lastzügen aus TREMOD verwendet.

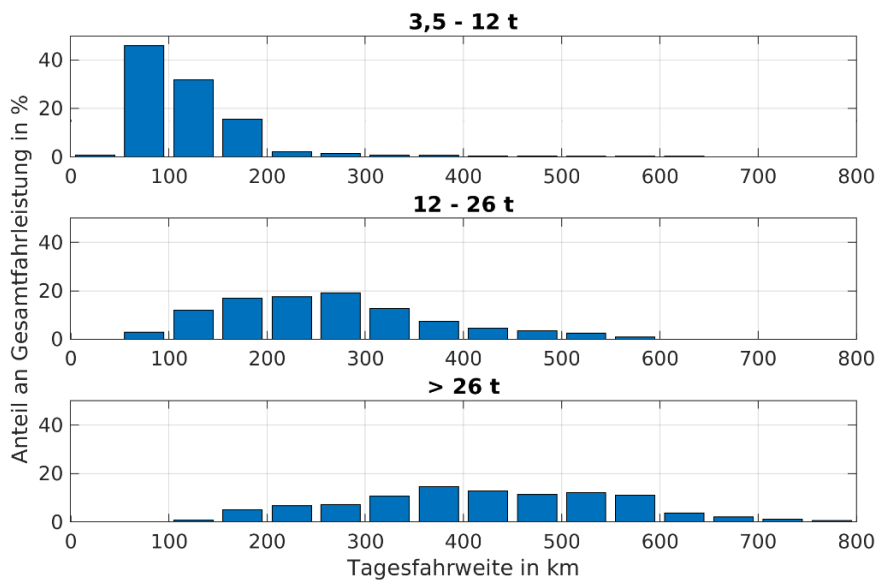


Abbildung 2: Verteilung der Tagesfahrweite über die bei der Modellierung zugrunde gelegten Einsatzprofile in den betrachteten Lkw-Klassen (eigene Berechnung auf Basis von Daten aus PTV Valdate und des KBA).

2.2 Technische Eignungsbewertung

2.2.1 Batterie-Lkw

Bei Batterie-Lkw ist die Tagesfahrleistung eines Einsatzprofils zentral für die Dimensionierung der Traktionsbatterie. Als konservativer Extremfall kann unterstellt werden, dass die Batterie stets für den gesamten Betriebstag reichen muss und nur über Nacht geladen werden kann. Demgegenüber können zusätzlich Zwischenlademöglichkeiten während des Betriebstages angenommen werden:

- Ladeinfrastruktur, die während des Verladevorgangs zwischen zwei Fahrten genutzt werden kann, z.B. an Laderampen installierte LIS (Verfügbarkeit abhängig von der transportierten Gütergruppe)
- öffentliche Lademöglichkeiten, für die eine Fahrtunterbrechung notwendig ist. Öffentliche Lademöglichkeiten können beispielsweise während der ohnehin anfallenden Lenkzeitpausen genutzt werden.

Abhängig von Relationslänge und Gütergruppe werden die verfügbaren Pausenzeiten für beide Arten von Zwischenlademöglichkeiten berechnet und die mögliche Energieaufnahme ermittelt. Das Vorgehen ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Zudem werden die Kosten durch zusätzlichen Zeitbedarfs fürs Laden außerhalb ohnehin anfallender Pausen berechnet und zusätzliche Ladezeit eingeräumt, sofern sich dies in Summe mindernd auf die Vollkosten auswirkt (dies ist dann der Fall, wenn die Kosteneinsparungen durch geringeren Reichweitenbedarf schwerer wiegen). Die Annahme, dass alle diese prinzipiellen Ladegelegenheiten auch tatsächlich zur Zwischenladung genutzt werden können, stellt den optimistischen Fall in der vorliegenden Analyse dar. Das Vorgehen zur Eignungsbewertung und Dimensionierung der Batterie-Lkw ist im Detail in (Jöhrens et al. 2021), Kapitel 3.4 beschrieben.

Die bedarfsgerechte Verfügbarkeit der für den jeweils betrachteten Fall benötigten Ladeinfrastruktur (betrieblich bzw. öffentlich) für die einzelnen Einsatzprofile wird grundsätzlich als gegeben angenommen¹.

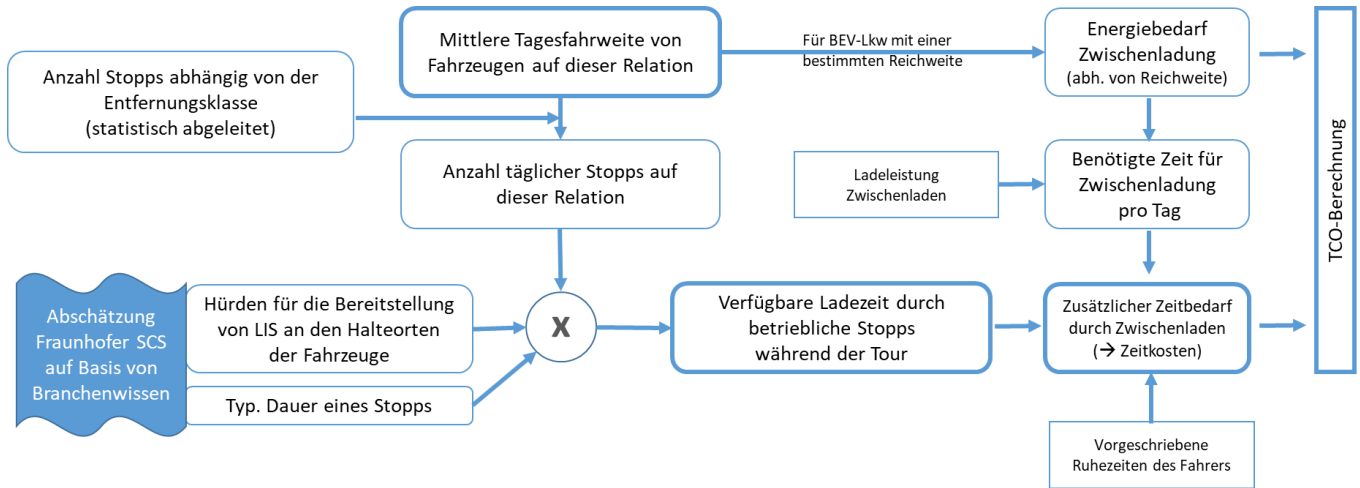


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Eignungs- und Kostenbestimmung von Batterie-Lkw für einzelne Einsatzprofile (eigene Darstellung). Für eine nähere Beschreibung siehe (Jöhrens et al. 2021).

Für die Modellierung werden Batterie-Lkw für alle Größenklassen in sechs verschiedenen Reichweiten² von 100 km bis 600 km berücksichtigt. Die jeweiligen mittleren spezifischen Verbräuche pro Größenklasse sind Tabelle 1 exemplarisch für die niedrigste und die höchste Auslegungsreichweite zu entnehmen.

Tabelle 1: Auslegung der im Modell hinterlegten Batterie-Lkw

		3,5-7,5 t	7,5-12 t	12-18 t	18-26 t	> 26 t
Systemleistung [kW]	BEV	125	145	266	287	310
Batteriegröße ¹ [kWh]	BEV100	91	97	108	123	150
	BEV600	616	661	745	851	1.007
Ø-Verbrauch ² [kWh/100km]	BEV100	71	75	84	96	116
	BEV600	79	83	93	106	127

¹Dargestellt ist die nominale Kapazität, die nutzbare Kapazität ist etwas geringer; ²Verbrauch bei 50 % Beladung und durchschnittlicher Nutzung, die Verbrauchsbandbreite liegt je nach Beladung und Straßenanteile bei -20 % bis +35 %.

¹ Der Vorschlag der EU-Kommission für eine Novelle der AFI-Richtlinie sieht hinsichtlich öffentlicher Lademöglichkeiten beispielsweise eine verpflichtende Mindestausstattung mit Schnellladeinfrastruktur entlang des TEN-T-Netzes bis 2030 vor.

² Die Reichweiten spiegeln jeweils eine mittlere reale Reichweite im für die jeweilige Fahrzeugklasse typischen Fahrprofil wider.

2.2.2 Brennstoffzellen-Lkw

Für die Abbildung von Brennstoffzellen-Lkw im Modell wurde eine Standardauslegung je Größenklasse gewählt, da hier der Einfluss des Einsatzprofils auf die Fahrzeugauslegung relativ gering ist (Tabelle 2). Die Reichweite wurde dabei so gewählt, dass die doppelte mittlere Tagesfahrweite mit einer Tankfüllung erreicht wird. Dahinter steht die Annahme, dass Betreiber von Brennstoffzellen-Lkw voraussichtlich eine gegenüber Batterie-Lkw deutlich höhere betriebliche Flexibilität erwarten. Die folgende Tabelle fasst die Kenndaten der Brennstoffzellenfahrzeuge zusammen. Ausgegangen wird von einer Wasserstoffspeicherung im gasförmigen Zustand bei einem Druckniveau von 700 bar.

Tabelle 2: Auslegung der im Modell hinterlegten Brennstoffzellen-Lkw

	3,5-7,5 t	7,5-12 t	12-18 t	18-26 t	> 26 t
Systemleistung [kW]	125	145	266	287	310
Leistung Brennstoffzelle [kW]	85	103	128	156	213
Tankgröße ¹ [kg]	13	24	23	43	53
Batteriegröße ¹ [kWh]	44	47	53	60	72
Ø-Verbrauch ² [kg/100km]	3,93	4,17	4,66	5,29	6,46
Reichweite [km]	320	570	490	800	820

¹Dargestellt ist die nominale Kapazität, die nutzbare Kapazität ist etwas geringer; ²Verbrauch bei 50 % Beladung und durchschnittlicher Nutzung, die Verbrauchsbandbreite liegt je nach Beladung und Straßenanteile bei -20 % bis +35 %.

Die für Brennstoffzellen-Lkw erwarteten Betankungsdauern liegen im Bereich von unter 30 Minuten (Rose 2020). Es wird daher unterstellt, dass Wasserstoff innerhalb der ohnehin anfallenden Pausen in hinreichender Menge nachgetankt werden kann, und auf eine genauere Analyse der zeitlichen Abläufe während eines Betriebstages verzichtet. Wie auch bei Batterie-Lkw wird angenommen, dass genügend Wasserstofftankstellen vorhanden sind und die Infrastruktur damit keine Restriktion für den Einsatz von Brennstoffzellen-Lkw darstellt¹.

2.2.3 Oberleitungs-Lkw

Die Ausrüstung zur Stromaufnahme aus Oberleitungen ist grundsätzlich bei allen Lkw mit einem elektrischen Antrieb möglich, also bei Dieselhybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-

¹ Der Vorschlag der EU-Kommission für eine Novelle der AFI-Richtlinie sieht eine verpflichtende Mindestausstattung mit H₂-Tankstellen entlang des TEN-T-Netzes bis 2030 vor.

fahrzeugen. Da Brennstoffzellenfahrzeuge erst zu einem etwas späteren Zeitpunkt am Markt erwartet werden, wird die Oberleitungsnutzung hier zunächst lediglich für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge (Oberleitungs-Hybrid-Lkw, OH-Lkw) und Batterie-Lkw (O-BEV-Lkw) betrachtet. Bei O-BEV sind im Modell verschiedene batterieelektrische Reichweiten (abseits der Oberleitung) zwischen 50 km und 300 km (in 50-km-Schritten) hinterlegt. Für Fahrzeuge mit einem zGG von weniger als 12 Tonnen sind Stromabnehmer aus technischen Gründen ungeeignet. Wesentliche Kennwerte der im Modell betrachteten Fahrzeugkonfigurationen sind Tabelle 3 (O-BEV) und Tabelle 4 (O-HEV) zu entnehmen.

Tabelle 3: Auslegung der im Modell hinterlegten Oberleitungs-Batterie-Lkw (O-BEV)

		12-18 t	18-26 t	> 26 t
Systemleistung [kW]	O-BEV	266	287	310
Batteriegröße ¹ [kWh]	O-BEV50	53	61	74
	O-BEV300	342	390	469
Ø-Verbrauch ² – mit OL ^{3,4} [kWh/100km]	O-BEV50	94	107	132
	O-BEV300	98	112	137
Ø-Verbrauch ² – ohne OL ⁴ [kWh/100km]	O-BEV50	91	103	125
	O-BEV300	95	108	130

¹Dargestellt ist die nominale Kapazität, die nutzbare Kapazität ist etwas geringer; ²Hierbei wird jeweils die für die Größenklasse typische Verteilung auf Straßenkategorien (Autobahn, Bundesstraße, Sonstige) unterstellt; ³ Unter Annahme von 100 % Oberleitungsbetrieb auf Autobahnen und 50 % Oberleitungsbetrieb auf Bundesstraßen; ⁴Verbrauch bei 50 % Beladung und durchschnittlicher Nutzung, die Verbrauchsbandbreite liegt je nach Beladung und Straßenanteile bei -20 % bis +35 %. Der ggü. BEV-Lkw etwas höhere Verbrauch resultiert aus dem Luftwiderstand des Pantographen.

Tabelle 4: Auslegung der im Modell hinterlegten Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-HEV)

	12-18 t	18-26 t	> 26 t
Motorleistung (je Aggregat) [kW]	266	287	310
Batteriegröße ¹ [kWh]	15	15	15
Ø-Verbrauch ² – mit OL ^{3,4}	49 kWh + 7,7 l auf 100 km	56 kWh + 9,0 l auf 100 km	101 kWh + 5,6 l auf 100 km
Ø-Verbrauch ² – ohne OL ⁴	16,7 l/100 km	18,6 l/100 km	24,1 l/100 km

¹Dargestellt ist die nominale Kapazität, die nutzbare Kapazität ist etwas geringer; ²Hierbei wird jeweils die für die Größenklasse typische Verteilung auf Straßenkategorien (Autobahn, Bundesstraße, Sonstige) unterstellt; ³ Unter Annahme von 100 % Oberleitungsbetrieb auf Autobahnen und 50 % Oberleitungsbetrieb auf Bundesstraßen; ⁴Verbrauch bei 50 % Beladung und durchschnittlicher Nutzung, die Verbrauchsbandbreite ist etwas größer als bei BEV, FCEV und O-BEV.

Bei einem Oberleitungssystem für Lkw ist im Gegensatz zu Ladepunkten und H₂-Tankstellen für das Jahr 2030 nicht von einer flächendeckenden Installation auszugehen; auch darüber hinaus ist diese voraussichtlich nicht sinnvoll. Für die Analysen dieser Studie wird vielmehr ein Basisnetz von Oberleitungen auf stark befahrenen Autobahnabschnitten in Deutschland mit einer Gesamtlänge von etwa 3.050 km unterstellt, wie es in (Jöhrens et al. 2020) abgeleitet wurde. Auch in anderen Studien wurde eine ähnliche Netzausdehnung im Bereich zwischen 3.000 und 4.000 km als mittelfristig sinnvoll identifiziert (Hacker / Jöhrens / et al. 2020). Der Einfluss der Netzausdehnung auf die Ergebnisse wird durch die zusätzliche Betrachtung eines gegenüber dem vorgenannten Basisnetz reduzierten Netzes von lediglich 1.450 km Gesamtlänge untersucht. Die beiden untersuchten Netze sind in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Zugrunde gelegtes Oberleitungsnetz mit einer Gesamtlänge von 3.050 km bzw. 1.450 km (reduziertes Netz)¹, abgeleitet in (Jöhrens et al. 2020).

Der unter Oberleitung zurückgelegte Fahrtanteil wird im Modell für alle Einsatzprofile des innerdeutschen Güterverkehrs bestimmt. Das Vorgehen bei der Auswertung der Einsatzprofile hinsichtlich Eignung und Kosten für O-Lkw ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Es zeigt sich, dass der Anteil der unter Oberleitung zurückgelegten Strecke tendenziell mit der Tagesfahrweite steigt und für Fernfahrten von mehr als 600 km im Mittel bei etwa 50 % liegt (Abbildung 6). Die restlichen Streckenanteile müssen OH-Lkw im Hybridmodus mit Dieselkraftstoff und O-BEV-Lkw mit Strom aus ihrer Traktionsbatterie bewäl-

¹ Das mit „3.050 km“ beschriftete Netz beinhaltet auch alle Streckenabschnitte des reduzierten Netzes („1.450 km“)

tigen. Im Falle des O-BEV-Lkw bedeutet dies, dass die notwendige Kapazität der Traktionsbatterie von der Länge der jeweils zu überbrückenden Streckenabschnitte ohne Oberleitung abhängt. Im Modell sind dazu O-BEV-Lkw mit einer Reichweite im Batteriebetrieb von 50 km bis 300 km (in 50-km-Schritten) hinterlegt. Für O-BEV wird grundsätzlich eine zusätzliche stationäre Ladung der Batterien über Nacht im Depot angenommen, so dass die Oberleitung nur den über die Reichweite der Batterien hinausgehenden Strombedarf eines Tages decken muss. Zusätzlich wird geprüft, ob die während der Fahrt nachgeladene Energie für die anschließenden oberleitungsfreien Streckenabschnitte ausreicht.

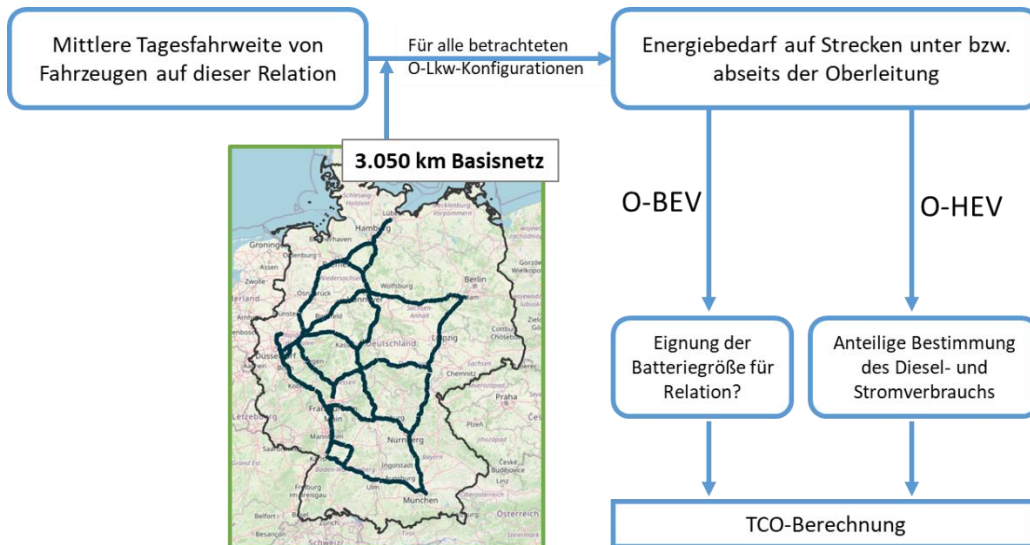


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Eignungs- und Kostenbestimmung von Oberleitungs-Lkw für einzelne Einsatzprofile (eigene Darstellung)

Abbildung 7 zeigt, welche maximal zu überbrückenden oberleitungsfreien Streckenabschnitte bei den einzelnen Einsatzprofilen auftreten¹. Auf dieser Grundlage werden die dem TCO-Modell für die jeweiligen Einsatzprofile „angebotenen“ Fahrzeugkonfigurationen eingeschränkt: Ein Einsatzprofil mit einer maximalen Strecke ohne Oberleitung von 180 km kann daher beispielsweise nicht durch O-BEV50, O-BEV100 oder O-BEV150 erbracht werden, sondern es ist mindestens ein O-BEV200-Lkw erforderlich.

¹ Zur Berechnung der oberleitungsfreien Abschnittslängen wird angenommen, dass die einzelnen Fahrten, aus denen sich das Tagesfahrprofil eines Lkw zusammensetzt, eine ähnliche Abdeckung mit Oberleitungen aufweisen. Auf der Relation Frankfurt-Offenburg gibt es beispielsweise zwischen Frankfurt und Karlsruhe eine Oberleitung. In dem auf dieser Relation basierenden Einsatzprofil müsste dann das Doppelte der Distanz zwischen Karlsruhe und Offenburg oberleitungsfrei bewältigt werden können.

