



# Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland

Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten

# Transport & Environment

April 2021

In-house Analyse von Transport & Environment

Autor: Fedor Unterlohner

Modellierung: Thomas Earl

Expertengruppe: Stef Cornelis, Tiziana Frongia, Simon Suzan

Grafische Gestaltung: Sofia Alexandridou

Übersetzung: Monika Berger (expressis verbis Übersetzungen)

Verantwortlicher Herausgeber: William Todts, Geschäftsführender Direktor

© 2021 European Federation for Transport and Environment AISBL

Bei Widersprüchlichkeiten bzw. Abweichungen zwischen der englischen und deutschen Sprachfassung dieser Veröffentlichung gilt vorrangig die englische Fassung.

## So zitieren Sie die vorliegende Studie

Transport & Environment (2021). Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland. Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten.

## Weiterführende Informationen

Fedor Unterlohner

Referent für Güterverkehr

fedor.unterlohner@transportenvironment.org

+32 (0)485 63 94 92

Square de Meeûs, 18, 2nd floor | B-1050 | Brüssel | Belgien

[www.transportenvironment.org](http://www.transportenvironment.org) | [@transenv](https://twitter.com/transenv) | fb: Transport & Environment

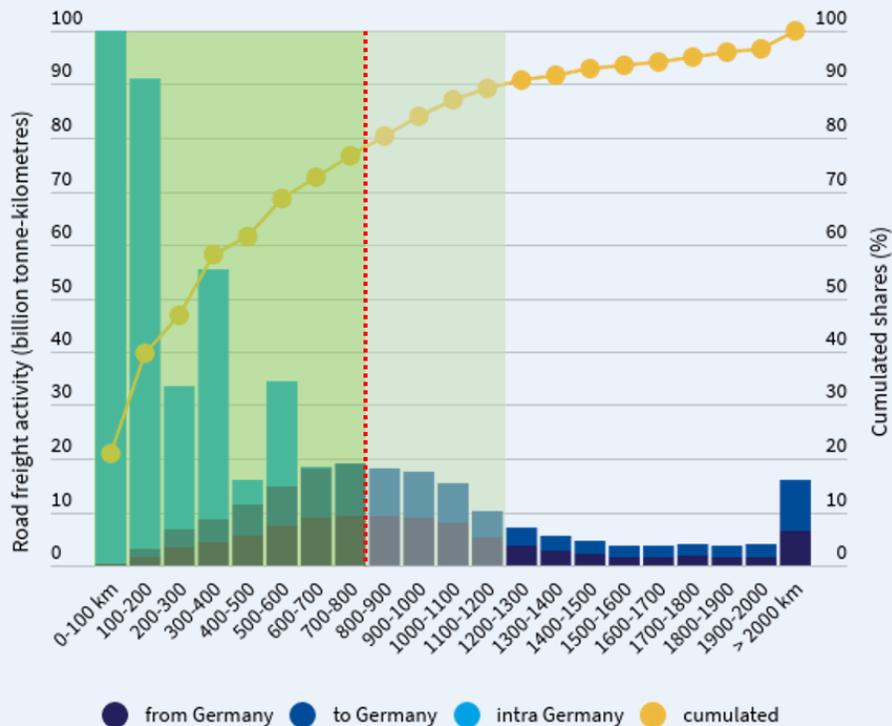
## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Florian Hacker, Moritz Mottschall und Katharina Göckeler (Öko-Institut e.V.) für die externe Begutachtung. Für die im vorliegenden Dokument dargelegten Erkenntnisse und Ansichten sind allein die oben aufgeführten Autoren verantwortlich. Das Gleiche gilt für eventuelle sachliche Fehler oder methodische Ungenauigkeiten.

## Kurzfassung

Effizienzmaßnahmen wie die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz von konventionellen Diesel-Lkw, Anreize zur Güterverkehrsverlagerung auf Schiene und Wasserstraße sowie die Steigerung der Logistikeffizienz können zur Senkung der Güterverkehrsemissionen in Deutschland beitragen, werden allerdings nicht ausreichen, um die Klimaziele des Landes für 2030 und 2050 zu erreichen. Dazu müssen Lastkraftwagen (Lkw) bis spätestens 2050 komplett dekarbonisiert werden.

In der vorliegenden Studie werden die Systemkosten sowie die Gesamtbetriebskosten (TCO) derjenigen Fahrzeugtechnologien analysiert, die eine Dekarbonisierung der deutschen Lkw-Fernverkehrs-Flotte ermöglichen. Wir definieren den Lkw-Fernverkehr als Straßengüterverkehr über Einzelfahrtstrecken von mehr als 400 km. In Deutschland werden 76 % des gesamten Straßengüterverkehrs auf Einzelfahrtstrecken von bis zu 800 km abgewickelt. Diese 800 km gelten als Mindestreichweite der in der vorliegenden Studie untersuchten Fahrzeugtechnologien.



**Notes:** Distribution of road freight activity across vehicle trip distance bands in Germany. Trips can last multiple days. The dark green shade illustrates the activity which can be covered by vehicles with 800 km range without recharging or refuelling. The light green shade extends this coverage based on one recharging or refuelling event during the mandatory daily rest period.

#### Verteilung der Straßengüterverkehrsaktivität in Deutschland über Einzelfahrtstrecken

Um den Sektor zu dekarbonisieren, muss der Lkw-Fernverkehr mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, entweder direkt oder indirekt über strombasierte Kraftstoffe. Für einen fairen Vergleich wurden alle Technologien unter der Voraussetzung verglichen, dass sie mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden und somit aus Well-to-Wheel-Sicht als emissionsfrei bzw. CO<sub>2</sub>-neutral angesehen werden können. Es wurden fünf Fahrzeugtechnologien untersucht:

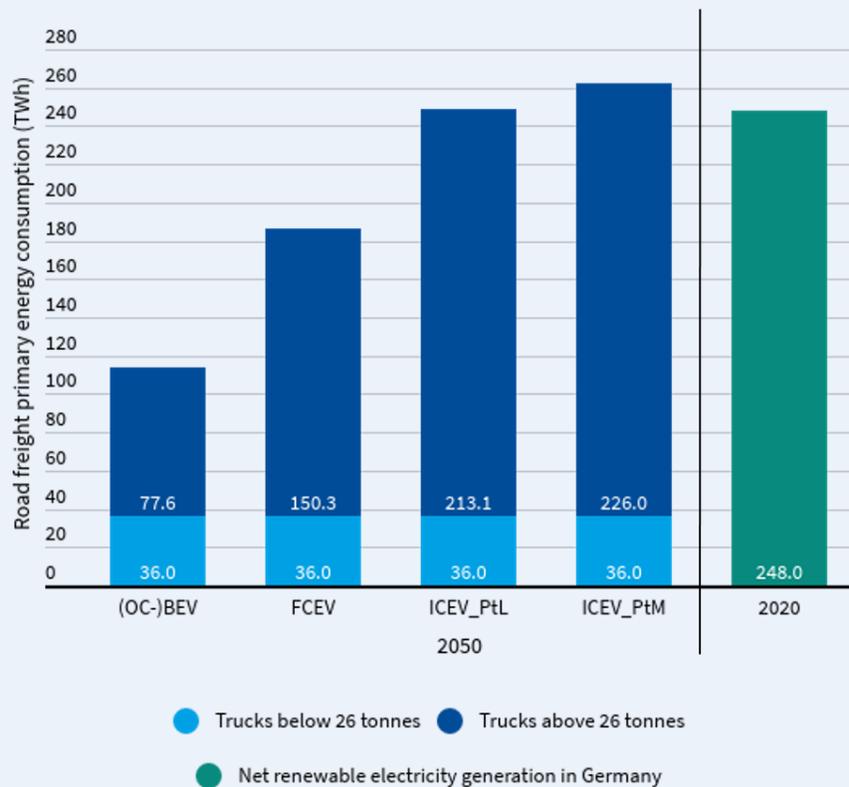
- batterieelektrische Fahrzeuge (BEV),

- batterieelektrische Fahrzeuge, die ihren Strom aus Oberleitungen beziehen (OC-BEV),
- wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV),
- mit flüssigen E-Fuels betriebene Dieselfahrzeuge (ICEV\_PtL),
- mit gasförmigen E-Fuels betriebene Gasfahrzeuge (ICEV\_PtM).

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass unter den heutigen Annahmen, den zu erwartenden Marktentwicklungen und den absehbaren technologischen Kostensenkungen batterieelektrische Fernverkehrs-Lkw und Oberleitungs-Lkw höchstwahrscheinlich der kostenwirksamste Weg sein werden, um den allergrößten Teil der heutigen dieselbetriebenen Fahrzeugflotte zu ersetzen und schließlich bis 2050 Null Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen (THG) im Straßengüterverkehr zu erreichen.

### **Bedarf an zusätzlichem erneuerbarem Strom**

Die Fahrzeugtechnologien weisen unterschiedliche Umwandlungsverluste auf und benötigen unterschiedliche Mengen an zusätzlichem erneuerbarem Strom. Die direkte Elektrifizierung von Lkw ist und bleibt auch in Zukunft mindestens doppelt so effizient wie erneuerbarer Wasserstoff und etwa dreimal so effizient wie Verbrennungsmotoren, die mit synthetischen, kohlenstoffbasierten Kraftstoffen (E-Fuels) betrieben werden. 2050 würde die direkte Elektrifizierung ein Äquivalent von 46 %, die Wasserstofftechnologie ein Äquivalent von 75 % und die beiden Kohlenwasserstofftechnologien Äquivalente von 100 % bzw. 106 % im Vergleich zur Nettostromerzeugung Deutschlands aus erneuerbaren Energien im Jahr 2020 erfordern.



**Notes:** Battery electrification for trucks below 26 tonnes is assumed across all pathways.

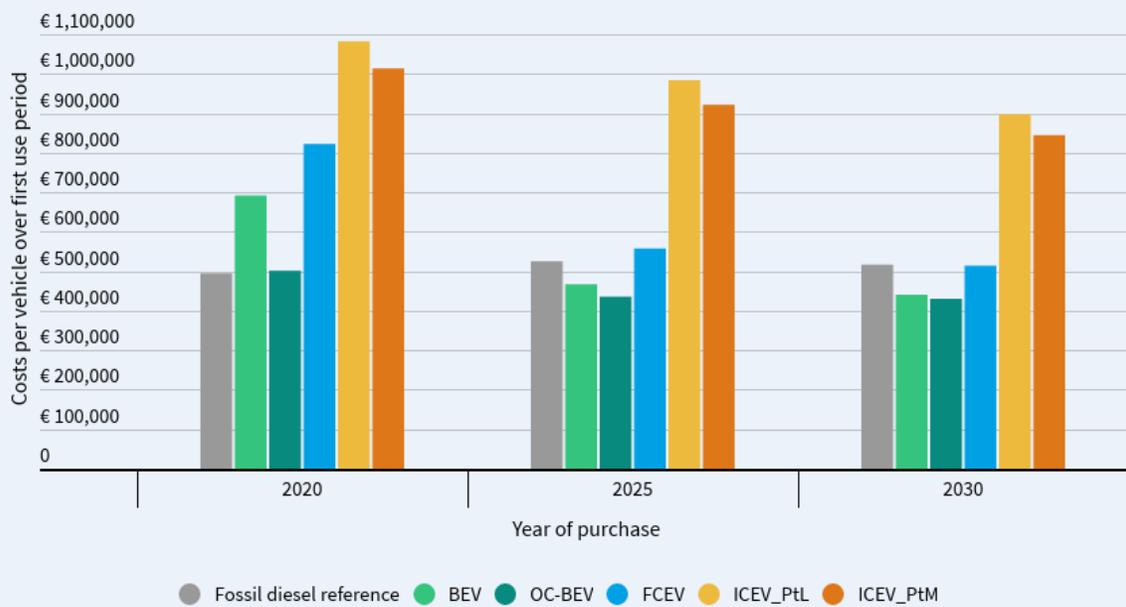
*Primärenergieverbrauch 2050 im Vergleich zur Netto-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 2020*

### Gesamtbetriebskosten (TCO)

Die Kosten für erneuerbare Energien sind eines von mehreren Kostenelementen, die es zu berücksichtigen gilt. Unter Berücksichtigung aller Kosten für Fahrzeuganschaffung, Betrieb und Infrastruktur sowie von Steuern, Abgaben, Mautgebühren und aktuellen Fördermitteln repräsentieren Fernverkehrs-BEV und -OC-BEV in den meisten Szenarien die kostengünstigste Option.

Im Vergleich zu mit fossilem Diesel betriebenen Lkw könnten Fernverkehrs-OC-BEV die Kostenparität bei den Gesamtbetriebskosten (TCO) bereits vor Mitte der 2020er Jahre, BEV gegen Mitte der 2020er Jahre und FCEV um das Jahr 2030 erreichen. Fernverkehrs-BEV und -OC-BEV dürften kostentechnisch auch dann den mit strombasierten Kraftstoffen betriebenen FCEV und ICEV überlegen sein, wenn diese Kraftstoffe in Nordafrika unter idealen Bedingungen produziert und nach Deutschland importiert werden würden.

## TCO of long-haul trucks in Germany Electricity-based fuel production in Europe



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

*TCO - Basisszenario mit strombasierter Kraftstoffproduktion in Europa*

Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw mit größeren Reichweiten sind möglicherweise besser für Einzelfahrstrecken über 1 200 km und mehr geeignet. Allerdings machen diese Fahrten nur 11 % der gesamten Straßengüterverkehrsaktivität in Deutschland aus. Daneben sind auch Nischenanwendungen denkbar, bei denen mögliche Reichweiten- und Kostenvorteile von Wasserstoff-Lkw zum Tragen kommen könnten. Entsprechende Beispiele sind Geländefahrzeuge wie Muldenkipper im Bergbau oder Fahrzeuge für Schwerlast- und Spezialtransporte im Straßengüterverkehr. In und um Seehäfen könnten Wasserstoff-Lkw auch einen Betriebs- und Kostenvorteil bei der Zu- und Abfuhr von Gütern (sogenannten Drayage-Operationen) bieten. Insbesondere die Synergieeffekte mit der Seeschifffahrt könnten dies begünstigen.

Letztendlich wird die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Fahrzeugtechnologien davon abhängen, wie sich ihre Skaleneffekte im kommenden Jahrzehnt entwickeln werden. Fahrzeugbatterien erleben derzeit eine selbstverstärkende Dynamik, die zu weiteren Kostensenkungen aufgrund des verstärkten Ausbaus der Produktionszahlen im Pkw-Segment führen wird. Dies dürfte bald auch auf das Segment der städtischen und regionalen Lkw-Verteilerverkehrs, und anschließend auf den Lkw-Fernverkehr übergreifen.

## Politische Empfehlungen

Der Straßengüterverkehr ist eine Branche, die sowohl Regulierung als auch beträchtliche Anreize erfordert, damit emissionsfreie Alternativen möglichst schnell die Kostenparität mit konventionellen Diesel-Lkw erreichen können. Die Bundesregierung sollte sich auf eine wirksamere Regulierung sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene sowie auf gezielte Finanzierungsanreize für emissionsfreie Lkw und die dazugehörige Infrastruktur konzentrieren.

## Nachfrage nach emissionsfreien Lkw

### Kaufprämie

In Deutschland können Güterverkehrsunternehmen Zuschüsse von bis zu 40.000 € pro emissionsfreien Lkw erhalten, die maximal 40 % der Investitionsmehrkosten pro Fahrzeug abdecken. Es ist zu begrüßen, dass Deutschland angekündigt hat, zukünftig bis zu 80 % der Investitionsmehrkosten mit einem Gesamtfördervolumen von 1,16 Mrd. € bis 2023 zu übernehmen. Die beihilferechtliche Genehmigung seitens der EU steht allerdings noch aus.

### Lkw-Maut

Gemäß der anstehenden Novelle der Eurovignetten-Richtlinie (die derzeit verhandelt wird) wird Deutschland voraussichtlich ab 2023 eine CO<sub>2</sub>-Spreizung der Infrastrukturabgabe der Lkw-Maut vornehmen. Deutschland hat angekündigt, bei der Infrastrukturabgabe auf der Grundlage der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu differenzieren sowie zusätzlich einen wirksamen Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen ab 2023 einzuführen. Deutschland sollte die derzeitige Befreiung von emissionsfreien Fahrzeugen von der Infrastrukturabgabe bis 2025 beibehalten und danach auf 75 % im Vergleich zu Fahrzeugen der CO<sub>2</sub>-Emissionsklasse 1 reduzieren.

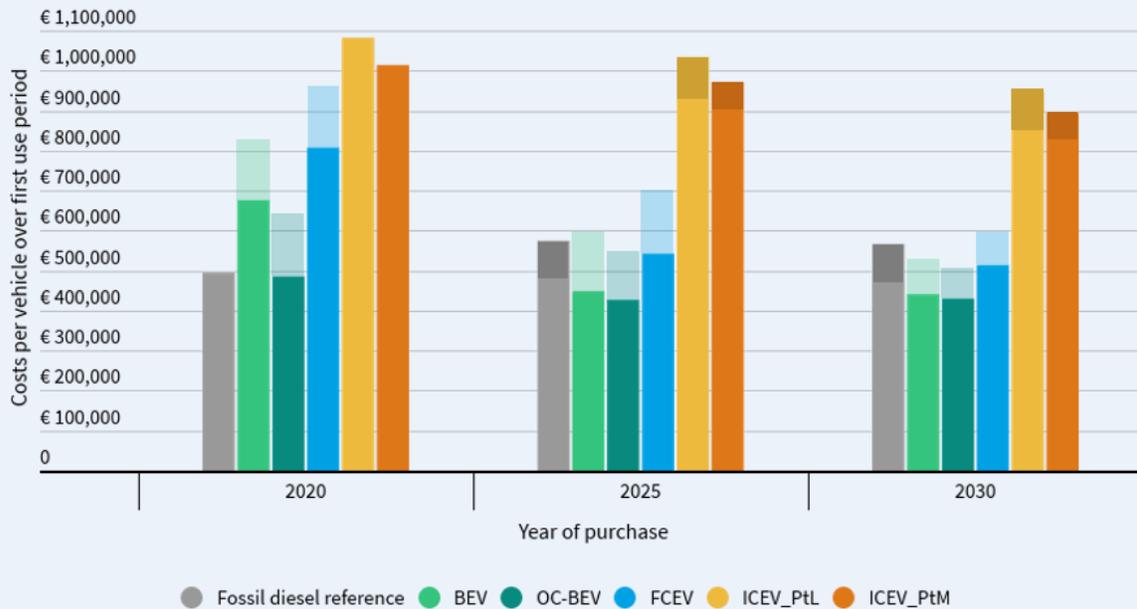
Darüber hinaus sollte Deutschland einen Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe des doppelten Referenzwertes erheben, was einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/tCO<sub>2</sub> entspricht. Im Rahmen der Überarbeitung der Lkw-Maut dürfte eine Erstattungsregelung eingeführt werden, um eine Doppelbelastung hinsichtlich des BEHG zu vermeiden. Eine solche Regelung sollte jedoch nur dann greifen, wenn für die verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen ein Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe des doppelten Referenzwertes erhoben wird und die Klimafolgekosten so vollständig internalisiert werden.

Deutschland muss die derzeitige Mautbefreiung für Gas-Lkw sofort beenden, um nicht weiter gegen EU-Recht zu verstoßen. Bei der CO<sub>2</sub>-Differenzierung werden Gas-Lkw von einer Mautermäßigung auf

die Infrastrukturabgabe profitieren, allerdings erst ab 2023. Bis zum Inkrafttreten der CO<sub>2</sub>-Differenzierung muss für Euro-VI-Gas-Lkw die gleiche Maut wie für Euro-VI-Diesel-Lkw erhoben werden, um der aktuellen Eurovignetten-Richtlinie zu entsprechen, deren Novellierung kurz vor dem Abschluss steht.

In Kombination mit der geplanten Überarbeitung der Kaufprämie hätte dies erheblichen Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten (TCO). Durch die Erhöhung des Fördersatzes der Anschaffungsbeihilfe auf 80 % der Investitionsmehrkosten, die Erhöhung der Beihilfeobergrenze auf 60.000 € und die oben vorgeschlagene Überarbeitung der Lkw-Maut könnten Fernverkehrs-BEV möglicherweise schon 2024 und FCEV kurze Zeit später die Kostenparität mit fossilen Diesel-Lkw erreichen.

## TCO of long-haul trucks in Germany after purchase subsidy and road charging reform



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

*TCO – nach Reform der Kaufprämie und Lkw-Maut*

### Lade- und Tankinfrastruktur

#### Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe

Deutschland sollte sich für eine ambitionierte Überarbeitung der EU-Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID) einsetzen. Die Richtlinie sollte in eine Verordnung umgewandelt werden, um einen zügigen und harmonisierten Aufbau der Infrastruktur zu gewährleisten. Der Anwendungsbereich sollte auf die emissionsfreien Technologien beschränkt

werden. Die derzeitigen Infrastrukturvorgaben für CNG- und LNG-Fahrzeuge sollten spätestens 2025 auslaufen.

In der AFID sollten verbindliche Ziele für die Anzahl der Ladepunkte pro Mitgliedsstaat für 2025 und 2030 festgelegt werden. In Deutschland müssen bis 2025 rund 4 000 (halb-)öffentliche Ladestationen und – an Standorten mit hohem Publikumsverkehr – sogenannte *Destination Charger* installiert werden. Bis 2030 muss deren Zahl bei mindestens 14 000 liegen (ohne öffentliches Nachladen). Bei einem Drittel bis der Hälfte dieser Ladestationen sollte Hochleistungsladen (mit mindestens 350 kW) möglich sein. Während der Ersteinführung von öffentlichen Hochleistungsladestationen und *Destination Chargers* in der ersten Hälfte der 2020er Jahre sollte der Schwerpunkt auf die sogenannten „städtischen Knotenpunkte“ des Straßengüterverkehrs entlang des TEN-V-Netzes gelegt werden, deren Abdeckung bis 2025 erreicht werden sollte.

Für batteriebetriebene Fernverkehrs-Lkw wird bis 2025 ein erstes, aus Hochleistungsladepunkten und dem sogenannten *Megawatt Charging System* (MCS) bestehendes Netz entlang der Autobahnen benötigt, bis 2027 mindestens ein Megawatt-Ladepunkt alle 100 km und schließlich bis 2030 eine vollständige Abdeckung mit Megawatt-Ladepunkten alle 50 km. Für das Laden am Zielort müssen alle mittleren und großen Logistikkreisläufe ab 2025 über mindestens eine Hochleistungsladestation für Zwischenladungen verfügen. Darüber hinaus werden öffentliche Nachladegeräte (150 kW) auf Lkw-Rastplätzen benötigt, die bis 2030 flächendeckend zur Verfügung stehen müssen.

### **Finanzielle Unterstützung für private und öffentliche Lade-Infrastruktur**

Deutschland hat ein ehrgeiziges Förderprogramm für die Tank- und Lade-Infrastruktur mit einem Gesamtvolumen von 4,1 Mrd. € bis 2023 sowohl für leichte als auch für schwere Nutzfahrzeuge angekündigt. Die Bundesregierung sollte wie geplant ein eigenes Förderinstrument einführen, um Güterverkehrsunternehmen beim Ausbau der Lade-Infrastruktur mit Depotladestationen und *Destination Chargers* für den städtischen und regionalen Lkw-Verteilerverkehr zu unterstützen. Das Programm sollte auch explizit Mittel für den Anschluss und Ausbau des Stromnetzes bereitstellen, da die Güterverkehrsunternehmen die netzbedingten Investitionsmehrkosten oft nicht stemmen können.

### **Megawatt-Ladeinfrastruktur**

Öffentlich-private Partnerschaften mit Lkw-Herstellern, Güterverkehrsunternehmen, Energieversorgern und Netzbetreibern sind notwendig, um die Grundlagen für den Aufbau eines landesweiten ersten Megawatt-Ladenetzes (MCS) ab 2025 zu schaffen. Die jüngste Ankündigung eines branchenübergreifenden Konsortiums, bis 2023 ein öffentlich finanziertes MCS-Pilotprojekt

durchzuführen, ist ein wichtiger erster Schritt. Deutschland sollte eine Förderung ähnlicher Projekte, die den Schwerpunkt besonders beim batterieelektrischen Fernverkehr auf das deutsche Fernstraßennetz legen, in Betracht ziehen.

### **Infrastruktur für die Wasserstoffbetankung**

Im Hinblick auf den Aufbau einer Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw sind Seehäfen und deren wirtschaftliches Hinterland für erste Pilotprojekte zu priorisieren. Häfen und angrenzende Unternehmenscluster stellen einen unbedenklichen Ausgangspunkt für die Einführung von Wasserstofftankstellen für Lkw dar, weil so Synergieeffekte mit der zukünftigen Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff in der Schifffahrt und der Industrie entstehen.

## **Energiebesteuerung**

### **Strom**

Der Strom, der von gewerblichen Straßengüterfahrzeugen verbraucht wird, ist derzeit in vollem Umfang steuer-, abgaben- und gebührenpflichtig. Die EEG-Umlage ist aktuell für Verkehrsunternehmen, die Elektrobusse im Linienverkehr einsetzen und mindestens 100 MWh Strom pro Jahr verbrauchen, auf 20 % gedeckelt. Diese Regelung soll bei der erneuten Novelle des deutschen Erneuerbare Energien Gesetzes im Jahr 2021 zeitlich befristet auf den Güterverkehr mit Elektro-Lkw ausgeweitet werden.

### **Erdgas**

In Deutschland gilt derzeit ein extrem niedriger Steuersatz für als Kraftstoff im Verkehr eingesetztes Erdgas (13,90 €/MWh), und zwar unabhängig von der Erzeugungsart (fossiles Erdgas oder nachhaltig erzeugtes Biomethan). Deutschland sollte den ermäßigten Satz so anpassen, dass er nur für nachhaltig erzeugtes Biomethan gilt, das aus fortschrittlichen abfall- und reststoffbasierten Rohstoffen stammt.

### **Diesel**

Trotz seines höheren Energie- und Kohlenstoffgehalts wird Dieseldieselkraftstoff immer noch geringer besteuert als Benzin. Darüber hinaus sind die Steuersätze für Diesel und Benzin seit 2003 eingefroren. Der Steuersatz für Dieseldieselkraftstoff sollte schrittweise angehoben werden, bis er auf der Grundlage des jeweiligen Energie- oder Kohlenstoffgehalts das gleiche Niveau wie Benzin erreicht. Bei einer Reform der Kraftstoffbesteuerung sind die künftigen Regulierungsmaßnahmen und die Höhe der CO<sub>2</sub>-Abgabe sowohl bei der Reform der Lkw-Maut als auch bei einer etwaigen Befreiungsregelung vom BEHG (siehe oben) zu berücksichtigen.

## **Angebot von emissionsfreien Lkw**

### **Europäische CO<sub>2</sub>-Normen für neue Lkw**

Um die drohende Versorgungslücke emissionsfreier Lkw abzuwenden, sollte sich Deutschland für eine ambitionierte Überprüfung der CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Lkw im Jahr 2022 einsetzen und damit ein Marktsignal an die Lkw-Hersteller senden, die Produktion von emissionsfreien Lkw schneller hochzufahren. In der anstehenden, für Ende 2022 geplanten Novellierung sind mehrere Schwachstellen zu bereinigen:

Das derzeitige durchschnittliche Flottenreduktionsziel für 2030 von 30 % ist völlig unzureichend, um die Klimaziele Deutschlands und der EU zu erreichen. Ein zunehmender Teil der Ziele für 2025 und 2030 kann durch den beschleunigten Hochlauf emissionsfreier Fahrzeuge erreicht werden. Das Ziel für 2030 muss daher deutlich erhöht werden. Darüber hinaus sollten in der Verordnung Folgeziele für 2035 und 2040 festgeschrieben werden. Die EU sollte beschließen, dass ab 2035 keine neuen Verbrenner-Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 26 Tonnen und ab spätestens 2040 keine neuen Verbrenner-Lkw über 26 Tonnen mehr verkauft werden.

### **Fahrzeuggewichte und -abmessungen**

Das durch die europäischen CO<sub>2</sub>-Normen eingeführte zulässige Mehrgewicht von bis zu zwei Tonnen für emissionsfreie Fahrzeuge als Änderung der EU-Richtlinie über Gewichte und Abmessungen ist so schnell wie möglich in deutsches Recht umzusetzen. Das Gleiche gilt für den jüngsten EU-Beschluss, mit der besondere Regeln für die maximale Länge von Fahrerhäusern mit besserer Aerodynamik festgelegt wurden. Mit der Entscheidung wird die Richtlinie über Gewichte und Abmessungen dahingehend geändert, dass eine Überschreitung der maximalen Fahrzeuglänge zulässig ist, wenn das Fahrerhaus Verbesserungen bei Aerodynamik, Energieeffizienz und Sicherheit bietet.

Die Mitgliedstaaten waren ursprünglich gesetzlich verpflichtet, diese Entscheidung bereits bis September 2020 in nationales Recht umzusetzen. Das nationale Gesetzgebungsverfahren muss nun so schnell wie möglich abgeschlossen werden, damit die Lkw-Hersteller Planungssicherheit für ihre zukünftige Fahrzeugentwicklung haben.

## **Emissionsfreier städtischer Güterverkehr**

Die Bundesregierung sollte in enger Abstimmung mit den Städten und Gemeinden eine Strategie für eine emissionsfreie Stadtlogistik entwickeln. Städtische Gebiete sollten mit Blick auf die zweite

Hälfte des Jahrzehnts die Einführung von emissionsfreien Zonen sowohl für leichte Nutzfahrzeuge als auch für schwere Nutzfahrzeuge, d.h. Transporter und Lkw, in Betracht ziehen. Übergangsregelungen für derzeit zugelassene Fahrzeuge bis 2030 können helfen, einen reibungslosen Übergang für betroffene Unternehmen zu gewährleisten. Die Vereinbarung der niederländischen Regierung mit Kommunalverwaltungen, Unternehmen und Forschungseinrichtungen, bis 2025 bzw. 2030 eine emissionsfreie Stadtlogistik zu erreichen, kann als Blaupause dienen.