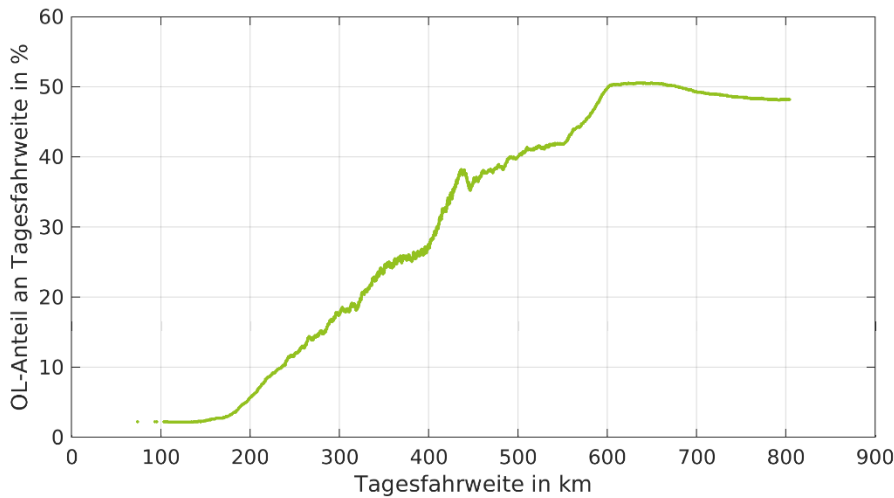


Abbildung 6: Anteil der Fahrleistung (gleitender Mittelwert), die von Lkw > 26 t unter Oberleitung zurückgelegt wird (eigene Berechnungen).

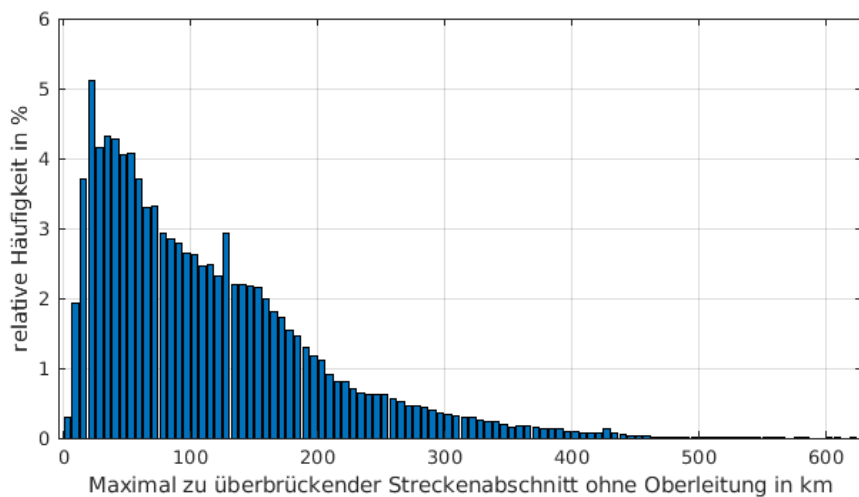


Abbildung 7: Maximal zu überbrückender Streckenabschnitt ohne Oberleitung bei Lkw > 26 t (eigene Berechnungen). Berücksichtigt wurden nur Relationen, die einen Oberleitungsanteil von > 0 haben.

2.3 Kostenannahmen

Die nachfolgenden Abschnitte fassen die Parametrierung des verwendeten Modells zusammen. Im „Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“ der NPM, AG 1 (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020) wurde für den Vergleich der Antriebstechnologien ein Parameterset abgestimmt und genutzt, um für einen durchschnittlichen Anwendungsfall die Vollkosten (TCO) zu berechnen. Hinsichtlich der Energie- und Infrastrukturkosten lehnt sich die hier verwendete Parametrierung daran an. Die Anschaffungskosten und energieunabhängigen Bestandteile der Betriebskosten basieren auf eigenen Recherchen im Rahmen dieses Vorhabens, um der in dieser Studie vorgenommenen feineren Differenzierung nach Größenklassen Rechnung zu tragen.

Ein wesentlicher Mehrwert der vorliegenden Studie zu bisherigen Studien zu den Kosten verschiedener Lkw-Antriebe ist, dass die Berechnung der Vollkosten und die Ermittlung der günstigsten Antriebstechnologie nicht für einen Durchschnittsfall, sondern für jede einzelne Relation separat vorgenommen werden. Im Ergebnis lassen sich somit hoch differenziert geeignete Einsatzprofile für die einzelnen Antriebstechnologien identifizieren und wirtschaftliche Anteile der Technologien an der Gesamtfahrleistung berechnen.

2.3.1 Fahrzeugpreise

Die Fahrzeugpreise wurden komponentenbasiert ermittelt, wobei die Kosten für die antriebsspezifischen Komponenten differenziert abgeleitet werden. Da sich die Kosten auf das Jahr 2030 beziehen, werden erwartete Skaleneffekte berücksichtigt und dabei ein ähnlicher Produktionshochlauf bei allen drei betrachteten Antriebstechnologien unterstellt. Im Detail ist das Vorgehen im Teilbericht „Potentialanalyse Batterie-Lkw“ des Vorhabens dokumentiert (Jöhrens et al. 2021), inklusive der getroffenen Annahmen für Finanzierung und Wertverlust. Die resultierenden Fahrzeugpreise sind in Tabelle 5 aufgeführt.¹ Es werden für das Jahr 2030 in dieser Studie keine Förderinstrumente für alternative Antriebe unterstellt, bezüglich der Fahrzeuganschaffung also insbesondere keine Kaufprämie² und keine Sonderabschreibung (Sonder-AfA).

Tabelle 5: Fahrzeugpreise je Größenklasse und Technologie im Jahr 2030

	3,5-7,5 t	7,5-12 t	12-18 t	18-26 t	> 26 t
ICEV	41.300 €	56.000 €	66.300 €	89.500 €	103.000 €
BEV100 ¹	31.400 € (+7.900 €)	44.700 € (+8.400 €)	59.300 € (+9.500 €)	77.000 € (+10.800 €)	90.200 € (+13.000 €)
FCEV	49.800 €	71.200 €	89.100 €	118.700 €	144.800 €
O-BEV100 ¹	/	/	74.700 € (+9.500 €)	92.300 € (+10.800 €)	106.100 € (+13.000 €)
O-HEV	/	/	109.100 €	137.900 €	158.300 €

Alle Preise in €₂₀₂₀; ¹Preise für Fahrzeuge mit 100 km Reichweite, in Klammern der angenommene zusätzliche Kaufpreis je weitere 100 km Reichweite.

2.3.2 Energiepreise

Die Energiepreise umfassen die Gestehungskosten, die Transportkosten sowie Abgaben und Umlagen. Die Kosten für den Aufbau öffentlicher Infrastruktur zur Energieversorgung (öffentliche Ladepunkte, Wasserstofftankstellen und Oberleitungen) werden hingegen im Basisfall nicht auf die Energiepreise umgelegt. Grund dafür ist, dass ein schneller, zielge-

¹Werte abgeleitet anhand folgender Hauptquellen (und weiterer Quellen und Annahmen): (Lastauto Omnibus 2014), (EurotaxSchwacke 2015), (Gerhardt et al. 2015), (Jöhrens et al. 2020), (Fries et al. 2017), (Den Boer et al. 2013), (Phadke et al. 2021), (Hunter et al. 2020), (VDMA 2020). Es wurden zudem weitere Quellen Annahmen für die Preisermittlung herangezogen bzw. Annahmen getroffen.

²Gegenwärtig werden über eine [Förderrichtlinie des BMVI](#) bis zu 80 % der investiven Mehrkosten für Elektro- und Brennstoffzellen-Lkw vom Bund übernommen. Das Programm ist bis 2024 befristet.

richteter und koordinierter Aufbau der öffentlichen Energieversorgungsinfrastruktur nach bisheriger Erfahrung staatlich initiiert sowie (zumindest in großen Teilen) staatlich vorfinanziert werden muss und somit zumindest in der Einführungsphase allenfalls in Teilen durch die Lkw-Betreiber gedeckt werden muss¹. Die Auswirkungen einer Umlegung der Infrastrukturkosten auf die Lkw-Betreiber werden bei der Diskussion der Ergebnisse separat betrachtet, die entsprechenden Annahmen werden in Abschnitt 2.3.3 beschrieben.

Die Energiepreise für die Berechnungen in dieser Untersuchung sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Der Dieselpreis besteht aus Produktbeschaffungskosten zzgl. Deckungsbeitrag von 67 ct₂₀₂₀/Liter, der Energiesteuer von 42 ct₂₀₂₀/Liter sowie einem CO₂-Aufschlag von 100 €/t (27 ct/Liter)². Beim Strom wird sowohl für die direkte Stromnutzung als auch für die Herstellung von Elektrolyse-H₂ in Deutschland eine Entnahme auf Mittelspannungsebene unterstellt. Für Batterie- und Oberleitungs-Lkw werden auf die Stromverbräuche ab Batterie (siehe Abschnitt 2.2) stets 7 % Energieverluste zwischen Mittelspannungsanschluss und Fahrzeug unterstellt (JRC 2020). Sofern der Strom nicht direkt für den Vortrieb von O-Lkw bei Fahrt unter der Oberleitung verwendet wird, kommen weitere 7 % fahrzeuginterne Speicherverluste hinzu.

Die Ableitung des H₂-Preises für die zwei betrachteten Fälle „Elektrolyse in Deutschland“ und „H₂-Import“ folgt dem Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge der NPM (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020). Analog zum NPM-Bericht bleiben die Kosten für Ladeinfrastruktur (sowohl öffentliche als auch betriebliche) bei der TCO-Berechnung unberücksichtigt. Zusätzlich wird aber ein zweiter Fall betrachtet, in dem die Lkw-Betreiber den betrieblichen Ladeinfrastrukturaufbau selbst finanzieren müssen, siehe dazu den nachfolgenden Abschnitt 2.3.3.

Tabelle 6: Angenommene Energiepreise (ohne USt) für das Referenzjahr 2030.

Dieselpreis	Strompreis (Mittelspannung)	H ₂ -Preis (Elektrolyse DE)	H ₂ -Preis (Import)
1,36 €/Liter	16,6 ct/kWh	9,45 €/kg	4,57 €/kg
(Jöhrens et al. 2021), inklusive CO ₂ -Preis von 100 €/t	(Jöhrens et al. 2021) unter Abzug der dort angenom- menen Infrastrukturumlage	(Nationale Plattform Mobi- lität, AG1 2020), korrigiert um den hier angenom- menen Strompreis ³	(Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020)

Zu berücksichtigen ist, dass die Preise für Strom und H₂ aus heimischer Elektrolyse von einer verbleibenden EEG-Umlage im Jahr 2030 von 4,7 ct/kWh ausgehen. Derzeit wird diskutiert, die Umlage deutlich schneller zurückzufahren oder ganz abzuschaffen, was den Strompreis im Jahr 2030 erheblich senken könnte.

¹ Diesen Ansatz legt auch der Werkstattbericht der NPM zugrunde (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020), in dem die Infrastrukturkosten bei der TCO-Berechnung ausgeklammert und lediglich bei der Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten berücksichtigt werden.

² Da der CO₂-Preis hier Teil des Dieselpreises angenommen wird, wird bei der Maut keine Spreizung nach CO₂-Emissionen unterstellt.

³ Bei der Anpassung des H₂-Preises wurde angenommen, dass 70 % des Endverbraucherpreises auf die Kosten des Elektrolysestroms zurückgehen.

2.3.3 Infrastrukturkosten

Für Aufbau und Unterhalt der Endverbrauchsinfrastruktur (Ladepunkte, H₂-Tankstellen, Oberleitungssystem) wurden spezifische Kosten pro abgegebener Energieeinheit abgeleitet (Tabelle 7). Die Grundlagen und Annahmen dafür sind in Anhang A2 dokumentiert.

Tabelle 7: Angenommene Infrastrukturumlagen auf die Energiepreise (ohne USt) für das Bezugsjahr 2030.

Ladung im Depot	Ladung an öff. Schnellladepunkt (750 kW)	Wasserstoff	Strombezug aus Oberleitung
2,5 ct/kWh	1,1 ct/kWh	80,0 ct/kg	5,0 ct/kWh

Im Basisfall gehen die Kosten für die Endverbrauchsinfrastruktur nicht in die Nutzerkosten ein. Um zu untersuchen, inwieweit eine Refinanzierung der Infrastruktur durch die Nutzer ab dem Ende der Einführungsphase (Referenzjahr 2030) die finanzielle Bilanz der Lkw-Betreiber bei Nutzung der einzelnen Technologien beeinflusst, werden in einem zusätzlichen Szenario die oben angegebenen Infrastrukturaufschläge zu den Energiepreisen addiert. Bei stationärer Ladeinfrastruktur und Wasserstofftankstellen sind die Kosten unter Annahme einer mittleren Auslastung abgeleitet und somit unabhängig von den Nutzerzahlen. Beim Strombezug aus dem Oberleitungssystem wird für die Ermittlung des Aufschlags die aus dem berechneten Potential für den Basisfall resultierende Nutzerzahl zugrunde gelegt. Kosten für den Ausbau der vorgelagerten Netzinfrastruktur zur Verteilung von Strom und Wasserstoff sind nicht berücksichtigt.

2.3.4 Lkw-Maut

Die Mautsätze wurden anhand der derzeit gültigen Mauttabelle unverändert fortgeschrieben. Für Nullemissionsantriebe fällt dabei der Zuschlag für Luftverschmutzung weg. Abgesehen davon wird für Nullemissionsantriebe derselbe Mautsatz wie für Diesel-Lkw angesetzt. Dies liegt zum einen daran, dass ein CO₂-Aufschlag für Dieselkraftstoff (der nach der Novellierung der Eurovignettenrichtlinie für die Lkw-Maut voraussichtlich zulässig sein wird) i. H. v. 100 €/t bereits in den Energiekosten berücksichtigt wird (siehe Abschnitt 2.3.2). Zum anderen wird eine Mautreduktion oder gar Mautbefreiung als Förderinstrument für alternative Antriebe, wie sie derzeit gewährt wird, für den im Referenzjahr 2030 angenommenen Massenmarkt alternativ angetriebener Lkw als unwahrscheinlich angesehen; diese hätte erhebliche Einnahmeausfälle zur Folge und würde somit die Infrastrukturfinanzierung gefährden. Tabelle 8 fasst die zugrunde gelegten Mautsätze für alle Antriebe und Fahrzeugklassen zusammen.

Tabelle 8: Mautsätze pro Größenklasse und Technologie

	3,5-7,5 t	7,5-12 t	12-18 t	18-26 t	> 26 t
ICEV, O-HEV (Dieselmodus)	0	9,3 ct/km	12,8 ct/km	17,3 ct/km	18,7 ct/km
(O-)BEV, FCEV, O-HEV (Oberleitungsmodus)	0	8,2 ct/km	11,7 ct/km	16,2 ct/km	17,6 ct/km

Annahme: GK 18-26t entspricht der Mautkategorie „> 18 t bis 3 Achsen“ und GK > 26 t entspricht „> 18 t bis 4 Achsen“

2.3.5 Sonstiges

Des Weiteren gibt es eine Reihe kleinerer Kostenpunkte in der Vollkostenberechnung. Konkret sind dies Instandhaltung, Versicherung, Fzg.-Steuern, Fahrzeuguntersuchung sowie die Kosten für Harnstoff (AdBlue) und Schmierstoffe. Diese Kostenpunkte spielen in Summe in den Vollkosten eine nicht unerhebliche Rolle, hängen aber nur in geringem Maße von der Antriebstechnologie ab. Antriebsspezifische Unterschiede beruhen mangels Praxiserfahrungen derzeit noch stark auf Schätzungen. Tabelle 9 und Tabelle 10 fassen die Annahmen zu den sonstigen Kostenpunkten zusammen. Bei einigen Kostenpunkten ist eine klare Trennung zwischen fix und variabel nicht möglich. Diese werden entweder den variablen Kosten oder Anteilig den variablen Kosten und Fixkosten zugerechnet. Eine detaillierte Herleitung kann dem ersten Teilbericht dieses Vorhabens entnommen werden (Jöhrens et al. 2021).

Tabelle 9: Sonstige Fixkosten in €₂₀₂₀/a

	ICEV	BEV	FCEV	O-BEV	O-HEV
3,5-7,5 t	12.940	12.860	12.860	/	/
7,5-12 t	14.960	14.880	14.880	/	/
12-18 t	15.710	15.640	15.640	15.710	15.860
18-26 t	16.380	16.330	16.330	16.410	16.560
> 26 t	18.350	18.320	18.320	18.410	18.560

Enthaltene Kostenpunkte: Kfz-Steuer; Haupt- und Abgasuntersuchung; Sicherheitsprüfung; Kfz- und Kaskoversicherung; Wartung, Instandhaltung und Pflege (Fixkostenanteil); Fuhrparkverwaltung; Unterstellung, Garage; Auflieger und Anhänger (Fixkostenanteil)

Tabelle 10: Sonstige variable Kosten in ct₂₀₂₀/km

	ICEV	BEV	FCEV	O-BEV	O-HEV
3,5-7,5 t	44,2	42,9	42,9	/	/
7,5-12 t	45,6	44,3	44,3	/	/
12-18 t	44,7	43,3	43,3	43,8	44,6
18-26 t	44,3	43,0	43,0	43,5	44,2
> 26 t	40,6	39,0	39,0	39,5	40,4

Enthaltene Kostenpunkte: Reifen; Schmierstoffe; Stromabnehmer (Schleifleiste); Wartung, Instandhaltung und Pflege (var. Kostenanteil); Harnstoff; Auflieger und Anhänger (var. Kostenanteil); Fahrer. Anmerkung: Kosten gelten für einen durchschnittlichen Anwendungsfall; je nach Nutzung können die Kosten variieren.

2.4 Datengrundlagen für THG-Lebenswegbilanz

In dieser Studie werden für die ermittelten Technologieportfolios des Lkw-Verkehrs im Jahr 2030 jeweils die jährlichen CO₂-Emissionen der Flotte unter Zugrundelegung einer Lebenszyklusperspektive abgeschätzt. Referenz ist dabei eine Flotte, die vollständig mit Diesel betrieben wird. Da die Technologieportfolios wirtschaftliche Potentiale von Neufahrzeugen im Jahr 2030 widerspiegeln, handelt es sich bei den berechneten CO₂-Minderungen ebenfalls um theoretische Potentiale, die sich bei einer sofortigen Umstellung der gesamten Flotte auf den entsprechenden Technologiemitmix ergeben würden. Die für die Umschichtung der Flotte benötigte Zeit ist dabei also nicht berücksichtigt. Dennoch bietet der Vergleich der Minderungspotentiale zwischen Technologieportfolios mit unterschiedlichen Schwerpunkten wichtige Hinweise, wie sich technologische Pfadentscheidungen auf die CO₂-Bilanz des Straßengüterverkehrs auswirken könnten.

Die Berechnung der CO₂-Emissionen berücksichtigt die energiebedingten Emissionen durch den Betrieb der Fahrzeuge (inklusive Stromerzeugung und H₂-Bereitstellung) sowie die Emissionen durch die Fahrzeugherstellung. Wesentliche methodische Festlegungen sind in (Helms et al. 2021) beschrieben. Die verwendeten Emissionsfaktoren für den Betrieb der Fahrzeuge (Bilanzraum: well-to-wheel) sind Tabelle 11 zu entnehmen. Zu berücksichtigen ist, dass im Gegensatz zum vorgenannten Papier eine raschere Dekarbonisierung der Stromerzeugung unterstellt wird, in Einklang mit dem Ziel einer Klimaneutralität im Jahr 2045. Dies wirkt sich sowohl auf die direkte Stromnutzung von Batterie- und Oberleitungs-Lkw als auch auf die H₂-Bereitstellung via Elektrolyse in Deutschland aus. Die Annahmen zur Strombereitstellung im Jahr 2030 sind aus den Modellierungen in (Prognos et al. 2021) abgeleitet. Der angegebene Emissionsfaktor bildet dabei einen Mittelwert aus dem zeitlich variablen Strommix während des Betriebs eines im Jahr 2030 zugelassenen Lkw, für den eine 7-jährige Betriebsdauer unterstellt wird.