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Kurzfassung</b>	<b>3</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>18</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>19</b>
<b>2. Binnengüterverkehr in Deutschland</b>	<b>22</b>
<b>3. Verfügbare Fahrzeugtechnologien</b>	<b>27</b>
3.1. Direktelektrifizierung	29
3.1.1. Batterie-Elektrifizierung	29
3.1.2. Oberleitungssysteme	33
3.2. Erneuerbarer Wasserstoff	35
3.3. Power-to-Liquid	37
3.4. Power-to-Methane	38
<b>4. Bedarf an zusätzlichem erneuerbarem Strom</b>	<b>41</b>
<b>5. Kostenanalyse</b>	<b>45</b>
5.1. Systemkosten	45
5.1.1. Fahrzeugkosten	46
5.1.2. Energiekosten	51
5.1.3. Infrastrukturkosten	53
5.1.4. Ergebnisse	53
5.2. Gesamtbetriebskosten	58
5.2.1. Steuern und Abgaben	58
5.2.2. Mautgebühren	63
5.2.3. Kaufprämie	64
5.2.4. Ergebnisse	64

<b>6. Diskussion und Ausblick</b>	<b>68</b>
<b>7. Politische Empfehlungen</b>	<b>72</b>
7.1. Nachfrage nach emissionsfreien Lkw	73
7.2. Lade- und Tankinfrastruktur	75
7.3. Energiebesteuerung	78
7.4. Angebot von emissionsfreien Lkw	80
7.5. Emissionsfreier städtischer Güterverkehr	82
<b>Anhang</b>	<b>83</b>
<b>Referenzen</b>	<b>101</b>

---

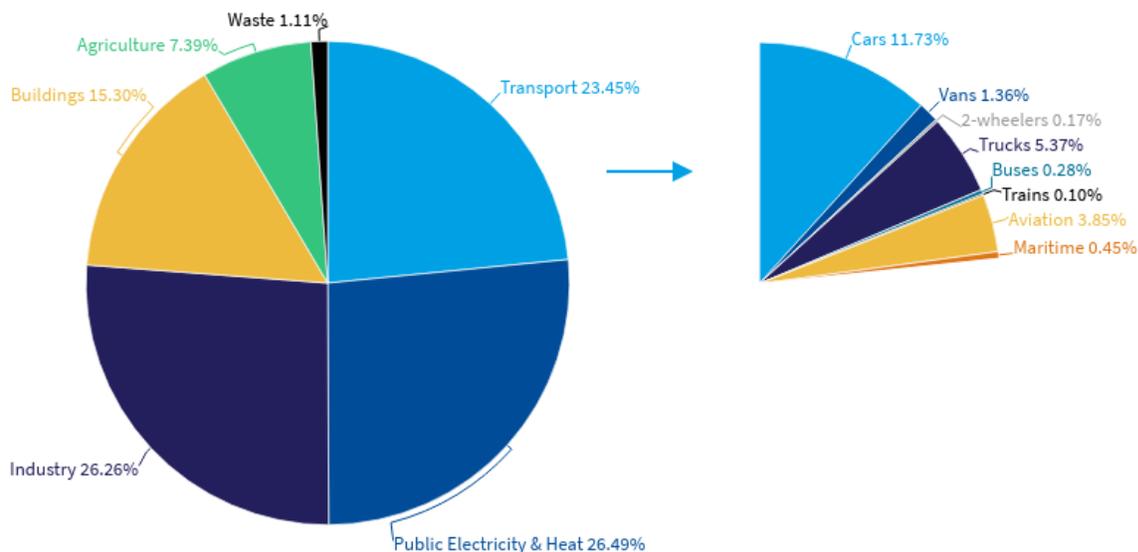
## Abkürzungsverzeichnis

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
CNG	Komprimiertes Erdgas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> e	Kohlendioxid-Äquivalent
DAC	Verfahren zur Gewinnung von Kohlendioxid direkt aus der Umgebungsluft
E-Fuels	Synthetische kohlenstoffbasierte Kraftstoffe
ERS	Elektrisches Straßensystem
FCEV	Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug
FT-Synthese	Fischer-Tropsch-Synthese
gCO <sub>2</sub> e	Gramm Kohlendioxid-Äquivalent
HDV	Schweres Nutzfahrzeug
HPDI	Hochdruck-Direkteinspritzung
ICEV	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
ICEV_PtL	Mit synthetischem E-Diesel betriebenes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
ICEV_PtM	Mit synthetischem E-Methan betriebenes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
LCOE	Stromgestehungskosten
LCOH	Wasserstoffgestehungskosten
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Verflüssigtes Erdgas
Mt	Megatonnen
OC-BEV	Batterieelektrisches Oberleitungsfahrzeug
PtL	Power-to-Liquid
PtM	Power-to-Methane
PV	Photovoltaik
SMR	Methan-Dampfreformierung
TCO	Gesamtbetriebskosten (TCO)
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TTW	Tank-to-Wheel
VECTO	Instrument zur Berechnung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen
vkm	Fahrzeugkilometer
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel
Z(L)EV	Emissionsfreies (und emissionsarmes) Fahrzeug
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

# 1. Einleitung

Der Verkehr ist mit jährlichen Gesamtemissionen von 196 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Mt CO<sub>2</sub>e) einer der Hauptverursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland und macht 23 % der gesamten Treibhausgasemissionen (THG) des Jahres 2019 aus, wenn man den internationalen Luft- und Schiffsverkehr einbezieht. Der Straßenverkehr macht 80 % aller verkehrsbedingten Emissionen aus, wovon ca. 28 % auf den Lkw-Verkehr entfallen.

## 2019 GHG emissions in Germany by sector and transport mode



**Notes:** Assuming a 95/5% split between truck and bus GHG emissions.

**Sources:** EEA (2019).

Abbildung 1: THG-Emissionen in Deutschland nach Sektor und Verkehrsträger im Jahr 2019

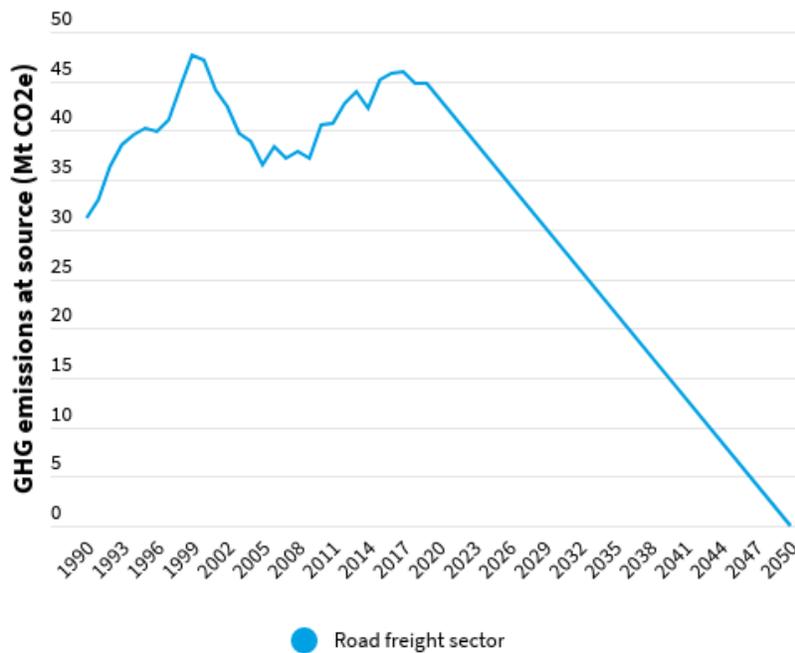
Laut Bundesklimagesetz muss Deutschland bis 2030 eine Gesamtminderung der THG-Emissionen um mindestens 55% im Vergleich zum Stand von 1990 und schließlich bis 2050 Netto-Null-Treibhausgasemissionen erreichen.<sup>1</sup> Darüber hinaus setzt das Klimaschutzprogramm 2030 der

Bundesregierung das Ziel, bis 2030 etwa ein Drittel der Fahrleistung in Fahrzeugkilometern (vkm) im schweren Straßengüterverkehr elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe zu erbringen.<sup>2</sup> Deutschland muss nun zügig die Emissionen aller Verkehrsträger, einschließlich des Straßengüterverkehrs, senken und bis Mitte des Jahrhunderts schließlich vollständig eliminieren.<sup>i</sup>

Ausgebremst wird diese Entwicklung durch die Emissionen aus dem Straßengüterverkehr. Trotz Schwankungen haben die Emissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland in den letzten 30 Jahren insgesamt zugenommen (siehe Abbildung 2). Gelingt es nicht, die Emissionen des Straßengüterverkehrs schnell zu senken und schließlich ganz zu eliminieren, wären die deutschen Klimaziele kaum noch zu erreichen.

---

<sup>i</sup> Der Verkehrssektor wird nicht in der Lage sein, verbleibende Restemissionen durch den Einsatz von negativen Emissionstechnologien auszugleichen. Diese werden benötigt, um unvermeidbare Emissionen in Sektoren wie der Industrie und Landwirtschaft zu kompensieren, in denen eine vollständige Emissionsvermeidung schwierig oder gar unmöglich ist.



**Notes:** EUTRM modelling based on the most recent available EEA data from 2019. GHG emissions between 2019 and 2020 are kept constant. Assuming a constant 95%/5% split between GHG emissions from trucks and buses.

**Sources:** T&E calculations based on EEA (2019).

Abbildung 2: Entwicklung der THG-Emissionen im deutschen Straßengüterverkehrssektor

2019 waren in Deutschland rund 750 000 Last- und Sattelzüge mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von mehr als 3,5 Tonnen zugelassen.<sup>3</sup> Jedes Jahr werden rund 85 000 Lkw neu zugelassen. Mehr als 99 % der heutigen Lkw-Flotte fährt mit konventionellem Diesel.<sup>4</sup> Neben der im Inland zugelassenen Fahrzeugflotte sind zudem weitere, im Ausland zugelassene Fahrzeuge im Gütertransport innerhalb Deutschlands bzw. im Transit durch Deutschland unterwegs.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die verfügbaren Fahrzeugtechnologien zur vollständigen Dekarbonisierung der deutschen Lkw-Fernverkehrs-Flotte sowie die damit verbundenen System- und

Nutzerkosten zu analysieren. Als Systemkosten gelten die Herstellungs-, Montage- und Verkaufskosten eines Fahrzeugs, die Kosten zur Erzeugung, zum Transport und zur Verteilung von Strom und strombasierten Kraftstoffen sowie die Aufbau- und Instandhaltungskosten der Lade- und Betankungsinfrastruktur. In den Systemkosten sind keine Steuern, Abgaben, Mautgebühren und Subventionen enthalten. Dies wurde bewusst so entschieden, um die tatsächlichen technisch-wirtschaftlichen Kosten der einzelnen Fahrzeugtechnologien besser einschätzen zu können. Hierbei handelt es sich um Kosten, die von der Gesellschaft, d. h., von Herstellern, Betreibern, Verbrauchern und öffentlicher Hand, getragen werden müssen. Im Gegensatz dazu sind in den Nutzerkosten, auch Gesamtbetriebskosten (TCO) genannt, Steuern, Abgaben, Gebühren und Fördermittel nach geltender Gesetzeslage in Deutschland berücksichtigt.

Effizienzmaßnahmen wie die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz konventioneller Diesel-Lkw, Anreize zur Verkehrsverlagerung auf Schiene und Wasserstraße sowie die Optimierung der Logistikeffizienz durch Digitalisierung können dazu beitragen, die Emissionen des Binnengüterverkehrs zu senken. Deren Potenzial sollte so weit wie möglich ausgeschöpft werden.

Wie die amtlichen Prognosen zeigen, wird jedoch erwartet, dass der Güterverkehr in Zukunft weiter zunehmen wird. Effizienzmaßnahmen allein reichen daher nicht aus, um den Binnengüterverkehr bis 2050 vollständig zu dekarbonisieren. Jüngste Analysen von Transport & Environment haben gezeigt, dass Effizienzmaßnahmen wie Erhöhung der Kraftstoffeffizienz von Diesel-Lkw, Verkehrsverlagerung und verbesserte Logistikeffizienz Frankreich und Großbritannien helfen können, die Emissionen des Güterverkehrs geringfügig zu senken. Derartige Maßnahmen müssen allerdings zusätzlich zur vollständigen Dekarbonisierung der Lkw-Flotte durch Änderung der Fahrzeugtechnologie und des Energievektors erfolgen, wenn diese beiden Länder ihre Klimaziele erreichen wollen.<sup>5,6</sup>

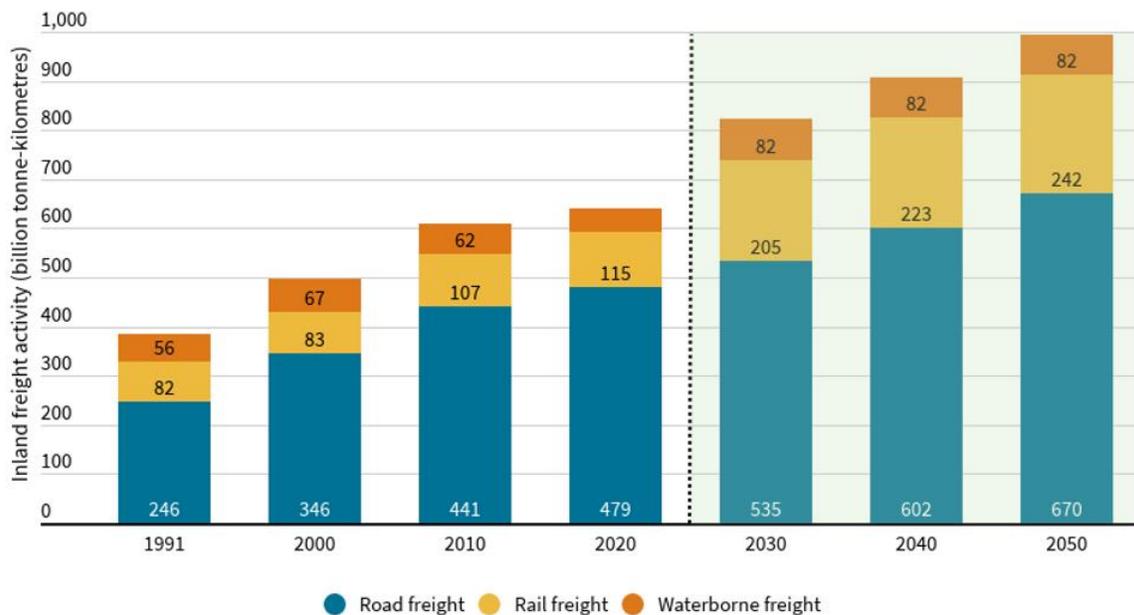
Mit anderen Worten: Es geht nicht darum, entweder das eine oder das andere zu tun, sondern beide Ziele gleichzeitig zu verfolgen. Neben der Dekarbonisierung des städtischen und regionalen Verteilerverkehr sowie Langstrecken-Fernverkehr müssen die Kapazitäten im Schienen- und Binnenschiffsverkehr deutlich erhöht und die Kraftstoffeffizienz der konventionellen Diesel-Lkw weiter verbessert werden.

## **2. Binnengüterverkehr in Deutschland**

Der Binnengüterverkehr in Deutschland war in den letzten 30 Jahren von stabilem und stetigem Wachstum geprägt und wurde zu mehr als zwei Dritteln mit Lkw abgewickelt. Vorsichtige Annahmen deuten darauf hin, dass der Güterverkehr in Zukunft voraussichtlich weiter zunehmen wird. Abbildung 3 fasst die historische Entwicklung und die Zukunftsprognose der Nachfrage im Binnengüterverkehr in

Deutschland anhand historischer Daten und Hochrechnungen von BMVI (2008), Öko-Institut (2014), Intraplan Consult et al. (2014), Intraplan Consult (2020), BMVI (2020) and Nationale Plattform Zukunft Mobilität (2020) zusammen.<sup>7,8,9,10,11,12</sup>

In den Hochrechnungen zur Nachfrage im Güterverkehr wurde bereits eine ehrgeizige Verlagerung des Güterverkehrs auf Schiene und Wasserweg berücksichtigt. Diese erfordert bis 2030 eine annähernde Verdoppelung der jeweiligen Transportkapazitäten, wenn das selbstgesteckte Ziel der Bundesregierung im Hinblick auf die Güterverkehrsverlagerung erreicht werden soll (siehe Abbildung 4).<sup>13</sup>



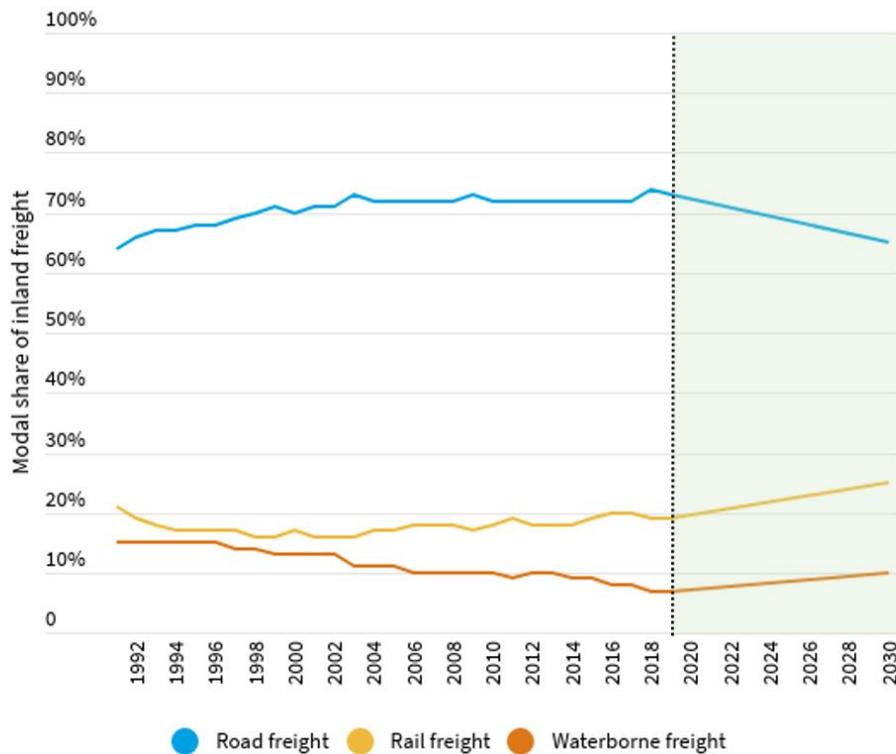
**Notes:** Derived historical and projected inland freight activity based on the literature and targets of the Federal Government. Excluding inland freight activity of aviation and pipelines.

**Sources:** T&E calculations based on BMVI (2008), Öko-Institut (2014), Intraplan Consult (2014), Intraplan Consult (2020), BMVI (2020), NPM (2020).

*Abbildung 3: Von der Literatur und den Zielen der Bundesregierung abgeleitetes historisches und prognostiziertes Güterverkehrsaufkommen.*

Es gibt mehrere Gründe, die den historischen Zuwachs des gesamten Güterverkehrsaufkommens sowie den geringen Anteil des Schienen- und Schiffsverkehrs im Vergleich zum Straßenverkehr erklären. Im Allgemeinen hängt die Nachfrage im Güterverkehr im Sinne von Frachtaufkommen mit der gesamtwirtschaftlichen Leistung, der Industrieproduktion und der Handelsintensität zusammen. Allerdings ist diese Korrelation von Land zu Land unterschiedlich und es ist unklar, wie sie sich in Zukunft entwickeln könnte.<sup>14</sup>

Bei Entfernungen bis 500 km ist der Straßengüterverkehr der Schiene in Bezug auf Kosten, Zeit, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit oft überlegen.<sup>15</sup> Der Schienengüterverkehr ist stark von der Art der zu transportierenden Güter abhängig und eher für Massengüter geeignet. Der Zugang zum Bahnnetz muss oft bis zu einem Jahr im Voraus oder – wegen Netzplanungsanforderungen – auf einer starren Entscheidungsgrundlage gewährt werden, was diese Option für die Just-in-Time-Produktion und die schwankende Nachfrage der Verlager unattraktiv macht.<sup>16</sup> Das Wachstumspotenzial wird nur dann voll ausgeschöpft werden können, wenn sich die Infrastruktur verbessert und wenn der Schienengüterverkehr zuverlässiger und flexibler gestaltet wird, zum Beispiel durch Digitalisierung der Schienenfahrzeuge, Erhöhung der durchschnittlichen Zuggeschwindigkeit und -länge sowie durch Förderung von kombiniertem und intermodalem Verkehr.



**Notes:** Excluding inland freight activity of aviation and pipelines.

**Sources:** T&E calculations based on BMVI (2008), Öko-Institut (2014), Intraplan Consult (2014), Intraplan Consult (2020), BMVI (2020) and NPM (2020).

*Abbildung 4: Historischer und prognostizierter Modal Split im Binnengüterverkehr basierend auf den Zielen der Bundesregierung*

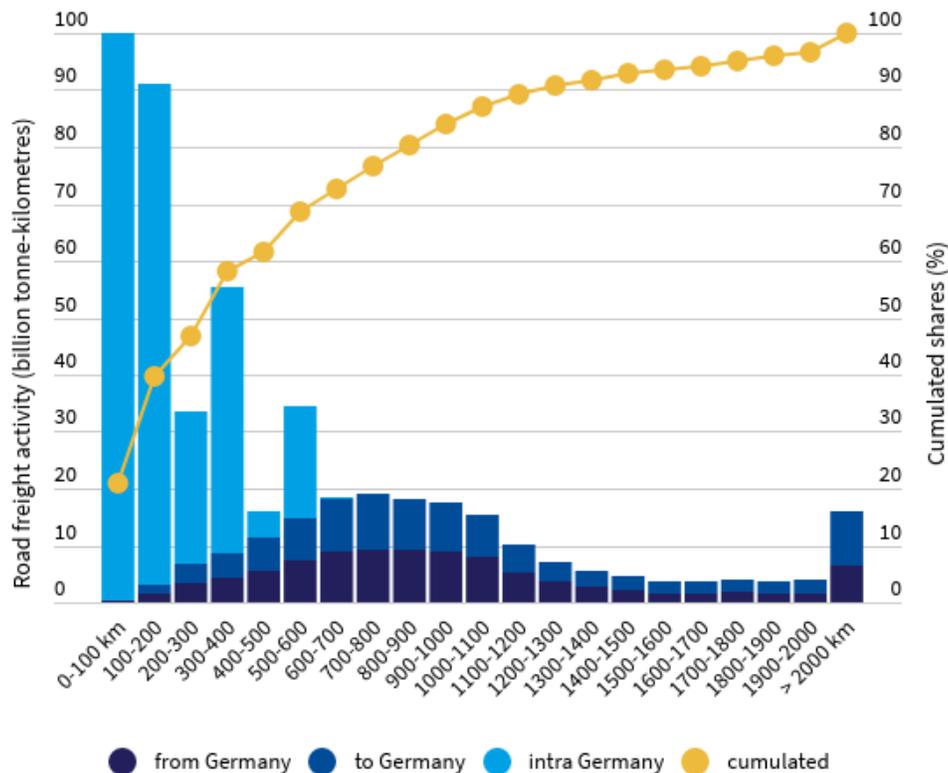
Der Binnenschiffsgüterverkehr leidet unter ähnlichen strukturellen Nachteilen in Bezug auf Kosten, Zeit, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit wie der Schienengüterverkehr. Für den zeitsparenden und wirtschaftlich tragfähigen Transport auf dem Wasserweg sind erhebliche und kontinuierliche Infrastrukturinvestitionen in das Wasserstraßennetz erforderlich. Auch der Binnenschiffsgüterverkehr beschränkt sich weitgehend auf den Transport von Massengütern und in geringerem Maße auf den Transport von standardisierten Containern. Er unterliegt noch stärkeren geografischen

Einschränkungen als der Schienengüterverkehr. Die Kosten für den Straßengüterverkehr werden ebenfalls steigen müssen, um Externalitäten besser berücksichtigen zu können und um den Schienen- und Schiffsgüterverkehr wettbewerbsfähiger zu machen.

Der Straßengüterverkehr ist der bevorzugte Verkehrsträger für Stückgut und kennt in Europa praktisch keine grenzüberschreitenden Hindernisse. Es ist zu erwarten, dass sich der derzeitige Trend zu komplexeren Lieferketten und einer höheren Transportintensität als Folge der Internationalisierung von Fertigungsprozessen in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen könnte.<sup>17</sup>

Es besteht allerdings ebenso die Möglichkeit, dass beispielweise Veränderungen im gesellschaftlichen und Konsumverhalten in der Zukunft Einfluss auf die derzeit hohe Güterverkehrsintensität haben werden. In der vorliegenden Studie werden Maßnahmen zur Reduzierung der Nachfrage im Güterverkehr aufgrund von Änderungen in den Fertigungsprozessen und im Konsumverhalten wie Abfallreduzierung, Recycling oder kürzere Transportwege zwar nicht weiter berücksichtigt: Sie könnten aber einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Sektors leisten. Stattdessen wird hier eine konservative Schätzung der zukünftigen Nachfrage im Güterverkehr zugrunde gelegt.

Beim überwiegenden Teil des in Tonnenkilometern (tkm) gemessenen Straßengüterverkehrsaktivität – ein guter Indikator für verursachte Emissionen – handelt es sich um Einzelfahrten unter 400 km Entfernung, die innerstädtische und regionale Lieferfahrzeuge übernehmen (siehe Abbildung 5). Der Langstreckengüterverkehr macht einen kleineren Anteil am Straßengüterverkehr aus, steht aber vor den größten technischen Herausforderungen hinsichtlich der Dekarbonisierung.



**Notes:** Distribution of road freight activity across vehicle trip distance bands in Germany. Trips can last multiple days.

**Sources:** T&E calculations based on ETISplus (2010) and calibrated based on Eurostat (2018).

Abbildung 5: Verteilung des Straßengüterverkehrsaufkommens in Deutschland über Einzelfahrtstrecken

### 3. Verfügbare Fahrzeugtechnologien

Zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in Deutschland ist eine Abkehr von fossilen Kraftstoffen zugunsten von emissionsfreien oder CO<sub>2</sub>-neutralen Technologien notwendig. Lastkraftwagen werden, ähnlich wie die anderen Wirtschaftssektoren, mit sauberem Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden müssen, entweder direkt mittels Elektrifizierung oder indirekt über strombasierte Kraftstoffe. Die verfügbaren Technologien benötigen die Bereitstellung

unterschiedlicher Mengen an zusätzlichem erneuerbarem Strom und unterscheiden sich in ihren System- und Nutzerkosten. Es handelt sich hierbei um folgende Technologien:

- batterieelektrische Fahrzeuge,
- batterieelektrische Fahrzeuge, die ihren Strom aus Oberleitungen beziehen,
- wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge,
- Dieselfahrzeuge, die mit flüssigen E-Fuels betrieben werden, und
- Gasfahrzeuge, die mit gasförmigen E-Fuels betrieben werden.

Die ersten drei Optionen erfordern einen schnellen Umstieg und den Hochlauf neuer Fahrzeugtechnologien sowie eine neue spezifische Infrastruktur. Die vierte Option erfordert keine Anpassungen der Antriebstechnik, da es sich um einen Drop-in-Kraftstoff handelt, der fossilen Diesel über eine Beimischungsquote schrittweise ersetzen würde. Es könnten also auch bestehende konventionelle Diesel-Lkw mit diesen E-Fuels fahren und die bestehende Infrastruktur weiternutzen. Die fünfte Technologieoption erfordert gewisse Umrüstungen des Antriebsstrangs, den Aufbau einer spezifischen Infrastruktur sowie eine Beimischungsquote.

Lkw, die im städtischen und regionalen Verteilerverkehr eingesetzt werden, verkehren in der Regel innerhalb eines Stadtgebiets oder führen – von nahegelegenen Verteilerzentren ausgehend – innerstädtische Lieferungen aus und kehren über Nacht zum Depot zurück. Die tägliche Fahrleistung städtischer Lieferfahrzeuge beträgt normalerweise 200 bis 400 km, während regionale Lieferfahrzeuge in der Regel Einzelfahrtstrecken von bis zu 400 km zurücklegen. In Deutschland entfallen 58 % des Straßengüterverkehrs auf Entfernungen von maximal 400 km (siehe Abbildung 5).<sup>ii</sup> Die direkte Elektrifizierung dieser Transportaktivität über batterieelektrische Lkw ist nicht nur technisch machbar, sondern wird aus Sicht der Gesamtbetriebskosten (TCO) in naher Zukunft die Kostenparität mit fossilen Diesel-Lkw erreichen.

Angesichts der techno-ökonomischen Entwicklungen sowie der Marktsignale der Lkw-Hersteller ist davon auszugehen, dass für die städtischen und regionalen Verteiler-Lkw mit einem typischen zGG von bis zu 26 Tonnen die Batterieelektrifizierung in Zukunft der kostengünstigste Weg sein wird. Batterieelektrische Verteiler-Lkw wie der Daimler FUSO eCanter und eActros, der Volvo FL und FE Electric, der DAF CF und LF Electric, der MAN eTGM sowie der Renault D Z.E. sind bereits in oder stehen kurz vor der Serienproduktion.<sup>18,19,20,21,22,23</sup>

---

<sup>ii</sup> Berechnungen von T&E auf der Grundlage der ETISplus-Daten (2010) und kalibriert auf Basis von Eurostat (2018).

Es ist ungewiss, welche der Technologien sich im Langstrecken-Straßengüterverkehr, für den normalerweise Sattelzüge mit 40 Tonnen zGG eingesetzt werden, durchsetzen wird. Alle in Frage kommenden Antriebstechnologien stehen noch am Anfang der techno-ökonomischen Lernkurve: Sie sind noch nicht kosteneffizient, geschweige denn wirtschaftlich wettbewerbsfähig mit konventionellen Diesel-Lkw. Ziel dieser Studie ist daher die Analyse der Fahrzeugtechnologien für den Lkw-Fernverkehr sowie ihrer System- und Nutzerkosten.

### **3.1. Direktelektrifizierung**

Die Direktelektrifizierung hat den entscheidenden Vorteil, am energieeffizientesten zu sein, was zu einem geringeren Primär- und Endenergieverbrauch und damit zu geringeren Energiekosten führt. Bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen wird ein groß angelegter Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge inzwischen weithin als der kostengünstigste und schnellste Weg zur vollständigen Dekarbonisierung angesehen. Die Produktion von batterieelektrischen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen wird derzeit hochgefahren und ihre Marktdurchdringung wird sich in den kommenden Jahren beschleunigen.