Tabelle 11: Betriebsbedingte THG-Emissionen der Fahrzeuge [kg CO₂-Äq.]

	Diesel	Strom	Wasserstoff ¹
Energiebereitstellung (Well-to-tank)	0,426 kg/Liter	0,178 kg/kWh	Elektrolyse DE: 10,28 kg/kg _{H₂} Import aus MENA-Region: 0,96 kg/kg _{H₂}
Fahrzeugbetrieb (Tank-to-wheel)	2,658 kg/Liter	-	-

Für die Bilanzierung der Fahrzeugherstellung wird abhängig vom Antriebstyp ein entsprechendes Basisfahrzeug zugrunde gelegt und für die THG-Emissionslast wesentliche antriebsspezifischen Zusatzkomponenten (Batterie, Brennstoffzelle, H₂-Tank) entsprechend

¹ Die THG-Emissionen der H₂-Bereitstellung wurden basierend auf dem Projekt „SYSEET“ abgeleitet (ifeu et al. 2019). Für Elektrolyse in Deutschland wurde dabei der deutsche Strommix 2030 zugrundegelegt (siehe mittlere Spalte). Für den H₂-Import aus der MENA-Region wurde eine vollständig erneuerbare Bereitstellung des Elektrolysestroms aus 69 % Windkraft und 31 % Photovoltaik angenommen. Die THG-Emissionen durch die Bereitstellung der Anlagen für EE-Erzeugung und Elektrolyse sind in der Bilanzierung inkludiert.

der jeweiligen Konfiguration ergänzt. Tabelle 12 und Tabelle 13 enthalten die jeweils angesetzten THG-Emissionen. Die Werte basieren auf Abschätzungen mit dem Ökobilanzmodell eLCAR des ifeu. Dort ist die Herstellung von Sattelzugmaschinen mit verschiedenen Antriebssystemen komponentenfein hinterlegt. Für die übrigen Größenklassen wurden die Werte entsprechend des Fahrzeuggewichts skaliert. Für alle Fahrzeugkomponenten wird eine Lebensdauer von 7 Jahren unterstellt. Eine detaillierte Dokumentation der Ökobilanzierung von Lkw-Antrieben mit eLCAR ist im Rahmen des Projekts BOLD in Vorbereitung.

Tabelle 12: CO₂-Emissionsfaktoren für die Herstellung der antriebsspezifischen Zusatzkomponenten

	Batterie	Brennstoffzelle	H ₂ -Tank
Spez. THG-Emissionen durch die Herstellung [kg CO ₂ -Äq.]	77 kg/kWh	26 kg/kW	291 kg/kg _{H₂}
Bedarf pro Fahrzeug ¹	91 - 1.006 kWh (auch abhängig von Reichweite)	85 - 213 kW	13 - 53 kg

Tabelle 13: THG-Emissionen durch die Herstellung der Basisfahrzeuge

kg CO ₂ -Äq.	Diesel-Lkw	Hybrid-Lkw	Rein elektrischer Lkw
< 7,5 t	8.450 kg	9.663 kg	8.711 kg
7,5-12 t	13.520 kg	1.5461 kg	13.937 kg
12-18 t	20.280 kg	23.191 kg	20.906 kg
18-26 t	29.293 kg	33.498 kg	30.198 kg
> 26 t	45.066 kg	51.536 kg	46.457 kg

¹ Abhängig von Größenklasse – 5 verschiedene Größenklassen betrachtet im Bereich von 3,5 t – 40 t zGG

3 Wirtschaftliches Potential einzelner Antriebstechnologien ggü. Diesel-Lkw

3.1 Batterie-Lkw

Zunächst werden die Vollkosten von Batterie-Lkw im Vergleich zu Diesel-Lkw im Durchschnitt aller Nutzungsprofile in der jeweiligen Fahrzeuggrößenklasse¹ verglichen (Abbildung 8). Auf Basis der Fahrtweitenverteilung in den einzelnen Größenklassen (siehe Abbildung 2) wurden für den Vergleich reale elektrische Reichweiten angenommen, mit denen jeweils ein Großteil der Einsatzprofile bei ausschließlicher Aufladung über Nacht im Depot betrieben werden kann. Für Fahrzeuge < 12 t bedeutet dies eine (reale) Reichweite von 200 km, im Bereich 12 t – 26 t von 300 km und im Bereich > 26 t von 500 km.

In 2030 sind demnach für typische Anwendungsfälle aller Lkw-Klassen Kostenvorteile von Batterie-Lkw gegenüber Diesel-Lkw zu erwarten. Bezogen auf die gesamten TCO pro km beträgt der mittlere Vorteil bei den einzelnen Größenklassen 2,3 %, 5,3 % bzw. 3,5 %. Je größer die Fahrzeugklasse, desto größer ist die benötigte Reichweite und damit (bedingt durch die Batteriekosten) die Fahrzeugkostendifferenz, aber desto größer ist andererseits auch die Fahrleistung, die Relevanz der Energiekosten und somit der Kostenhebel über geringere Energiekosten für Strom.

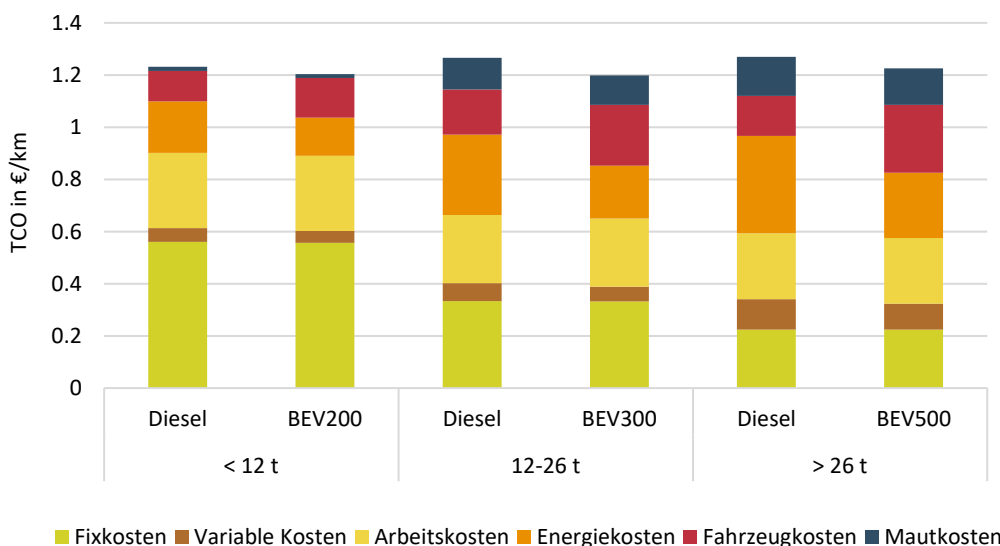


Abbildung 8: Vollkosten für Batterie-Lkw verschiedener Größenklassen im Vergleich zu entsprechenden Diesel-Lkw (eigene Berechnungen); Bezugsjahr 2030; die gewählten Reichweiten orientieren sich an typischen Tagesfahrweiten der jeweiligen Größenklassen (eigene Berechnungen).

¹ Für die Darstellung der durchschnittlichen Vollkosten wurden jeweils die beiden Größenklassen 3,5 - 7,5 t und 7,5 - 12 t bzw. 12 - 18 t und 18 - 26 t zusammen betrachtet.

Die antriebsunabhängigen Kostenkomponenten (Fixkosten¹ und Arbeitskosten) machen bei kleinen Fahrzeugen einen vergleichsweise großen Anteil der Gesamtkosten aus. Die Differenz der Gesamtkosten pro km zwischen den Antrieben ist bei den kleinen Lkw daher absolut gesehen geringer ist als bei den größeren, der Unterschied allein bei den antriebsabhängigen Kostenkomponenten ist jedoch dennoch signifikant. Bezogen auf den antriebsabhängigen Teil der TCO pro km beträgt der mittlere Vorteil bei den einzelnen Größenklassen 6,5 %, 9,9 % bzw. 5,5 %.

Im nächsten Schritt wird für jedes einzelne Einsatzprofil anhand seiner TCO die kostengünstigste Technologie zwischen Diesel- und Batterieantrieben ermittelt, wobei der Bereich der Kostenparität (+/- 1 % der gesamten TCO) separat ausgewiesen wird. Zu Fahrzeugkonfigurationen und Lademöglichkeiten wird im Basisfall Folgendes angenommen:

- Falls während eines Tagesprofils eine Lenkzeitpause nötig ist (Fahrzeit über 4,5 h), werden nur BEV500² oder BEV600 zugelassen und die Annahme getroffen, dass diese während der Lenkzeitpause mit hoher Leistung zwischengeladen werden.
- Es wird keine zeitliche Verzögerung durch zusätzliche Zwischenladung zugelassen, auch wenn dies unter Berücksichtigung der entsprechenden Zeitkosten in den TCO einen Kostenvorteil bedeuten würde³.
- Die Verfügbarkeit bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur wird vorausgesetzt (keine infrastrukturellen Restriktionen).

Bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wurde in den TCO keine Infrastrukturumlage (siehe Abschnitt 2.3.3) berücksichtigt. Entsprechende Berechnungen gehen allerdings in die Analyse der Gesamtkostenbilanz ein (Abschnitt 3.4.2). Detaillierte Ergebnisse für die Fahrleistungspotentiale im Falle einer Umlage der Infrastrukturkosten auf die Nutzer sind in Anhang A3 dargestellt; die Potentiale fallen hier etwas niedriger aus, es ergeben sich aber keine wesentlichen Änderungen in der Gesamtaussage.

Die Ergebnisse der Analysen (Abbildung 9 bis Abbildung 13) zeigen für nahezu alle Einsatzprofile einen Kostenvorteil von Batterie-Lkw gegenüber Diesel-Lkw für das Jahr 2030. Im Bereich der Lkw < 12 t erweist sich dabei für die Hälfte der Fahrleistung eine Reichweite von 100 km als ausreichend⁴. Bei Fahrzeugen und Gespannen über 26 t, die etwa zwei Drittel der Gesamtfahrleistung ausmachen, wird aufgrund der o.g. Annahmen überwiegend eine Reichweite von 500 km benötigt. Mit der angenommenen Zwischenladung reicht diese allerdings auch für fast alle Profile aus, so dass nur in Ausnahmefällen auf BEV600 zurückgegriffen werden muss (siehe Abbildung 10). Bei Fahrzeugen im Bereich 12-26 t gibt es entsprechend der relativ breiten Verteilung der Tagesfahrweiten auch eine entsprechende Bandbreite an Reichweitenbedarfen⁵.

¹ Dies sind insbesondere Steuern, Versicherung, Inspektion, Verwaltung und Unterstellung

² Rein rechnerisch legt ein Lkw bei 80 km/h in 4,5 h eine Strecke von 360 km zurück. Zur Gewährleistung hinreichender betrieblicher Flexibilität (Sicherheitsmarge für Staus, Kapazitätsengpässe bei Schnellladern etc.) wird eine Mindestreichweite von 500 km unterstellt.

³ Zur methodischen Aspekten der Berücksichtigung von Zeitkosten bei der Eignungsanalyse siehe (Jöhrens et al. 2021)

⁴ Für einige Gütergruppen, bei denen dies realistisch erscheint, schließt das ein Zwischenladen während des Verladevorgangs ein, siehe (Jöhrens et al. 2021).

⁵ Zu beachten ist, dass in den zugrundeliegenden Verkehrsdaten lediglich zwischen drei verschiedenen Größenklassen (< 12 t, 12-26 t, > 26 t) differenziert wird, so dass innerhalb dieser Gruppen in der Berechnung jeweils die gleichen Einsatzprofile zugrunde liegen.

Die Analysen zeigen auch, dass Fahrzeuge mit niedrigen Reichweiten einen relativ hohen Kostenvorteil realisieren können, während von den BEV500 vor allem im Bereich mittlerer Tagesfahrweiten bis etwa 500 km viele nicht weit über die TCO-Parität hinauskommen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Einsatzprofile für Batterie-Lkw hängt somit in besonderem Maße von den Energiepreisen ab. Erst bei höheren Tagesfahrleistungen stabilisiert sich der TCO-Vorteil bei diesen Einsatzprofilen dann deutlich.

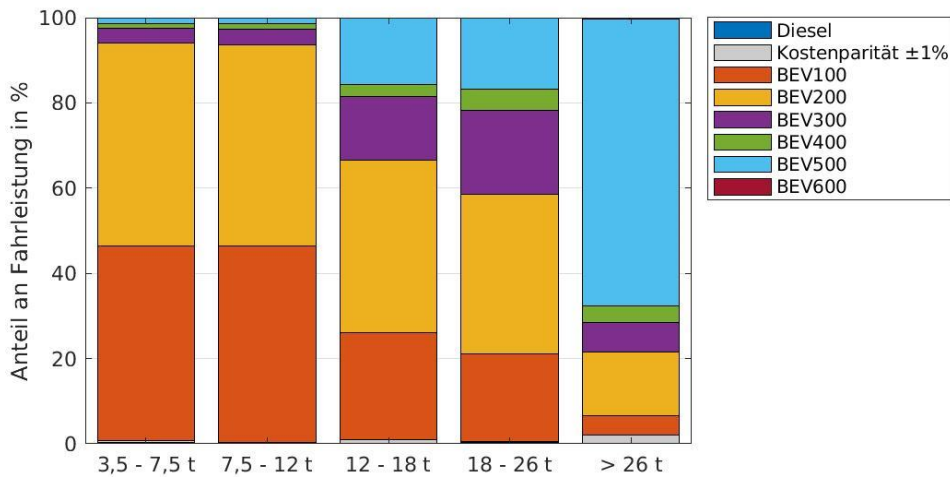


Abbildung 9: Wirtschaftliches Potential von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung (eigene Berechnungen). Falls während einer Fahrt eine Lenkzeitpause nötig ist, werden nur BEV500 oder BEV600 zugelassen. Keine zeitliche Verzögerung für Ladevorgänge zugelassen. (eigene Berechnungen)

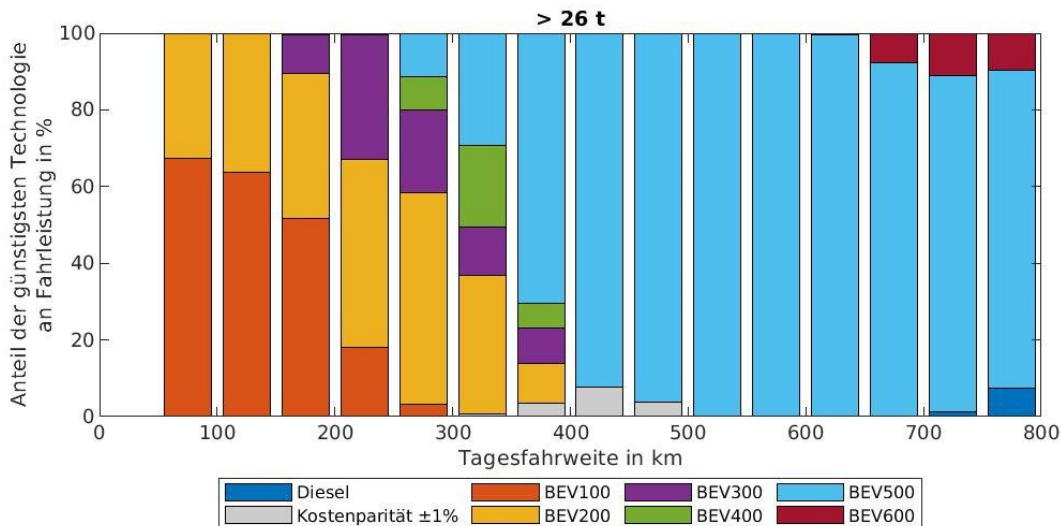


Abbildung 10: Wirtschaftliches Potential von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten (Basisfall, siehe oben) als Anteil an der Gesamtfahrleistung, differenziert nach Tagesfahrweite für Lkw > 26 t (eigene Berechnungen)

Um den Einfluss des Strompreises zu untersuchen, wurde dieser in einer Sensitivitätsanalyse zwischen 15 ct/kWh und 27 ct/kWh variiert (Abbildung 11). Im Strompreis ist dabei jedoch nicht die Endverbrauchsinfrastruktur enthalten und es wird demzufolge auch nicht

zwischen öffentlicher und betrieblicher Ladung differenziert. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse unterstreicht die Bedeutung des Strompreises für die Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw: Ein höherer Strompreis senkt das wirtschaftliche Potential v.a. bei Lkw > 26 t (da hier die Energiekosten anteilig eine besonders große Bedeutung haben) und bei Lkw < 7,5 t (da diese aufgrund hoher Fixkosten insgesamt einen relativ geringen Kostenvorteil für Batterie-Lkw aufweisen). Die Variation des Dieselpreises bzw. des in ihm enthaltenen CO₂-Aufschlags (Abbildung 12) ergibt ein komplementäres Ergebnis: Ein gegenüber dem Basisfall niedrigerer CO₂-Preis wirkt sich unmittelbar auf das wirtschaftliche Potential des Batterieantriebs aus, insbesondere im Segment der Last- und Sattelzüge.

Gegenüber der separat publizierten Potentialanalyse für Batterie-Lkw im gleichen Vorhaben (Jöhrens et al. 2021) ist zu berücksichtigen, dass dort beim Strompreis Abschätzungen für den Endverbraucherpreis zugrunde gelegt wurden¹ und sich somit ein Strompreis von etwa 20 ct/kWh für betriebliches bzw. 28 ct/kWh für öffentliches Laden ergab. Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen alternativen Antriebstechnologien und Kompatibilität mit der Methodik der NPM² sicherzustellen, wurden in der vorliegenden Studie die Infrastrukturkosten separat betrachtet.

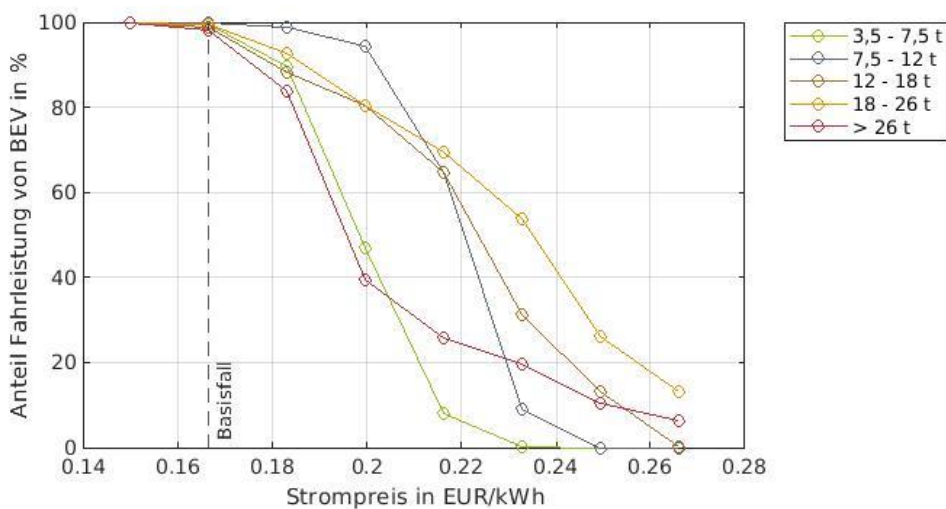


Abbildung 11: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Batterie-Lkw in Abhängigkeit des Strompreises im Jahr 2030 (eigene Berechnungen).