Außerdem schreitet die Entwicklung der Batterietechnologie voran und die Kosten sinken. Neben der Verbesserung der Herstellungsprozesse wird erwartet, dass die chemische Zusammensetzung der Batteriezellen, d. h., die Kathoden- und Anodenmaterialien und etwaige (Post-)Lithiumchemien, weiter optimiert wird, wodurch die gravimetrische und volumetrische Energiedichte, das Batteriepackgewicht, die Zyklusnutzungsdauer und die Langlebigkeit der Batterien verbessert sowie eine nachhaltige Rohstoffbeschaffung, eine Weiterverwendung (*Second-Life*) in stationären Speicheranwendungen und schließlich das Recycling ermöglicht werden.<sup>24</sup>

Die Direktelektrifizierung von Lkw, zu denen sowohl batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) als auch batterieelektrische Oberleitungsfahrzeuge (OC-BEV) zählen, sorgt für eine höhere Energieeffizienz. Beide verwenden eine (unterschiedlich große) Batterie und einen elektrischen Antriebsstrang, benötigen aber eine unterschiedliche Ladeinfrastruktur. Höhere Fahrzeuganschaffungskosten durch die eingebaute Batterie werden durch geringere Betriebskosten während der Nutzungsdauer des Fahrzeugs ausgeglichen. Ein elektrischer Antriebsstrang bietet Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Er stößt keine Abgase und damit weder Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) noch Luftschadstoffe aus. Außerdem besteht ein elektrischer Antriebsstrang aus weniger Komponenten und beweglichen Teilen und erfordert daher weniger Wartungsmaßnahmen und Reparaturen im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor oder einem Brennstoffzellen-Stack.

#### **3.1.1. Batterie-Elektrifizierung**

Stützt man sich auf die Berechnungen von Earl et al., so lag der Battery-to-wheel-Energieverbrauch im Jahr 2020 bei 1,52 kWh/km bei einem nicht optimierten Frontlenker-Fahrerhaus. Bis 2030 soll er bei

einem optimierten Zugmaschinen-Design und einer EU-spezifischen Autobahngeschwindigkeit von 80 km/h 1,15 kWh/ betragen.<sup>25,iii</sup> Erreicht wird dies durch Effizienzverbesserungen: Durch den Leichtbau eines 40-Tonnen-Sattelzugs und aerodynamischer Optimierung lassen sich Rollwiderstand, Luftwiderstand und Eigenmasse des Fahrzeugs senken. Die Berücksichtigung der Bremsenergieerückgewinnung verbessert die Energieeffizienz weiter. In Deutschland dürfte die durchschnittliche Geschwindigkeit von Sattelzügen auf Autobahnen unter Berücksichtigung von Tempolimits, Baustellen und Staus unter der gesetzlichen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h liegen.<sup>26</sup>

Die Annahmen stellen einen angemessenen Mittelwert im Vergleich zu Literatur- und Herstellerangaben dar: Moultak et al. sowie Sharpe veranschlagen einen ungefähren Battery-to-wheel-Energiebedarf von 1,60 kWh/km im Jahr 2020 und von 1,45 kWh/km im Jahr 2030 bei einer höheren US-spezifischen Autobahn-Höchstgeschwindigkeit von 105 km/h.<sup>27,28</sup> Tesla hat einen Energiebedarf von „weniger als 1,24 kWh/km“ für seinen Zugmaschine Semi (ebenfalls bei 105 km/h) angekündigt.<sup>29</sup>

Wir definieren den Lkw-Fernverkehr als Straßengüterverkehr über Einzelfahrtstrecken von mehr als 400 km. Fernverkehr-Sattelzüge benötigen eine größere Batterie im Fahrzeug für eine tägliche Mindestreichweite von ca. 500 bis 800 km, in wenigen Fällen auch darüber hinaus. In Deutschland werden 76 % des gesamten Straßengüterverkehrs auf Einzelfahrtstrecken bis zu 800 km abgewickelt (siehe Abbildung 5).<sup>iv</sup>

Das in der Kostenanalyse berücksichtigte BEV hat 2020 eine nominale (d. h. Brutto-) Batteriekapazität von 1 351 kWh (die aufgrund von Verbesserungen des Energieverbrauchs bis 2030 auf 1 022 kWh sinkt), die für eine maximale Reichweite von 800 km ohne Nachladen reicht.<sup>v</sup> Um über eine angemessene Sicherheitsmarge für das Erreichen der nächsten Ladestation zu verfügen, wird in der Praxis die maximale Betriebsreichweite ohne Nachladen bei ca. 720 km liegen.

---

<sup>iii</sup> Der Battery-to-wheel-Energieverbrauch bestimmt die Energiespeicherkapazität des Fahrzeugs, die wiederum ausschlaggebend ist für die maximale Reichweite ohne Aufladen. Bei der Berechnung des Stromverbrauchs, d.h. der Energiekosten eines BEV, müssen zusätzliche Verluste in der Ladeeinrichtung berücksichtigt werden. Die entsprechenden Werte für den Energieverbrauch aus dem Netz (auch „Plug-to-Wheel“ genannt) betragen 1,60 kWh/km im Jahr 2020 und sollen ab 2030 1,21 kWh/km betragen (siehe Anhang).

<sup>iv</sup> Berechnungen von T&E auf der Grundlage der ETISplus-Daten (2010) und kalibriert auf Basis von Eurostat (2018).

<sup>v</sup> Die BEV-Werte für das Jahr 2020 sind als hypothetisch zu verstehen, da diese Fahrzeuge mit den hier angenommenen Spezifikationen noch nicht in Serie produziert werden.

Um die Langlebigkeit der Batterie zu gewährleisten, wird eine maximale Entladetiefe (DoD) von 90 % angenommen, was 2020 zu einer nutzbaren (d. h. Netto-) Batteriekapazität von 1 216 kWh führt (die bis 2030 auf 920 kWh sinken wird). ). Realdaten lassen auf eine durchschnittliche DoD von etwa 90% für Pkw schließen.<sup>30</sup> Man geht davon aus, dass die spezifische Energiedichte des fahrzeugeigenen Batteriepacks von 183 Wh/kg im Jahr 2020 auf 318 Wh/kg im Jahr 2030 ansteigen wird.<sup>31</sup> Diese Schätzung von Ricardo Energy & Environment stimmt mit Annahmen aus anderen Literaturquellen überein.<sup>32,33,34</sup> Branchenführer haben mitgeteilt, dass eine derartige Batterieleistung tatsächlich sogar früher erreicht werden könnte als allgemein angenommen.<sup>35</sup>

Durch das fahrzeugeigene Batteriepack ergibt sich ein Brutto-Zusatzgewicht des Fahrzeugs von 7,4 Tonnen im Jahr 2020, 4,8 Tonnen im Jahr 2025 und 3,2 Tonnen im Jahr 2030. Deutschland steht kurz vor der Umsetzung der jüngsten Änderungen der EU-Richtlinie über Gewichte und Abmessungen in nationales Recht, was bedeutet, dass das zusätzliche Gewicht durch den emissionsfreien Antriebsstrang mit bis zu maximal 2 Tonnen kompensiert wird.<sup>36</sup> Dies in Kombination mit der Nettogewichtseinsparung durch Verwendung eines elektrischen Antriebsstranges anstelle eines konventionellen Dieselantriebs (2,4 Tonnen) würde 2020 zu einem Netto-Nutzlastverlust von etwa 3,0 Tonnen und folglich zu einem Nutzlastnachteil bei batterieelektrischen Fahrzeugen führen. Mit zunehmender Energiedichte des Batteriepacks und zusätzlicher Gewichtsreduzierung der Zugmaschine wird dies voraussichtlich ab der zweiten Hälfte der 2020er Jahre keine Rolle mehr spielen.<sup>vi</sup> Tabelle 1 veranschaulicht diesen Umstand für das Jahr 2025.

	Parameter	Formel	Wert	Quelle
a	Battery-to-wheel-Energiebedarf im Jahr 2025		1.34 kWh/km	Earl et al. (2018)
b	Maximale Reichweite ohne Nachladen		800 km	-
c	Maximale Entladetiefe der Batterie		90%	T&E calculations
d	Erforderliche Batterie-Nennkapazität im Jahr 2025	$a \times b / c$	1,187 kWh	-
e	Spezifische Energiedichte auf Packebene im		245 Wh/kg	Ricardo Energy &

<sup>vi</sup> Berechnungen von T&E.

	Jahr 2025			Environment (2019)
f	Gewicht des Batteriepacks	d / e	4,844 kg	-
g	Gewicht des elektrischen Achsantriebs (einschließlich Elektromotor, Wechselrichter und Getriebe)		600 kg	Hall et al. (2019) <sup>37</sup>
h	Gesamtgewicht des elektrischen Antriebsstranges	f + g	5,444 kg	-
i	Gewicht des konventionellen Antriebsstranges und der Flüssigkeiten im Dieseltank		3,000 kg	Sharpe (2019)
<b>j</b>	<b>Netto-Zusatzgewicht</b>	<b>h - i</b>	<b>2,444 kg</b>	-
k	Maximale zusätzliche ZEV-Gewichtstoleranz gemäß der EU-Richtlinie für Gewichte und Abmessungen		(bis zu) 2,000 kg	European Union (2019) <sup>38</sup>
<b>l</b>	<b>Netto-Nutzlastverlust</b>	<b>j - k</b>	<b>444 kg</b>	-

*Tabelle 1: Beispielberechnung des Nutzlastverlustes. Auf der Grundlage von Sharpe (2019)*

Abhängig von verschiedenen Faktoren wie der Umgebungstemperatur, der C-Rate und der Anzahl an Vollzyklen nimmt die Kapazität von Lithium-Ionen-Batterien im Laufe der Zeit ab. Ein Batterie-Wärmeregelsystem regelt das Temperaturniveau und die Temperaturverteilung und optimiert so die Langlebigkeit der Zellen. Die C-Rate, mit dem ein BEV bei Ladevorgängen im Megawattbereich geladen wird, beträgt normalerweise rund 1C und ist damit niedrig genug, um eine lange Nutzungsdauer der Zellen zu gewährleisten.

Die Vollzyklen-Nutzungsdauer beschreibt die Anzahl der äquivalenten Lade-/Entlade-Vollzyklen während der Nutzungsdauer einer Batterie. Als Mindestanforderungen für batterieelektrische Fahrzeuge gelten heute mindestens 1 000 Vollzyklen.<sup>39</sup> Jüngste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass bei fortschrittlichen Lithium-Ionen-Zellchemien eine Zyklusstabilität von 90 % über bis zu 3 000 Vollzyklen erhalten bleibt.<sup>40</sup> In Anlehnung an Harlow et al. und Kühnel et al. wird hier davon ausgegangen, dass die große Batterie eines BEV im Jahr 2020 eine Zyklennutzungsdauer von

1 250 Vollzyklen erreicht und dieser Wert bis 2030 linear auf 1 750 Zyklen ansteigt. Ein BEV fährt 889 km pro äquivalentem Vollzyklus (ÄVZ). Daraus ergibt sich eine Batterie-Gesamtnutzungsdauer von 1,1 Mio. km im Jahr 2020 und 1,5 Mio. km im Jahr 2030. Danach gilt die Batterie als verbraucht. Dies reicht theoretisch aus, um mindestens die erste und zweite Nutzungsperiode eines Fernverkehrs-Lkw abzudecken.

Batterieelektrische Fernverkehrs-Lkw, die mehrtägige Überlandfahrten zurücklegen, werden auf ein flächendeckendes Ladeinfrastrukturnetz entlang der Autobahn mit einer akzeptablen Dichte angewiesen sein. Die Aufladung kann entweder langsam über Nacht oder bei gelegentlichen Schnellladungen in den Pausen des Fahrers erfolgen. Die angenommenen Ladezeiten orientieren sich an den EU-Vorschriften zu Lenk- und Ruhezeiten, um betriebliche Ausfallkosten zu vermeiden. Sie sehen eine tägliche Lenkzeit von höchstens 9 Stunden (in Ausnahmefällen 10 Stunden) und eine Mindestruhezeit von (mindestens) 9 Stunden vor. Darüber hinaus sind alle viereinhalb Stunden Fahrtunterbrechungen von 45 Minuten gesetzlich vorgeschrieben, die in zwei Pausen von 30 und 15 Minuten aufgeteilt werden können.<sup>41</sup> Nimmt man dies und eine optimistische durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h als Grundlage, so kann ein einzelner Fahrer zwischen den Fahrtunterbrechungen eine Einzelstrecke von maximal 360 km und eine maximale Strecke von höchstens 720 km pro Tag zurücklegen.

Die Kostenanalyse geht in Anlehnung an Kühnel et al. von Schnellladegeräten mit einer Leistung von 1,2 Megawatt (MW) aus, die innerhalb von höchstens 45 Minuten die Batterie für eine maximale Reichweite von 400 km aufladen können, und von Ladepunkten mit einer Leistung von 150 kW, mit denen die Batterie über Nacht innerhalb von rund 8 Stunden vollständig aufgeladen werden kann.<sup>42</sup>

Dabei ist zu beachten, dass derartige Hochleistungs-Ladegeräte einen erheblichen zusätzlichen Strombedarf verursachen und einen Anschluss an das Mittelspannungsnetz und möglicherweise eine Verstärkung der Netzkapazität erfordern würden. *CharIN*, die Standardisierungsinitiative der Industrie, entwickelt derzeit das „Megawatt Charging System“ (MCS), einen Hochleistungs-Ladestandard für Nutzfahrzeuge mit bis zu 4,5 MW.<sup>43</sup> Das Laden von BEV über Nacht an herkömmlichen Ladepunkten, ergänzt durch gelegentliches Laden tagsüber mit stationären Batteriespeichern, könnte eine effiziente Lastenausgleichsstrategie darstellen, um bei niedriger Gesamtnachfrage Strom aus dem Netz zu beziehen und so zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung aus einem auf erneuerbaren Energien basierenden Stromnetz beizutragen.<sup>44</sup>

### **3.1.2. Oberleitungssysteme**

Ein elektrisches Straßensystem (ERS) auf den am stärksten frequentierten Abschnitten des Autobahnnetzes und damit eine dynamische Aufladung während der Fahrt kann eine Alternative zur

statischen Aufladung darstellen und somit eine Verkleinerung des im Fahrzeug verbauten Batteriepacks ermöglichen. Ein ERS stellt die Stromversorgung des Elektrofahrzeugs über Oberleitungen, eine Stromschiene im Boden oder induktives Aufladen sicher und kann somit einen kostengünstigen und ergänzenden Pfeiler der Elektrifizierung des Fernverkehrs-Lkw-Segments bilden.<sup>vii</sup> Die verschiedenen ERS-Technologien haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile, wobei manche Oberleitungen als die derzeit ausgereifteste technologische Option ansehen.<sup>45</sup> Die Oberleitungs-Technologie wird derzeit in Feldversuchen auf drei Abschnitten des deutschen Straßennetzes getestet und wurde für die hiesige Kostenanalyse ausgewählt.<sup>46,47</sup> Die Kostenschätzungen von Kühnel et al. basieren unter anderem auf den vom Bundesumweltministerium geförderten ENUBA-Projekten.<sup>48,49</sup>

Bis auf den Gewichtsunterschied aufgrund des leichteren Batteriepacks sowie zwei weiteren Abweichungen laut Siemens ist der Battery-to-wheel-Energiebedarf bei einem OC-BEV identisch mit den Werten eines BEV: Der ausgefahrene Stromabnehmer führt zu einem erhöhten Energieverbrauch von 0,10 kWh/km aufgrund des erhöhten Luftwiderstands und zusätzliche Ladeverluste von 10 % treten zwischen dem Mittelspannungsnetz und dem Fahrdraht auf.<sup>50</sup> Daraus ergeben sich folgende Werte: 1,54 kWh/km (2020) und 1,25 kWh/km (2030) gemessen am Stromabnehmer und 1,71 kWh/km (2020) und 1,39 kWh/km (2030) gemessen am Netz. Beim reinen Batteriebetrieb mit eingefahrenem Stromabnehmer auf den nicht elektrifizierten Abschnitten des Straßennetzes entsprechen die Werte denen eines BEV nach Berücksichtigung des Gewichtsunterschieds durch die leichtere Batterie (siehe Fahrzeugenergieverbrauchswerte im Anhang).

OC-BEV haben eine kleinere Batterie, die geladen werden kann, wenn das Fahrzeug Strom über die Oberleitungen bezieht, und die eine elektrische Autonomie beim Fahren auf nicht elektrifizierten Abschnitten des Straßennetzes ermöglicht. Der in der Kostenanalyse berücksichtigte OC-BEV hat eine Batteriekapazität zwischen 320 kWh (2020) und 256 kWh (2030), was eine Reichweite von bis zu 200 km bei oberleitungsfreiem Betrieb ermöglicht.<sup>viii</sup> Laut Wietschel et al. sind mehr als 95 % der Fahrten von Sattelzügen auf dem deutschen Autobahnnetz kürzer als 100 km.<sup>51</sup> Eine reine Batteriereichweite von 200 km würde also ausreichen, um kleinere und größere Elektrifizierungslücken und die Entfernung zwischen Autobahn und (Ent-)Ladestelle zu überbrücken sowie um zusätzliche Einsatzflexibilität zu

---

<sup>vii</sup> Oberleitungen könnten technisch auch von Oberleitungsfahrzeugen mit dieselektrischem Hybridantrieb (OC-HEV) genutzt werden, wie es derzeit in den Feldversuchen in Deutschland bereits der Fall ist. Diese Möglichkeit wurde jedoch in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt, da Hybrid-Dieselfahrzeuge auf ERS-Systemen voraussichtlich die Ausnahme sein werden.

<sup>viii</sup> Die OC-BEV-Werte für das Jahr 2020 sind als hypothetisch zu verstehen, da diese Fahrzeuge mit den hier angenommenen Spezifikationen noch nicht in Serie produziert werden.

gewährleisten. In Anlehnung an Kühnel et al. wurde ein Elektrifizierungsgrad von 90 % angenommen, wobei die restlichen 10 % auf Lücken innerhalb der elektrifizierten Netzabschnitte (z. B. Brücken oder Tunnel) zurückzuführen sind. Unter Berücksichtigung des Fahrleistungsanteils im elektrifizierten Netz (80 %) ergibt sich eine Fahrleistungsverteilung von 72/28 % zwischen Strombezug über die Oberleitungen und aus der eingebauten Batterie für den Antrieb des Elektromotors.

Wie beim BEV wird angenommen, dass die Batterie eines OC-BEV eine Zyklenutzungsdauer von 1 250 Vollzyklen im Jahr 2020 und 1 750 Zyklen im Jahr 2030 erreicht. Ein OC-BEV fährt 222 km pro äquivalentem Vollzyklus, wenn er seinen Strom nur aus der eingebauten Batterie bezieht. Daraus ergibt sich eine Batterie-Gesamtnutzungsdauer von 990 000 km im Jahr 2020 und 1,4 Mio. km im Jahr 2030. Danach gilt die Batterie als verbraucht. Dies reicht theoretisch aus, um mindestens die ersten zwei Nutzungsperioden eines Fernverkehr-Lkw abzudecken.

Das Haupthindernis auf dem Markt für ein ERS ist ein möglicherweise zögerlicher Ausbau der Infrastruktur aufgrund der Trägheit des Marktes und der anfänglich höheren Investitionskosten. Die Technologie muss europaweit harmonisiert und ihr Einsatz zwischen allen beteiligten Akteuren eng koordiniert werden, um grenzüberschreitende Interoperabilität zu gewährleisten. Ähnlich wie bei der Ladeinfrastruktur für BEV kann ein erheblicher zusätzlicher Strombedarf auf das Mittelspannungsnetz zukommen, der möglicherweise Netzverstärkungen auf einigen Abschnitten erfordert.<sup>52</sup>

### **3.2. Erneuerbarer Wasserstoff**

Wasserstoff wird als potenzieller Energieträger für den Straßengüterfernverkehr betrachtet. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) können aus einer Well-to-Wheel (WTW)-Perspektive emissionsfrei sein, wenn der als Kraftstoff benötigte Wasserstoff mit erneuerbarem Strom hergestellt, und nicht über Methan-Dampfreformierung (SMR) aus fossilem Erdgas gewonnen wird. Aus Erdgas gewonner, sogenannte „blauer“ Wasserstoff erfordert Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS), welche Abscheidungsraten von bis zu 90% der Downstream-Emissionen bei Anwendung der fortschrittlichsten Technologie (autotherme Reformierung, ATR) ermöglicht.<sup>53</sup> Nichtsdestotrotz sind rund 25% der gesamten Lebenszyklusemissionen von fossilem Erdgas auf sogenannte flüchtige Upstream-Emissionen zurückzuführen, die auch bei der Produktion von blauem Wasserstoff verursacht werden würden.<sup>54</sup> Damit bleibt erneuerbarer, sogenannter „grüner“ Wasserstoff die einzige Option, die mittel- und langfristig Null Well-to-Wheel-Emissionen gewährleisten kann.

Erneuerbarer Wasserstoff kann mit einem Elektrolyseur hergestellt werden, der Wasser mit Hilfe von erneuerbarem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff spaltet. Über die elektrochemische Umwandlung in der Brennstoffzelle des Fahrzeugs wird Strom erzeugt, der unter Umständen in einer kleineren Batterie im Fahrzeug zwischengespeichert wird sowie den Elektromotor antreibt. Die Vorteile: keine CO<sub>2</sub>- und

Schadstoffemissionen, relativ kurze Betankungszeiten und möglicherweise größere Reichweiten. Die größten Herausforderungen sind die Verluste bei der Well-to-Wheel-Energieumwandlung, die hohen Kosten für die Fahrzeugtechnologie, die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff, der Entwicklungsbedarf bei der erforderlichen Infrastruktur für die Kraftstoffverteilung und -betankung, sowie die steigende Wahrscheinlichkeit, aufgrund eines höheren Primärbedarfs an erneuerbarem Strom verstärkt auf außereuropäische Kraftstoffimporte Europas angewiesen zu sein.

Der Battery-to-wheel-Energiebedarf ist bei dem FCEV und BEV bis auf wenige Ausnahmen identisch, da beide abgesehen von Elektrostecker, Brennstoffzellen-Stack und Wasserstoffspeicher die gleichen Fahrzeugeigenschaften und Antriebsstrangkomponenten aufweisen. Das bedeutet, dass von den gleichen Effizienzverbesserungen wie beim BEV und OC-BEV ausgegangen wird (Reduzierung des Rollwiderstands, des Luftwiderstands und der Fahrzeugleergewichts). Der Unterschied zwischen dem FCEV und BEV in Bezug auf den Energiebedarf ist auf das geringere Batteriegewicht sowie die zusätzlichen Konversionsverluste bei der Umwandlung von Wasserstoff in Strom in der Brennstoffzelle zurückzuführen (durchschnittlicher Umwandlungswirkungsgrad im Jahr 2020: 54 %, 56 % im Jahr 2030 und 61 % im Jahr 2050).<sup>55</sup> Daraus ergibt sich ein Tank-to-Wheel-Energieverbrauch von 2,53 kWh/km im Jahr 2020, 1,95 kWh/km im Jahr 2030 und 1,79 kWh/km im Jahr 2050. Diese Verbrauchswerte sind vergleichbar mit den Angaben von Moultak et al., Daimler and Hyundai.<sup>56,57</sup>

FCEV verfügen über einen Brennstoffzellen-Stack, eine kleinere Batterie zur Zwischenspeicherung von Strom für Motorspitzenlasten und einen Wasserstoffspeicher mit verdichtetem oder verflüssigtem Wasserstoff. Die Verdichtung bei 350 oder 700 bar ist die technisch ausgereifteste und bewährteste Speichermöglichkeit.<sup>58</sup> Sie führt im Vergleich zur Verflüssigung zu geringeren Energieumwandlungsverlusten. Eine Verflüssigung von Wasserstoff würde die volumetrische Speicherdichte erhöhen und das Gewicht des Tankmaterials reduzieren, aber auch zu höheren Energieverlusten von 25 % bis 35 % führen und teurere dickwandige Kryotanks erfordern.<sup>59,60</sup> Für die Kostenanalyse wurde der FCEV mit einem PEM-Brennstoffzellen-Stack mit einer Nennleistung von 240 kW, einem Batteriepack mit 127 kWh und, je nach Energieverbrauch des Fahrzeugs, einem Wasserstofftank mit einem Druck von 700 bar und einem Gewicht zwischen 0,9 und 1,3 Tonnen ausgestattet.<sup>ix</sup> Die Kapazität des Wasserstofftanks ist zunächst 61 kg<sub>H2</sub> im Jahr 2020 und sinkt bis 2030 auf 47 kg<sub>H2</sub> mit zunehmender Energieeffizienz des Fahrzeugs.<sup>61</sup> Basierend auf den Angaben des U.S. Department of Energy wird der Durchfluss an der Wasserstoffzapfsäule auf 3,6 bis 7,2 kg<sub>H2</sub> pro Minute geschätzt, was Betankungszeiten von weniger als 20 Minuten gewährleistet, wenn der Tank komplett leer ist.

---

<sup>ix</sup> Die FCEV-Werte für das Jahr 2020 sind als hypothetisch zu verstehen, da diese Fahrzeuge mit den hier angenommenen Spezifikationen noch nicht in Serie produziert werden.

Sollte der erneuerbare Wasserstoff aufgrund geringerer Kosten für erneuerbaren Strom außerhalb Europas produziert werden, müsste er anschließend entweder verdichtet und über ein interkontinentales Rohrfernleitungsnetz befördert oder er müsste verflüssigt und per Flüssiggastanker nach Deutschland transportiert werden, was beides mit erheblichen zusätzlichen Energieumwandlungsverlusten verbunden wäre.<sup>62</sup> Bei anderen Überseetransportmöglichkeiten werden Wasserstoffträger wie Ammoniak oder flüssige organische Wasserstoffträger (*liquid organic hydrogen carriers, LOHC*) verwendet, die zwar einfacher zu transportieren wären, aber zu zusätzlichen Umwandlungsverlusten führen würden.<sup>63</sup>

Sofern nicht mittelfristig ein flächendeckendes inländisches Rohrfernleitungsverteilternetz zur Verfügung steht, würde die inländische Verteilung vom Produktionsstandort oder dem Einfuhr-Terminal (z. B. einem Seehafen) über spezielle, für den Transport tiefkalter verflüssigter Gase geeignete Tankfahrzeuge erfolgen, die den Flüssigwasserstoff zur Tankstelle befördern, wo er entweder direkt im verflüssigten Zustand genutzt oder wieder in seinen gasförmigen Zustand umgewandelt werden kann.<sup>64,65</sup> Eine weitere Möglichkeit ist die dezentrale Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff direkt neben der Tankstelle, entweder über eine Stromerzeugung vor Ort oder über eigenen, über eine Kaufvereinbarung mit Herkunftsnachweisen (*power purchase agreement, PPA*) bezogenen Strom aus erneuerbaren Quellen, eventuell mit vorübergehender stationärer Batteriespeicherung, um Stromspitzenkosten zu reduzieren und die erforderliche Auslastung des Elektrolyseurs zu erreichen.

### **3.3. Power-to-Liquid**

Power-to-Liquid (PtL), d. h. Synthetischer, kohlenstoffbasierter E-Diesel, der aus erneuerbarem Wasserstoff und CO<sub>2</sub> mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese (FT) hergestellt wird, könnte sich theoretisch als CO<sub>2</sub>-neutraler Schlüssel zur Dekarbonisierung des Straßengüterfernverkehrs erweisen. Die Vorteile von flüssigem FT-Diesel sind die ausgereifte und weit verbreitete Fahrzeugtechnologie, bei der die Umrüstung des Antriebsstranges entfallen würde, sowie die hohe Energiedichte des Kraftstoffes und die bereits existierende Transport-, Verteil- und Betankungsinfrastruktur, die weiterhin genutzt werden könnte. Die größten Herausforderungen sind die hohen Energieumwandlungsverluste bei der Kraftstoffherstellung, der vergleichsweise niedrige thermische Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren, die daraus resultierenden hohen Kraftstoffkosten, eine lediglich eingeschränkte Minderung von Luftschadstoffemissionen und eine erhöhte Abhängigkeit von Energieimporten aus dem außereuropäischen Ausland aufgrund eines deutlich gestiegenen Bedarfs an Strom aus erneuerbaren Quellen.<sup>x</sup>

---

<sup>x</sup> Synthetische Kraftstoffe, sogenannte E-Fuels, enthalten zwar keine Verunreinigungen wie Schwermetalle und Schwefel, erzeugen jedoch Abgase, die Feinstaub, Stickstoffoxid und Kohlenmonoxid (CO) aufweisen. Studien

Die FT-Synthese benötigt erneuerbaren Wasserstoff und direkt aus der Luft gewonnenes CO<sub>2</sub> als Ausgangsmaterial. *Direct Air Capture (DAC)*, ein Verfahren zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft, ist die einzig mögliche Methode, um kohlenstoffneutralen Kraftstoff herzustellen. Die kostengünstigere Kohlenstoffabscheidung und -verwertung (CCU) aus einer industriellen Punktquelle wäre deutlich billiger, birgt aber das Risiko einer Doppelzählung und kann keinen geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf, d. h., keine kohlenstoffneutrale Produktion und Verbrennung des Kraftstoffs gewährleisten.

In Übereinstimmung mit den Annahmen für den (OC)-BEV und FCEV finden im Tank-to-Wheel-Energiebedarf von mit synthetischem E-Diesel betriebenen Fahrzeugen (ICEV\_PtL) optimistische, im oberen Bereich geschätzte Energieeffizienzverbesserungen für Diesel-Lkw Berücksichtigung, die von den europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen erwartet werden können, das heißt ein um 21 % gesenkter Kraftstoffverbrauch bis 2030 bei Sattelzügen im Vergleich zum Ausgangswert von 2019/2020 nach Delgado et al. (29,86 l/100 km im Jahr 2020 und 23,47 l/100 km im Jahr 2030).<sup>xi,66</sup> Dies beinhaltet eine Steigerung des durchschnittlichen thermischen Wirkungsgrades (BTE) des Dieselmotors von 42 % im Jahr 2020 auf 48 % im Jahr 2030. In der Praxis würde dieses Maß an Effizienzsteigerung ein optimiertes, aerodynamischeres Design bei Sattelzügen erfordern.