¹ Umlage der Kosten betrieblicher Ladeinfrastruktur und Abschätzung von Preisen für Schnellladung anhand aktueller Marktpreise für Ladestrom an Schnellladeinfrastruktur im Pkw-Bereich

² siehe den Werkstattbericht der AG 1: (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020)

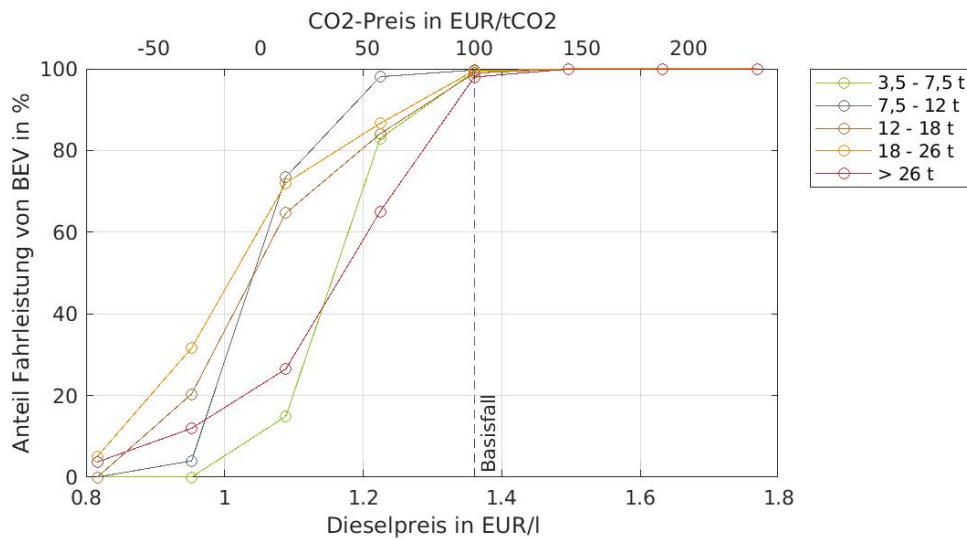


Abbildung 12: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Batterie-Lkw in Abhängigkeit des Diesel- bzw. CO₂-Preises im Jahr 2030 (eigene Berechnungen).

Ausgehend von dem oben betrachteten Basisfall hinsichtlich der Fahrzeugkonfiguration und Nutzung von Ladeinfrastruktur wurden zusätzlich zwei Extremfälle betrachtet:

- Laden ausschließlich über Nacht im Depot
- Zwischenladen während flexibler Lenkzeitpausen und an Verladestandorten¹; Zeitbedarf fürs Zwischenladen über die ohnehin betrieblich anfallenden Kosten wird in Kauf genommen, wenn trotz der anfallenden Zeitkosten ein TCO-Vorteil für Batterie-Lkw besteht².

Die Ergebnisse sind den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen. Im Falle ausschließlicher Depotladung ergibt sich im Fernverkehr für etwa 20 % der Fahrleistung ein Reichweitenbedarf von 600 km und weitere 10 % der Fahrleistung wären nur mit noch größeren Batterien elektrifizierbar (die im Modell nicht hinterlegt sind). Der Kostenvorteil sinkt mit der notwendigen Batteriegröße und liegt für BEV600 nur noch knapp über der Kostenparität. Die Sensitivität für Energiepreisänderungen ist hier also besonders groß. Das Szenario mit optimistischen Annahmen zur Zwischenladung senkt die benötigten Reichweiten deutlich und führt zu einem relativ stabilen Kostenvorteil von fast durchgängig über 5 ct/km für Lkw > 26 t. Die betrieblichen Herausforderungen und der Infrastrukturbedarf eines solchen Szenarios sind jedoch deutlich größer.

¹ Hier wurde angenommen, dass die Lenkzeitpause auch vor Erreichen von 4,5 h Fahrzeit erfolgen kann (dennoch allerdings nur 45 min Lenkzeitpause pro 4,5 h Fahrt) und zusätzlich im Falle mehrerer täglicher Fahrten an den Verladestandorten nachgeladen werden kann

² Zur methodischen Aspekten der Berücksichtigung von Zeitkosten bei der Eignungsanalyse siehe (Jöhrens et al. 2021)

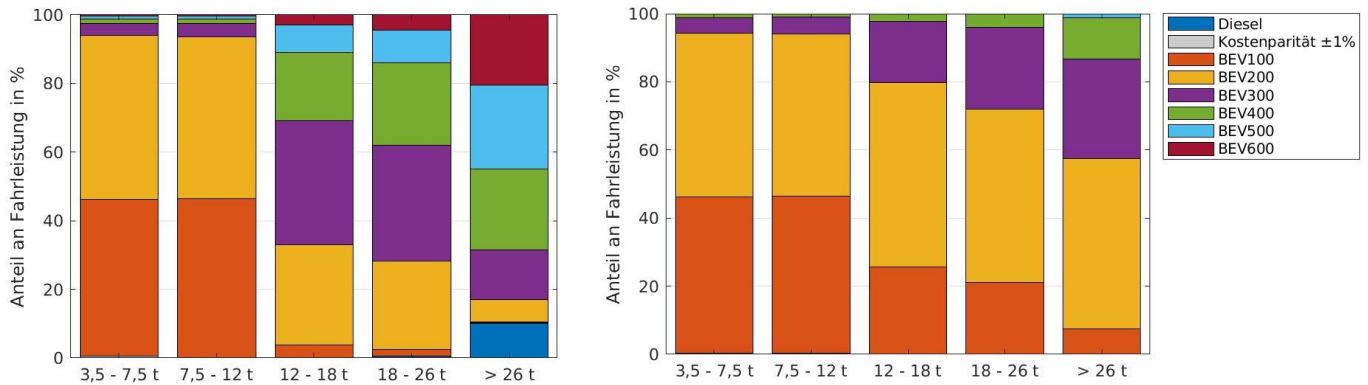


Abbildung 13: Wirtschaftliches Potential von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung für den Fall, dass die Lkw ausschließlich im Depot laden können (keine Zwischenladung unterwegs oder an Verloaderampen, linke Abbildung) und den Fall, dass die Lkw jederzeit zwischenladen können, sofern der Kostenvorteil der Batterie-Lkw trotz Einrechnung der Zeitkosten erhalten bleibt (rechte Abbildung). Eigene Berechnungen.

Fazit:

Batterie-Lkw haben durch die effiziente Energieumwandlung einen hohen Betriebskostenvorteil. Den größten Kostentreiber stellt der Reichweitenbedarf (Batteriekapazität) dar. Das führt dazu, dass die Wirtschaftlichkeit im Bereich des Fernverkehrs mit Last- und Sattelzügen generell schwieriger herzustellen ist als für kleinere Fahrzeuge, die tendenziell auf kürzeren Distanzen verkehren. Durch schnelle Zwischenlademöglichkeiten kann im Bereich der Langstreckenverkehre die Wirtschaftlichkeit allerdings signifikant verbessert werden (Ermöglichung hoher Fahrleistungen bei begrenzter Batteriekapazität).

3.2 Brennstoffzellen-Lkw

Abbildung 14 zeigt die mittleren Vollkosten für Brennstoffzellen-Lkw gegenüber Diesel-Lkw in den betrachteten Größenklassen für das Bezugsjahr 2030. Für den H₂-Preis wurde eine Erzeugung aus Elektrolyse in Deutschland unterstellt (9,45 €/kg_{H₂}). Die TCO des Brennstoffzellenantriebs liegen für die betrachteten Größenklassen um 18,4 %, 22 % bzw. 25,1 % über denen des Dieselantriebs. Betrachtet man nur die antriebsabhängigen Kostenkomponenten (lässt also Fixkosten und Arbeitskosten außen vor), so liegen die km-spezifischen Kosten des Brennstoffzellenantriebs um 60,2 %, 41,5 % bzw. 40,3 % über denen des Dieselantriebs. Grund hierfür sind in erster Linie die Energiekosten, die um den Faktor 1,7 bis 2 höher liegen als beim Diesel. Die Anschaffungskosten des Brennstoffzellenantriebs sind der Größenordnung nach vergleichbar denen des Batterieantriebs und damit deutlich höher als die des Dieselantriebs, wobei die Mehrkosten bei Lkw > 26 t etwas geringer als die des Batterieantriebs sind. Höhere Reichweiten sind beim Brennstoffzellenantrieb also tendenziell etwas günstiger als beim Batterieantrieb. Trotz Wegfall der Luftverschmutzungsabgabe bei der Lkw-Maut (1,1 ct/km) bleibt eine signifikante und robuste Kostenlücke von durchschnittlich etwa 30 ct/km¹ zwischen Brennstoffzellen- und Dieselantrieb für das Jahr 2030, so dass hier ohne erhebliche staatliche Eingriffe kein wirtschaftliches Einsatzszenario zu erwarten ist (siehe Abbildung 15, linkes Bild).

¹ Über die einzelnen Einsatzprofile ergibt sich für die Kostenlücke eine Schwankungsbreite zwischen etwa 20 ct/km und 40 ct/km.

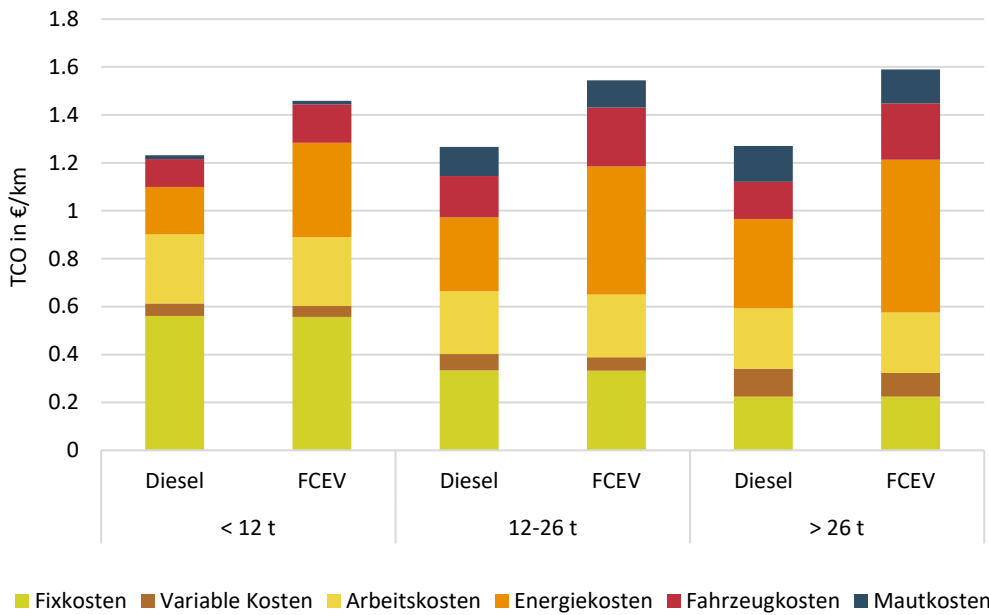


Abbildung 14: Vollkosten für Brennstoffzellen-Lkw verschiedener Größenklassen im Vergleich zu entsprechenden Diesel-Lkw (eigene Berechnungen); Bezugsjahr 2030.

Bei Annahme eines deutlich geringeren H₂-Preises von 4,57 €/kg_{H₂}, wie er sich unter optimistischen Bedingungen durch Import von H₂ ergeben könnte, ergibt sich für das wirtschaftliche Potential gegenüber dem Dieselantrieb ein anderes Bild (Abbildung 15, rechtes Bild). Der Brennstoffzellenantrieb erreicht dann v.a. für die größeren Lkw ab 12 t in weiten Bereichen Kostenparität und für einen Fahrleistungsanteil von etwa 20 % (12-26 t) bzw. 40 % (> 26 t) sogar einen Kostenvorteil. Hintergrund ist, dass sich bei solch geringen H₂-Preisen ein Energiekostenvorteil gegenüber dem Dieselantrieb ergibt. Dieser kommt mit zunehmender Fahrleistung stärker zum Tragen. Im Bereich geringer Fahrleistungen steigt andererseits der Anteil innerstädtischer Fahrleistung (geringere Geschwindigkeiten, größere Dynamik), bei der der Brennstoffzellenantrieb einen größeren relativen Effizienzvorteil gegenüber dem Dieselantrieb hat als im Autobahnbetrieb. Daher treten hier dann im Vergleich zum Dieselantrieb einige wirtschaftliche Einsatzprofile speziell für große Fahrzeuge im Verteilerverkehr auf. Der Kostenvorteil gegenüber dem Diesel-Lkw liegt allerdings im Mittel unter 5 % und damit deutlich geringer als bei Batterie-Lkw.

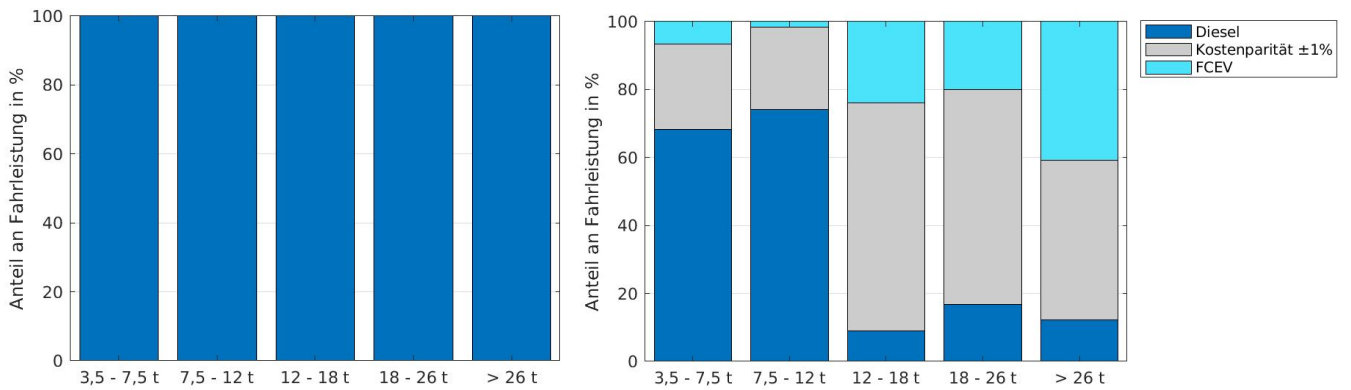


Abbildung 15: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Brennstoffzellen-Lkw nach Größenklassen im Jahr 2030 unter Annahme einer H₂-Produktion in Deutschland (H₂-Preis: 9,45 €, linkes Diagramm) bzw. eines H₂-Imports (H₂-Preis: 4,57 €, rechtes Diagramm) (eigene Berechnungen).

Den Einfluss des H₂-Preises auf das wirtschaftliche Potential von Brennstoffzellen- gegenüber Diesel-Lkw fasst Abbildung 16 zusammen. Bei Fahrzeugen > 12 t sind bei einem H₂-Preis von 4 €/kg_{H₂} bereits fast alle Einsatzprofile gegenüber dem Dieselantrieb wirtschaftlich. Bei kleineren Lkw haben die Energiekosten gegenüber den Anschaffungskosten eine geringere Relevanz in den Gesamtkosten und es ist demzufolge ein höherer Energiepreisvorteil notwendig, um einen wirtschaftlichen Vorteil für den Brennstoffzellenantrieb zu realisieren. Kleinere Lkw reagieren daher bei der Wirtschaftlichkeit weniger sensitiv auf Änderungen der Energiepreise. Dies spiegelt sich entsprechend bei der Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit vom Dieselpreis bzw. dem in ihm enthaltenen CO₂-Preis (Abbildung 17): Bei Annahme eines für Elektrolyse in Deutschland erwarteten H₂-Preises ist ein CO₂-Preis von mindestens 400 €/t notwendig, um für den Brennstoffzellenantrieb wirtschaftliche Einsatzprofile zu erhalten.

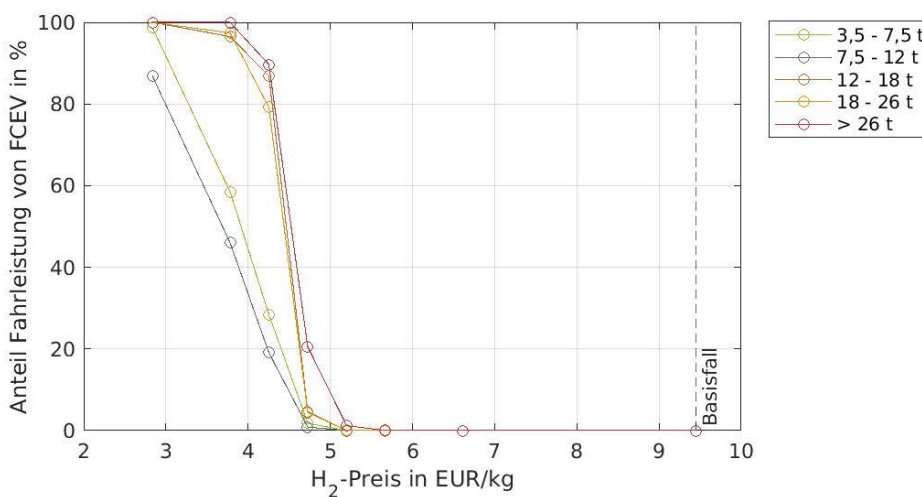


Abbildung 16: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Brennstoffzellen-Lkw in Abhängigkeit des H₂-Preises im Jahr 2030 (eigene Berechnungen).

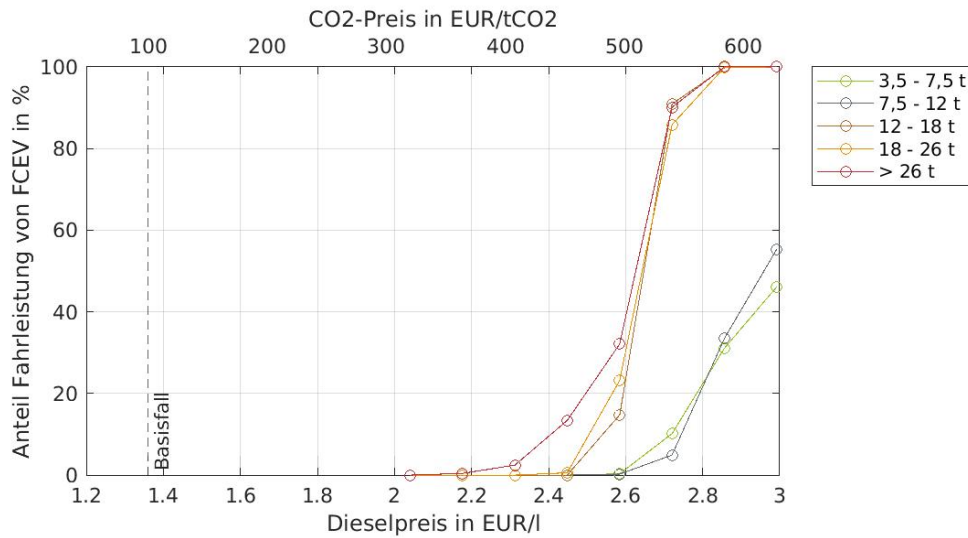


Abbildung 17: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Brennstoffzellen-Lkw (Annahme: H₂-Produktion in Deutschland) in Abhängigkeit des Diesel- bzw. CO₂-Preises im Jahr 2030 (eigene Berechnungen).