### **3.4. Power-to-Methane**

Power-to-Methane (PtM), d. h., synthetisches E-Methan, das aus erneuerbarem Wasserstoff und direkt aus der Umgebung gewonnenem CO<sub>2</sub> hergestellt wird, könnte sich theoretisch ebenfalls als CO<sub>2</sub>-neutraler Schlüssel zur Dekarbonisierung des Straßengüterfernverkehrs erweisen. Die Vorteile von Power-to-Methane sind die relativ ausgereifte Fahrzeugtechnik und überschaubare Motoranpassungen, die erforderlich wären. Ähnlich wie bei Power-to-Liquid sind die zentralen Herausforderungen die hohen Umwandlungsverluste bei der Kraftstoffherstellung, der vergleichsweise niedrige thermische Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren, die daraus resultierenden hohen Kraftstoffkosten, eine mangelnde Minderung der Luftschadstoffemissionen und eine erhöhte

---

zufolge ist die Menge an Feinstaub aufgrund fehlender Verunreinigungen wahrscheinlich geringer ist als bei Kraftstoffen aus fossilen Energieträgern. Die Menge an emittierten Stickoxiden ist voraussichtlich ähnlich hoch oder geringer.

<sup>xi</sup> Ein Reduktionsziel von -21 % scheint eine optimistische Schätzung zu sein, wenn man bedenkt, dass ein Teil des Flottenreduktionsziels für 2030 (30 %) durch den Einsatz von emissionsfreien und emissionsarmen Fahrzeugen (ZLEV) erreicht werden soll. ZLEV-Neuzulassungen werden das nominale Reduktionsziel wirksam senken, sowohl durch ihre Mehrfachzählung bis 2025 als auch durch den freiwilligen Benchmark für Neuzulassungen ab 2025.

Abhängigkeit von Energieimporten aus dem außereuropäischen Ausland aufgrund eines deutlich gestiegenen Bedarfs an Strom aus erneuerbaren Quellen.<sup>67</sup>

## Verfügbarkeit von nachhaltigem Biomethan

Biomethan, erneuerbares, aus Biogas aufbereitetes Methan, könnte theoretisch ein wirksames Instrument zur Senkung der THG-Emissionen der deutschen Lkw-Flotte sein. Während pflanzliche Rohstoffe der ersten Generation aufgrund ihrer hohen Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen und negativen Umweltauswirkungen nicht in Betracht gezogen werden dürfen, könnte fortschrittliches Biomethan aus Abfällen und Reststoffen, das durch anaerobe Vergärung und Biomassevergasung erzeugt wird, unter Anwendung strenger Nachhaltigkeitskriterien in der Tat die THG-Emissionen beachtlich senken. 2020 wurde im deutschen Verkehrssektor insgesamt 0,9 TWh Biomethan eingesetzt.<sup>68</sup>

Die Verfügbarkeit von nachhaltigem Biomethan aus fortschrittlichen abfall- und reststoffbasierten Ausgangsmaterialien ist jedoch viel zu gering, um einen größeren Anteil der deutschen Lkw-Flotte damit zu versorgen. Searle et al. schätzten das maximale nachhaltige Biomethanpotenzial bei verschiedenen Kostenniveaus in Deutschland und kamen zu dem Schluss, dass nur ein niedriges Produktionsniveau die notwendigen Nachhaltigkeitskriterien erfüllen würde (siehe Abbildung 6).<sup>69</sup> Unter Berücksichtigung der THG-Emissionen über die gesamten Nutzungsdauer betrachteten Searle et al. anaerobe vergorenen Viehdung, Klärschlamm sowie in Gas umgewandelte Bioabfälle als geeignete Ausgangsmaterialien, die keine oder teilweise negative THG-Emissionen erzeugen.

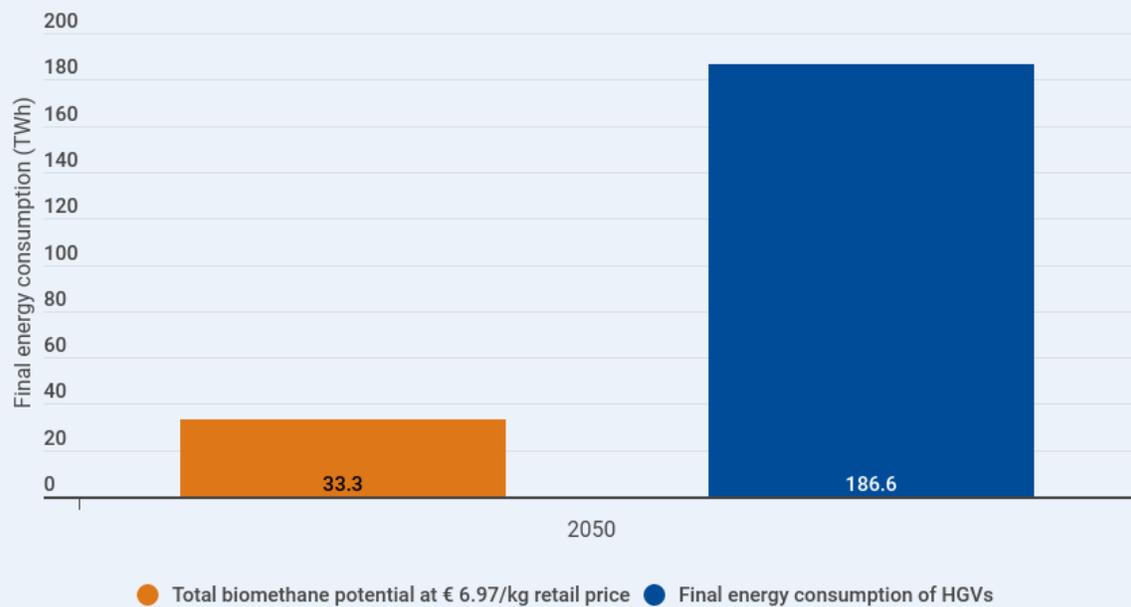
Laut ihrer Analyse der Rohstoffverfügbarkeit könnte Deutschland im Jahr 2050 33,3 TWh Biomethan pro Jahr zu einem Grenzpreis von 6,97 €/kg<sub>CNG</sub> bereitstellen, wobei die Zusatzkosten für Verflüssigung, Transport, Verteilung und Speicherung hierbei noch nicht berücksichtigt sind.<sup>xii</sup> Das ist mehr als das Sechsfache des durchschnittlichen Verkaufspreises von komprimiertem Erdgas (CNG) als Transportkraftstoff in Deutschland (zwischen 1,08 und 1,13 €/kg<sub>CNG</sub> für hochkalorisches Gas).<sup>70,71</sup> Das Produktionspotenzial von 33,3 TWh könnte nur mit erheblichen finanziellen Subventionen realisiert werden: Um Preisparität mit fossilem Methan zu erreichen, wären Subventionen von knapp 6,00 €/kg erforderlich. Zum Vergleich: Der Verkaufspreis von verflüssigtem Power-to-Methane, das

---

<sup>xii</sup> Die Autoren der Studie haben die Rohdaten zur Verfügung gestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Produktionskosten von nachhaltigem Biomethan anfangs unter 5,54 €/kg<sub>CNG</sub> liegen werden und dass die Grenzkosten für jedes zusätzlich genutzte Ausgangsmaterialienpotenzial schrittweise ansteigen werden.

aus erneuerbaren Energien erzeugt und aus Übersee importiert wird, könnte 2050 bei 2,48 €/kg<sub>LNG</sub> liegen (siehe Abschnitt 5.2.1).

Der für den Betrieb der gesamten deutschen Lkw-Flotte mit Methan im Jahr 2050 erforderliche Endenergieverbrauch läge unter Berücksichtigung von Treibstoffeffizienzsteigerungen sowie der Verkehrsverlagerung auf den Schienen- und Binnenschiffsverkehr bei 186,6 TWh. Das bedeutet: Würde das gesamte nachhaltige Biomethanpotenzial in Deutschland ausschließlich von Lkw genutzt werden, könnte es 2050 lediglich 18 % des erwarteten Endenergieverbrauchs der Flotte decken.



**Notes:** Comparing the final energy consumption of a dual-fuel CI HPDI gas vehicle fleet with the total sustainable biomethane production potential in Germany. Assuming that all available biomethane is supplied to HGVs, leaving nothing for the power, industry or buildings sectors. Based on a biomethane retail price of € 6.79/kg, this is more than six times the average price level of compressed fossil methane (CNG) as a transport fuel in Germany.

**Sources:** T&E calculations based on Searle et al. (2018).

Abbildung 6: Vergleich von nachhaltigem Biomethanpotenzial und Endenergieverbrauch im Jahr 2050

Die Gewinnspannen in der Spediteursbranche sind gering und die Kraftstoffkosten machen einen großen Teil der Gesamtbetriebskosten (TCO) aus. Würde das gesamte nachhaltige

Biomethanpotenzial ausschließlich dem Straßengüterverkehr zugeteilt, bliebe nichts mehr für den Energie-, Industrie- oder Gebäudesektor. Dies würde außerdem bedeuten, dass denjenigen, die derzeit Biomethan nutzen, keines mehr zur Verfügung stünde.

Es ist höchst unwahrscheinlich, dass ein signifikanter Anteil des verfügbaren Biomethans dem deutschen Straßengüterverkehr zugeteilt würde, wenn mehrere Branchen um dieses Gas konkurrieren. Daher wird Biomethan als Kraftstoff für Gas-Lkw in der vorliegenden Studie nicht weiter berücksichtigt.

Die technischen Spezifikationen von Gas-Lkw unterscheiden sich nicht voneinander, unabhängig davon, ob der verwendete Kraftstoff fossilen oder biogenen Ursprungs ist oder aus der Power-to-Methan-Produktion stammt, sofern das Methan für die Verwendung als Transportkraftstoff gereinigt und aufbereitet wird. Das bedeutet, dass die Kraftstoff- und Verbrennungseigenschaften der Fahrzeuge identisch sind.<sup>72</sup> Gasförmiger Kraftstoff kann entweder verdichtet oder zur Speicherung verflüssigt und in einem modifizierten Verbrennungsmotor zum Antrieb genutzt werden. Da Fernverkehrs-Lkw größere Fahrzeugreichweiten benötigen, müssen gasbetriebene Sattelzüge ihren Kraftstoff in verflüssigter Form (LNG) an Bord mitführen.

Gasförmiger synthetischer kohlenwasserstoffbasierter Kraftstoff wird durch Methanisierung (auch Sabatier-Prozess genannt) erzeugt. Als Ausgangsmaterialien nutzt dieser Prozess Wasserstoff aus erneuerbarem Strom und direkt aus der Umgebung gewonnenes CO<sub>2</sub>, um Methan und Wasser als Folgeprodukte zu erzeugen.

Für ein mit synthetischem E-Methan betriebenes Fahrzeug (ICEV\_PtM) wurde ein bivalenter, HPDI-Motor mit Selbstzündung gewählt, der die gleiche Kraftstoffeffizienz wie herkömmliche Dieselmotoren erreichen kann (2,96 kWh/km im Jahr 2020 und 2,33 kWh/km im Jahr 2030). Diese Annahme stützt sich auf Literaturquellen und Herstellerangaben.<sup>73</sup> Zusätzliche Energieverluste durch Verdampfung oder Verdunstung werden nicht berücksichtigt. Der Dual-Fuel-Motor wird primär mit Methan betrieben und verwendet kleinere Mengen an Diesel als Sekundärkraftstoff zur Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches.<sup>74</sup> Zur Vereinfachung wird bei der Kostenanalyse davon ausgegangen, dass diese Fahrzeuge ausschließlich mit synthetischem E-Methan betrieben werden.

#### **4. Bedarf an zusätzlichem erneuerbarem Strom**

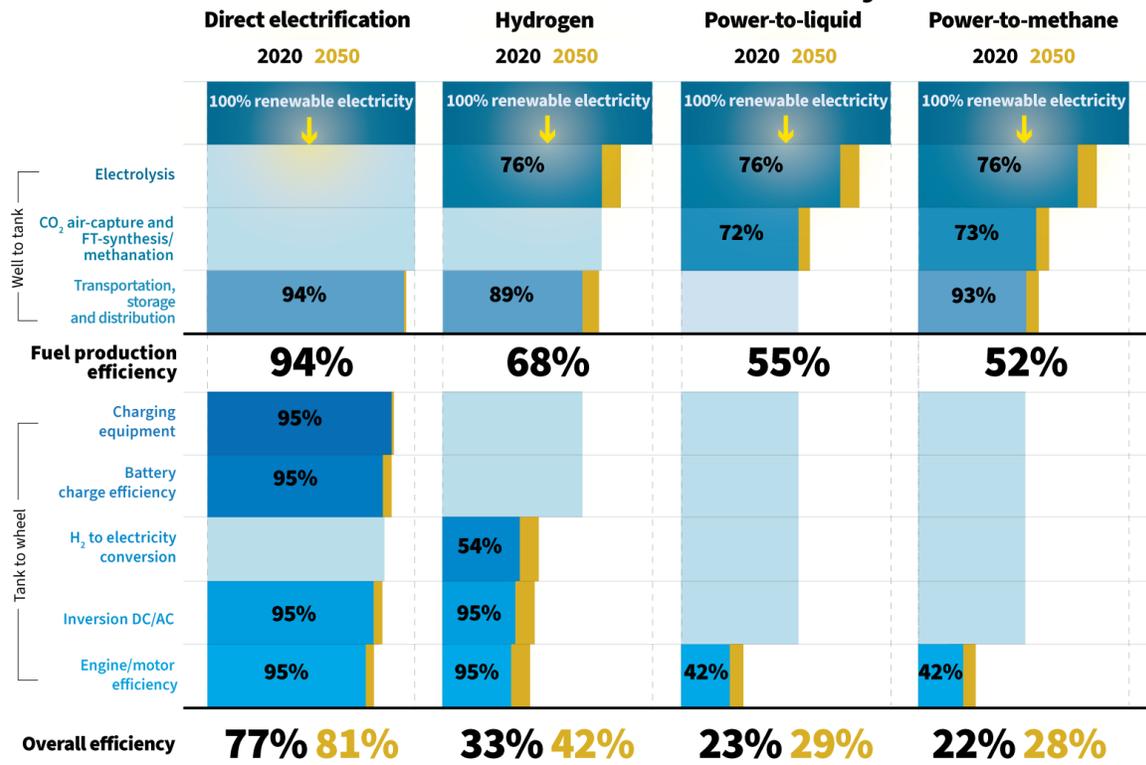
Die verschiedenen Fahrzeugtechnologien weisen unterschiedliche Umwandlungsverluste auf und benötigen daher direkt oder indirekt unterschiedliche Mengen an Strom aus erneuerbaren Quellen für die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff oder E-Fuels. Abbildung 7 zeigt die durchschnittlichen

Umwandlungswirkungsgrade auf Grundlage der heutigen und der maximalen technischen Möglichkeiten im Jahr 2050.<sup>75,xiii</sup> Die direkte Elektrifizierung ist und bleibt mindestens doppelt so effizient wie erneuerbarer Wasserstoff und etwa dreimal so effizient wie Verbrennungsmotoren, die mit flüssigen oder gasförmigen E-Fuels betrieben werden.

---

<sup>xiii</sup> Die hier angegebenen Umwandlungswirkungsgrade dienen der Veranschaulichung und sind als ungefähre Mittelwerte unter Berücksichtigung unterschiedlicher Produktionswege zu verstehen. Die Berechnung der Kosten für Kraftstoffe und Strom aus erneuerbaren Quellen in der Kostenanalyse basiert auf den Umwandlungswirkungsgraden des PtG/PtL-Rechners (Well-to-Tank) von Agora Verkehrswende et al. und den im Anhang aufgeführten Kraftstoffverbrauchswerten der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel).

## Trucks: direct electrification most efficient by far

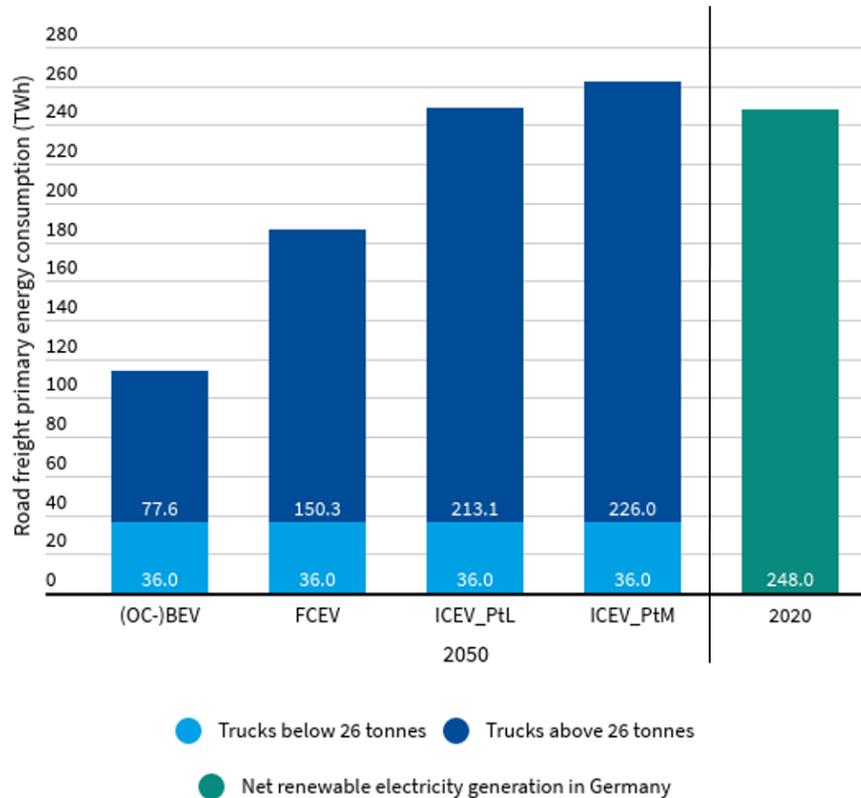


Notes: Efficiency rates of long-haul HGVs. To be understood as approximate mean values taking into account different production methods. Direct electrification represents both BEVs running on batteries and/or overhead catenaries. Hydrogen includes onboard fuel compression, while power-to-methane includes fuel liquefaction. Assuming same engine efficiency for diesel and dual-fuel HPDI gas vehicles. Excluding mechanical losses.

Abbildung 7: Umwandlungswirkungsgrade der verschiedenen Fahrzeugtechnologien

Dies wirkt sich auf die Menge an zusätzlichem Strom aus erneuerbaren Quellen aus, die für die verschiedenen Technologiemodelle benötigt wird. In Abbildung 8 wird der zusätzliche Bedarf an Strom aus erneuerbaren Quellen veranschaulicht und mit der Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2020 verglichen.<sup>76</sup> Für alle Technologien wird von einer Batterieelektrifizierung für Lkw bis 26 Tonnen zGG ausgegangen. Die Unterschiede im Gesamtverbrauch an erneuerbarer Primärenergie sind also auf Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 26 Tonnen zurückzuführen. 2050 würde die direkte Elektrifizierung ein Äquivalent

von 46 %, die Wasserstofftechnologie ein Äquivalent von 75 % und die beiden Kohlenwasserstofftechnologien Äquivalente von 100 % bzw. 106 % im Vergleich zur Nettostromerzeugung des Landes aus erneuerbaren Energien im Jahr 2020 erfordern.



**Notes:** Battery electrification for trucks below 26 tonnes is assumed across all pathways.

**Sources:** T&E calculations and Fraunhofer ISE (2020).

Abbildung 8: Primärenergieverbrauch 2050 im Vergleich zur Netto-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 2020

Im Rahmen der umfassenden Energiewende und der Notwendigkeit, alle Wirtschaftssektoren einschließlich des Energie-, Industrie- und Gebäudesektors vollständig zu dekarbonisieren, werden in

Deutschland und Europa erhebliche zusätzliche Kapazitäten an Strom aus erneuerbaren Quellen benötigt. Erneuerbarer Strom sollte daher so effizient wie möglich genutzt werden. Da die Dekarbonisierung des Luft- und Schifffahrtssektors sowie andere schwer zu dekarbonisierende Wirtschaftszweige wie der Industrie auf strombasierte Kraftstoffe und insbesondere auf erneuerbaren Wasserstoff angewiesen sein werden, sollte die direkte Elektrifizierung des Straßenverkehrs vorrangig haben, wo immer dies technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Befürworter von strombasierten Kraftstoffen im Straßengüterverkehr verweisen oft auf die Notwendigkeit temporärer und saisonaler Energiespeicher in einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierendem Energiesystem. Es ist jedoch umstritten, ob der Straßengüterverkehr für eine derartige systemische Speicherfunktion genutzt werden sollte. Es dürfte kostengünstigere Möglichkeiten zum Ausgleich und zur Speicherung von Strom aus erneuerbaren Energien geben, die zuerst genutzt werden sollten: zusätzliche Verbindungsleitungskapazitäten zwischen den EU-Ländern, Lasten- und Spitzenausgleich durch sektorübergreifendes Bedarfsmanagement, temporäre stationäre Batteriespeicher zum Ausgleich von Tagesüberschüssen und Pumpspeichieranlagen in Nordeuropa bei längerem Stromspeicherbedarf. Importierter erneuerbarer Wasserstoff wird benötigt werden, um die saisonalen Schwankungen erneuerbarer Energien auszugleichen, indem er etwa beispielsweise zur Rückverstromung im Winter in Gas-Spitzenlastkraftwerken eingesetzt werden wird.<sup>77</sup>

## 5. Kostenanalyse

Die Kosten für Strom aus erneuerbaren Quellen sind nur eines der Kostenelemente, die es zu berücksichtigen gilt. Die Systemkosten umfassen alle Kapital- und Betriebskosten für die jeweilige Fahrzeugtechnologie unter Berücksichtigung ihres Anschaffungs-, Energie- und Infrastrukturbedarfs. Die Nutzerkosten, auch Gesamtbetriebskosten (TCO) genannt, umfassen dagegen die vollen Anschaffungs-, Erhaltungs- und Betriebskosten einschließlich aller Steuern, Abgaben, Gebühren und Fördermitteln. Fahrerbezogene Lohnkosten sowie Versicherungs- und Fahrzeugfinanzierungskosten sind nicht enthalten, da sie nicht technologieabhängig anfallen.

### 5.1. Systemkosten

Im Gegensatz zu den TCO beziehen sich die Systemkosten auf die Technologie- und Produktionskosten, die in unterschiedlichem Maße von den Herstellern, Betreibern, Verbrauchern und der öffentlichen Hand getragen werden müssen. Sie schließen alle Steuern, Abgaben und Gebühren mit Ausnahme der Netzanschlussgebühren sowie der Stromnetz- und -verteilungskosten aus, um eine unverfälschte Einschätzung der tatsächlichen Kosten und einen fairen Vergleich zwischen direkter Elektrifizierung und strombasierten Kraftstoffen zu ermöglichen.

### 5.1.1. Fahrzeugkosten

Die Bottom-up-Fahrzeugkostenschätzungen basieren auf den Angaben von Kühnel et al., Moultak et al., Meszler et al. und dem U.S. Department of Energy und sind im Anhang zu finden.<sup>78,79</sup> Alle Fahrzeugtechnologien haben die gleichen Eigenschaften und erfüllen das typische Nutzungsprofil eines Fernverkehrs-Sattelzuges, der gemäß den EU-Typgenehmigungsvorschriften für den gewerblichen Straßengüterverkehr eingesetzt wird. Die detaillierten Fahrzeugspezifikationen für das Jahr 2025 sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Parameter	ICEV_diesel	BEV	OC-BEV	FCEV	ICEV_PtL	ICEV_PtM
<b>Antriebsstrang</b>	Dieselmotor (350 kW)	Elektromotor (350 kW)		PEM Brennstoffzelle (240 kW) - Elektromotor (350 kW)	Dieselmotor (350 kW)	Bivalenter HPDI-Motor mit Selbstzündung (350 kW)
<b>Energiespeicher</b>	Dieseltank	Batterie		Kompr. H <sub>2</sub> Kraftstofftank - Batterie	Dieseltank	LNG-Tank - Dieseltank
<b>Kraftstofftank und Batterie-Nennkapazität im Jahr 2025</b>	570 L <sub>Diesel</sub>	1,187 kWh	288 kWh	54 kg <sub>H2</sub> - 127 kWh	570 L <sub>Diesel</sub>	205 kg <sub>LNG</sub> - 170 L <sub>Diesel</sub>
<b>Maximale Reichweite ohne Betankung und Aufladung</b>	> 1,900 km	800 km	> 800 km - 200 km	800 km <sup>xiv</sup>	> 1,900 km	1,058 km

<sup>xiv</sup> Wasserstoff-Lkw können auch mit einem größeren Kraftstofftank ausgestattet werden und so Reichweiten von 1 200 km und mehr erreichen. Ein größerer Wasserstofftank würde auch zu höheren Fahrzeugkosten führen. Die hier angenommene Reichweite von 800 km wurde daher für alle Nullemissionstechnologien angeglichen, um sie miteinander vergleichen zu können.

			mit Batterie			
--	--	--	-----------------	--	--	--

Tabelle 2: Fahrzeugspezifikationen im Jahr 2025

Ein Sattelzug hat ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen, ein Leergewicht von 14,4 Tonnen, das bis 2030 durch Leichtbau auf 12,1 Tonnen sinkt, und eine daraus resultierende maximale Nutzlast von bis zu 25,6 Tonnen (27,9 Tonnen im Jahr 2030). Die angenommenen Fahrzeug- und Bauteilgewichte basieren auf den Angaben von Kühnel et al., Meszler et al., Sharpe, Wietschel et al. und Hall et al.. Der in der vorliegenden Studie untersuchte Betriebszyklus eines Fernverkehrs-Lkws umfasst mehrtägige Überlandfahrten mit einer maximalen täglichen Fahrstrecke von bis zu 720 km, wenn das Fahrzeug von nur einem Fahrer gefahren wird.

Auf der Grundlage der Daten des von der Europäischen Kommission finanzierten TRACCS-Projekts wird von einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung während der ersten Nutzungsperiode von 136 750 km ausgegangen.<sup>80</sup> Dies entspricht einer durchschnittlichen täglichen Fahrleistung von 547 km bei 250 Betriebstagen pro Jahr.

Nach 2030 und bis 2050 bleiben die Fahrzeugkosten unverändert, da es nicht möglich ist, angemessene Einschätzungen über diesen Zeitpunkt hinaus vorzunehmen. Darin sind eine Erstnutzungsdauer des Fahrzeugs von fünf Jahren und ein verbleibender Restwert von 24,9 % berücksichtigt. Fahrzeugkomponenten, die nach der ersten Nutzungsperiode auszutauschen sind, werden vom Restwert abgezogen. Dies gilt weder für die Batteriepacks des (OC-)BEV, die 1,0 - 1,5 Mio. km halten, bevor sie einen kritischen Erhaltungsgrad erreichen (siehe Abschnitte 3.1.1. und 3.1.2.), noch für den Brennstoffzellen-Stack, der laut U.S. Department of Energy sowie Roland Berger während seiner Nutzungsdauer für eine Reichweite von 1,6 - 1,9 Mio. km bei einer durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit von 64 km/h reichen soll.<sup>81</sup>

Kühnel et al. kalkulierten einen Aufschlagfaktor von 40 % ein, um den Endkundenpreis nach Berücksichtigung der Herstellungs-, Montage- und Vertriebskosten sowie der Gewinnspanne des Herstellers zu ermitteln. Dieser Aufschlagfaktor wurde konsequent auf alle berücksichtigten Fahrzeugkomponenten angewendet. Der Gesamt-Netto-Endkundenpreis (d. h., ohne Kfz-Steuer, Umsatzsteuer, Versicherungs- und Finanzierungskosten) umfasst die Komponentenkosten für Karosserie und Innenausstattung, Reifen, konventionellen Antriebsstrang (Verbrennungsmotor, Abgasnachbehandlungsanlage und Dieseltank), elektrische Achse (Elektromotor mit einer Nennleistung von 350 kW, Wechselrichter und Getriebe), Brennstoffzellensystem (Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellen-Stack mit einer Nennleistung von 240 kW),

Wasserstoffspeicher (Verdichtung bei 700 bar), Batteriepacks inklusive Wärmeregelsystem, weitere Fahrzeugelektronik und den Stromabnehmer. Die Wartungs- und Reparaturkosten beziehen sich auf die Kosten für die allgemeine Fahrzeugwartung, die Harnstofflösung für die Abgasnachbehandlungsanlage und den Stromabnehmer während der ersten Nutzungsperiode.

Je höher die Skalierung der Produktion ist, desto niedriger sind die Kosten für eine bestimmte Fahrzeugkomponente. Sowohl bei Batteriepacks als auch bei Brennstoffzellensystemen und Wasserstoffspeichern geht man davon aus, dass bei schweren Nutzfahrzeugen eine ähnliche Technologie zum Einsatz kommen wird wie bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen. Daher ist anzunehmen, dass die hochgerechneten Komponentenpreise konvergieren (sofern dies nicht bereits geschehen ist), wodurch bei schweren Nutzfahrzeugen die notwendigen Skaleneffekte zum Tragen kommen.

Die geschätzten Fahrzeugkosten basieren auf einem hypothetischen Szenario, bei dem die Fertigungskapazitäten und Produktionslinien in Betrieb sind und die Fahrzeugkomponenten in großem Umfang in Serie gefertigt werden. Dies ist bei Fahrzeugkomponenten zu beachten, die derzeit weder für leichte noch für schwere Nutzfahrzeuge in größerem Umfang produziert werden, wie Brennstoffzellen und Wasserstoffspeicher.

Die Preise für Fahrzeugbatterien sind in den letzten Jahren drastisch gesunken und dürften weiter sinken. Die Endkundenpreise für Batteriepacks basieren auf der Prognose von BloombergNEF für 2020 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Dazu wird ein Aufschlag von 40 % hinzuaddiert, wie er für die oben genannten Fahrzeugkomponenten vorgenommen wurde, um etwaige zusätzliche Rohstoff-, Herstellungs- und Vertriebskosten sowie eine mögliche breitere Preisspanne in der Zukunft zu berücksichtigen. Die Preise für Batteriepacks haben 2020 einen volumengewichteten Branchendurchschnitt von 112 €/kWh erreicht und dürften wahrscheinlich weiter auf 47 €/kWh im Jahr 2030 sinken, vor allem aufgrund des rasanten Produktionszuwachses und großer Skaleneffekte durch das Segment der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge.<sup>82</sup> Die Schätzungen von BloombergNEF sind vergleichbar mit anderen hochgerechneten Kostenkurven für Batteriepacks.<sup>83</sup>

Es ist anzunehmen, dass die derzeit bestehende Kostenschere bei Batteriepacks für Pkw und für schwere Nutzfahrzeuge aufgrund des geringeren Produktionsumfang im Schwerlastsegment nur vorübergehend besteht und dass sich das Kostenniveau angleichen wird, sobald die Produktion von batterieelektrischen Lkw und Bussen in den kommenden Jahren hochgefahren wird. Solch eine Tendenz der Kostenangleichung ist bereits im chinesischen Nutzfahrzeugmarkt zu beobachten, wo schon in größerem Umfang produziert wird, hauptsächlich durch die Hebelwirkung des Elektrobusses: BloombergNEF schätzt, dass die volumengewichteten Durchschnittspreise für

Nutzfahrzeug-Batteriepacks in China 2020 bei nur 86 €/kWh liegen, während sie in allen anderen Weltregionen aufgrund der geringen Produktionsskalierung mit 329 €/kWh noch recht hoch waren.

Man kann daher realistischerweise annehmen, dass sich die Batteriepackpreise für das Segment der Pkw und leichten sowie schweren Nutzfahrzeuge bis 2023 und darüber hinaus angleichen werden. Nichtsdestotrotz werden Batterien für Fernverkehr-Lkw modifizierte und leistungsstärkere Batteriezellchemien erfordern um höhere Reichweiten und Energiedichten zu ermöglichen. Es ist davon auszugehen, dass dies zu höheren Rohstoffkosten führen wird. Der inkludierte Aufschlagsfaktor von 40% berücksichtigt etwaige dadurch resultierende Aufpreise.

Bei den Werten für die spezifische Energiedichte handelt es sich um niedrige Annahmen zum Potenzial kommender technologischer Verbesserungen auf der Grundlage der Angaben von Ricardo Energy & Environment.<sup>84</sup> Es wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um ein Szenario zu berücksichtigen, in dem die Kosten für Batteriepacks im Laufe des Jahrzehnts schneller sinken als derzeit von BloombergNEF prognostiziert (siehe Anhang). Das rasche Hochfahren von Produktionskapazitäten und jüngste Verlautbarungen von Unternehmen aus der Batterie-Wertschöpfungskette deuten darauf hin, dass sich die hier im Basisszenario verwendeten Annahmen doch als Obergrenze herausstellen könnten.<sup>85,86,87,88</sup>

	2020	2025	2030
Batteriepackkosten inkl. Aufschlag in €/kWh	248	101	66
Batteriepackkosten inkl. Aufschlag in €/kWh (Sensitivität)	248	96	46
Spezifische Energiedichte auf Zellenebene in Wh/kg	235	314	408
Spezifische Energiedichte auf Packebene in Wh/kg	183	245	318

In Bezug auf Brennstoffzellensysteme und Wasserstoffspeicher wird auf Basis des U.S. Department of Energy, Moultak et al., Roland Berger sowie Hill et al. von einem jährlichen Produktionsvolumen von 10 000 Einheiten pro Hersteller im Jahr 2030 ausgegangen.<sup>89</sup> Der für alle anderen Fahrzeugkomponenten verwendete Aufschlagsfaktor findet darin ebenfalls Berücksichtigung.

Basierend auf einer höheren jährlichen Brennstoffzellenproduktion von 50 000 Einheiten pro Hersteller im Jahr 2030 wurde eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen (siehe Anhang). Dies entspricht einem verhältnismäßig rasanten MarkthochlaufszENARIO in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre.

	2020	2025	2030
Brennstoffzellen-Systemkosten inkl. Aufschlag in €/kW	811	309	155
Brennstoffzellen-Systemkosten inkl. Aufschlag in €/kW (Sensitivität)	811	309	99
Wasserstofftank-Systemkosten inkl. Aufschlag in €/kWh	41	24	22
Wasserstofftank-Systemkosten inkl. Aufschlag in €/kWh (Sensitivität)	41	14	11

Hierbei ist zu beachten, dass die europäischen Hersteller erst ab der zweiten Hälfte der 2020er Jahre mit der Serienproduktion von Brennstoffzellen-Elektro-Lkw beginnen wollen.<sup>90,91,92,93</sup> Die Wasserstoffindustrie hat angekündigt, dass insgesamt bis 2025 10 000 und bis 2030 100 000 Wasserstoff-Lkw in Europa auf die Straße gebracht werden sollen.<sup>94</sup> Diese Produktionsziele wären für sich genommen nicht ausreichend, um das oben angenommene Kostenniveau für die Sensitivitätsanalyse zu erreichen. Es ist fraglich, ob ein einzelner Lkw-Hersteller in der Lage wäre, in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts ein jährliches Produktionsniveau von 50 000 Einheiten zu erreichen, wenn man bedenkt, dass 2019 insgesamt 274 000 schwere Nutzfahrzeuge über 16 Tonnen zGG (ohne Omnibusse und Reisebusse) in der EU und der EFTA neu zugelassen wurden.<sup>95</sup>

Unter Berücksichtigung, dass voraussichtlich nur ein Teil der Lkw über 16 Tonnen mit Wasserstoff betrieben werden und dass aufgrund des zunehmenden Güterverkehrs mit einem Anstieg der Neuzulassungen zu rechnen ist, dürfte keiner der europäischen Lkw-Hersteller allein in der Lage sein, einen Produktionsumfang von 50 000 Einheiten pro Jahr nur für den europäischen Markt zu realisieren.<sup>96,xv</sup>

<sup>xv</sup> Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist Hochlauf des Produktionsvolumens bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen zur Erzielung der notwendigen Skaleneffekte nicht mehr absehbar. Die Lkw-Hersteller könnten zur Kostensenkung durch Auslastung ihrer Produktionslinien und durch Bedienung mehrerer regionaler Märkte gleichzeitig Partnerschaften eingehen und versuchen, andere Märkte wie die Seeschifffahrt oder stationäre Back-up-Anwendungen zu bedienen, in denen Brennstoffzellen voraussichtlich eine wichtige Rolle spielen werden.

Zeitverluste aufgrund von Ausfallzeiten werden nicht berücksichtigt, da BEV gemäß den EU-Lenk- und Ruhezeiten ohne Nutzungsbeeinträchtigung geladen werden. Im Netto-Verkaufspreis eines BEV ist ein Nutzlastabzug aufgrund des zusätzlichen Fahrzeuggewichts und des daraus resultierenden Nutzlastverlusts bis in die zweite Hälfte der 2020er Jahre berücksichtigt. Da manche Fahrten nur teilweise beladen oder sogar leer durchgeführt werden, wird davon ausgegangen, dass in Übereinstimmung mit Hall et al. 50 % der Fahrzeugflotte durch Gewichtsbegrenzungen eingeschränkt wären. Zum Vergleich: Hill et al. schätzen, dass nur 10 % bis 19,5 % der von Fernverkehrs-Lkw über 32 Tonnen zGG zurückgelegten Kilometer Gewichtsbegrenzungen unterliegen, während die durchschnittliche Nutzlastauslastung mit rund 56 % veranschlagt wurde.<sup>97</sup> Dies deckt sich mit Daten des Britischen Verkehrsministeriums, das von einer durchschnittlichen Nutzlastauslastung von 63 % bei Fernverkehrs-Lkw ausgeht.<sup>98</sup>

### 5.1.2. Energiekosten

Der PtG/PtL-Rechner von Agora Verkehrswende et al. wurde verwendet, um die Gestehungskosten von Strom aus erneuerbaren Quellen (LCOE) und die Kosten der daraus hergestellten strombasierten Kraftstoffe zu berechnen.<sup>99</sup> An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass alle Technologiemodelle direkt oder indirekt auf Strom aus erneuerbaren Quellen basieren. Das schließt explizit die Energieversorgung des (OC)-BEV mit ein.<sup>xvi</sup>

Die Versorgung aller Fahrzeugtechnologien mit erneuerbaren Energien ist eine bewusste Entscheidung, um einen fairen Vergleich zwischen den Fahrzeugtechnologien zu ermöglichen, die Well-to-Wheel ohne THG-Emissionen betrieben werden können (wenn auch nicht über den gesamten Lebenszyklus). Mit anderen Worten wurden die Emissionen, die beim Bau und Rückbau von Anlagen zur Strom- und Kraftstoffherzeugung entstehen, hier nicht berücksichtigt.<sup>100</sup> Ebenso werden mögliche zeitliche oder räumliche Einschränkungen beim Hochlauf der Produktionsanlagen außer Acht gelassen. Die detaillierten Energiekosten sind im Anhang enthalten.

Bei den Stromerzeugungs- und Kraftstoffproduktionsanlagen handelt es sich um Offshore-Windkraftanlagen in der Nordsee mit Anschluss an das deutsche Stromnetz und um inländische Kraftstoffproduktionsanlagen in der Nähe der deutschen Küste. Es wurde eine Sensitivitätsanalyse der Photovoltaikanlagen in Nordafrika für strombasierte Kraftstoffe durchgeführt, denn die MENA-Region

---

<sup>xvi</sup> In der Praxis werden Güterkraftverkehrsunternehmen und Ladeinfrastrukturbetreiber entweder Netzstrom zum Laden der Fahrzeuge nutzen oder eine Stromkaufvereinbarung mit Direktabnahme (PPA) abschließen, mit der sie sich verpflichten, Öko-Strom direkt von einem Energieversorgungsunternehmen zu beziehen (oder beides gleichzeitig).

bietet besonders vorteilhafte Standortbedingungen für die kostengünstige Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff und E-Fuels aufgrund der niedrigeren Kosten für Öko-Strom.

Die Kostenberechnungen basieren auf dem Referenzszenario des PtG/PtL-Rechners von Agora.<sup>101</sup> Die gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten (WACC) wurden auf 6 % festgelegt und für die Abscheidung von CO<sub>2</sub> wurde die direkte Gewinnung aus der Umgebung gewählt. Bei den Offshore-Windkraftanlagen in der Nordsee wurde eine Auslastung von 4 000 Volllaststunden pro Jahr angesetzt; auch die Niedertemperatur-Elektrolyse sowie die FT-Synthese und die Methanisierung erfolgen mit 4 000 Volllaststunden. Bei der Sensitivitätsanalyse wurde die Photovoltaik in Nordafrika sowie die Niedertemperatur-Elektrolyse mit 2 344 Volllaststunden angesetzt, während sowohl die FT-Synthese als auch die Methanisierung mit 4 000 Volllaststunden angesetzt wurden und somit auf eine temporäre stationäre Wasserstoffspeicherung angewiesen sind.

Netzanschlussgebühren sind in den Stromgestehungskosten für die direkte Elektrifizierung enthalten. Darüber hinaus sind darin Stromnetzanschlussstarife und Netzentgelte enthalten, die als Äquivalent zu den Transport- und Verteilungskosten von strombasierten Kraftstoffen zu verstehen sind. Die berücksichtigten Stromnetztarife und Netzentgelte für gewerbliche Abnehmer (Nicht-Haushalte) mit einem Jahresverbrauch zwischen 500 und 2 000 MWh basieren auf den Angaben von Destatis.<sup>102</sup>

Die Kosten für im Ausland produzierte strombasierte Kraftstoffe umfassen die Kosten für Verflüssigung (sofern erforderlich), den anschließenden Transport per Tankschiff von Nordafrika (Port Said) nach Deutschland (Wilhelmshaven) und der inländischen Verteilung zur Tankstelle mit für den Transport tiefkalter verflüssigter Gase geeigneten Tankfahrzeugen (erneuerbarer Wasserstoff) oder konventionellen Tankfahrzeugen (synthetischer E-Diesel und E-Methan). Andere Wasserstoffträger wie Ammoniak oder flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) werden hier nicht weiter in Betracht gezogen, da sie unter Berücksichtigung der Rückumwandlung wahrscheinlich mindestens so teuer wie Flüssigwasserstoff wären.<sup>103</sup> Basierend auf den Plänen der europäischen Gasindustrie ist davon auszugehen, dass ein durchgängiges Wasserstoff-Rohrfernleitungsnetz nicht vor den 2040er Jahren entstehen wird.<sup>104</sup> Wenn der erneuerbare Wasserstoff in Europa produziert werden soll, wird daher erwartet, dass die dezentrale Produktion vor Ort an der Tankstelle in Kombination mit einer Stromkaufvereinbarung (PPA) im Jahr 2030 aufgrund der fehlenden Transport- und Verteilungskosten vermutlich den günstigsten Produktionsweg darstellen wird (siehe Abbildung 13).

Die Kosten für die Kraftstoffaufbereitung (Verdichtung oder Verflüssigung), den Transport und die Verteilung basieren auf den Angaben des U.S. Department of Energy, Hydrogen Council, Runge et al., Pfennig et al., Mottschall et al., Agora Verkehrswende et al., Fasihi et al. und Bünger et al. (siehe Anhang).<sup>105,106,107,108,109,110,111</sup> Für das Referenzfahrzeug mit fossilem Diesel wurde der 10-Jahres-

Durchschnitt der Großhandelskosten für Diesel zwischen 2010 und 2020 von 52,98 €/l in Deutschland (ohne Energiesteuer und Umsatzsteuer) berücksichtigt, der im zeitlichen Verlauf konstant gehalten wird.<sup>112</sup>

### **5.1.3. Infrastrukturkosten**

Die geschätzten Infrastrukturkosten basieren auf den Angaben von Kühnel et al. und berücksichtigen Kapazität und Leistung von Tankstellen und Ladestationen, die Auslastung, die Nutzungsdauer, die Investitionskosten, die Betriebskosten und die Anzahl der versorgten Fahrzeuge pro Tankstelle bzw. Ladestation. Für die OC-BEV wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um ein Szenario mit einem geringeren Auslastungsgrad der Oberleitungsinfrastruktur berücksichtigen zu können. Ein niedrigerer Auslastungsgrad hätte erhebliche Auswirkungen auf die System- und Nutzerkosten (siehe Anhang).

Hierbei ist zu beachten, dass die Schätzungen der Tank- und Ladekosten bis zu einem gewissen Grad spekulativ sind, da die Technologien noch nicht vollständig kommerzialisiert, geschweige denn auf dem Markt eingeführt sind. Die Kosten sowohl für die Ladestationen als auch für die Tankstellen folgen bis 2030 ähnlichen Kostensenkungskurven und werden danach konstant gehalten. Es wird angenommen, dass die Kosten für LNG-Tankstellen nicht weiter sinken, da die Technologie bereits kommerzialisiert und weit verbreitet ist. Die detaillierten Kosten sind im Anhang aufgeführt.

ICEV\_PtL können die bereits etablierte Betankungsinfrastruktur nutzen. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Kapitalkosten dieser Tankstellen abgeschrieben werden, die Betriebskosten unbedeutend sind und die Infrastruktur nach dem Ablauf ihrer Nutzungsdauer nicht ersetzt werden muss.

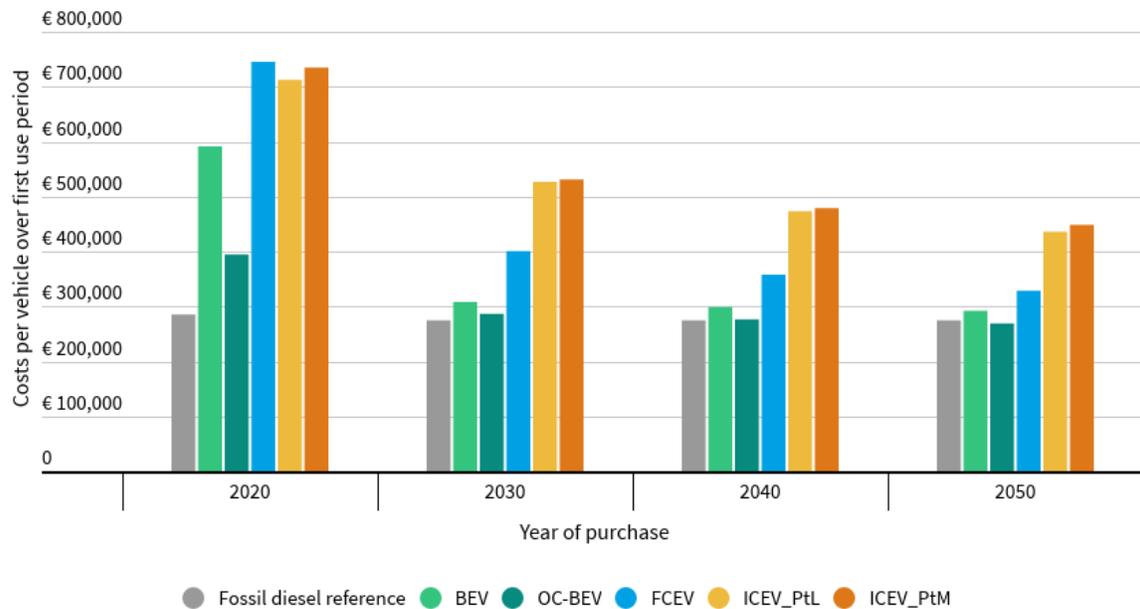
### **5.1.4. Ergebnisse**

In den Systemkosten der Fahrzeuge in Abbildung 9 - 12 ist zu Vergleichszwecken auch ein fossiler Referenz-Diesel-Lkw aufgeführt. Wie bereits erwähnt, veranschaulicht der Systemkostenansatz die tatsächlichen, technisch-wirtschaftlichen Kosten der verschiedenen Technologiemodelle und sollte nicht mit den TCO verwechselt werden, deren zusätzliche Kostenkomponenten in Form von Steuern, Abgaben, Gebühren und Fördermitteln im nachfolgenden Abschnitt behandelt werden.

Dabei ist zu beachten, dass die Technologiekosten aufgrund von Fahrzeugen und Infrastruktur nach 2030 und bis 2050 unverändert beibehalten werden, da keine realistischen Annahmen für die Zeit danach möglich sind. Dies impliziert, dass Kostenrückgänge ab 2030 ausschließlich auf die sinkenden Kosten für erneuerbaren Strom und strombasierte Kraftstoffe zurückzuführen sind. Tatsächlich sind höchstwahrscheinlich weitere inkrementelle Kostensenkungen, insbesondere bei den Hauptfahrzeugkomponenten wie Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstoffspeichern, zu erwarten, je

nachdem, wie sich der Produktionsumfang im Laufe der Zeit entwickelt und wie viele Marktsegmente mit den verschiedenen Fahrzeugtechnologien in Zukunft bedient werden.

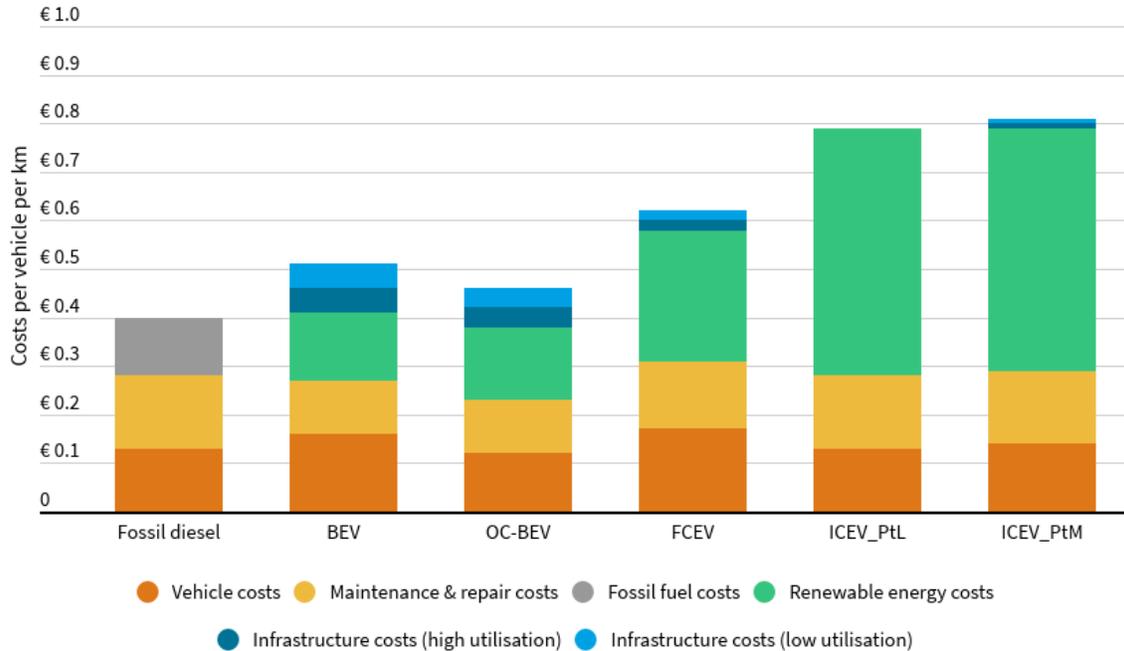
## Lifetime system costs of long-haul trucks in Germany Electricity-based fuel production in Europe



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight before 2030.

Abbildung 9: Systemkosten - Basisszenario mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Europa

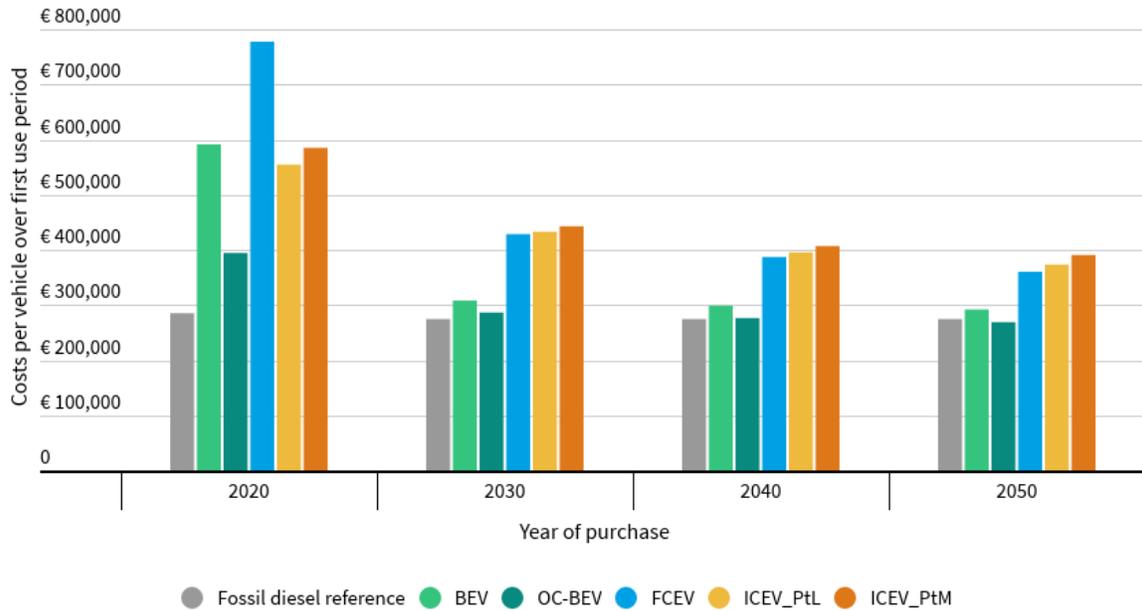
## System costs per km of long-haul trucks in Germany in 2030 Electricity-based fuel production in Europe



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs.

Abbildung 10: Systemkosten pro Kilometer im Jahr 2030 - Basisszenario mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Europa

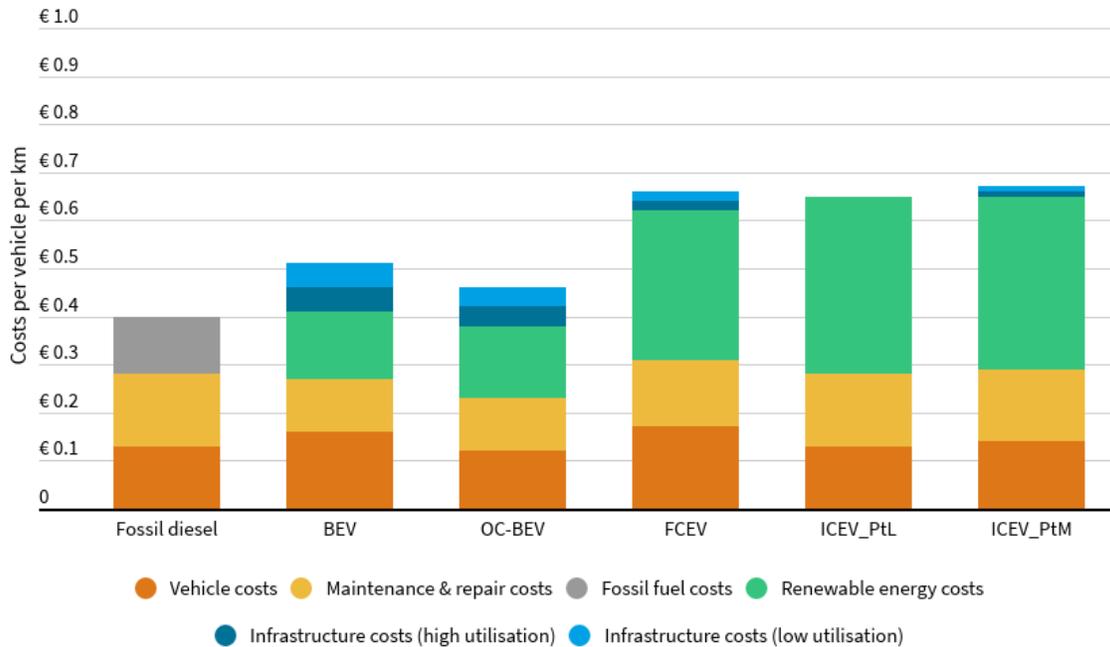
## Lifetime system costs of long-haul trucks in Germany Electricity-based fuel production in North Africa



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight before 2030.

Abbildung 11: Systemkosten - Sensitivitätsanalyse mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Nordafrika

## System costs per km of long-haul trucks in Germany in 2030 Electricity-based fuel production in North Africa



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs.

Abbildung 12: Systemkosten pro Kilometer im Jahr 2030 - Sensitivitätsanalyse mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Nordafrika

Die Ergebnisse zeigen, dass der BEV und OC-BEV höchstwahrscheinlich die kosteneffektivste Option unter allen Technologiemodellen darstellen, die Null Well-to-Wheel-Emissionen erreichen können, wenn man Steuern, Abgaben, Umlagen und Subventionen außer Acht lässt. BEV und OC-BEV wären wahrscheinlich auch preiswerter als mit erneuerbarem Wasserstoff betriebene FCEV und als mit E-Fuels betriebene ICEV, wenn diese strombasierten Kraftstoffe im Ausland produziert und nach Deutschland importiert werden würden. Im Fall von Wasserstoffimporten aus Übersee zeigt sich, dass zusätzliche

Umwandlungs-, Transport- und Verteilungskosten die niedrigeren Produktionskosten mehr als ausgleichen. Wasserstoffimporte sind laut den hier vorgenommenen Berechnungen nur dann günstiger im Vergleich zur Produktion vor Ort an der Wasserstofftankstelle unter Berücksichtigung aller Steuern und Abgaben auf Strom (siehe Abbildung 13).

## **5.2. Gesamtbetriebskosten**

Die Gesamtbetriebskosten (TCO) umfassen die Systemkosten und zusätzlich alle bei Anschaffung, Betrieb und Betankung des Fahrzeugs fälligen Steuern und Abgaben sowie Mautgebühren und Fördermittel. In diesem Sinne entsprechen die TCO den dem Betreiber entstehenden Gesamtkosten für den Besitz und den Betrieb des Fahrzeugs auf der Grundlage der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Steuerstruktur.

### **5.2.1. Steuern und Abgaben**

Wie oben erläutert, sind in den Systemkosten bereits die Netzanschlussgebühren für die Anlagen zur Erzeugung von erneuerbarem Strom sowie die Kosten für die Transport- und Verteilungsinfrastruktur (d. h. Netzentgelte) sowohl für erneuerbaren Strom als auch für strombasierte Kraftstoffe enthalten. Darüber hinaus sind im TCO alle Steuern und Abgaben (ohne Umsatzsteuer) für die Anschaffung, den Betrieb und die Beladung bzw. Betankung des Fahrzeugs enthalten. Die Besteuerung von strombasierten Kraftstoffstoffen erfolgt nach der aktuellen Gesetzeslage in Deutschland.