Fazit:

Bei H₂-Kosten, wie sie für die Produktion in Deutschland anzunehmen sind, befindet sich der Brennstoffzellenantrieb fernab jeglicher Konkurrenzfähigkeit zum Dieselantrieb. Auch bei optimistisch angenommenen H₂-Preisen steht hohen Anschaffungskosten (im Vergleich zu Diesel-Lkw) nur eine vergleichsweise geringe Kosteneinsparung bei den Energiekosten gegenüber. BZ-Lkw sind daher in jedem Fall auf hohe Fahrleistungen angewiesen, um auf einen Vollkostenvorteil gegenüber Diesel-Lkw zu kommen. Die großen Lkw-Segmente weisen im Mittel deutlich höhere Fahrleistungen auf und damit bei gegebenem H₂-Preis eine vergleichsweise höhere Wirtschaftlichkeit für Brennstoffzellen-Lkw. Bei den kleineren Fahrzeugsegmenten können die Fahrzeugmehrkosten gegenüber dem Diesel-Lkw bei den in diesen Segmenten üblicherweise geringeren Fahrleistungen nur schwer kompensiert werden.

3.3 Oberleitungs-Lkw

Abbildung 18 zeigt die mittleren Vollkosten für Oberleitungs-Lkw gegenüber Diesel-Lkw in den für O-Lkw relevanten Größenklassen für das Bezugsjahr 2030. Es wird dabei zwischen Diesel-Hybridfahrzeugen (O-HEV) und rein elektrischen O-BEV differenziert, wobei bei letzteren für den Vergleich eine batterieelektrische Reichweite von 150 km angenommen wurde, was in etwa dem Mittelwert der im Modell betrachteten Fahrzeugkonfigurationen (50 km bis 300 km Reichweite) entspricht. Bei der Kostenberechnung wurde ein Oberleitungs-Basisnetz von 3.050 km Gesamtlänge zugrunde gelegt (siehe Abschnitt 2.2.3) und all diejenigen Einsatzprofile berücksichtigt, die das Basisnetz nutzen und sich rein technisch realisieren lassen. Es wurde dabei die Annahme getroffen, dass O-BEV grundsätzlich über Nacht stationär im Depot laden können und die Oberleitung lediglich den über die Reichweite der Batterie hinausgehenden Energiebedarf während des Betriebstages decken muss.

Der Vergleich zeigt einen deutlichen Kostenvorteil für O-Lkw gegenüber Diesel-Lkw. Für O-BEV liegen die Kosteneinsparungen etwas höher als bei BEV, was auf die geringere Batte-

riekapazität zurückgeht (Referenz ist hier im Bereich > 26 t der BEV500). Für O-HEV liegen die Kostenvorteile gegenüber dem Dieselantrieb deutlich unter denen des O-BEV. Gründe sind der doppelte Antriebsstrang und die Kosten für Dieselmotorkraftstoff im Hybridmodus.

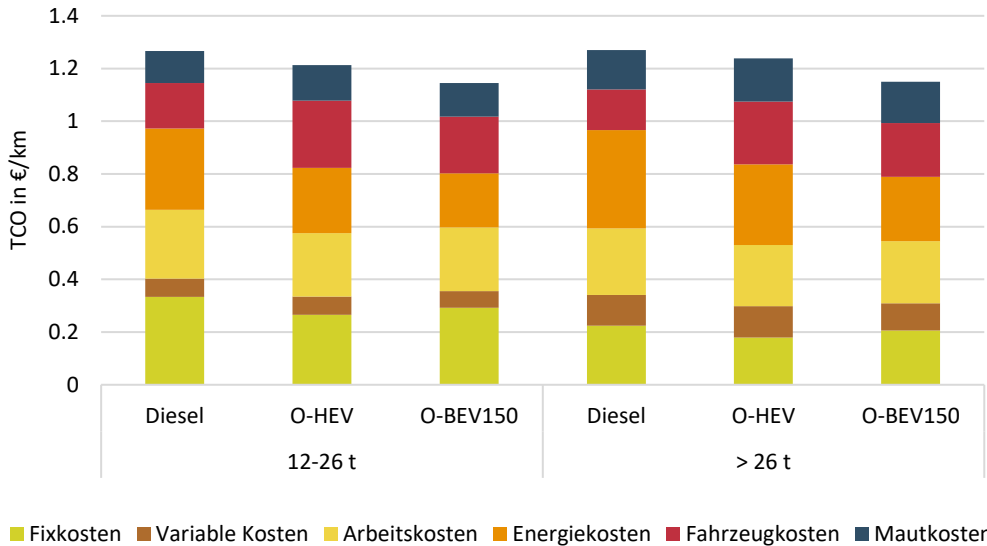


Abbildung 18: Vollkosten für Oberleitungs-Lkw (rein elektrische sowie Hybrid-Fahrzeuge) verschiedener Größenklassen im Vergleich zu entsprechenden Diesel-Lkw; Bezugsjahr 2030 (eigene Berechnungen).

Bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wurde in den TCO keine Infrastrukturumlage (siehe Abschnitt 2.3.3) berücksichtigt. Entsprechende Berechnungen gehen allerdings in die Analyse der Gesamtkostenbilanz ein (Abschnitt 3.4.2). Detaillierte Ergebnisse für die Fahrleistungspotentiale im Falle einer Umlage der Infrastrukturkosten auf die Nutzer sind in Anhang A3 dargestellt; die Potentiale fallen hier etwas niedriger aus, es ergeben sich aber keine wesentlichen Änderungen in der Gesamtaussage.

Unter Annahme des in Abschnitt 2.2.3 definierten Oberleitungs-Basisnetzes von 3.050 km Länge haben bei Lkw < 26 t Einsatzprofile mit einer summierten Fahrleistung von gut der Hälfte der Gesamtfahrleistung auf mindestens einem Streckenabschnitt Berührung mit dem Oberleitungsnetz; bei Lkw > 26 t sind es etwa 70 % der Gesamtfahrleistung. Für etwa 90 % dieses grundsätzlichen Potentials erreichen O-Lkw in den Größenklassen < 26 t einen Kostenvorteil gegenüber Diesel-Lkw (Abbildung 19, linkes Bild). Es kommen dabei ausschließlich rein elektrische O-BEV zum Einsatz. Bei der Fahrzeugklasse > 26 t sind etwa 75 % der Fahrleistung im Einzugsbereich der Oberleitung gegenüber dem Dieselantrieb wirtschaftlich vorteilhaft. Bezogen auf die gesamte Fahrleistung in dieser Größenklasse beträgt das Potential somit etwa 52 %. Es kommen hierbei in Einzelfällen auch O-HEV zum Einsatz, ihr Anteil liegt bei 1,4 % der Fahrleistung. Über alle für O-Lkw geeigneten Größenklassen hinweg liegt der Anteil der gegenüber Diesel-Lkw wirtschaftlichen Fahrleistung bei 51 %.

Wird die angenommene Ausdehnung des Oberleitungsnetzes auf 1.450 km Länge in etwa halbiert, geht die für O-Lkw wirtschaftliche Fahrleistung auf knapp 30 % zurück. In einer Grenzbetrachtung wird durch den initialen Aufbau von 1.450 km Netzlänge also mehr Fahrleistung durch O-Lkw ermöglicht als durch die Ausweitung des Netzes auf 3.050 km Länge. Eine genauere Auswertung zeigt, dass im ersten Fall vor allem O-Lkw auf mittleren Strecken mit hoher Befahrungsstärke profitieren, während bei weiterem Ausbau vor allem

länger laufende Verkehre ermöglicht werden. Für einen Netzausbau über 3.050 km hinaus kann auf Basis der Ergebnisse ein weiteres Absinken des zusätzlichen Nutzens pro ausgebautem Streckenkilometer erwartet werden. Dieser Befund steht im Einklang mit Ergebnissen vorangegangener Studien, die im Bereich zwischen 3.000 km und 4.000 km eine aus wirtschaftlicher Sicht optimale Netzausdehnung identifiziert haben (Hacker / Blanck / et al. 2020; Wietschel et al. 2017).

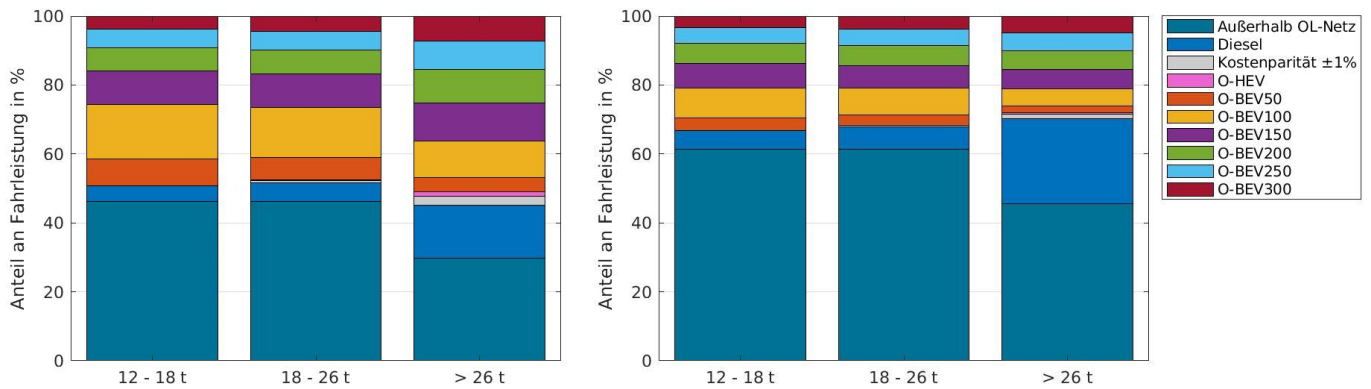


Abbildung 19: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials von Oberleitungs-Lkw für die relevanten Größenklassen; links: Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken; rechts: Annahme eines kleineren OL-Netzes von lediglich 1.450 km Gesamtlänge (eigene Berechnungen).

Die Wirtschaftlichkeit von O-Lkw zeigt sich v.a. bei langen Tagesfahrweiten, die häufig einen relativ hohen Streckenanteil auf dem OL-Netz aufweisen. Bei langen Touren, die längere Abschnitte ohne Oberleitung einschließen und damit auch mit O-BEV300 technisch nicht darstellbar sind, können O-HEV wirtschaftlich in Einzelfällen attraktiv sein. Da die Zahl der Einsatzprofile mit Tagesfahrweiten über 700 km aber gering ist und O-Lkw durch die zusätzliche Ladung im Depot bereits mit einem gefüllten Energiespeicher in den Betriebstag starten können, haben O-HEV dennoch nur einen sehr geringen Anteil am wirtschaftlichen Fahrleistungspotential. Dies könnte anders aussehen, wenn man auch grenzüberschreitende Einsatzprofile berücksichtigen würde.

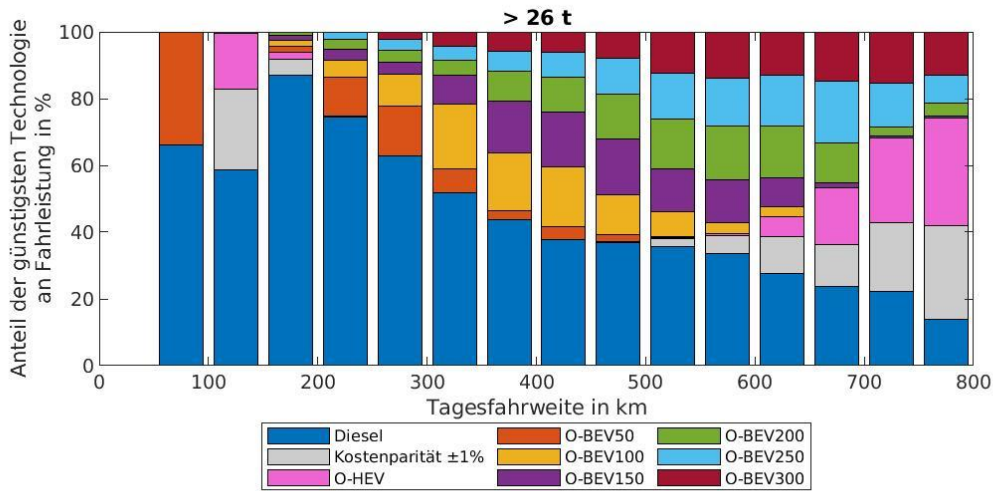


Abbildung 20: Anteil wirtschaftlicher O-Lkw-Fahrleistung von Fahrzeugen > 26 t zGG abhängig von Tagesfahrweite unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken (eigene Berechnungen).

Die Analyse der Differenzkosten für die einzelnen Einsatzprofile zeigt, dass O-BEV mit kleinen Batterien tendenziell einen höheren Kostenvorteil realisieren können (ähnlich wie bei den Batterie-Lkw). Innerhalb einer gegebenen Fahrzeugkonfiguration steigt der Kostenvorteil mit der Fahrleistung. O-HEV kommen generell nur auf vergleichsweise geringe Kostenvorteile, die aufgrund ihres Dieserverbrauchs weniger sensitiv auf Änderungen der Energiepreise reagieren.

Die Wirtschaftlichkeit korreliert stark mit dem Anteil elektrifizierter Strecke an der Tagesstrecke (Abbildung 21). Bereits ab einem Oberleitungsanteil von etwa 5 % sind gegenüber dem Dieselantrieb wirtschaftliche Einsatzfälle zu finden, wobei dies in erster Linie mittlere Strecken betrifft, bei denen die Lkw ihre Energie primär im Depot aufnehmen. Mit zunehmendem Fahranteil unter der Oberleitung nimmt auch der Anteil wirtschaftlicher Einsatzprofile zu. Ab etwa 70 % Oberleitungsanteil sind alle Einsatzprofile wirtschaftlich, da dann nur noch vergleichsweise kleine Batterien für die Strecken abseits der Oberleitung benötigt werden. Steht für O-Lkw keine Depotladung zur Verfügung, haben alle wirtschaftlichen Einsatzprofile mindestens 35 % Oberleitungsanteil an der Fahrleistung.

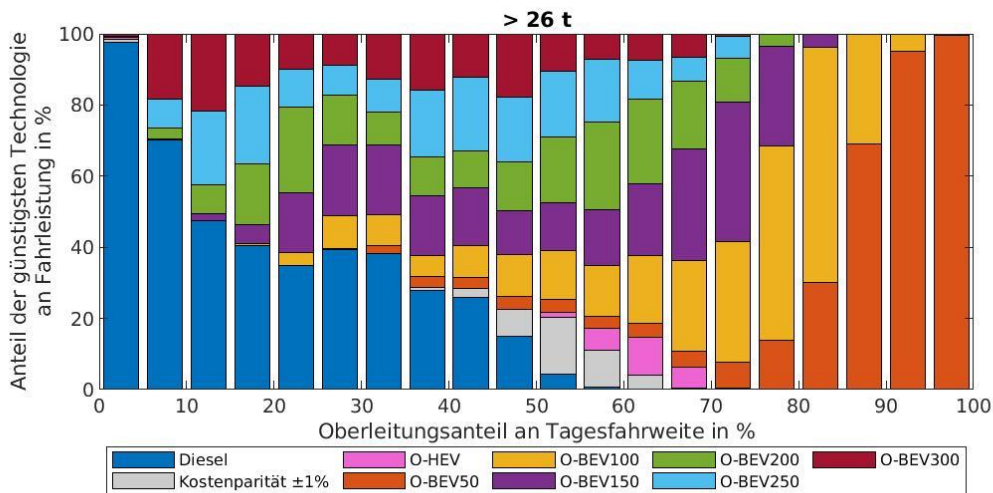


Abbildung 21: Gewählte Batteriegröße und Konfiguration der O-Lkw > 26 t zGG in Abhängigkeit des Oberleitungsanteils an der Strecke unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken (eigene Berechnungen).

Bei den oben dargestellten Berechnungen wurde die Annahme getroffen, dass O-BEV mit einer Leistung von bis zu 400 kW an der Oberleitung laden können. Prinzipiell stellen vor allem O-BEV mit großen Batterien und relativ geringem Oberleitungsanteil vergleichsweise hohe Anforderungen an die Leistungsabgabe der Oberleitung. Um mögliche Effekte einer geringeren Leistungsverfügbarkeit zu untersuchen, wurde eine Vergleichsrechnung mit halbiertes Leistungsverfügbarkeit aus der Oberleitung (200 kW pro Fahrzeug) durchgeführt. Es ergeben sich gegenüber dem Standardfall keine signifikanten Änderungen bei den mit O-Lkw durchführbaren Einsatzprofilen und somit auch nicht beim wirtschaftlichen Einsatzpotential von O-Lkw. Weitere Vergleichsrechnungen zeigten, dass die Leistungsverfügbarkeit allerdings dann eine Rolle spielen kann, wenn für O-Lkw keine oder nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten zur nächtlichen stationären Aufladung zur Verfügung stehen. Dieser Aspekt sollte bei der Entwicklung künftiger Betriebskonzepte für O-Lkw berücksichtigt werden.

Fazit:

Der Anteil der für O-Lkw wirtschaftlichen Einsatzprofile steigt einerseits mit der Tagesfahrweite und andererseits mit dem Anteil der unter Oberleitung gefahrenen Strecke. Ab etwa 70 % Oberleitungsanteil an der Tagesfahrweite sind O-Lkw für alle Einsatzprofile kostengünstiger als Diesel-Lkw. Aus Kostensicht kommen fast ausschließlich O-BEV zum Einsatz, sofern die verfügbare OL-Ladeleistung eine sichere Nachladung ihrer Batterien an der Oberleitung erlaubt.

3.4 Vergleich der Einzelpotentiale

3.4.1 Fahrleistung

Im Folgenden werden die gegenüber dem Dieselantrieb wirtschaftlichen Fahrleistungspotentiale der einzelnen alternativen Antriebssysteme verglichen (Abbildung 22). Die Ergebnisse zeigen, welcher Anteil des Lkw-Verkehrs wirtschaftlich auf alternative Antriebe umstellbar wäre, wenn jeweils nur eine Alternativtechnologie zugelassen wäre. Die Betrachtung kostenoptimaler Technologiemixe erfolgt im Kapitel 4.

Mit Batterie-Lkw kann nahezu das komplette Spektrum der Einsatzprofile im Bezugsjahr 2030 wirtschaftlich erschlossen werden (siehe Abschnitt 3.1). Auch wenn ausschließlich Depotladung zugelassen wird (keine Zwischenladung), reduziert sich das Fahrleistungspotential gegenüber dem Basisfall lediglich um 5 %. Allerdings ist der mittlere Kostenvorteil der gegenüber Diesel-Lkw wirtschaftlichen Einsatzprofile dann im Schnitt deutlich geringer.

Mit in Deutschland hergestelltem Elektrolysewasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Lkw haben hingegen keine wirtschaftliche Anwendung. Bei Verwendung günstigen Importwasserstoffs (4,57 €/kg_{H2}) sind 31 % der Fahrleistung mit BZ-Lkw wirtschaftlich, hauptsächlich im Segment der Last- und Sattelzüge mit hohen Fahrleistungen. Oberleitungs-Lkw kommen nur für Fahrzeuge mit zGG > 12 t in Frage und ermöglichen abhängig vom Netzausbau einen gegenüber Diesel-Lkw wirtschaftlichen Betrieb für 24-42 % der Gesamtfahrleistung, vor allem im Bereich langer Strecken.