Die Kraftfahrzeugsteuer beinhaltet die einmalige Zulassungssteuer in Höhe von 26,30 € und die jährliche Kraftfahrzeugsteuer in Höhe von 556 € pro Jahr.<sup>113,114</sup>

Der Preis für erneuerbaren Strom setzt sich neben den bereits in den Systemkosten enthaltenen Netzumlagen und -entgelten für Nicht-Haushalte auch aus der EEG-Umlage sowie weiteren Abgaben und Umlagen und der Stromsteuer zusammen.<sup>115</sup> Wie oben erwähnt, wurde ein jährlicher Strombedarf zwischen 500 und 2 000 MWh pro Endverbraucher zugrunde gelegt. Dies entspricht in etwa dem jährlichen Stromverbrauch einer Fernverkehrs-Lkw-Flotte mit 2-10 Fahrzeugen. Zum Vergleich: 65 % aller Güterkraftverkehrsunternehmen in Deutschland betreiben eine Lkw-Flotte mit 2 oder mehr Fahrzeugen.<sup>116</sup> Daraus ergibt sich ein Endpreis für erneuerbaren Strom für Nicht-Haushalte von 26,07 €/kWh im Jahr 2020, der etwas höher ist als der entsprechende Netzstrompreis für Nicht-Haushalte von 19,89 €/kWh für die gleiche Jahresverbrauchsklasse.<sup>117</sup>

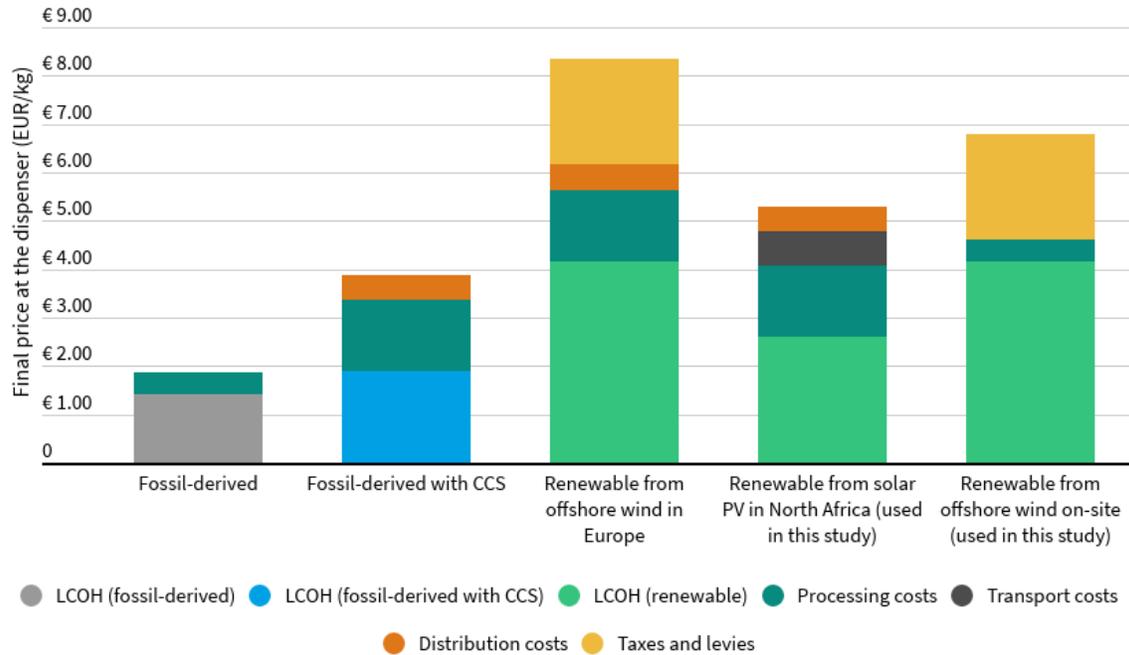
Wasserstoff, der als Kraftstoff im Straßenverkehr verwendet wird, ist in Deutschland derzeit von der Energiesteuer befreit und bleibt dies vorerst auch. Der von Elektrolyseuren genutzte erneuerbare Strom ist zudem von den Netzentgelten und der EEG-Umlage befreit.<sup>118,119</sup> Nach Berücksichtigung von Aufbereitung (d. h., Verdichtung oder Verflüssigung), Transport- und Verteilungskosten sowie anwendbaren

Steuern und Abgaben auf den eingespeisten Strom liegt der Endpreis für erneuerbaren Wasserstoff an der Zapfsäule zwischen 5,30 und 6,79 €/kg im Jahr 2030. Dem steht 2020 ein geschätzter Endpreis für Wasserstoff aus fossilen Energieträgern an der Zapfsäule von 1,86 €/kg ohne Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) und 3,90 €/kg mit CCS gegenüber.<sup>120,xvii</sup> Die detaillierten Kostenkomponenten der verschiedenen Produktionsmodelle sind in Abbildung 13 dargestellt und lassen sich gut mit verschiedenen Kostenszenarien in der Literatur vergleichen.<sup>121,122,123,124,125,126</sup>

---

<sup>xvii</sup> Die von der IEA angegebenen Produktionskosten für Wasserstoff aus fossilem Erdgas entsprechen dem europäischen Durchschnitt. Dabei wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff aus Erdgas an einem zentralen Standort in den Niederlanden auf basis von SMR produziert wird, mit anschließender CO<sub>2</sub>-Speicherung in erschöpften Offshore-Gasfeldern entlang des niederländischen Festlandssockels. Die Endverbraucherpreise enthalten daher zusätzliche Kosten für Verflüssigung und Verteilung nach Deutschland.

## Final price of different hydrogen production pathways at the dispenser in 2030



**Notes:** Fossil-derived hydrogen production from natural gas steam-methane reforming decentralised on-site. Fossil-derived hydrogen production with CCS centralised in the Netherlands with undersea storage in depleted North Sea gas fields. Processing costs are due conversion via compression or liquefaction. Transport costs refer to shipping from North Africa to Germany via cryogenic tanker vessel. Distribution costs refer to delivery via cryogenic tanker truck. In Germany, renewable hydrogen production is exempt from the renewables levy ('EEG-Umlage') and network tariffs ('Netzentgelte'); all other taxes and levies on electricity input apply. Hydrogen as a transport fuel is exempt from fuel duty.

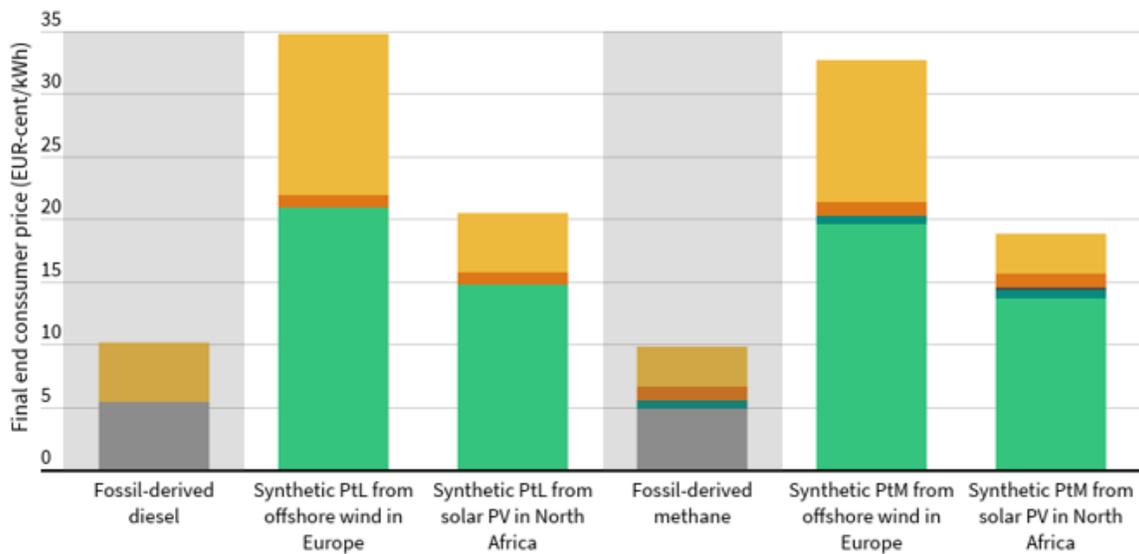
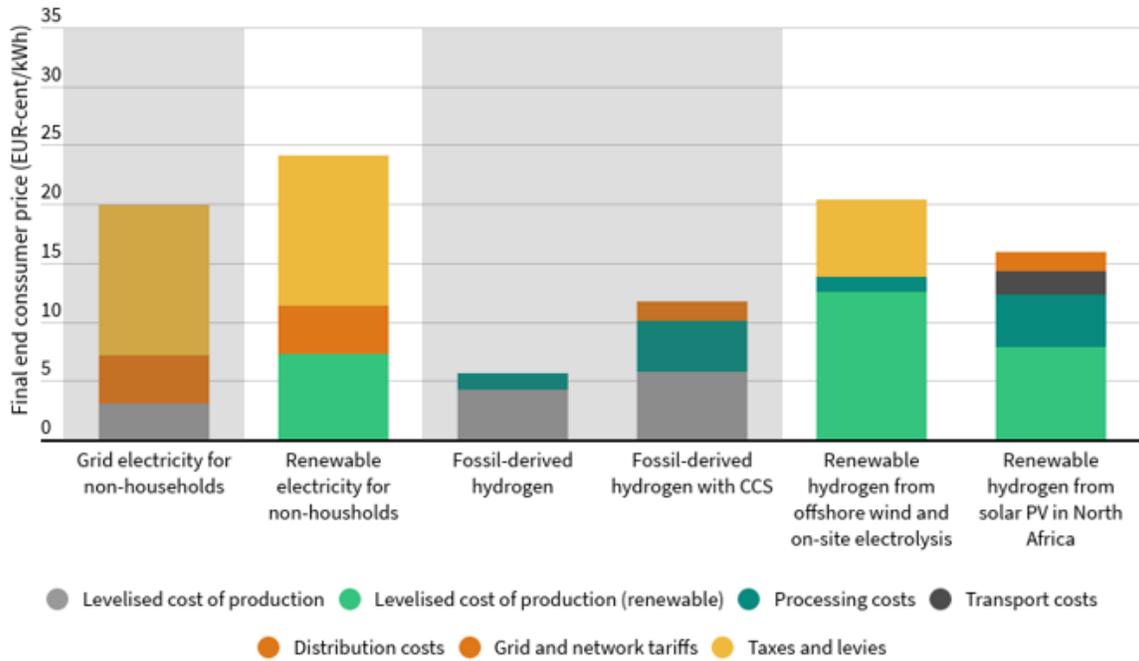
Abbildung 13: Vergleich verschiedener Endverbraucherpreise für Wasserstoff im Jahr 2030

Sowohl beim Fahrzeug mit fossilem Diesel als auch beim Power-to-Liquid-Modell wird die Energiesteuer auf Dieselkraftstoff in Höhe von 47,04 €/l berücksichtigt und im zeitlichen Verlauf ohne Inflationsausgleich unverändert beibehalten.<sup>127</sup> Dabei ist davon auszugehen, dass Güterverkehrsunternehmen einen Ausgleich für die zusätzlichen Kraftstoffkosten erhalten, die seit 2021 über das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) erhoben werden. Ein solches

Rückerstattungssystem wird wahrscheinlich als Bestandteil einer überarbeiteten Lkw-Maut eingeführt werden, sobald die Infrastrukturabgabe auf Basis von CO<sub>2</sub> differenziert wird und CO<sub>2</sub>-Emissionen als externe Kosten aufgeschlagen werden. Der Preis von 25 €/t CO<sub>2</sub> im Jahr 2021, der bis 2025 auf 55 €/t CO<sub>2</sub> ansteigen soll, wird daher nicht weiter berücksichtigt.

Bei Power-to-Methane ist der derzeit reduzierte Steuersatz für Erdgas als Kraftstoff von 13,90 €/MWh enthalten, der bis 2025 auf 22,85 €/MWh ansteigen und schließlich bis 2027 den regulären Satz von 30,80 €/MWh erreichen wird.<sup>128</sup>

## Final electricity and electricity-based fuel prices in 2030



### 5.2.2. Mautgebühren

In Deutschland gibt es ein entfernungsabhängiges Straßennutzungsgebührensysteem, das derzeit eine Infrastrukturabgabe auf der Grundlage des Fahrzeuggewichts und der Anzahl der Achsen sowie die verursachten Luftverschmutzungskosten und Lärmbelastungskosten umfasst.<sup>129</sup> Emissionsfreie Fahrzeuge sind derzeit von allen Mautteilsätzen komplett befreit.

Die Novelle der Eurovignetten-Richtlinie, die die Regeln und Verfahren festlegt, die die Mitgliedstaaten bei der Erhebung von Gebühren für die Infrastrukturnutzung durch Lkw einhalten müssen, wird derzeit in interinstitutionellen Verhandlungen („Trilogie“) verhandelt. Nach der allgemeinen Ausrichtung des Rates müssen die Mitgliedstaaten ab 2023 die Infrastrukturabgabe für Lkw auf der Grundlage ihrer Emissionsleistung differenzieren. Zu diesem Zweck werden ICEV und Z(L)EV in fünf CO<sub>2</sub>-Emissionsklassen eingeteilt, basierend auf ihrer Leistung im Vergleich zur in den CO<sub>2</sub>-Normen für neue Lkw festgelegten, linearen Entwicklung der Emissionsminderung.<sup>130</sup> Mitgliedstaaten wird es außerdem erlaubt sein, eine volle Befreiung von der Infrastrukturabgabe für ZEV bis Ende 2025 einzuführen oder beizubehalten. Danach muss die Reduktion 50 - 75 % gegenüber weniger verbrauchsarmen ICE-Lkw der Emissionsklasse 1 betragen. Die Mitgliedstaaten werden auch die Möglichkeit haben, eine CO<sub>2</sub>-basierte Gebühr für externe Kosten als Alternative zur Änderung der Infrastrukturabgabe anzuwenden sowie beide Instrumente miteinander zu kombinieren.<sup>131</sup>

Nach derzeitigem Stand will Deutschland ab 2023 eine CO<sub>2</sub>-Spreizung der Infrastrukturabgabe in Kombination mit einem wirksamen Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen einführen.<sup>132</sup> Für emissionsfreie Fahrzeuge wird hier daher angenommen, dass Deutschland die derzeitige vollständige Befreiung von der Infrastrukturabgabe bis 2025 beibehält, danach muss sie im Vergleich zu ICEV der Emissionsklasse 1 auf 75 % reduziert werden. Bei konventionellen Diesel-Lkw wird eine Verbesserung der Kraftstoffeffizienz von ca. 21 % zwischen 2019/20 und 2030 erwartet (siehe Abschnitt 3.3.), weshalb sie der Emissionsklasse 1 zugeordnet sind. Angesichts der erwarteten Emissionen von bivalenten Erdgas-Lkw mit selbstzündendem HPDI-Motor werden ICEV\_PtM hier der Emissionsklasse 3 zugeordnet. Die aktuellen Infrastruktur- und externen Kostensätze werden im zeitlichen Verlauf unverändert beibehalten.

Die daraus resultierenden Gebühren im mautpflichtigen Netz für die verschiedenen Fahrzeuge sind im Anhang aufgeführt. In Anlehnung an Kühnel et al. wurde davon ausgegangen, dass Fernverkehrs-Sattelzüge 90 % ihrer Gesamtfahrleistung auf dem mautpflichtigen Straßennetz, das Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland umfasst, zurücklegen.

### **5.2.3. Kaufprämie**

In Deutschland können Güterverkehrsunternehmen Zuschüsse von bis zu 40.000 € pro emissionsfreiem Lkw erhalten, wobei maximal 40 % der zusätzlichen Fahrzeug-Investitionskosten übernommen werden und der Höchstbetrag, den ein einzelnes Unternehmen erhalten kann, auf 500.000 € begrenzt ist.<sup>133</sup> Gas-Lkw sind seit Januar 2021 von der Förderung ausgeschlossen.<sup>134,xviii</sup> Es wird davon ausgegangen, dass die Kaufprämie zum Jahr 2026 ausläuft.

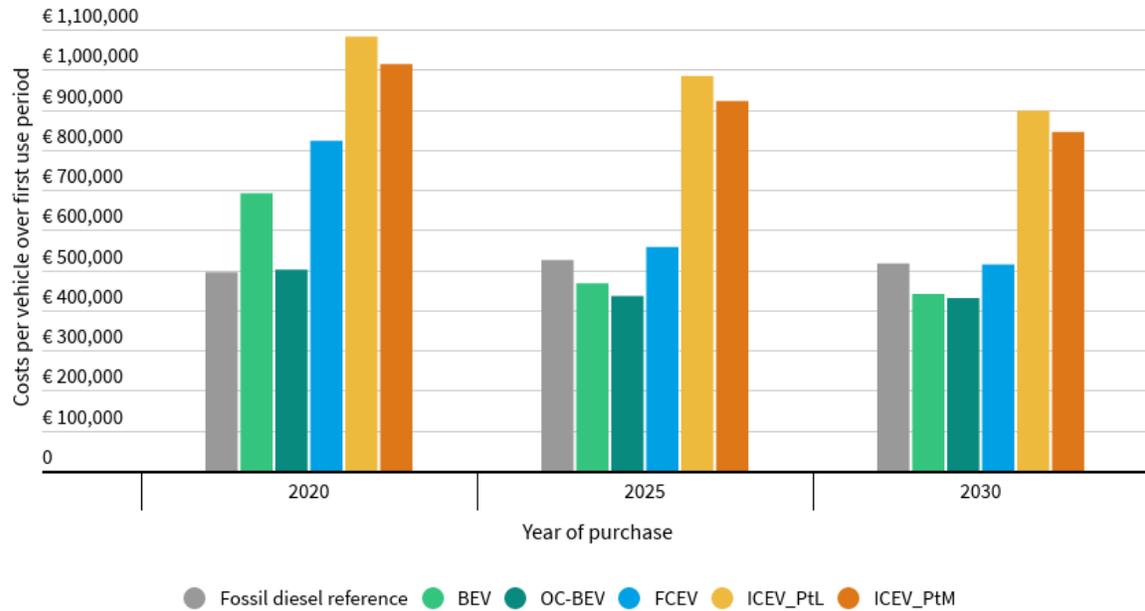
### **5.2.4. Ergebnisse**

Die Ergebnisse für die erste Fahrzeug-Nutzungsperiode einschließlich aller Steuern, Abgaben, Gebühren und Fördermittel gemäß der derzeit geltenden Gesetzgebung sind nachfolgend in den Abbildungen 15 - 18 dargestellt. Dort wird außerdem zu Vergleichszwecken ein mit fossilem Diesel betriebenes Fahrzeug aufgeführt.

---

<sup>xviii</sup> Ein neues Programm mit überarbeiteten Fördersätzen soll Anfang 2021 verabschiedet werden.

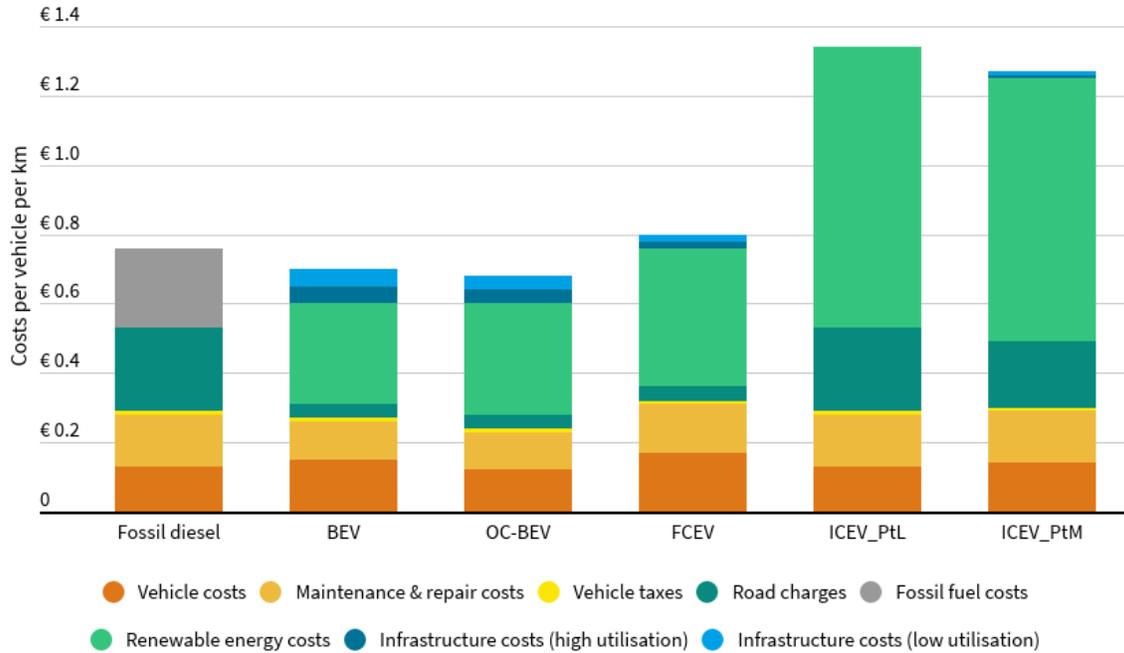
## TCO of long-haul trucks in Germany Electricity-based fuel production in Europe



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

Abbildung 15: TCO - Basisszenario mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Europa

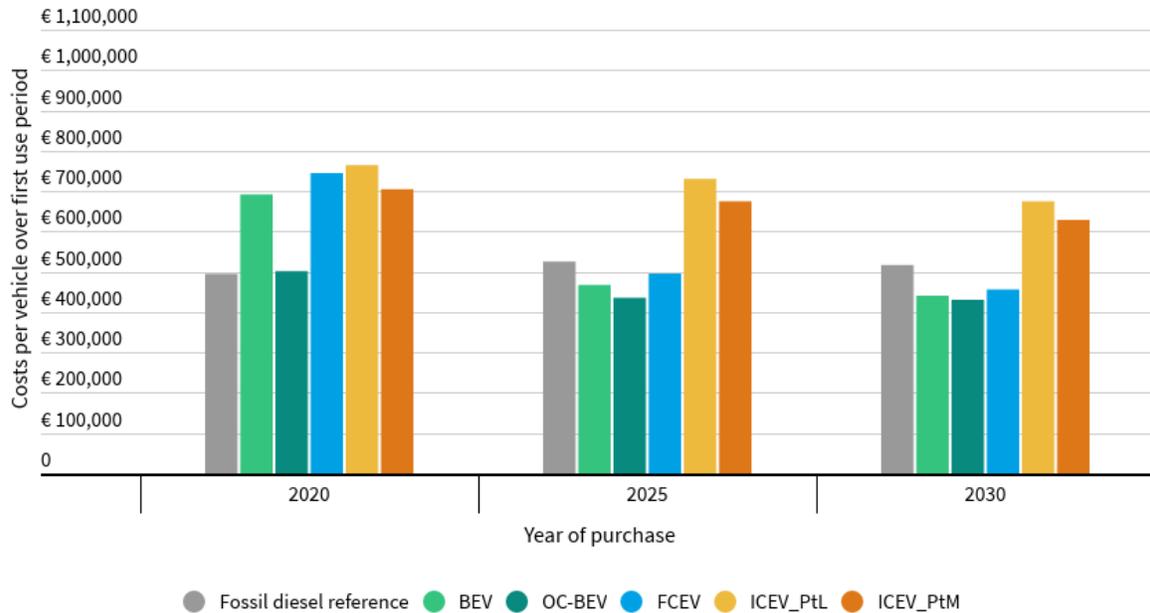
## TCO per km of long-haul trucks in Germany in 2030 Electricity-based fuel production in Europe



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision.

Abbildung 16: TCO pro Kilometer im Jahr 2030 - Basisszenario mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Europa

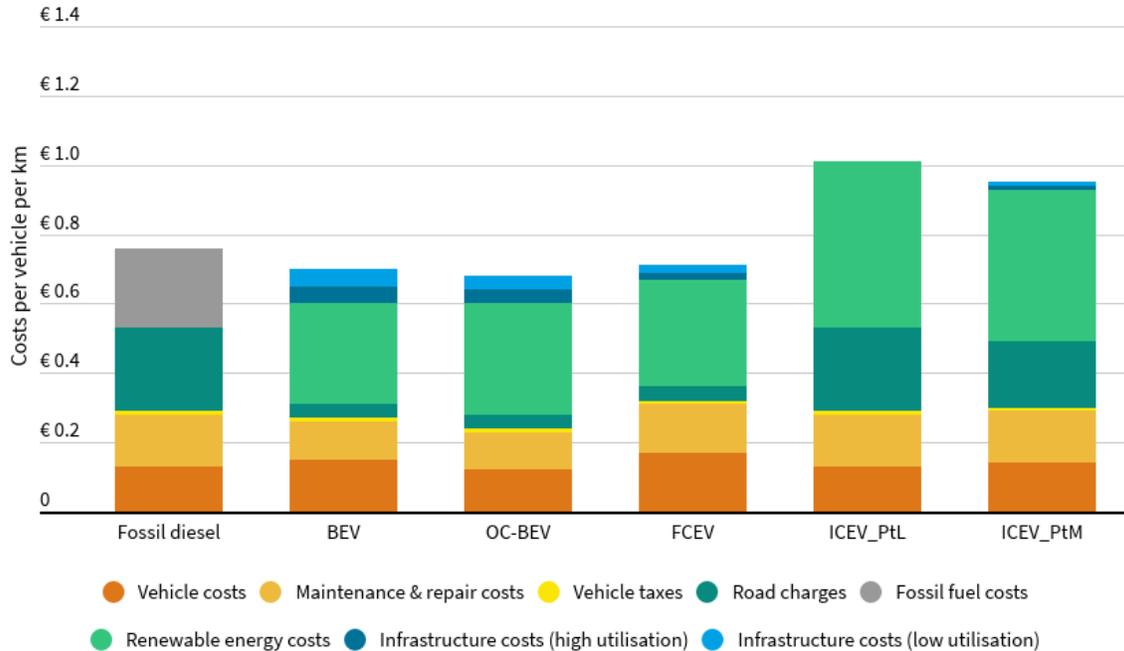
## TCO of long-haul trucks in Germany Electricity-based fuel production in North Africa



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

Abbildung 17: TCO - Sensitivitätsanalyse mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Nordafrika

## TCO per km of long-haul trucks in Germany in 2030 Electricity-based fuel production in North Africa



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision.

Abbildung 18: TCO pro Kilometer im Jahr 2030 - Sensitivitätsanalyse mit strombasierter Kraftstoffherzeugung in Nordafrika

## 6. Diskussion und Ausblick

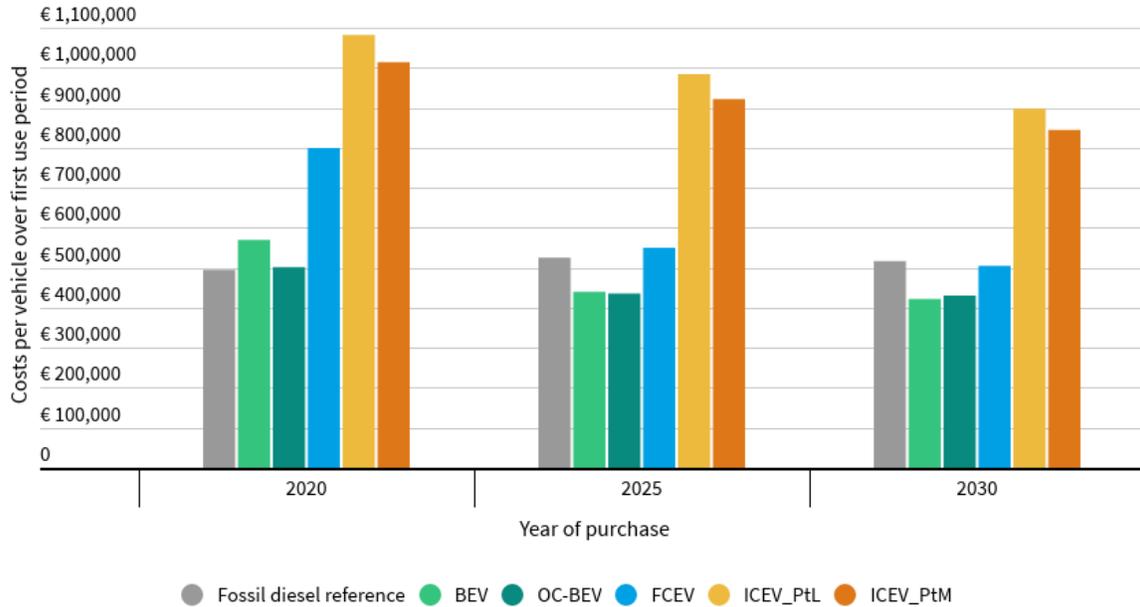
Auch unter Berücksichtigung aller Steuern, Abgaben, Mautgebühren und aktuellen Förderungen dürften Fernverkehrs-BEV und -OC-BEV in den meisten Szenarien wohl die kostengünstigste Option bilden. Mit der aktuellen Kaufprämie und einem überarbeiteten System der Straßennutzungsgebühren könnten Fernverkehrs-OC-BEV die Kostenparität bei den Gesamtbetriebskosten (TCO) mit fossilen

Diesel-Lkw vor Mitte der 2020er Jahre, BEV gegen Mitte der 2020er Jahre und FCEV um das Jahr 2030 erreichen. Fernverkehrs-BEV und OC-BEV dürften kostentechnisch auch dann den mit strombasierten Kraftstoffen betriebenen FCEV und ICEV überlegen sein, wenn diese Kraftstoffe in Nordafrika unter idealen Bedingungen produziert und nach Deutschland importiert werden würden.

Der Straßengüterverkehr ist ein gewinnorientiertes Geschäft mit niedrigen Gewinnmargen, und die Güterverkehrsunternehmen werden sich für die kostengünstigste Fahrzeugtechnologie entscheiden, vorausgesetzt, sie bietet ausreichend betriebliche Flexibilität und kann ein dichtes und zuverlässiges Infrastrukturnetz nutzen. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass Güterkraftverkehrsunternehmen bereit wären, einen zusätzlichen Aufpreis für Technologien zu zahlen, die eine deutlich höhere Fahrzeugreichweite bieten, wenn ihr reales Einsatzprofil dies nicht erfordert. Vielmehr ist zu erwarten, dass sich Spediteure für eine kürzere Fahrzeugreichweite entscheiden werden, wenn diese ihren Anforderungen an Route und Flexibilität entspricht, um Kosten zu senken.

Dazu lohnt es sich, die TCO von Fernverkehr-Lkw mit 500 km Reichweite zu betrachten, mit denen immer noch rund 60 % des Straßengüterverkehrs in Deutschland abgedeckt werden könnten, ohne sie zwischendurch aufzuladen oder zu betanken. Dabei macht sich der Kostenvorteil von BEV durch die kleinere Batterie noch deutlicher bemerkbar (siehe Abbildung 19). Die Serienproduktion von Fernverkehr-Lkw mit 500 km Reichweite ist für die erste Hälfte der 2020er Jahre angekündigt.

## TCO of line-haul trucks in Germany Electricity-based fuel production in Europe



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 500 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

Abbildung 19: TCO - Basisszenario für Fernverkehr-Lkw mit 500 km Reichweite

Fernverkehrs-BEV mit einer Reichweite von 800 km können bei Betrieb mit einem Fahrer aufgrund der EU-Lenk- und Ruhezeiten maximal 720 km pro Tag absolvieren, und zwar einschließlich einer 10%igen Sicherheitsmarge für das Erreichen der nächsten Ladestation. Durch das Aufladen dieser Lkw während der Ruhezeiten des Fahrers wird die Reichweite auf bis zu 1 200 km erhöht werden können, was nahezu 90 % der in Tonnenkilometern gemessenen Straßengüterverkehrsaktivität in Deutschland abdecken könnte (siehe Abbildung 20).



**Notes:** Distribution of road freight activity across vehicle trip distance bands in Germany. Trips can last multiple days. The dark green shade illustrates the activity which can be covered by vehicles with 800 km range without recharging or refuelling. The light green shade extends this coverage based on one recharging or refuelling event during the mandatory daily rest period.

**Sources:** T&E calculations based on ETISplus (2010) and calibrated based on Eurostat (2018).

Abbildung 20: Straßengüterverkehrsaufkommen, das von BEV mit 800 km Reichweite abgedeckt wird, wenn sie während der täglichen Ruhezeit aufgeladen werden

Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw mit größeren Reichweiten sind möglicherweise besser für Strecken über 1200 km und mehr geeignet. Allerdings betrifft dies nur 11 % der gesamten Straßengüterverkehrsleistung in Deutschland. Daneben sind auch Nischenanwendungen denkbar, bei

denen die Reichweiten- und Kostenvorteile von Wasserstoff-Lkw zum Tragen kommen könnten. Bei Geländefahrzeugen wie Muldenkippern im Bergbau beispielsweise wäre eine größere Reichweite aufgrund der außergewöhnlichen Anforderungen an ihre Betriebsbereitschaft von Vorteil. Fahrzeuge für Schwerlast- und Sondertransporte könnten außerdem aufgrund spezifischer betrieblicher Anforderungen wie Reichweite oder höherem Energieverbrauch größere Energiespeicher an Bord benötigen. Ein weiteres mögliches Anwendungsszenario für FCEV könnten abgelegene Gebiete sein, in denen die notwendige Netzinfrastruktur für das Laden mit hoher Leistung fehlt.