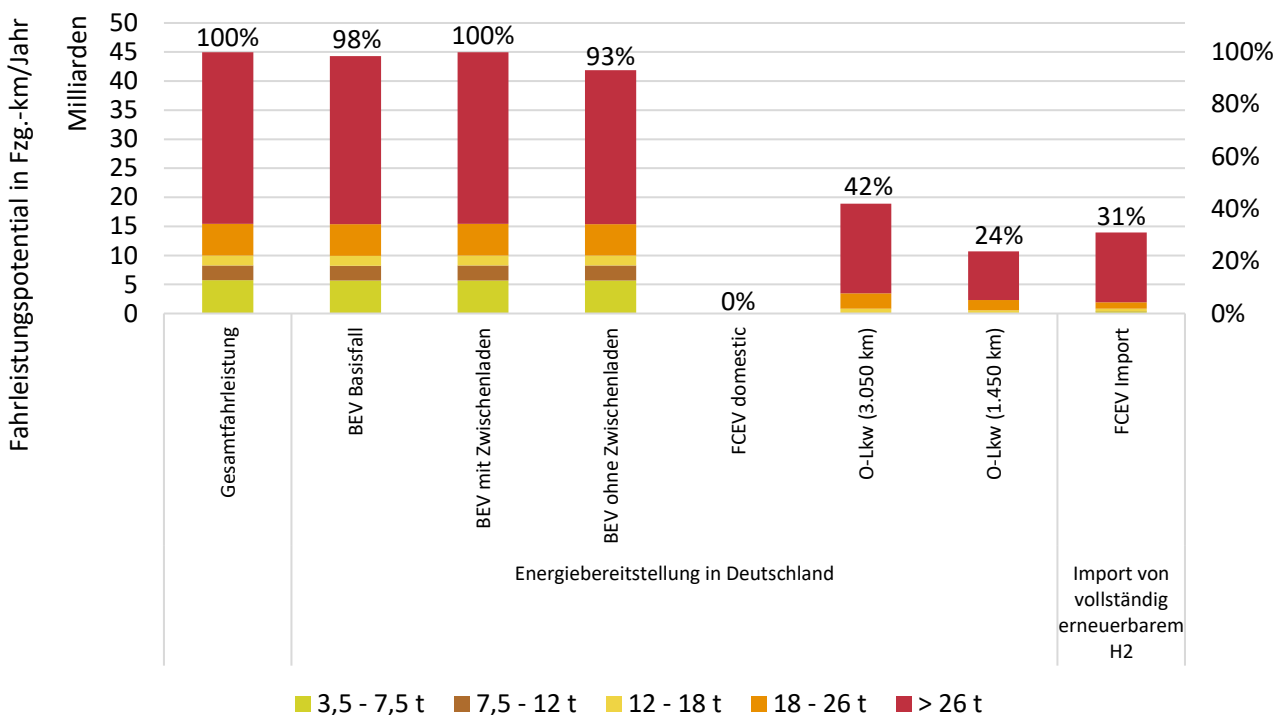


Abbildung 22: Summierte Fahrleistungen alternativ angetriebener Lkw für die betrachteten Einzelpotentiale (eigene Berechnungen)

3.4.2 Kostenbilanz für Lkw-Betreiber

Für die Einzelpotentiale wurden zudem die summierten Einsparungen der Lkw-Betreiber gegenüber dem Referenzszenario mit ausschließlich Diesel-Lkw berechnet (Abbildung 23). Zusätzlich zum Basisfall, in dem die Infrastrukturkosten nicht auf die Fahrzeugbetreiber umgelegt wurden, wurde hier die Auswirkung einer vollständigen Berücksichtigung der Infrastrukturkosten in den TCO untersucht¹. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lkw-Betreiber bei Ausschöpfung des Potentials von Batterie-Lkw beträchtliche Einsparungen zwischen 2,5 und 4,5 Mrd. € jährlich realisieren können. Unter Berücksichtigung einer Infrastrukturumlage sinken diese Werte um 1-1,5 Mrd. €, es verbleiben aber Einsparungen im Bereich von 1-3 Mrd. € jährlich. Brennstoffzellen-Lkw können hingegen nur Einsparungen realisieren, wenn die Infrastrukturkosten nicht auf die Betreiber umgelegt werden. Durch Ausschöpfung des O-Lkw-Potentials (bei 3.050 km Netzlänge) können Betreiber Einsparungen im Bereich von etwa 1,5 Mrd. € jährlich realisieren. Bei Umlegung der Infrastrukturkosten verbleiben Kosteneinsparungen für die Betreiber in der Größenordnung von 500 Mio. €.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Infrastrukturkosten dieser in Entwicklung befindlichen Technologien derzeit nur näherungsweise quantifiziert werden können. Hier bestehen große Unsicherheiten, insbesondere durch voraussichtlich notwendige Infrastrukturerüchtigung im vorgelagerten Stromnetz und für die Verteilung des Wasserstoffs (beides hier nicht berücksichtigt) sowie die Abhängigkeit der Infrastrukturkosten von der genauen Auslegung der Infrastruktur (Kapazitäten, Redundanz etc.). Des Weiteren können Wechselwirkungen der Infrastruktur mit dem Energiesystem zu abweichenden Stromgestehungskosten zwischen den Antriebstechnologien führen. In diesem Bereich besteht erheblicher, über das aktuelle Vorhaben hinausgehender Forschungsbedarf.

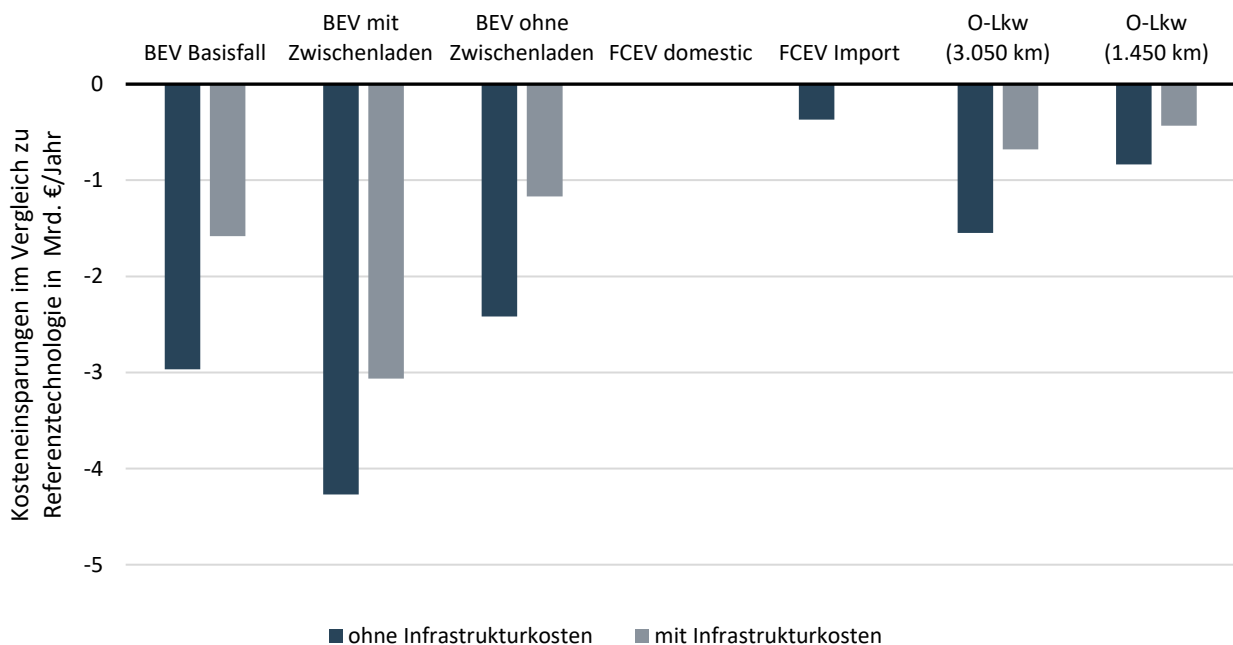


Abbildung 23: Summierte Differenzkosten der alternativ angetriebenen Lkw gegenüber Diesel-Lkw für die betrachteten Einzelpotentiale (eigene Berechnungen). Der graue Balken zeigt die Einsparungen, die sich ergeben, wenn die Infrastrukturkosten (bei angenommener Ausschöpfung des jeweiligen wirtschaftlichen Potentials) auf die Lkw-Betreiber umgelegt werden.

¹ Die Berechnung der Infrastrukturumlage folgt dabei einem vereinfachten Ansatz auf Basis von Eckwerten der NPM, siehe (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020) und Abschnitt 2.3.3.

3.4.3 Potentielle THG-Minderung

Des Weiteren wurden die Treibhausgasreduzierungsunterschiede für die betrachteten Antriebstechnologien ermittelt, die sich bei angenommener jeweils separater vollständiger Ausschöpfung ihrer jeweiligen wirtschaftlichen Potentiale im Jahr 2030 ergeben. Der Bilanzrahmen umfasst dabei den Betrieb (Nutzung und Energiebereitstellung) sowie die Fahrzeugherstellung. Das Vorgehen lehnt sich an (Helms et al. 2021) an, wesentliche Grundlagendaten sind Abschnitt 2.4 zu entnehmen.

Spezifisch erreicht die direkte Nutzung des deutschen Strommix über Batterie- und Oberleitungs-Lkw¹ selbst unter Berücksichtigung der Fahrzeug- und Batterieherstellung 2030 voraussichtlich eine THG-Minderung von jeweils gut 50 %. Beim Brennstoffzellen-Lkw liegt die erzielbare THG-Minderung bei Erzeugung über Elektrolyse mit deutschem Strommix dagegen aufgrund der Konversionsverluste unter 10 %, so dass diese Option selbst im Falle eines entsprechenden Marktpotentials klimapolitisch nicht sinnvoll erscheint. Nur bei Import vollständig erneuerbaren Wasserstoffs aus der MENA-Region² wäre dagegen eine spezifische THG-Minderung von gut 70 % möglich. Angesichts einer absehbar sehr hohen Nachfrage nach grünem Wasserstoff in verschiedenen Sektoren³ erscheint es allerdings fraglich, ob die benötigten Mengen im Jahr 2030 zu den hier angenommenen Kosten (4,57 €/kg_{H2}) tatsächlich für den Straßengüterverkehr zur Verfügung stehen.

Die absoluten Treibhausgasreduzierungsunterschiede (unter Zugrundelegung des vorgenannten Bilanzraums) für die betrachteten Antriebstechnologien bei jeweils angenommener vollständiger Ausschöpfung ihrer jeweiligen wirtschaftlichen Potentiale im Jahr 2030 sind in Abbildung 24 dargestellt. Es sei an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen, dass eine Ausschöpfung der Potentiale bereits im Jahr 2030 aufgrund verzögerter Marktpenetration nicht realistisch ist und der Anteil der Technologien im Bestand des Jahres 2030 daher aller Voraussicht nach in jedem Fall deutlich niedriger liegen dürfte. Die gezeigten THG-Minderungsunterschiede stellen somit theoretische Obergrenzen dar.

Für die somit theoretisch erzielbaren THG-Minderungen durch Einsatz der einzelnen Technologien im Jahr 2030 zeigt sich folgendes Bild:

- Batterie-Lkw haben aufgrund ihres hohen wirtschaftlichen Potentials und vergleichsweise hoher spezifischer Minderungen das mit Abstand höchste CO₂-Minderungsunterschied. Auch unter Berücksichtigung der Fahrzeugherstellung (deren Bedeutung merklich zunimmt) können hier 48-57 % der Emissionen gegenüber dem Referenzfall vermieden werden.
- Bei Brennstoffzellen-Lkw ergibt sich bei Nutzung von in Deutschland erzeugtem Elektrolysewasserstoff kein wirtschaftliches Potential und somit auch keine THG-Minderung. Bei Nutzung von importiertem, vollständig erneuerbarem Wasserstoff können im Falle sehr geringer Energiekosten immerhin Minderungen von bis zu 27 % erreicht werden. Es bleiben jedoch zahlreiche offene Fragen bezüglich der Realisierbarkeit, Nachhaltigkeit und systemischer Effizienz bezüglich der Erreichung der Klimaziele: Ein H₂-Import in großem Maßstab zu dem hier angenommenen niedrigen Preis setzt voraus, dass in den potenziellen Herkunftsländern nicht nur ein hohes Potential für die Erzeugung von er-

¹ Entsprechend des berechneten wirtschaftlichen Einsatzpotentials handelt es sich hierbei größtenteils um O-BEV.

² Annahme: 69 % Windenergie, 31 % Photovoltaik

³ siehe hierzu z.B. (Matthes et al. 2020)

neuerbarem Strom besteht, sondern auch die entsprechenden Elektrolysekapazitäten bis 2030 aufgebaut werden können. Das H₂-Exportpotential von EE-Gunstregionen ist zwar theoretisch groß, allerdings ist dieser Ansatz mit erheblichen geopolitischen Herausforderungen und neuen Abhängigkeiten verbunden. Zudem muss sichergestellt werden, dass neben dem wirtschaftlich und technisch anspruchsvollen Technologiehochlauf auch Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich politischer, sozialer und ökologischer Anforderungen eingehalten werden.

- Oberleitungs-Lkw erreichen in ihrem Anwendungsbereich hohe spezifische Minderungen von etwa 54 % (vergleichbar mit BEV) und können bezogen auf die Gesamtemissionen je nach Netzausbau zwischen 15 % und 27 % Emissionseinsparung erzielen.

Bei allen hier dargestellten Minderungspotentialen handelt es sich jedoch um theoretische Obergrenzen, die nur im Falle einer vollständigen Ausschöpfung des jeweiligen wirtschaftlichen Potentials der einzelnen Antriebstechnologien im Jahr 2030 realisiert werden könnten.

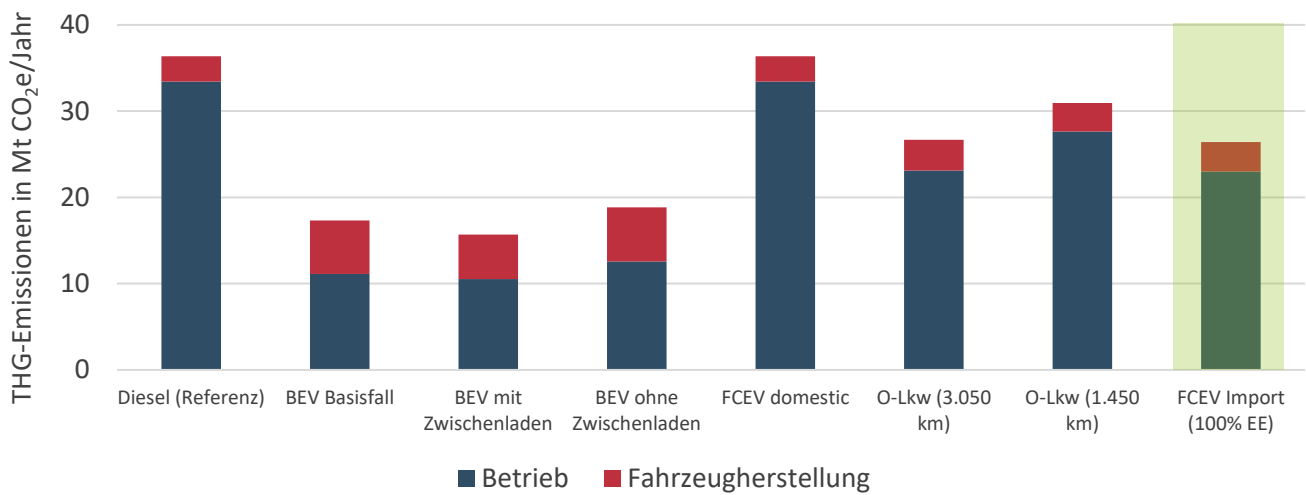


Abbildung 24: Jährliche Treibhausgasemissionen der alternativ angetriebenen Lkw bei vollständiger Ausschöpfung der betrachteten Einzelpotentiale (eigene Berechnungen). Alle betrachteten Fälle außer „FCEV Import“ verwenden den deutschen Strommix 2030.

4 Kostenoptimaler Technologiemitmix

Im vorangegangenen Kapitel wurden die wirtschaftlichen Potentiale der einzelnen Antriebstechnologien jeweils separat im Vergleich zum Dieselantrieb quantifiziert. Zur Berechnung eines kostenoptimalen Antriebsportfolios für den Lkw-Verkehr im Jahr 2030 werden nun nachfolgend alle betrachteten Technologien hinsichtlich ihrer Vollkosten auf Ebene einzelner Fahrzeugeinsatzprofile miteinander verglichen und jeweils die Technologie mit minimalen Vollkosten gewählt. Für den Vergleich wurden im Basisfall folgende Annahmen getroffen:

- Alternative Antriebe müssen einen TCO-Vorteil von mind. 1 % gegenüber dem Dieselantrieb aufweisen.
- Für **Batterie-Lkw** gilt: Falls während eines Tagesprofils eine Lenkzeitpause nötig ist (Fahrzeit über 4,5 h), werden nur BEV500 oder BEV600 zugelassen und die Annahme getroffen, dass diese während der Lenkzeitpause mit hoher Leistung zwischengeladen werden. Dies entspricht dem Basisfall in Abschnitt 3.1.
- Für **Oberleitungs-Lkw** wird ein Basisnetz von 3.050 km Länge angenommen.
- Für **Brennstoffzellen-Lkw** wird günstiger Import-Wasserstoff (4,57 €/kg_{H2}) angenommen.
- Infrastrukturkosten für alle alternativen Antriebe werden nicht auf die Lkw-Betreiber umgelegt.

Bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen für den kostenoptimalen Technologiemitmix wurde in den TCO keine Infrastrukturumlage (siehe Abschnitt 2.3.3) berücksichtigt. Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Umlage der Infrastrukturkosten auf die Nutzer sind in Anhang A3 dargestellt; die Potentiale alternativer Antriebe fallen dadurch etwas niedriger aus, es ergeben sich aber keine wesentlichen Änderungen in der Gesamtaussage.

Abbildung 25 zeigt die resultierende Verteilung der Fahrleistung auf die jeweils wirtschaftlichsten Technologien nach Fahrzeugklasse, Abbildung 26 gibt für das dominierende Segment der Lkw > 26 t zusätzlich die Aufteilung nach der mittleren Tagesfahrweite an. Es zeigt sich, dass BEV-Antriebe den resultierenden Technologiemitmix dominieren (etwa 68 % der Fahrleistung). Auf langen Strecken mit hinreichendem Oberleitungsanteil werden sie durch O-Lkw (überwiegend O-BEV) ergänzt, die hier gegenüber BEV einen Kostenvorteil von im Durchschnitt etwa 4 % erreichen können.

Dieselantrieb und Brennstoffzellenantrieb sind im kostenoptimierten Technologiemitmix nicht vertreten. Bei Annahme in Deutschland produzierten Wasserstoffs ergibt sich eine Kostenlücke von etwa 30-40 % zu Batterie- und Oberleitungs-Lkw, so dass auch deutlich günstigere Energiepreisentwicklungen als hier angenommen keine Änderung erwarten lassen. Kann mit Importwasserstoff ein besonders günstiger Preis realisiert werden (Annahme: 4,57 €/kg_{H2}), so erreichen Brennstoffzellen-Lkw zumindest für einen gewissen Teil der Einsatzprofile annähernd Kostenparität gegenüber Batterie-/Oberleitungs-Lkw. Für 24 % der Gesamtfahrleistung beträgt der Kostennachteil weniger als 5 %. Die Kostenunterschiede aller alternativen Antriebe zum Diesel-Lkw hängen stark von den künftigen CO₂- und Strompreisen ab.