Wasserstoff-Lkw könnten auch einen Betriebs- und Kostenvorteil bei der Zu- und Abfuhr von Gütern (sogenannten „Drayage-Operationen“) in und um Seehäfen und deren angrenzendem Hinterland bieten, da Containerwechsel oft sehr zügig erfolgen müssen. Außerdem könnten sie dort von Synergieeffekten mit der Seeschifffahrt und niedrigeren Kraftstoffkosten aufgrund der zukünftigen Rolle der Seehäfen als Wasserstoff-Importterminals profitieren.

Letztendlich wird die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Fahrzeugtechnologien davon abhängen, wie sich ihre Skaleneffekte im kommenden Jahrzehnt entwickeln werden. Fahrzeugbatterien erleben derzeit eine selbstverstärkende Dynamik, die zu einer Kostensenkung aufgrund des verstärkten Ausbaus der Produktionszahlen im Pkw-Segment führen wird. Dies dürfte bald auch auf das Segment der städtischen und regionalen Lkw-Verteilerverkehrs, und anschließend auf den Lkw-Fernverkehr übergreifen.

Somit dürften fallende Batteriepreise die relativen Kostenvorteile von OC-BEV in den nächsten Jahren zunehmend ausgleichen. Bei Brennstoffzellen und Wasserstoffspeichern dürfte es aufgrund mangelnder Skaleneffekte vor der zweiten Hälfte der 2020er Jahre nur unwesentliche Kostensenkungen geben. Andere potenzielle Brennstoffzellen-Märkte wie die Seeschifffahrt oder stationäre Back-up-Anwendungen dürften vor den 2030er Jahren kaum ein substantielles Ausmaß erreichen. Daher dürfte es für Wasserstoff-Lkw extrem schwierig werden, vor 2030 einen größeren Marktanteil im Lkw-Segment zu erreichen.

## **7. Politische Empfehlungen**

Der Straßengüterverkehr ist eine Branche, die sowohl eine starke Regulierung als auch beträchtliche Anreize erfordert, damit emissionsfreie Alternativen möglichst schnell die Kostenparität mit konventionellen Diesel-Lkw erreichen können. Die Bundesregierung sollte sich auf eine wirksamere Regulierung sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene sowie auf gezielte Finanzierungsanreize für emissionsfreie Lkw und die dazugehörige Infrastruktur konzentrieren.

## 7.1. Nachfrage nach emissionsfreien Lkw

### Kaufprämie

Die anfänglich höheren Anschaffungskosten von emissionsfreien Lkw sind ein erhebliches Hindernis für Güterkraftverkehrsunternehmen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen. Um Anreize für die anfängliche Nachfrage zu schaffen und um den Markthochlauf zu beschleunigen, sind zeitlich begrenzte Anschaffungsbeihilfen erforderlich. Für gasbetriebene Lkw sollten keine Beihilfen gewährt werden, da die Versorgung mit Biomethan nicht ausreicht, um einen signifikanten Anteil der Lkw-Flotte zu versorgen.

In Deutschland können Güterverkehrsunternehmen Zuschüsse von bis zu 12.000 € (bis 12 Tonnen zGG) und 40.000 € (über 12 Tonnen zGG) für emissionsfreie Lkw erhalten, wobei maximal 40 % der Investitionsmehrkosten pro Fahrzeug übernommen werden und der Höchstbetrag, den ein einzelnes Unternehmen erhalten kann, auf 500.000 € begrenzt ist.<sup>135</sup> Es ist zu begrüßen, dass Deutschland angekündigt hat, bis zu 80 % der Investitionsmehrkosten mit einem Gesamtfördervolumen von 1,16 Mrd. € bis 2023 zu übernehmen. Die beihilferechtliche Genehmigung seitens der EU steht allerdings noch aus.<sup>136</sup> Noch ist unklar, ob die maximale Förderobergrenze von 40.000 € bestehen bleibt und ob die Prämie wie geplant im Jahr 2026 auslaufen soll. Abbildung 21 zeigt, wie sich eine Erhöhung der Förderquote auf 80% der Investitionsmehrkosten sowie eine Erhöhung der Beihilfeobergrenze auf 60.000 € in Kombination mit der Reform der Lkw-Maut auf die Gesamtbetriebskosten auswirken würde.

### Lkw-Maut

2019 betragen die jährlichen Bundeseinnahmen aus der Benzin- und Dieselkraftstoffsteuer 37 Mrd. €. <sup>137</sup> Diese Steuereinnahmen werden allmählich abnehmen und schließlich ganz wegfallen. Sie können nur teilweise durch die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs ausgeglichen werden. Um diese zukünftigen Einnahmeverluste zu kompensieren, das derzeitige, künstlich niedrige Kostenniveau an die realen externen Effekte des Straßengüterverkehrs anzupassen und die notwendige Lenkungswirkung in Richtung emissionsfreier Alternativen zu erzielen, muss Deutschland seine entfernungsabhängige Lkw-Maut nach der Novellierung der Eurovignetten-Richtlinie reformieren.

Gemäß der Novellierung der Eurovignetten-Richtlinie (die derzeit verhandelt wird) muss Deutschland die Infrastrukturabgabe ab 2023 bei denjenigen Lkw-Kategorien differenzieren, die unter die CO<sub>2</sub>-Normen für neue Lkw fallen. Zu diesem Zweck werden ICEV und ZLEV in fünf CO<sub>2</sub>-Emissionsklassen eingeteilt, basierend auf ihrer Leistung im Vergleich zur in den CO<sub>2</sub>-Normen festgelegten, linearen Entwicklung bei der Emissionsminderung. Mitgliedsstaaten wird es außerdem erlaubt, die volle Befreiung von der Infrastrukturabgabe für emissionsfreie Fahrzeuge bis Ende 2025 einzuführen oder

beizubehalten. Danach muss die Ermäßigung 50-75 % im Vergleich zu den verbrauchsärmsten ICE-Lkw der CO<sub>2</sub>-Emissionsklasse 1 betragen.

Die Mitgliedstaaten werden außerdem die Möglichkeit haben, einen CO<sub>2</sub>-basierten Aufschlag für externe Kosten als Alternative zur Differenzierung der Infrastrukturabgabe anzuwenden oder beide Instrumente zu kombinieren. Die Mitgliedstaaten können auch einen erhöhten Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen erheben, der nicht mehr als das Doppelte des in der Richtlinie festgelegten Referenzwertes betragen darf.

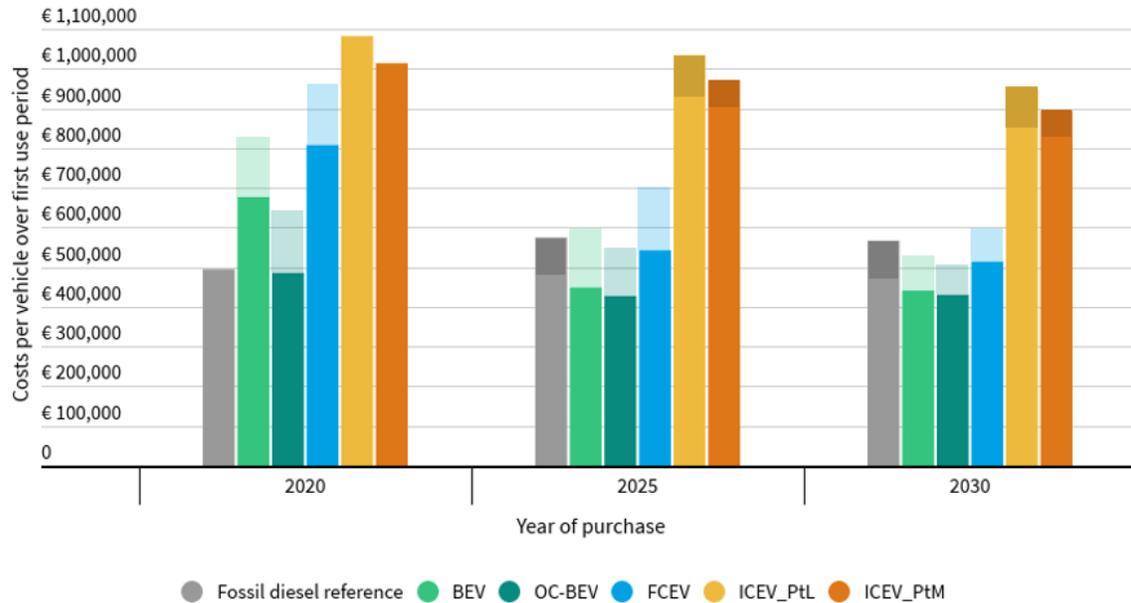
Deutschland hat angekündigt, bei der Infrastrukturabgabe auf der Grundlage der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Kombination mit einem wirksamen Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen ab 2023 zu differenzieren (sogenannte CO<sub>2</sub>-Spreizung).<sup>138</sup> Deutschland sollte die derzeitige ZEV-Befreiung von der Infrastrukturabgabe bis 2025 beibehalten und danach auf 75% gegenüber der CO<sub>2</sub>-Emissionsklasse 1 senken.

Darüber hinaus sollte Deutschland einen Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe des doppelten Referenzwertes erheben, was einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/tCO<sub>2</sub> entspricht. Im Rahmen der Überarbeitung der Lkw-Maut dürfte eine Erstattungsregelung eingeführt werden, um eine Doppelbelastung hinsichtlich des BEHG zu vermeiden. Eine solche Regelung sollte jedoch nur dann greifen, wenn für die verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen ein Aufschlag externer Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe des doppelten Referenzwertes erhoben wird.<sup>139</sup>

Deutschland muss auch die derzeitige Mautbefreiung für Gas-Lkw sofort beenden, um nicht weiter gegen EU-Recht zu verstoßen. Im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Differenzierung werden Gas-Lkw von einer Mautermäßigung auf die Infrastrukturabgabe in Höhe von 5 % bis 30 % profitieren, je nachdem, ob sie der CO<sub>2</sub>-Emissionsklasse 2 oder 3 zugeordnet sind, dies allerdings erst ab 2023. Bis zum Inkrafttreten der CO<sub>2</sub>-Differenzierung muss für Euro-VI-Gas-Lkw die gleiche Maut wie für Euro-VI-Diesel-Lkw erhoben werden, um der aktuellen Eurovignetten-Richtlinie zu entsprechen, deren Novellierung ansteht.

Abbildung 21 zeigt, wie sich dies in Kombination mit der geplanten Überarbeitung der Kaufprämie auf die Gesamtbetriebskosten (TCO) auswirken würde. Durch die Erhöhung des Fördersatzes der Anschaffungsbeihilfe auf 80 % der Investitionsmehrkosten und die oben vorgeschlagene Überarbeitung der Lkw-Maut könnten Fernverkehrs-BEV möglicherweise schon 2024 und FCEV kurze Zeit später die Kostenparität mit fossilen Diesel-Lkw erreichen.

## TCO of long-haul trucks in Germany after purchase subsidy and road charging reform



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

Figure 21: TCO – nach Reform der Kaufprämie und Lkw-Maut

### 7.2. Lade- und Tankinfrastruktur

#### Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe

Deutschland sollte sich für eine ambitionierte Überarbeitung der EU-Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID) einsetzen. Die Richtlinie sollte in eine Verordnung umgewandelt werden, um einen zügigen und harmonisierten Aufbau der Infrastruktur zu gewährleisten. Der Anwendungsbereich sollte auf die emissionsfreien Technologien beschränkt

werden. Die derzeitigen Infrastrukturvorgaben für CNG- und LNG-Fahrzeuge sollten bis spätestens 2025 abgebaut werden.

In der AFID sollten verbindliche Ziele für die Anzahl der Ladepunkte pro Mitgliedsstaat für 2025 und 2030 festgelegt werden. In Deutschland müssen bis 2025 rund 4 000 (halb-)öffentliche Ladestationen und – an Standorten mit hohem Publikumsverkehr – sogenannte *Destination Charger* installiert werden. Bis 2030 muss deren Zahl bei mindestens 14 000 liegen (ohne öffentliches Nachladen). Bei einem Drittel bis der Hälfte dieser Ladestationen sollte Hochleistungsladen (mit mindestens 350 kW) möglich sein. Während der Ersteinführung von öffentlichen Hochleistungsladestationen und *Destination Chargers* in der ersten Hälfte der 2020er Jahre sollte der Schwerpunkt auf die sogenannten „städtischen Knotenpunkte“ des Straßengüterverkehrs entlang des TEN-V-Netzes gelegt werden, deren Abdeckung bis 2025 gewährleistet werden sollte.

Für batteriebetriebene Fernverkehrs-Lkw wird bis 2025 ein erstes, aus Hochleistungsladepunkten und dem sogenannten *Megawatt Charging System* (MCS) bestehendes Netz entlang der Autobahnen benötigt, bis 2027 mindestens ein Megawatt-Ladepunkt alle 100 km und schließlich bis 2030 eine vollständige Abdeckung mit Megawatt-Ladepunkten alle 50 km. Für das Laden am Zielort müssen alle mittleren und großen Logistikkreisläufe ab 2025 über mindestens eine Hochleistungsladestation für Zwischenladungen verfügen. Darüber hinaus werden öffentliche Nachladegeräte (150 kW) auf Lkw-Rastplätzen benötigt, die bis 2030 flächendeckend zur Verfügung stehen müssen.

Die Mitgliedstaaten sollten außerdem dazu verpflichtet werden, neben dem TEN-V-Kernnetz auch die Stromnetzinfrastuktur auszubauen, um das Hochleistungsladen batteriebetriebener Fernverkehrs-Lkw zu ermöglichen. Elektrische Straßensysteme (ERS) sollten als Technologie anerkannt werden, damit diejenigen Mitgliedstaaten, die sie einsetzen, ihre verbindlichen Ziele für das TEN-V-Kernnetz erreichen können. Im Hinblick auf den Aufbau einer Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw sind Seehäfen und deren wirtschaftliches Hinterland einschließlich Industriecluster für erste Pilotprojekte zu priorisieren (siehe unten).

### **Finanzielle Unterstützung für private und öffentliche Ladeinfrastruktur**

Deutschland hat ein ehrgeiziges Förderprogramm für Lade- und Betankungsinfrastruktur mit einem Gesamtvolumen von 4,1 Mrd. € bis 2023 sowohl für leichte als auch für schwere Nutzfahrzeuge angekündigt.<sup>140</sup> Die Bundesregierung sollte wie geplant ein eigenes Förderinstrument einführen, um Güterverkehrsunternehmen beim Ausbau der Lade-Infrastruktur mit Depotladestationen und *Destination Chargers* für den städtischen und regionalen Lkw-Verteilerverkehr zu unterstützen. Das Programm sollte auch explizit Mittel für den Anschluss und Ausbau des Stromnetzes bereitstellen, da die Güterverkehrsunternehmen die netzbedingten Investitionsmehrkosten oft nicht stemmen können.

So verlangt Kalifornien zum Beispiel von den Energieversorgern des Bundesstaates, die notwendigen Netzausbauten für verkehrsbedingte Elektrifizierungsmaßnahmen einschließlich Lade-Infrastruktur für Fahrzeuge vorzunehmen.<sup>141</sup> Folglich bieten die Energieversorger Netzinfrastukturausbauten ohne Mehrkosten für Fahrzeugbetreiber.<sup>142</sup>

### **Megawatt-Ladeinfrastruktur**

Öffentlich-private Partnerschaften mit Lkw-Herstellern, Verkehrsbetrieben, Energieversorgern und Netzbetreibern sind erforderlich, um anfängliche Finanzierungshemmnisse zu überwinden, den Wissensfluss zwischen den Akteuren zu ermöglichen und die Grundlage für den Aufbau eines landesweiten ersten Megawatt-Ladernetzes (MCS) ab 2025 zu schaffen. Die jüngste Ankündigung eines branchenübergreifenden Konsortiums, bis 2023 ein öffentlich finanziertes MCS-Pilotprojekt durchzuführen, ist ein wichtiger erster Schritt.<sup>143</sup> Deutschland muss die Förderung ähnlicher Projekte mit speziellem Fokus auf den batterieelektrischen Fernverkehr entlang des deutschen Fernstraßennetzes in Betracht ziehen. An derartigen Projekten sollten Versorgungsunternehmen und Netzbetreiber beteiligt werden.

### **Oberleitungsinfrastruktur**

Wenn die Oberleitungsinfrastruktur Wirklichkeit werden soll, sind jetzt konkrete politische Maßnahmen und eine engere Zusammenarbeit zwischen gleichgesinnten Mitgliedstaaten erforderlich. Das größte Hindernis für die Einführung ist derzeit die fehlende technologische Harmonisierung und die Trägheit des Marktes aufgrund der Investitionsunsicherheit. Es liegt im Interesse Deutschlands und seiner europäischen Partnerländer, ein gemeinsames Verständnis über die notwendigen nächsten Schritte zur technologischen Harmonisierung zu entwickeln, um die grenzüberschreitende Interoperabilität einer möglichen zukünftigen Oberleitungsinfrastruktur sicherzustellen.

### **Infrastruktur für die Wasserstoffbetankung**

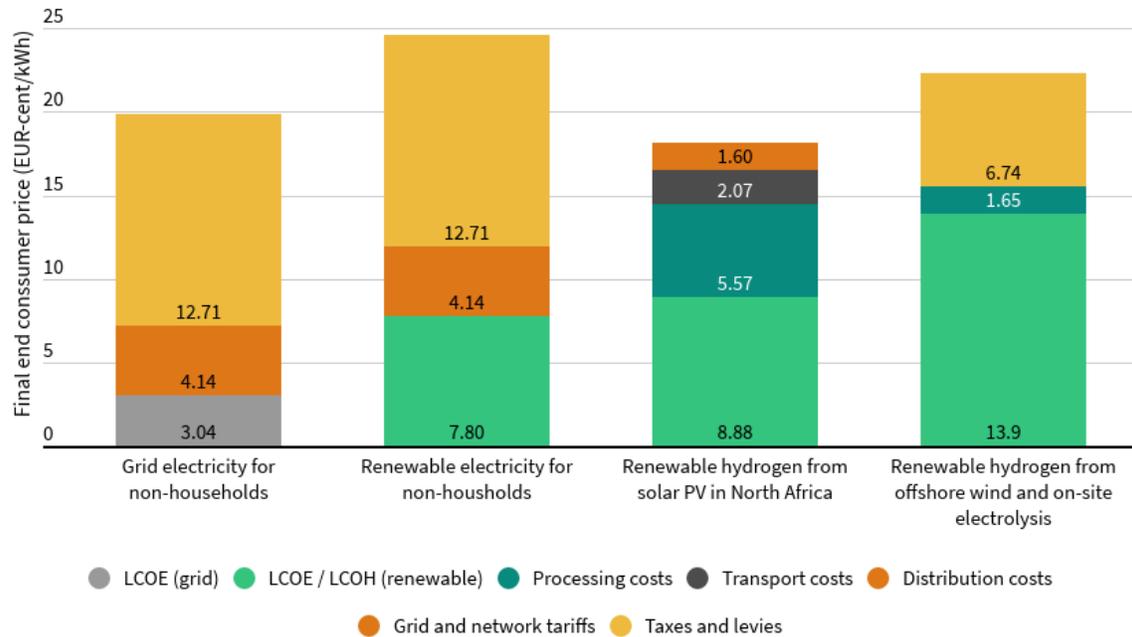
Im Hinblick auf den Aufbau einer Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw sind Seehäfen und deren wirtschaftliches Hinterland für erste Pilotprojekte zu priorisieren. Häfen und angrenzende Unternehmenscluster stellen einen unbedenklichen Ausgangspunkt für die Einführung von Wasserstofftankstellen für Lkw dar, weil so Synergieeffekte mit der zukünftigen Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff in der Schifffahrt und der Industrie entstehen. Seehäfen werden auch als wichtige Anlandeterminals für Wasserstoffimporte aus Offshore- oder Übersee-Produktionsstätten dienen, was die anfängliche Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff-Lkw verbessern wird.

### 7.3. Energiebesteuerung

#### Strom

Abbildung 22 zeigt, wie ungleich Strom und Wasserstoff derzeit in Deutschland besteuert werden. Der Strom, der von gewerblichen Straßengüterfahrzeugen verbraucht wird, ist derzeit in vollem Umfang steuer-, abgaben- und gebührenpflichtig. Die EEG-Umlage ist aktuell für Güterverkehrsunternehmen, die Elektrobusse im Linienverkehr einsetzen und mindestens 100 MWh Strom pro Jahr verbrauchen, auf 20 % gedeckelt.<sup>144</sup> Diese Regelung soll bei der erneuten Novelle des deutschen Erneuerbare Energien Gesetzes im Jahr 2021 zeitlich befristet auf den Güterverkehr mit Elektro-Lkw ausgeweitet werden. Dies würde dazu beitragen, die Wettbewerbsbedingungen zwischen batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Lkw anzugleichen, da letztere bereits von der Energisteuer befreit sind und die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff von der EEG-Umlage sowie von den Netzentgelten für den eingesetzten Strom befreit ist.

## Final electricity and hydrogen prices in 2025



**Notes:** Electricity wholesale prices, network tariffs, taxes and levies for non-household users with an annual consumption of 500 - 2,000 MWh. Processing costs are due conversion via compression or liquefaction. Transport costs refer to shipping from North Africa to Germany via cryogenic tanker vessel. Distribution costs refer to delivery via cryogenic tanker truck. In Germany, renewable hydrogen production is exempt from the renewables levy ('EEG-Umlage') and network tariffs ('Netzentgelte'); all other taxes and levies on electricity input apply. Hydrogen as a transport fuel is exempt from fuel duty.

Figure 22: Endpreise für Strom und erneuerbaren Wasserstoff im Jahr 2025

Eine solche Reduzierung würde EU-Recht entsprechen: Die Energiebesteuerungsrichtlinie erlaubt es den Mitgliedstaaten ausdrücklich, nach Genehmigung durch einen einstimmigen Durchführungsbeschluss des Rates einen ermäßigten Steuersatz auf Strom anzuwenden, der an Ladestationen für Elektrofahrzeuge bereitgestellt wird.<sup>145</sup> Die Niederlande wenden seit 2016 einen ermäßigten Steuersatz an und wurden vom Rat ermächtigt, dies bis mindestens 2025 fortzusetzen.<sup>146,147</sup> Die Bundesregierung sollte sich darüber hinaus dafür einsetzen, dass das Einstimmigkeitserfordernis bei der anstehenden Überarbeitung der EU-Energiebesteuerungsrichtlinie (ETD) aufgehoben wird.

## **Erdgas**

In Deutschland gilt derzeit ein extrem niedriger Steuersatz für als Kraftstoff im Verkehr eingesetztes Erdgas (13,90 €/MWh), und zwar unabhängig von der Erzeugungsart (aus fossilen Energieträgern gewonnenes Erdgas oder nachhaltig erzeugtes Biomethan). Der aktuelle Steuersatz wird schrittweise erhöht, bis ab 2027 der eigentliche Satz von 31,80 €/MWh gilt. Deutschland müsste den ermäßigten Satz so anpassen, dass er nur für nachhaltig erzeugtes Biomethan gilt, das aus fortschrittlichen abfall- und reststoffbasierten Rohstoffen stammt. Fossiles Erdgas sollte nicht von einer Ermäßigung profitieren und stattdessen zum normalen Satz besteuert werden. Diese Änderungen können im Rahmen des Haushaltsgesetzes 2022 eingeführt werden.

## **Diesel**

Die derzeit niedrigen Ölpreise und die wachsende politische Bereitschaft, Subventionen für fossile Energieträger auslaufen zu lassen, sind eine günstige Gelegenheit, die Kraftstoff- und Energiesteuersätze zu harmonisieren und zu vereinfachen. Trotz seines höheren Energie- und Kohlenstoffgehalts wird Dieselmotorkraftstoff immer noch geringer besteuert als Benzin. Darüber hinaus sind die Steuersätze für Diesel und Benzin seit 2003 eingefroren. Der Steuersatz für Dieselmotorkraftstoff sollte schrittweise angehoben werden, bis er auf der Grundlage des jeweiligen Energie- oder Kohlenstoffgehalts das gleiche Niveau wie Benzin erreicht.<sup>148</sup> Bei einer Reform der Kraftstoffbesteuerung sind die künftigen Regulierungsmaßnahmen und die Höhe der CO<sub>2</sub>-Abgabe sowohl bei der Reform der Lkw-Maut als auch bei einer etwaigen Befreiungsregelung vom BEHG (siehe oben) zu berücksichtigen.

Alternativ könnte Deutschland auch eine jährliche Indexierung der Kraftstoffsteuersätze in Anlehnung an den historischen Verbraucherpreisindex (VPI) einführen. Die historisch beobachtete Inflationsrate liegt seit 1991 im Durchschnitt bei 1,7 % jährlich.<sup>149</sup>

## **7.4. Angebot von emissionsfreien Lkw**

Es ist vielfach belegt, dass die Nachfrage nach emissionsfreien Lkw schnell wächst, die Hersteller aber nicht in der Lage sind, den Markt schnell genug mit dem erforderlichen Angebot zu bedienen. Die fehlende Investitionssicherheit für emissionsfreie Lkw ist nach wie vor eines der Haupthindernisse für die Produktion und damit auch für den Markthochlauf.

Nichtsdestotrotz bewegt sich die Branche bereits in die richtige Richtung: Der weltweit größte Lkw-Hersteller Daimler hat angekündigt, die ICEV-Entwicklung einzustellen und ab 2039 alle in den Triade-Märkten Europa, Japan und Nordamerika verkauften Lkw nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zu verkaufen.<sup>150</sup> Scania hat angekündigt, dass im Jahr 2030 ganze 50 % der von diesem Hersteller verkauften Lkw batterieelektrische Fahrzeuge sein werden.<sup>151</sup> MAN strebt an, dass bis dahin 60 % der

innerstädtischen und regionalen Lieferfahrzeuge und 40 % der Fernverkehrs-Lkw emissionsfrei fahren.<sup>152</sup> Renault Trucks will bis 2030 35 % emissionsfreie Lkw verkaufen.<sup>153</sup>

### **Europäische CO<sub>2</sub>-Normen für neue Lkw**

Die EU hat 2019 erstmalig CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte für neue Lkw verabschiedet. Um die drohende Versorgungslücke zu überwinden, sollte sich Deutschland für eine ambitionierte Überprüfung im Jahr 2022 einsetzen und damit das Marktsignal an die Lkw-Hersteller geben, die Produktion von emissionsfreien Lkw hochzufahren. In der anstehenden, für Ende 2022 geplanten Überarbeitung sind mehrere Schwachstellen zu bereinigen:

Das derzeitige durchschnittliche Flottenreduktionsziel für 2030 von 30 % ist völlig unzureichend, um die Klimaziele Deutschlands und der EU zu erreichen. Ein zunehmender Teil der Ziele für 2025 und 2030 kann durch den beschleunigten Einsatz emissionsfreier Fahrzeuge erreicht werden. Das Ziel für 2030 muss daher deutlich erhöht werden. Darüber hinaus sollten in der Verordnung Folgeziele für 2035 und 2040 festgelegt werden.

Bei der Überprüfung 2022 wird die Europäische Kommission eine Ausweitung der CO<sub>2</sub>-Normen auf die derzeit nicht regulierten Fahrzeugkategorien (leichtere Lkw, Kraftfahrzeuganhänger, Linien- und Reisebusse) in Betracht ziehen. Dazu muss die Zertifizierung mit VECTO erweitert werden. Die überarbeiteten CO<sub>2</sub>-Grenzwerte sollten dann auch für die derzeit nicht geregelten Fahrzeugtypen (Kraftfahrzeuganhänger, Linien- und Reisebusse) und -gruppen (1 - 3, 11, 12 und 16) soweit wie möglich und umsetzbar gelten.

Das ZLEV-Anreizsystem sollte durch ein verbindliches Verkaufsziel ersetzt werden, um die Hersteller zu verpflichten, einen bestimmten Anteil emissionsfreier Fahrzeuge an den Gesamtstückzahlen zu verkaufen. Der Anteil könnte je nach Fahrzeugkategorie und Gewichtsklasse auf der Grundlage der VECTO-Kategorien variieren, um spezifische Fahrzeugeigenschaften und betriebliche Anforderungen angemessen zu berücksichtigen. Kaliforniens Verordnung „Advanced Clean Trucks“ legt ein verbindliches Verkaufsziel ab 2024 fest. Demnach soll bis 2032 der Anteil an emissionsfreien Zugmaschinen der Klassen 7 und 8 (über 12 Tonnen zGG) bei 40 % liegen.<sup>154</sup> Die Vorgabe, nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zu verkaufen, könnte als Rechtsinstrument dienen, um einen Ausstieg aus dem Verbrenner-Verkauf für 2035 bei Fahrzeugen unter 26 Tonnen zGG und für die späten 2030er Jahre bei Fahrzeugen über 26 Tonnen zGG zu erreichen (siehe unten).

Im Einklang mit einer ZEV-Vorgabe sollte die EU beschließen, dass ab 2035 keine neuen Verbrenner-Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 26 Tonnen und ab spätestens 2040 keine neuen Verbrenner-Lkw über 26 Tonnen mehr verkauft werden. Die EU sollte es den Mitgliedstaaten ermöglichen, auf

freiwilliger Basis frühere Ausstiegstermine festzulegen. Dazu müsste die EU gesetzgeberische Maßnahmen ergreifen, die es diesen Mitgliedstaaten erlauben, dies in Übereinstimmung mit den EU-Typgenehmigungs- und Binnenmarktvorschriften zu tun.<sup>155</sup> Die Bundesregierung sollte sich für die Einführung einer solchen Regelung auf europäischer Ebene einsetzen, die es den Mitgliedstaaten ermöglicht, frühere Ausstiegstermine einzuführen.

### **Fahrzeuggewichte und -abmessungen**

Das durch die europäischen CO<sub>2</sub>-Normen eingeführte zulässige Mehrgewicht von bis zu zwei Tonnen für emissionsfreie Fahrzeuge als Änderung der Richtlinie über Gewichte und Abmessungen ist so schnell wie möglich in deutsches Recht umzusetzen.