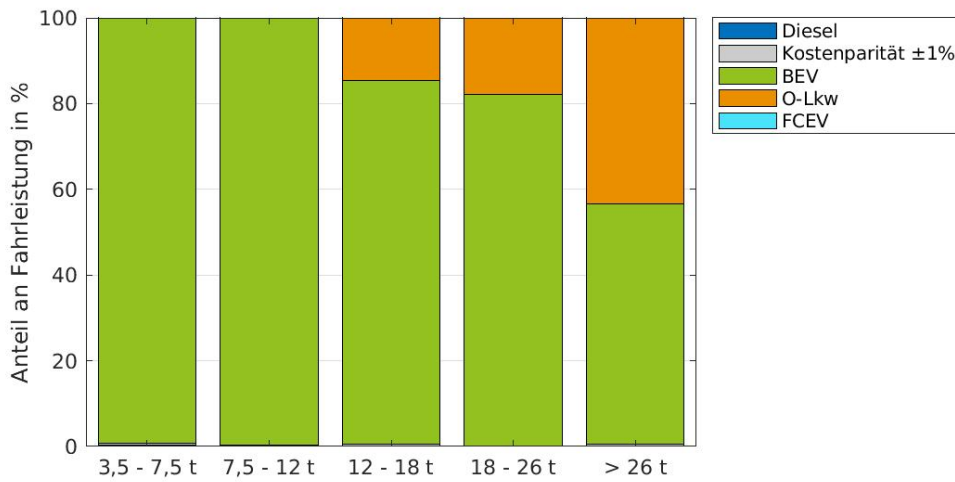


Abbildung 25: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km (eigene Berechnungen).¹

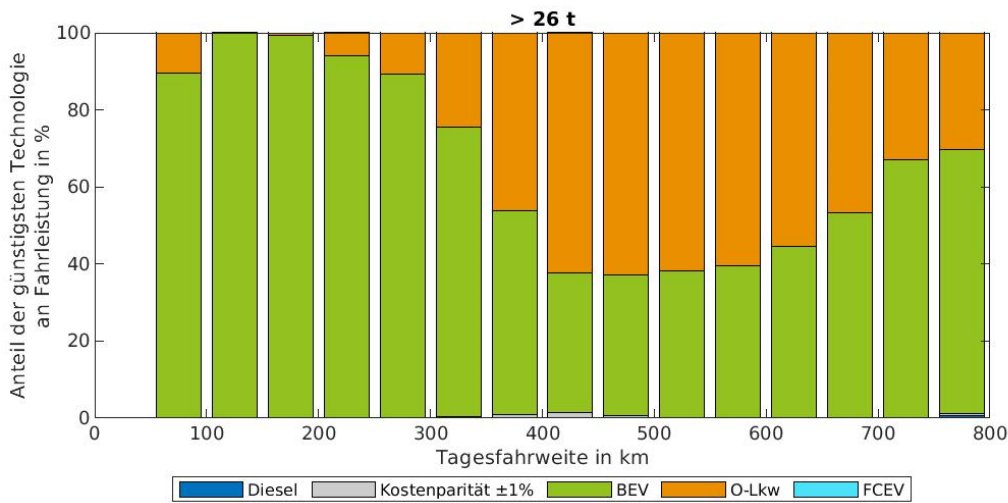


Abbildung 26: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km in Abhängigkeit der Tagesfahrweite (eigene Berechnungen).

Bei einer gegenüber dem zuvor beschriebenen Fall reduzierten Oberleitungsnetzlänge von 1.450 km wechselt ein Teil des O-Lkw-Potentials hin zu BEV-Lkw als dem günstigsten Antrieb (Abbildung 27 und Abbildung 28). Qualitativ ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei 3.050 km Netzlänge, wobei der Anteil von O-Lkw am gesamten Antriebsportfolio verglichen mit der Netzlänge in etwa proportional zurückgeht. Am Vergleich des wirtschaftlichen Potentials nach Tagesfahrweite (Abbildung 26 und Abbildung 28) ist zu erkennen, dass bei geringerer Netzausdehnung das Potential v.a. im Bereich hoher Tagesfahrweiten

¹ Für Batterie-Lkw wird hier der Basisfall angenommen, d.h. Zwischenladung von Batterie-Lkw auf Fernfahrten nur während der regulären Lenkzeitpausen.

absinkt. Hier erscheinen dann in geringem Umfang auch Diesel-Lkw im Technologiemix. Steht kein Oberleitungsnetz zur Verfügung, so stellt sich der Basisfall des BEV-Lkw-Potentials als kostenoptimaler Technologiemix ein (siehe Abschnitt 3.1).

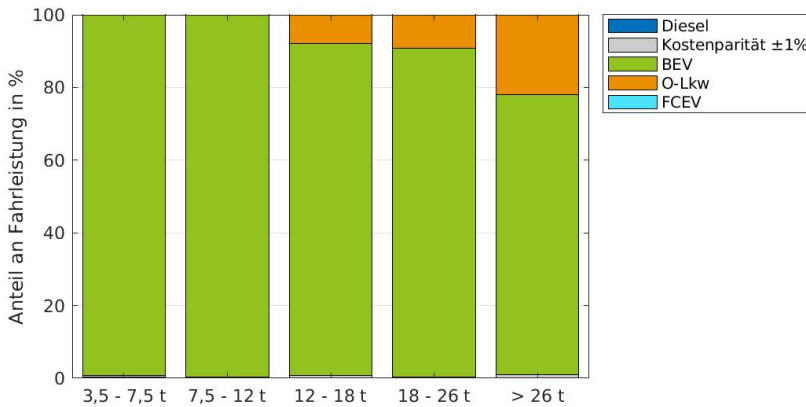


Abbildung 27: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines kürzeren Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von nur 1.450 km (eigene Berechnungen).¹

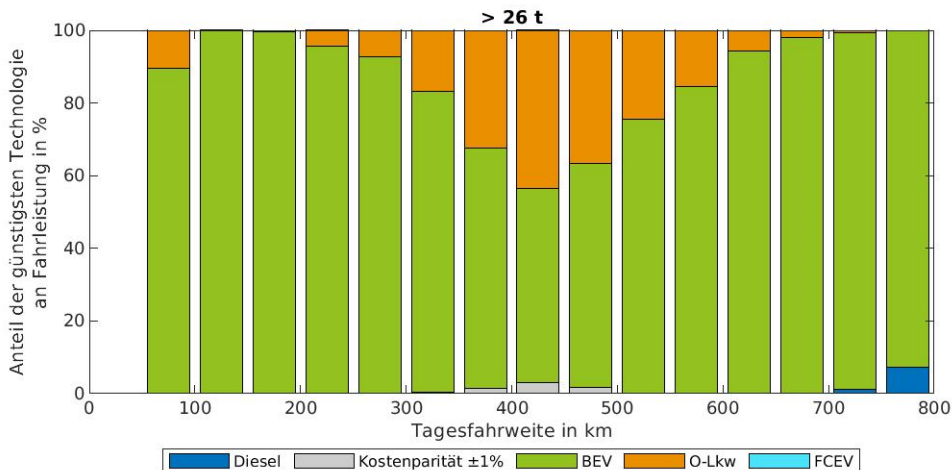


Abbildung 28: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten bei Annahme eines kürzeren Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von nur 1.450 km in Abhängigkeit der Tagesfahrweite (eigene Berechnungen).

Da die Oberleitungstechnologie eine Art Zwischenladeinfrastruktur für Batterie-Lkw darstellt, liegt die Vermutung nahe, dass ihre Wirtschaftlichkeit gegenüber stationär geladenen Batterie-Lkw unter anderem davon abhängt, in welchem Umfang für Batterie-Lkw stationäre Lademöglichkeiten angenommen werden. In Abbildung 29 ist daher der jeweils kostenoptimale Technologiemix für Lkw > 12 t für drei verschiedene Annahmen bezüglich der stationären Lademöglichkeiten² gegenüber gestellt, neben dem Basisfall auch aus-

¹ Für Batterie-Lkw wird hier der Basisfall angenommen, d.h. Zwischenladung von Batterie-Lkw auf Fernfahrten nur während der regulären Lenkzeitpausen.

² Zu den Details dieser Annahmen siehe Abschnitt 3.1

schließliches Laden im Depot und die vollständige Verfügbarkeit von Möglichkeiten zur Zwischenladung. Im Falle ausschließlicher Depotladung sind Oberleitungs-Lkw in fast all denjenigen Fällen gegenüber Batterie-Lkw wirtschaftlich, in denen sie einen Kostenvorteil gegenüber Diesel-Lkw haben. Bei voller Verfügbarkeit stationären Zwischenladens nimmt das Potential von O-Lkw hingegen deutlich ab. Aspekte der betrieblichen Realisierbarkeit von Infrastruktur zur stationären Zwischenladung sind für den zukünftigen Technologiemix also von großer Bedeutung.

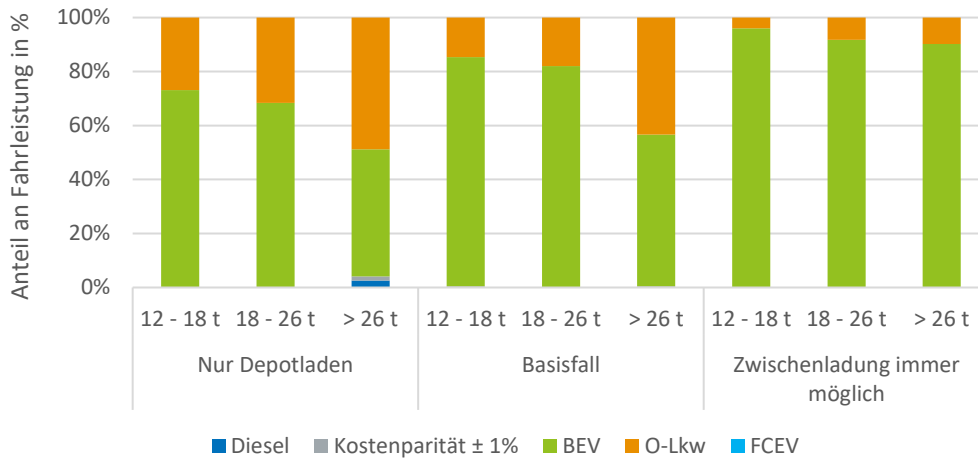


Abbildung 29: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten für ein Oberleitungsnetz von 3.050 km Gesamtlänge und drei verschiedene Annahmen bezüglich der Zwischenlademöglichkeiten bei BEV-Lkw (eigene Berechnungen).

Lkw-Betreiber können bei Realisierung des kostenoptimalen Technologieportfolios (und unveränderten Rahmenbedingungen) gegenüber dem Referenzfall TCO-Einsparungen von jährlich ca. 3,5 Mrd. € erwarten (Abbildung 30). Wird kein Oberleitungsausbau angenommen und werden folglich ausschließlich Batterie-Lkw eingesetzt, so verringert sich der jährliche Kostenvorteil der Betreiber um etwa 500 Mio. €. Die Einsparungen steigen also leicht mit zunehmendem Oberleitungsausbau, liegen aber in Anbetracht der Unsicherheiten in allen Fällen auf ähnlichem Niveau. Eine vollständige Umlage der Infrastrukturkosten auf die Betreiber hat jeweils in etwa eine Halbierung der Einsparungen zur Folge.

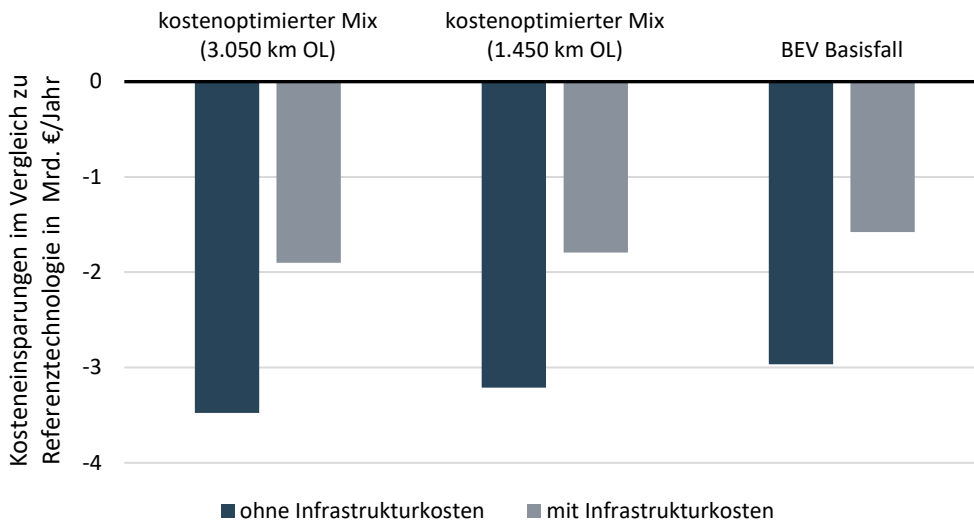


Abbildung 30: Summierte Differenzkosten der alternativ angetriebenen Lkw gegenüber Diesel-Lkw für die betrachteten Technologieportfolios (eigene Berechnungen).

Alle kostenoptimierten Technologieportfolios erreichen THG-Einsparungen gegenüber der Diesel-Referenz zwischen 52 % und 55 % (inkl. Energiebereitstellung und Fahrzeugherstellung) und 67-68 % in einer reinen Well-to-Wheel-Betrachtung (Abbildung 31). Das entspricht einem absoluten THG-Minderungspotential von etwa 19-20 Mt jährlich¹. Die Fahrzeugherstellung gewinnt bei den Emissionen v.a. durch den Batteriebedarf der elektrischen Flotte an Bedeutung (etwa 35 % Anteil der Herstellung ggü. 8 % in der Referenz). Durch ein Oberleitungssystem lassen sich jährlich etwa 14,5 GWh Batteriekapazität einsparen (entspricht 26 % bezogen auf die gesamte Lkw-Flotte), auf die gesamten THG-Emissionen hat dies aber nur geringen Einfluss.

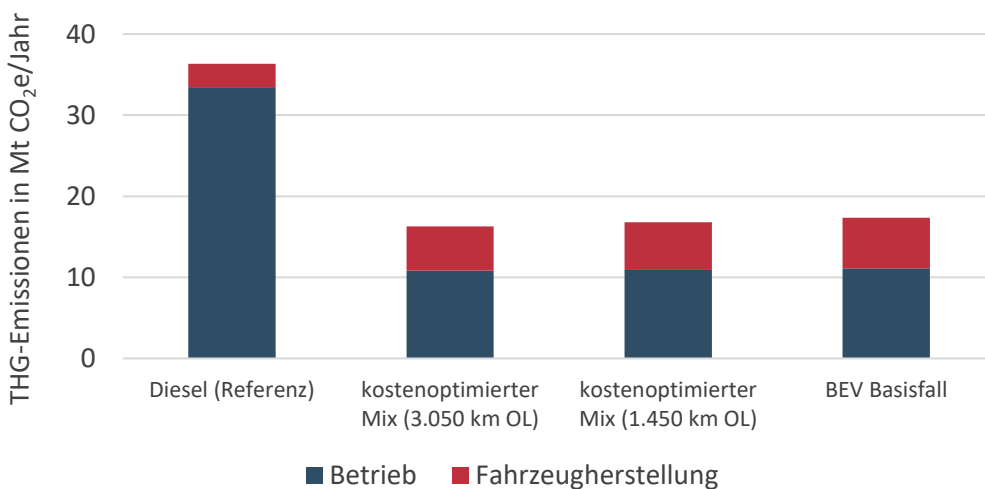


Abbildung 31: Jährliche Treibhausgasemissionen der alternativ angetriebenen Lkw für die betrachteten Technologieportfolios (eigene Berechnungen).

¹ Auch hier handelt es sich um ein theoretisches Potential, das die begrenzte Geschwindigkeit der Flottenerneuerung nicht berücksichtigt.

Literaturverzeichnis

- BAST (2017): Fahrleistungserhebung 2014. https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrssicherheit/Fachthemen/U2-fahrleistung-2014/u2-Fahrleistung-2014-ergebnisse.html;jsessionid=C1AF6B1E9015BB8BF7FA7F12470DCCB3.live21302?nn=1817128. (21.12.2020).
- Bünger, Dr. U.; Nicolai, S.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, Dr. J.; Ruhe, S.; Albrecht, Dr. U. (2019): Infrastrukturbedarf E-Mobilität: Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. S. 134.
- Burke, A.; Sinha, A. K. (2020): Technology, Sustainability, and Marketing of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Medium-Duty and Heavy-Duty Trucks and Buses in 2020-2040. In: *UC Davis: National Center for Sustainable Transportation*. National Center for Sustainable Transportation.
- BVU; Intraplan; IVV; Planco Consulting (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht. <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf> (29.01.2020).
- DB Netze (2020): Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2019. https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Finanzierung/IZB/IZB_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (04.11.2021).
- Den Boer, E.; Aarnink, S.; Kleiner, F.; Pagenkopf, J. (2013): Zero emissions trucks. An overview of state-of-the-art technologies and their potential.
- EurotaxSchwacke (2015): Schwacke Liste Nutzfahrzeuge. IV.
- Fries, M.; Lehmeier, M.; Lienkamp, M. (2017): Multi-criterion optimization of heavy-duty powertrain design for the evaluation of transport efficiency and costs. Technische Universität München.
- Gerhardt, N.; Scholz, A.; Hahn, H.; Schumacher, P.; Sager, C.; Bergk, F. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Endbericht. Fraunhofer IWES, Kassel. https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2016/02/stiftungumweltenergierecht_Endbericht_EE-Strom_W%C3%A4rme-Verkehr_2015.pdf.
- Göckeler, K.; Hacker, F.; Mottschall, M.; Blanck, R.; Görz, W.; Kasten, P.; Bernecker, T.; Heinzlmann, J. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr.
- Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W.; Bernecker, T.; Speiser, J.; Röckle, F.; Schubert, M.; Neubauer, G. (2020): Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn, Fraunhofer IAO, Intraplan Consult GmbH, Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf> (25.02.2020).
- Hacker, F.; Jöhrens, J.; Plötz, P. (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung Und Ausbauszenarien Von Oberleitungs-Lkw in Deutschland. Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Stand_desWissens_OH-Lkw_Zusammenfassung_final_2020-05-25.pdf.
- Helms, H.; Biemann, Dr.-Ing. K.; Allekotte, M.; Jöhrens, J.; Liebich, A.; Fehrenbach, H.; Lambrecht, U. (2021): Defossilisation in road goods transport: Life-cycle climate impacts of alternative truck technologies and fuels.

- Hunter, C.; Penev, M.; Reznicek, E. (2020): Market Segmentation Analysis of Medium and Heavy Duty Trucks with a Fuel Cell Emphasis. National Renewable Energy Laboratory. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/sa169_hunter_2020_o.pdf (02.11.2021).
- IEA (2019): The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities.
- ifeu; DLR; JOANNEUM Research (2019): SYSEET – Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energietraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf (03.11.2021).
- 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“. <https://www.ifeu.de/publikation/potentialanalyse-fuer-batterie-lkw/>.
- Jöhrens, J.; Waßmuth, V.; Rucker, J.; Kräck, Jan; Helms, H.; Biemann, K.; Schillinger, M.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Heidelberg. <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Roadmap-OH-Lkw-Bericht-Einfuehrungsszenarien-web.pdf>.
- JRC (2020): JEC Tank-to-Wheels Report v5: Heavy duty vehicles. Text, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/jec-tank-wheels-report-v5-heavy-duty-vehicles>.
- Lastauto Omnibus (2014): Katalog 2014. ETM Verlag, Stuttgart.
- Matthes, D. F. C.; Heinemann, C.; Hesse, D. T.; Kasten, P.; Mendelewitsch, D. R.; Seebach, D.; Timpe, C.; Cook, V. (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe. Eine Überblicksuntersuchung. Öko-Institut.
- Mayer, T.; Semmel, M.; Guerrero Morales, M. A.; Schmidt, K. M.; Bauer, A.; Wind, J. (2019): Techno-economic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 44, No.47, S. 25809–25833.
- Nationale Plattform Mobilität, AG1 (2020): Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge - Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus Elektrifizierung. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nfz.pdf (07.12.2020).
- Phadke, A.; Khandekar, A.; Abhyankar, N.; Wooley, D.; Rajagopal, D. (2021): Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045.
- Rose, P. (2020): Modeling a potential hydrogen refueling station network for fuel cell heavy-duty vehicles in Germany in 2050.
- VDMA (2020): Brennstoffzellen Branchenführer Deutschland 2020. https://bz.vdma.org/documents/266669/49015197/Branchenf%C3%BChrer_Brennstoffzellen_2020_final_1591084549781.pdf/4d9c9301-c026-e7a1-8e08-49c6b7d20474 (02.11.2021).
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, Dr. P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J.; Boßmann, Dr. T.; Stütz, Dr. S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, H.; Waßmuth, Dr.-Ing. V.; Paufler-Mann, D.; Rödl, Dr. A.; Schade, Dr. W.; Mader, S. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE, M-Five, Karlsruhe. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile.

Anhang

A1 Modellbeschreibung PTV Validate

PTV Validate ist ein deutschlandweites Straßenverkehrsmodell mit Berücksichtigung des europäischen Bezugs. Verkehrsmengen und Verkehrsströme werden getrennt für Pkw und Lkw abgebildet. Somit können auch für Teilgebiete/Regionen und einzelne Streckenabschnitte Analysen durchgeführt werden.

Das PTV Validate-Modell differenziert die Verkehrsnachfrage räumlich in über 10.000 Verkehrszellen, auf ca. 5,6 Millionen Einzelstrecken (basierend auf den kontinuierlich aktualisierten Navigationsnetzen von HERE) und bildet circa 120 Millionen tägliche Fahrten ab. Die Verkehrszellen orientieren sich an den administrativen Grenzen und werden im Schnitt über vier bis acht Anbindungen mit dem Streckennetz verbunden. Im Modell ist ein umfangreicher Strukturdatensatz verarbeitet, der neben Einwohnern u. a. auch Schulen und Arbeitsplätze umfasst. Im Güterverkehr basieren die Verflechtungen auf den Grundlagendaten des Kraftfahrtbundesamtes, ergänzt um eine lokale Differenzierung bezüglich der Aufkommens- und Produktionsschwerpunkte. Einen weiteren wichtigen Abgleich stellen die gütergruppenspezifischen Informationen der Verflechtungsprognose 2030 des BMVI dar.

Das Gesamtmodell bildet das Mobilitätsprogramm der Bevölkerung und der Unternehmen Deutschlands im motorisierten Individualverkehr und im straßenbezogenen Güterverkehr nach. Im Güterverkehr werden die Warentransporte je Güterabteilung unter Verwendung von entfernungsabhängigen Widerstandsfunktionen und Auslastungsgraden in Fahrzeugbewegungen umgerechnet. Dabei werden die Lkw nach Größenklassen aufgeteilt. Die so entstehenden Lkw-Fahrten werden über Einspeisungspunkte in das Netzmodell aufgebracht. Die Routenwahl erfolgt dabei getrennt vom Pkw-Verkehr.

In der Überlagerung der Einzelfahrten für Pkw und Lkw bezogen auf Deutschland ergeben sich Verkehrsmengen auf den relevanten Straßen des deutschen Streckennetzes. Dieses umfasst neben dem klassifizierten Netz auch alle innerstädtischen Strecken mit Verbindungsfunktion. Der Transitverkehr sowie der Quell- und Zielverkehr Deutschlands werden im europäischen Kontext ergänzt. Kalibriert und validiert wird das Modell unter Verwendung von Zählraten im Straßennetz. Unter Zugrundelegung der Verflechtungsprognose 2030 kann neben dem Status quo auch das Szenariojahr 2030 im deutschen Straßennetz analysiert werden.

A2 Abschätzung der Infrastrukturkosten

Die Infrastrukturkosten für das Bezugsjahr 2030 wurden jeweils bezogen auf eine Energieeinheit der betrachteten Energieträger abgeleitet. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

Bei **betrieblicher Ladeinfrastruktur** für BEV-Lkw wird eine Leistung von 150 kW angenommen und dafür nach (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020) Investitionskosten von 70.800 € angesetzt. Es wird eine Betriebsdauer der Ladestation von gut 5 h pro Tag angenommen¹, so dass 800 kWh Strom täglich abgegeben werden (ausreichend für eine vollständige Aufladung von ein bis zwei Lkw je nach Größenklasse). Bei einer Lebensdauer von 20 Jahren und 250 Betriebstagen pro Jahr sowie einer jährlichen Pauschale von 2 % der Investitionskosten für Wartung und Instandhaltung ergeben sich Infrastrukturkosten von 2,5 ct/kWh_{el}.

Bei **öffentlicher Ladeinfrastruktur** zum Zwischenladen mit hoher Leistung wird gegenüber der betrieblichen LIS von einer höheren Auslastung von 10 h täglich ausgegangen². Es wird eine Leistung von 750 kW angenommen, der Preis pro Ladepunkt wird nach (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020) mit 300.000 € angesetzt. Bei ebenfalls 2 % der Investitionskosten für Wartung und Instandhaltung ergibt sich somit ein Infrastrukturaufschlag von 1,1 ct/kWh für öffentliche Schnellladeinfrastruktur.

Für die Kosten von **Wasserstofftankstellen** wurden auf Literaturbasis Investitionskosten von 2000 € für eine Abgabekapazität von 1 kg_{H2} pro Tag abgeschätzt³. Für Wartung und Instandhaltung wurden verglichen mit Ladeinfrastruktur prozentual etwas höhere Kosten von jährlich 5 % der Investitionskosten angesetzt (IEA 2019), die angenommene Lebensdauer beträgt auch hier 20 Jahre. Es ergeben sich somit Kosten für die H₂-Tankstelleninfrastruktur von 80 ct/kg_{H2}.

Die Investitionskosten für ein **Oberleitungsnetz** schließlich werden mit 2 Mio. € pro beidseitig elektrifiziertem Streckenkilometer angenommen (Nationale Plattform Mobilität, AG1 2020). Als Fahrleistungspotential an der Oberleitung ergab sich ohne Umlegung der Infrastrukturkosten im Falle eines Basisnetzes von 3.050 km Länge ein Wert von 5,9 Mrd. Fzg.-km unter Oberleitung. Unter Annahme eines mittleren Stromverbrauchs von 1,3 kWh/km für O-Lkw ergibt dies Infrastrukturkosten von 4,2 ct pro abgegebener kWh_{el}. Für die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Oberleitungsinfrastruktur wird im Bahnbereich aktuell eine Spanne von jährlich 0,5-0,7 % der Investitionskosten angegeben (DB Netze 2020). Unter Berücksichtigung der voraussichtlich höheren Beanspruchung einer OL-Infrastruktur im Straßenverkehr wird hier ein Wert von 1 % jährlich verwendet. In Summe ergeben sich somit Infrastrukturkosten von 5 ct/kWh_{el}.

Bei den angenommenen Infrastrukturkosten aller Technologien sind generell keine möglicherweise notwendigen Ausbaumaßnahmen im vorgelagerten Verteilnetz enthalten. Diese werden voraussichtlich für alle Technologien anfallen, wobei ihre Höhe von vielen, insbesondere auch lokalen Faktoren abhängt.

¹ Da eine Ladestation in der Regel über 2 Ladepunkte verfügt, ist auch eine (zumindest teilweise) parallele Aufladung von 2 Lkw möglich.

² Auch hier ist bei 2 Ladepunkten eine zumindest zeitweise parallele Nutzung durch zwei Fahrzeuge möglich.

³ (Bünger et al. 2019; Burke / Sinha 2020; Mayer et al. 2019)

A3 Wirtschaftliche Potentiale bei Umlage der Infrastrukturkosten auf die Nutzer

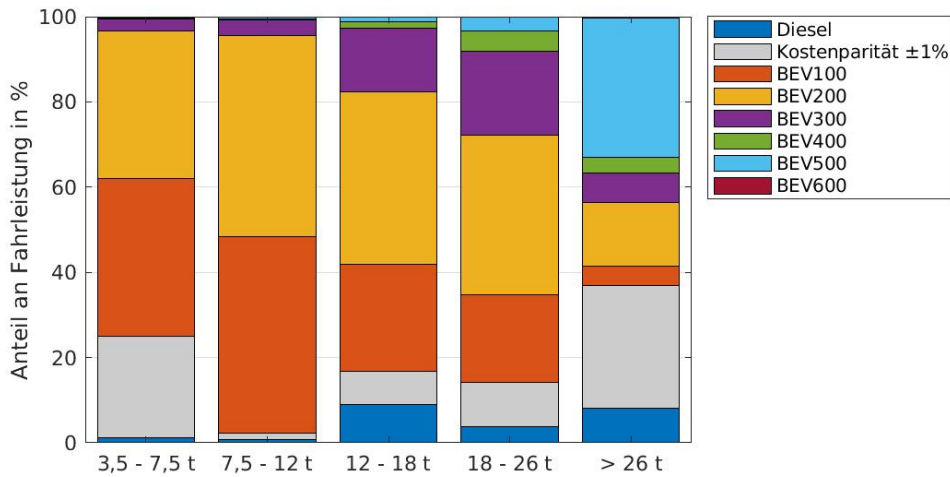


Abbildung 32: Wirtschaftliches Potential (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten als Anteil an der Gesamtfahrleistung (eigene Berechnungen). Falls während einer Fahrt eine Lenkzeitpause nötig ist, werden nur BEV500 oder BEV600 zugelassen. Keine zeitliche Verzögerung für Ladevorgänge zugelassen. (eigene Berechnungen)

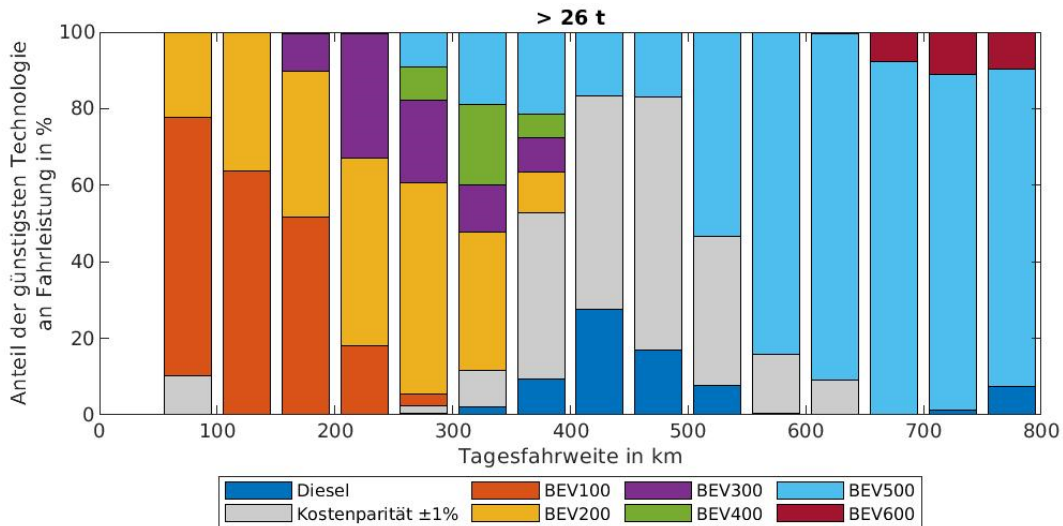


Abbildung 33: Wirtschaftliches Potential (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Batterie-Lkw verschiedener Reichweiten (Basisfall, siehe oben) als Anteil an der Gesamtfahrleistung, differenziert nach Tagesfahrweite für Lkw > 26 t (eigene Berechnungen)

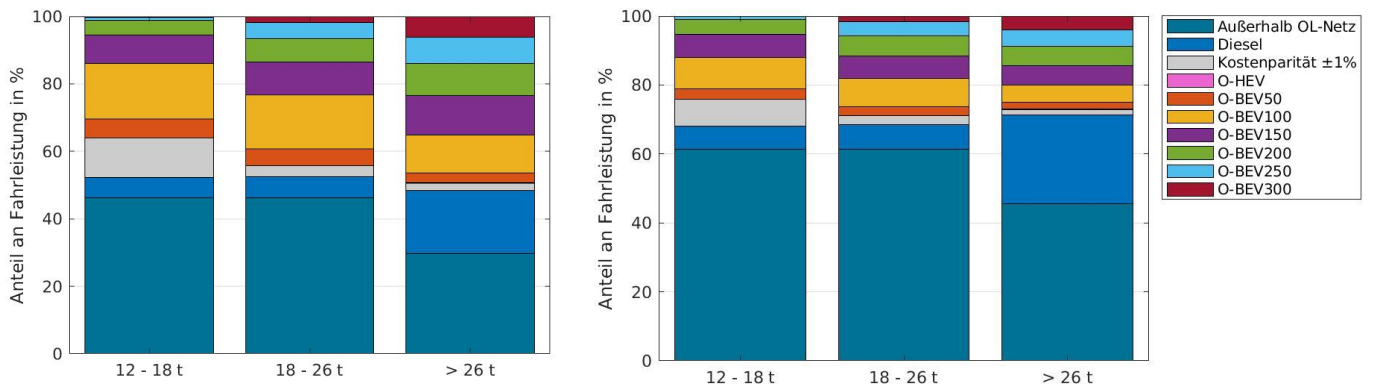


Abbildung 34: Anteil des wirtschaftlichen Fahrleistungspotentials (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Oberleitungs-Lkw für die relevanten Größenklassen; links: Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken; rechts: Annahme eines kleineren OL-Netzes von lediglich 1.450 km Gesamtlänge (eigene Berechnungen).

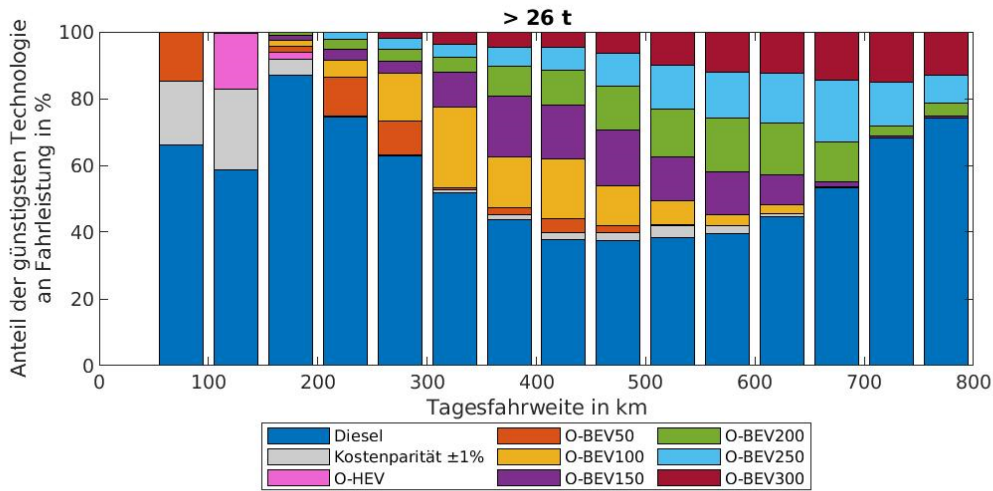


Abbildung 35: Anteil wirtschaftlicher O-Lkw-Fahrleistung (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) von Fahrzeugen > 26 t zGG abhängig von Tagesfahrweite unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken (eigene Berechnungen).

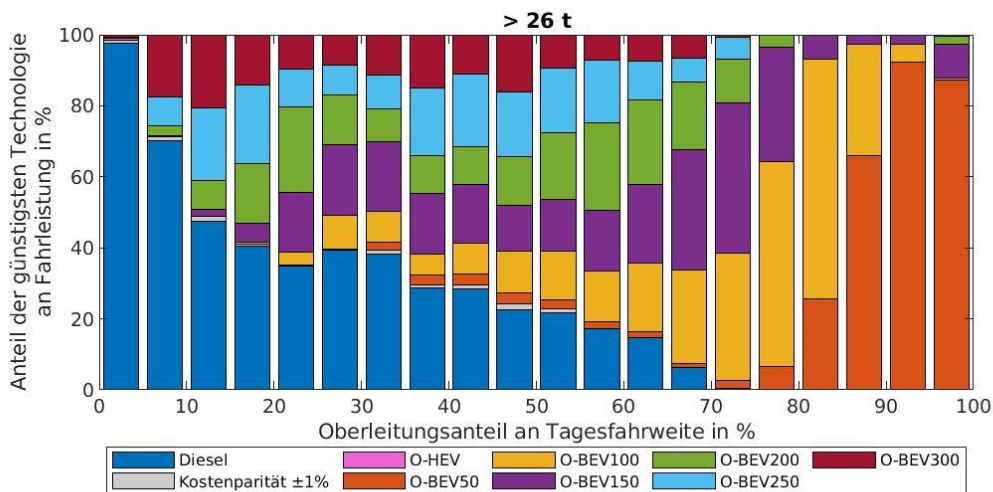


Abbildung 36: Gewählte Batteriegröße und Konfiguration der O-Lkw > 26 t zGG (bei Berücksichtigung der Infrastrukturkosten) in Abhängigkeit des Oberleitungsanteils an der Strecke unter Annahme eines Basisnetzes von 3.050 km Oberleitungsstrecken (eigene Berechnungen).

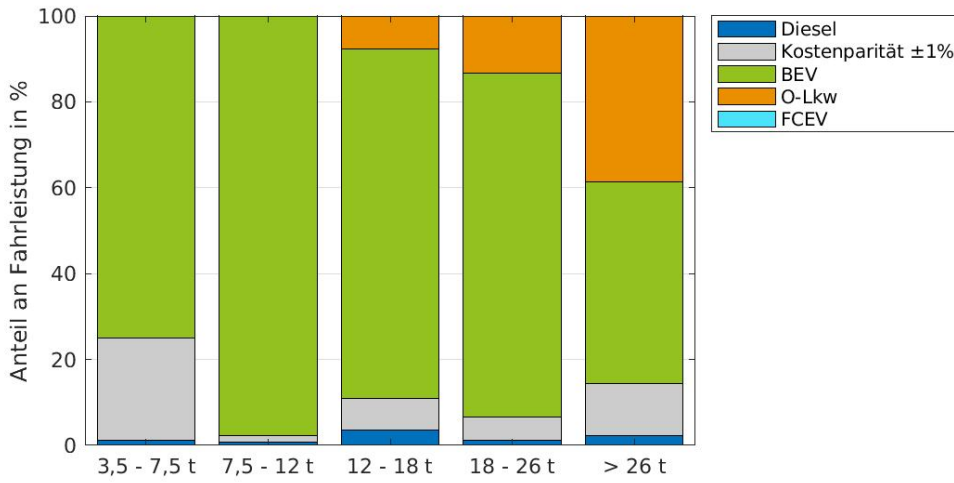


Abbildung 37: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten (inkl. Infrastrukturkosten) bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km (eigene Berechnungen).¹

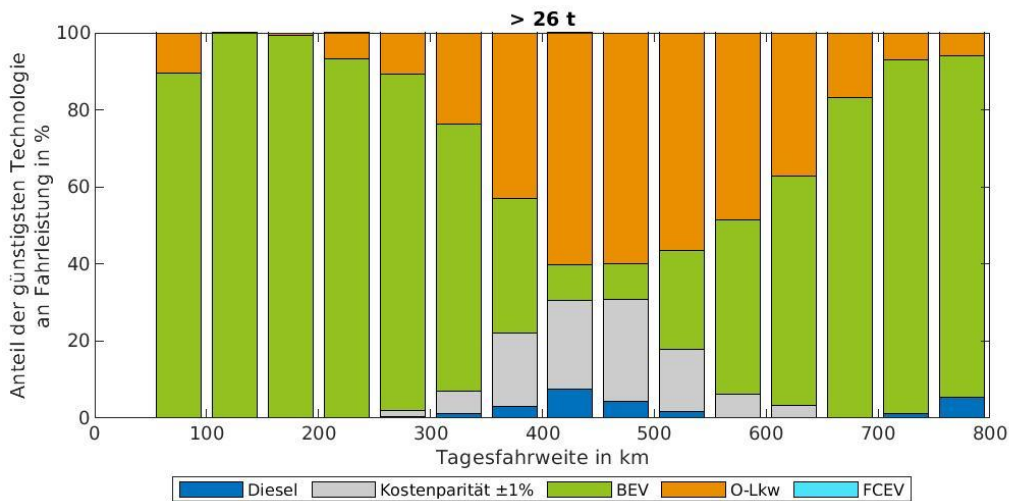


Abbildung 38: Anteil der Antriebstechnologien an einem Technologieportfolio mit minimalen Vollkosten (inkl. Infrastrukturkosten) bei Annahme eines Oberleitungsnetzes mit einer Gesamtlänge von 3.050 km in Abhängigkeit der Tagesfahrweite für Lkw > 26 t (eigene Berechnungen).

¹ Für Batterie-Lkw wird hier der Basisfall angenommen, d.h. Zwischenladung von Batterie-Lkw auf Fernfahrten nur während der regulären Lenkzeitpausen.