Das Gleiche gilt für die jüngste EU-Entscheidung, mit der besondere Regeln für die maximale Länge von Fahrerhäusern mit besserer Aerodynamik festgelegt wurden.<sup>156</sup> Mit der Entscheidung wird die Richtlinie über Gewichte und Abmessungen dahingehend geändert, dass eine Überschreitung der maximalen Fahrzeuglänge zulässig ist, wenn das Fahrerhaus Verbesserungen bei Aerodynamik, Energieeffizienz und Sicherheit bietet.

Die Mitgliedstaaten waren ursprünglich gesetzlich verpflichtet, diese Entscheidung bereits bis September 2020 in nationales Recht umzusetzen. Das nationale Gesetzgebungsverfahren läuft bereits und muss nun schnellstmöglich abgeschlossen werden, damit die Lkw-Hersteller Gewissheit für ihre zukünftige Fahrerhausentwicklung haben.<sup>157</sup>

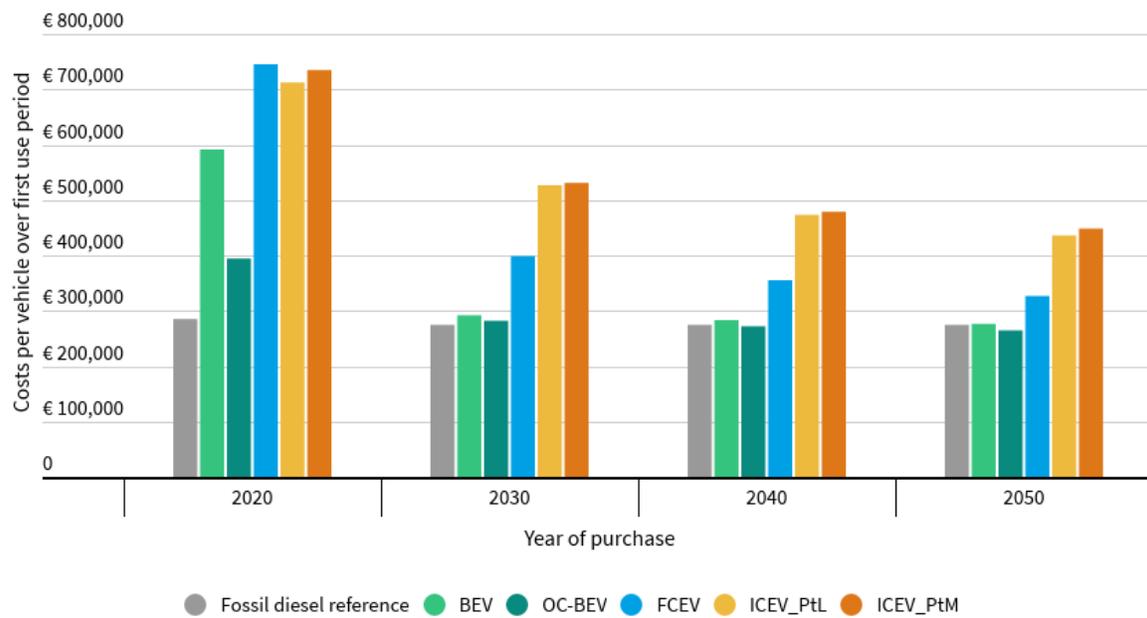
## **7.5. Emissionsfreier städtischer Güterverkehr**

Die Bundesregierung sollte in enger Abstimmung mit den Städten und Gemeinden eine Strategie für eine emissionsfreie Stadtlogistik entwickeln. Städtische Gebiete sollten mit Blick auf die zweite Hälfte des Jahrzehnts die Einführung von emissionsfreien Zonen sowohl für leichte Nutzfahrzeuge als auch für schwere Nutzfahrzeuge, d.h. Transporter und Lkw, in Betracht ziehen. Übergangsregelungen für derzeit zugelassene Fahrzeuge bis 2030 können helfen, einen reibungslosen Übergang für betroffene Unternehmen zu gewährleisten. Die Vereinbarung der niederländischen Regierung mit Kommunalverwaltungen, Unternehmen und Forschungseinrichtungen, bis 2025 bzw. 2030 eine emissionsfreie Stadtlogistik zu erreichen, kann als Blaupause dienen.<sup>158,159</sup> Die Stadt Amsterdam hat einen ehrgeizigen Maßnahmenplan für saubere Luft aufgestellt, der bis 2025 in weiten Teilen der Stadt emissionsfreie leichte und schwere Nutzfahrzeuge vorschreibt.<sup>160</sup>

# Anhang

## Kostensensitivitäten

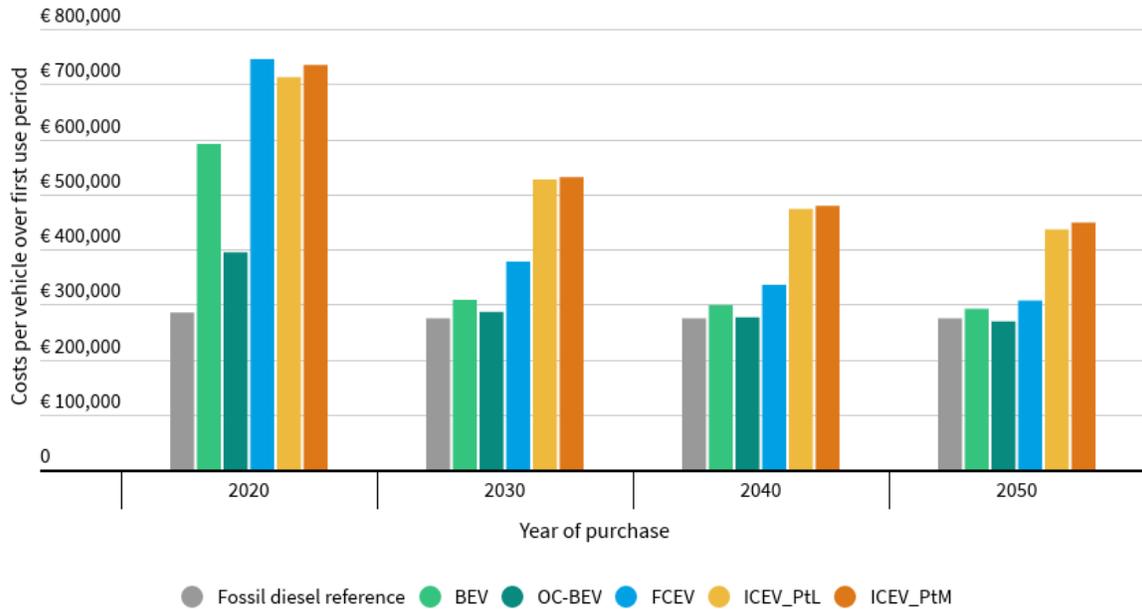
### Lifetime system costs of long-haul trucks in Germany Reduced battery costs



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight before 2030.

*Systemkosten - Sensitivitätsanalyse mit reduzierten Batteriekosten*

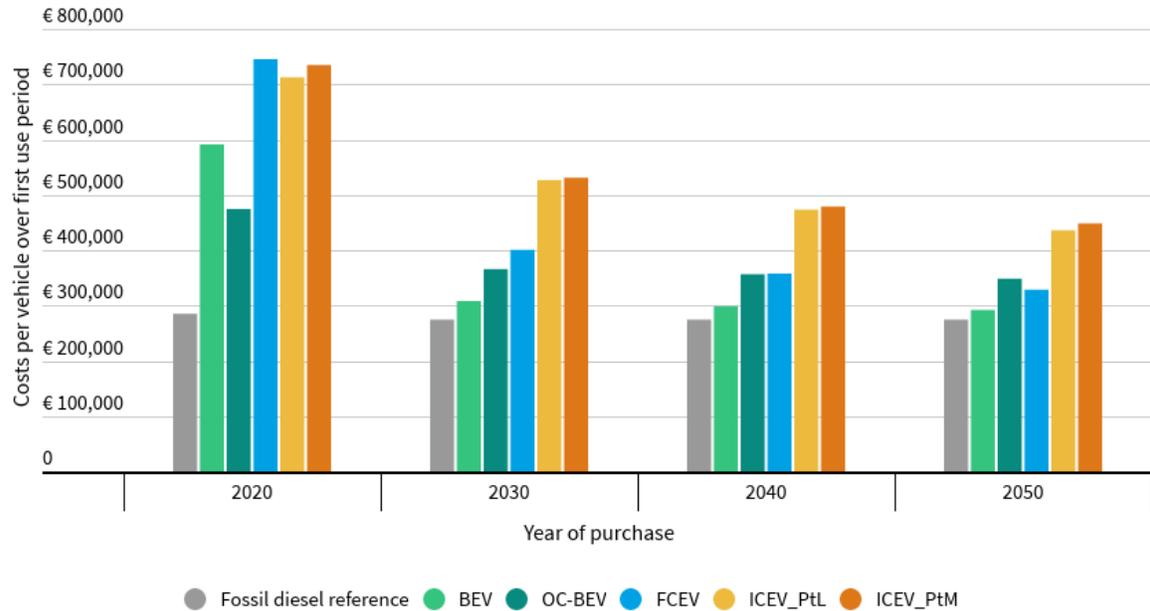
## Lifetime system costs of long-haul trucks in Germany Reduced fuel cell and hydrogen storage tank costs



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight before 2030.

*Systemkosten - Sensitivitätsanalyse mit reduzierten Brennstoffzellen- und Wasserstofftankkosten*

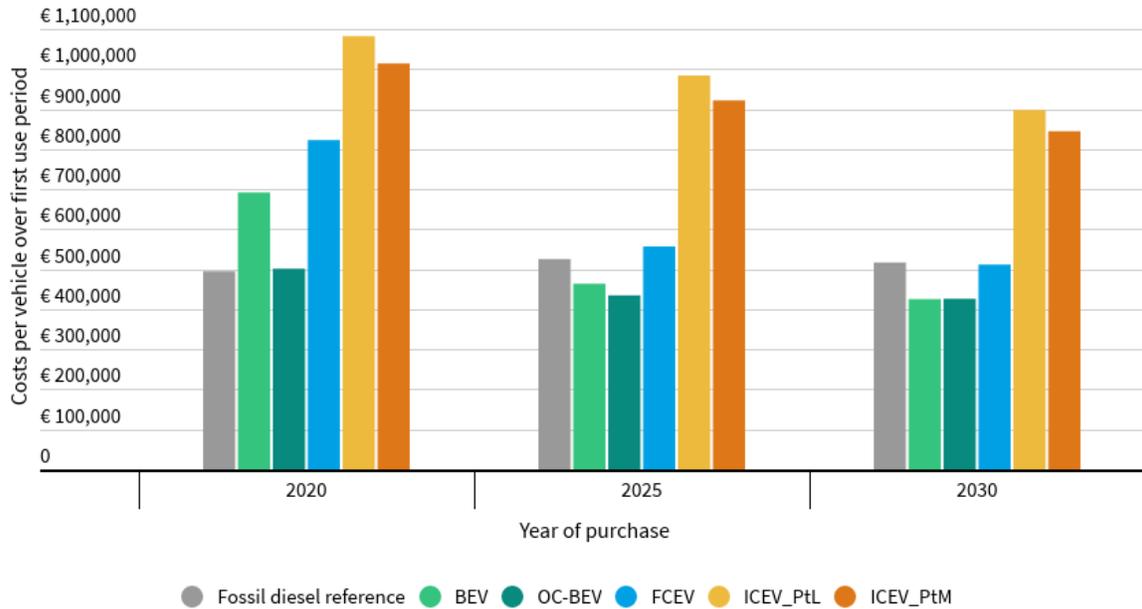
## Lifetime system costs of long-haul trucks in Germany Low utilisation of the overhead catenary infrastructure



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including vehicle costs (purchase costs, maintenance & repairs and residual value), renewable electricity and fuel costs and infrastructure costs (at high utilisation except for the OC-BEV). Excluding taxes, levies and road charges except for grid connection fees and electricity transmission and distribution costs. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight before 2030.

*Systemkosten - Sensitivitätsanalyse mit niedrigerem Auslastungsgrad der Oberleitungsinfrastruktur*

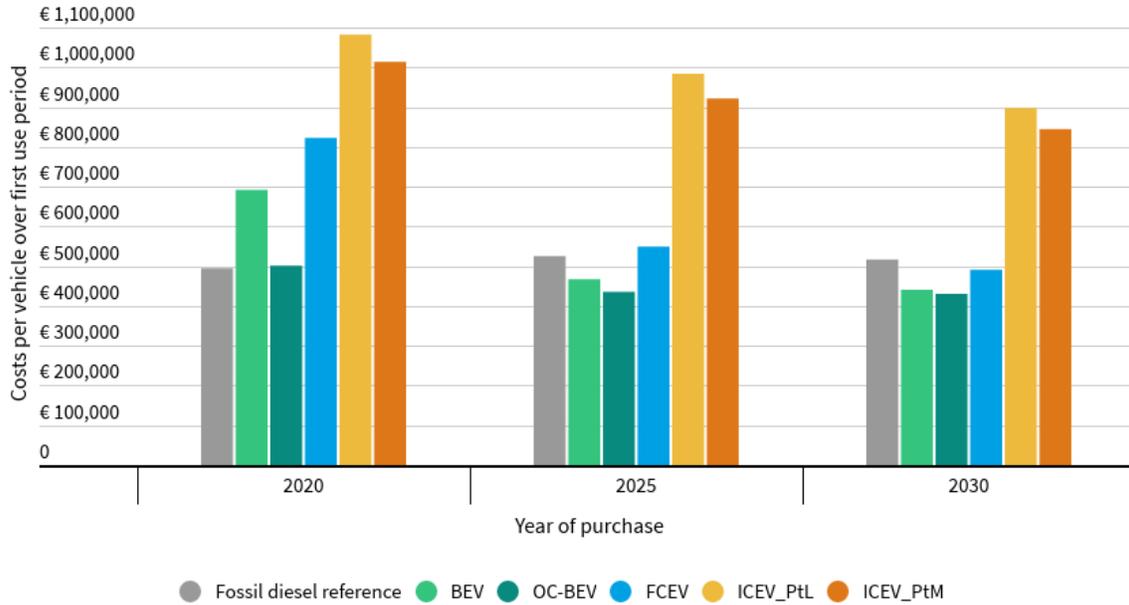
## TCO of long-haul trucks in Germany Reduced battery costs



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

*TCO - Sensitivitätsanalyse mit reduzierten Batteriekosten*

## TCO of long-haul trucks in Germany Reduced fuel cell and hydrogen storage tank costs

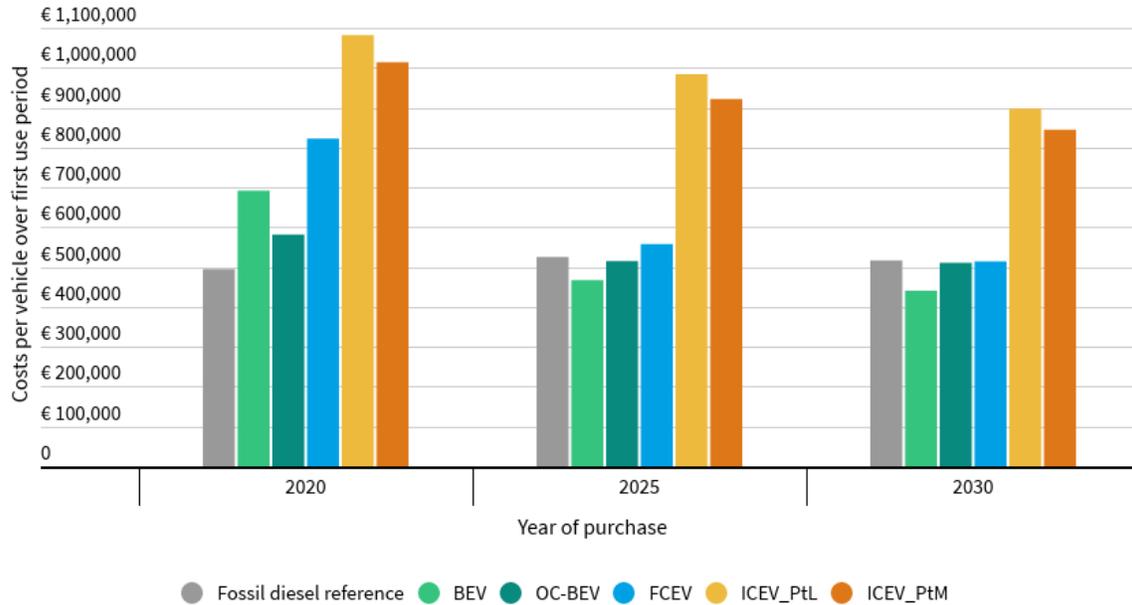


**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

*TCO - Sensitivitätsanalyse mit reduzierten Brennstoffzellen- und Wasserstofftankkosten*

## TCO of long-haul trucks in Germany

### Low utilisation of the overhead catenary infrastructure



**Notes:** Costs are for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW and (at least) 800 km range. Assuming a first use period of 5 years. All vehicles are exclusively powered by renewable energy, including the (OC)-BEV. Including total vehicle costs (purchase costs and residual value, maintenance & repairs, vehicle taxes, excl. financing costs and VAT), renewable electricity and fuel costs (incl. grid connection fees, transport and distribution costs as well as taxes and levies), infrastructure costs (at high utilisation) and road charges varied based on the Eurovignette Revision. BEV includes opportunity costs due to additional battery weight until 2025.

*TCO - Sensitivitätsanalyse mit niedrigerem Auslastungsgrad der Oberleitungsinfrastruktur*

## Fahrzeugenergieverbrauchswerte

Pathway	in L/100 km				
	2020	2025	2030	2040	2050
ICEV_diesel (tank-to-wheel)	29.86	26.67	23.47	23.47	23.47
ICEV_PtL (tank-to-wheel)	29.86	26.67	23.47	23.47	23.47
	in kWh/km				
BEV (battery-to-wheel)	1.52	1.34	1.15	1.15	1.15
BEV (plug-to-wheel)	1.60	1.41	1.21	1.21	1.21
OC-BEV (pantograph-to-wheel)	1.54	1.40	1.25	1.25	1.25
OC-BEV (from the grid)	1.71	1.55	1.39	1.39	1.39
FCEV (tank-to-wheel)	2.53	2.24	1.95	1.87	1.79
ICEV_PtM (tank-to-wheel)	2.96	2.64	2.33	2.33	2.33

**Notes:** Energy consumption values for long-haul tractor trailers with 40 tonnes GVW. Values after 2030 are kept constant except for the FCEV which benefits from an increasing average fuel cell efficiency until 2050. Taking into account fuel efficiency improvements of ICEVs until 2030. For OC-BEVs, above values represent the energy consumption when drawing traction from the overhead lines with and without charging losses; when running on the battery, the BEV (battery-to-wheel) values apply after accounting for battery weight differences.

**Sources:** T&E calculations based on Earl et al. (2018), Delgado et al. (2017), Moultak et al. (2017), Kühnel et al. (2018), National Research Council (2013), Volvo (2017).

## Fahrzeugkosten

Vehicle		Vehicle costs (excl. financing costs, VAT, purchase subsidy and opportunity costs)				
		2020	2025	2030	2040	2050
ICEV_diesel	Purchase cost	€ 105,484	€ 109,159	€ 115,252	€ 115,252	€ 115,252
	M&R	€ 20,471 p.a.	€ 20,608 p.a.	€ 20,608 p.a.	€ 20,608 p.a.	€ 20,608 p.a.
	Vehicle taxes	€ 561 p.a.	€ 561 p.a.	€ 561 p.a.	€ 561 p.a.	€ 561 p.a.
BEV	Purchase cost	€ 417,255	€ 200,006	€ 145,346	€ 145,346	€ 145,346
	M&R	€ 14,359 p.a.	€ 14,359 p.a.	€ 14,359 p.a.	€ 14,359 p.a.	€ 14,359 p.a.
	Vehicle taxes	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.
OC-BEV	Purchase cost	€ 203,547	€ 136,872	€ 112,028	€ 112,028	€ 112,028
	M&R	€ 14,632 p.a.	€ 14,632 p.a.	€ 14,632 p.a.	€ 14,632 p.a.	€ 14,632 p.a.
	Vehicle taxes	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.	€ 5 p.a.
FCEV	Purchase cost	€ 391,802	€ 209,572	€ 157,096	€ 155,647	€ 154,318
	M&R	€ 26,324 p.a.	€ 18,735 p.a.	€ 18,735 p.a.	€ 18,735 p.a.	€ 18,735 p.a.

	Vehicle taxes	€ 5 p.a.				
ICEV_PtL	Purchase cost	€ 105,484	€ 109,159	€ 115,252	€ 115,252	€ 115,252
	M&R	€ 20,471 p.a.	€ 20,608 p.a.	€ 20,608 p.a.	€ 20,608 p.a.	€ 20,608 p.a.
	Vehicle taxes	€ 561 p.a.				
ICEV_PtM	Purchase cost	€ 128,339	€ 120,075	€ 126,777	€ 126,777	€ 126,777
	M&R	€ 21,894 p.a.	€ 20,389 p.a.	€ 20,389 p.a.	€ 20,389 p.a.	€ 20,389 p.a.
	Vehicle taxes	€ 561 p.a.				

**Sources:** T&E calculations based on Kühnel et al. (2018), Meszler et al. (2018), ACEA (2020), Zoll (2020) BloombergNEF (2020), Moultaq et al. (2017), Ricardo Energy & Environment (2019), Hall et al. (2019), U.S. Department of Energy (2019) and Roland Berger (2020).

## Energiekosten

Electricity and electricity-based fuel production in Europe		€-cent/kWh				
		2020	2025	2030	2040	2050
<b>Fossil diesel</b>	Total	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34
	Total incl. taxes and levies	10.07	10.07	10.07	10.07	10.07
<b>Renewable electricity (commercial)</b>	Levelised cost of electricity	9.22	7.80	7.23	6.14	5.11
	Transport to Germany	<i>Grid connection fees included in LCOE</i>				

<b>use)</b>	Distribution in Germany	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14
	Total	13.36	11.94	11.37	10.28	9.25
	Total incl. taxes and levies	26.07	24.65	24.08	22.99	21.96
<b>Renewable hydrogen from offshore wind on-site production (PPA)</b>	Levelised cost of hydrogen	16.70	13.90	12.49	10.00	7.91
	Compression	1.96	1.65	1.35	1.04	0.73
	Transport to Germany	<i>not applicable</i>				
	Distribution in Germany	<i>not applicable</i>				
	Total	18.65	15.56	13.83	11.04	8.64
	Total incl. taxes and levies	25.60	22.29	20.37	17.21	14.48
<b>Power-to-liquid from offshore wind in the North Sea</b>	Levelised cost of fuel production	27.48	23.71	20.86	17.42	14.49
	Transport to Germany	<i>not applicable</i>				
	Distribution in Germany	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Total	28.48	24.71	21.87	18.42	15.49
	Total incl. taxes and levies	41.90	37.86	34.77	30.85	27.52
<b>Power-to-methane from</b>	Levelised cost of fuel production	26.16	22.34	19.56	16.08	13.74

<b>offshore wind in the North Sea</b>	Liquefaction	0.69	0.68	0.67	0.64	0.61
	Transport to Germany	<i>not applicable</i>				
	Distribution in Germany	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
	Total	27.95	24.12	21.33	17.82	15.45
	Total incl. taxes and levies	38.03	34.83	32.67	28.70	25.92

<b>Electricity-based fuel production in North Africa</b>		<b>€-cent/kWh</b>				
		<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Renewable hydrogen from solar PV in North Africa</b>	Levelised cost of hydrogen	10.18	8.88	7.83	6.10	4.86
	Liquefaction	6.73	5.57	4.41	3.55	2.69
	Transport to Germany	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07
	Distribution in Germany	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
	Total	20.58	18.13	15.91	13.33	11.23
	Total incl. taxes and levies	20.58	18.13	15.91	13.33	11.23
<b>Power-to-liquid from solar PV in</b>	Levelised cost of fuel production	18.90	17.10	14.74	12.29	10.49

<b>North Africa</b>	Transport to Germany	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	Distribution in Germany	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Total	19.95	18.15	15.78	13.33	11.53
	Total incl. taxes and levies	24.67	22.86	20.50	18.05	16.25
<b>Power-to-methane from solar PV in North Africa</b>	Levelised cost of fuel production	17.83	15.94	13.62	11.11	9.88
	Liquefaction	0.69	0.68	0.67	0.64	0.61
	Transport to Germany	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
	Distribution in Germany	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
	Total	19.83	17.93	15.61	13.07	11.80
	Total incl. taxes and levies	21.22	20.22	18.79	16.25	14.98

**Sources:** T&E calculations based on Destatis (2020), Zoll (2020), Agora Verkehrswende et al. (2018), Destatis (2021), U.S. Department of Energy (2019), Pfennig et al. (2017), Runge et al. (2020), Hydrogen Council (2020), EnWG (2020), Mottschall et al. (2019), Bundesnetzagentur (2020), Fasihi et al. (2016) and and Bünger et al. (2016).

## Infrastrukturkosten

Electric charging station				
Parameters		2020	2025	2030
<b>High-power charger (1.2 MW)</b>	Charging time	45 minutes for 400 km range		
	Supplied vehicles per day	10		20
	Service life	15 years		
	Capital expenditure	€ 464,344	€ 420,000	€ 374,186
	Operational expenses	€ 4,643 p.a.	€ 4,200 p.a.	€ 3,742 p.a.
<b>Overnight charger (150 kW)</b>	Charging time	8 hours for 800 km range		
	Supplied vehicles per day	0.83		0.91
	Service life	15 years		
	Capital expenditure	€ 75,000	€ 69,545	€ 65,000
	Operational expenses	€ 750 p.a.	€ 696 p.a.	€ 650 p.a.
<b>Total infrastructure costs per vehicle per year (high utilisation)</b>		€ 10,463 p.a.	€ 9,621 p.a.	€ 6,917 p.a.

<b>Electric road system</b>
-----------------------------

Parameters		2020	2025	2030
<b>Overhead catenary system</b>	System voltage	1,500 V <sub>DC</sub>		
	Maximum power consumption per vehicle for traction and battery charging	240 kW		
	Average vehicle speed	80 km/h		
	Installed permanent power per direction	2 MW/km		
	Installed permanent substation power	4 MW/km		
	Number of supplied vehicles per direction (at 240 kW)	8 vehicles/km		
	Number of supplied vehicles per direction at overload capacity (for up to 2 hrs at 240 kW)	12 vehicles/km		
	Possible time gap between vehicles	5.40 seconds		
	Possible time gap at overload capacity	4.05 seconds		
	Service life	20 years		
	Capital expenditure per km (both directions)	€ 3.05 million		
	Capital expenditure per MW (both directions)	€ 762,500		
	Operational expenses per km (both directions)	€ 61,000 p.a.		
<b>Total infrastructure costs per vehicle per year (high utilisation)</b>		€ 5,338 p.a.		

<b>Hydrogen refuelling station</b>				
<b>Parameters</b>		<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
<b>Mid-sized hydrogen refuelling station</b>	Total refuelling capacity	5,468 kg <sub>H2</sub>		
	Mean refuelling quantity per vehicle	42 kg <sub>H2</sub>	37 kg <sub>H2</sub>	32 kg <sub>H2</sub>
	Dispenser flow rate	3.6 - 7.2 kg <sub>H2</sub> /min		
	Supplied vehicles per day	110		166
	Service life	15 years		
	Capital expenditure	€ 6.97 million	€ 6.30 million	€ 5.61 million
	Operational expenses	€ 69,652 p.a.	€ 63,000 p.a.	€ 56,128 p.a.
<b>Total infrastructure costs per vehicle per year (high utilisation)</b>		€ 4,855 p.a.	€ 4,391 p.a.	€ 2,592 p.a.

<b>LNG refuelling station</b>				
<b>Parameters</b>		<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
<b>Mid-sized LNG</b>	Total refuelling capacity	17,000 kg <sub>LNG</sub>		

<b>refuelling station</b>	Mean refuelling quantity per vehicle	119 kg <sub>LNG</sub>	106 kg <sub>LNG</sub>	93 kg <sub>LNG</sub>
	Supplied vehicles per day	55		83
	Service life	15 years		
	Capital expenditure	€ 1.03 million	€ 1.03 million	€ 1.03 million
	Operational expenses per year	€ 27,080 p.a.	€ 27,080 p.a.	€ 27,080 p.a.
<b>Total infrastructure costs per vehicle per year (high utilisation)</b>		€ 1,746 p.a.	€ 1,746 p.a.	€ 1,157 p.a.

Sources: T&E calculations based on Kühnel et al. (2018).

## Mautgebühren

Vehicle	Charge	2020	2025	2030
ICEV_diesel	Infrastructure charge	€-cent 17.40/km	€-cent 17.40/km	€-cent 17.40/km
	External cost charge for noise and air pollution	€-cent 1.30/km	€-cent 1.30/km	€-cent 1.30/km
	External cost charge for CO <sub>2</sub>	-	€-cent 8.00/km	€-cent 8.00/km
	Total	€-cent 18.70/km	€-cent 26.70/km	€-cent 26.70/km
BEV	Infrastructure charge	-	-	€-cent 4.35/km
	External cost charge for air and noise pollution	-	€-cent 0.20/km	€-cent 0.20/km

	External cost charge for CO <sub>2</sub>	-	-	-
	Total	-	€-cent 0.20/km	€-cent 4.55/km
OC-BEV	Infrastructure charge	-	-	€-cent 4.35/km
	External cost charge for air and noise pollution	-	€-cent 0.20/km	€-cent 0.20/km
	External cost charge for CO <sub>2</sub>	-	-	-
	Total	-	€-cent 0.20/km	€-cent 4.55/km
FCEV	Infrastructure charge	-	-	€-cent 4.35/km
	External cost charge for air and noise pollution	-	€-cent 0.20/km	€-cent 0.20/km
	External cost charge for CO <sub>2</sub>	-	-	-
	Total	-	€-cent 0.20/km	€-cent 4.55/km
ICEV_PtL	Infrastructure charge	€-cent 17.40/km	€-cent 17.40/km	€-cent 17.40/km
	External cost charge for air and noise pollution	€-cent 1.30/km	€-cent 1.30/km	€-cent 1.30/km
	External cost charge for CO <sub>2</sub>	-	€-cent 8.00/km	€-cent 8.00/km
	Total	€-cent 18.70/km	€-cent 26.70/km	€-cent 26.70/km

ICEV_PtM	Infrastructure charge	€-cent 17.40/km	€-cent 12.18/km	€-cent 12.18/km
	External cost charge for air and noise pollution	€-cent 1.30/km	€-cent 1.30/km	€-cent 1.30/km
	External cost charge for CO <sub>2</sub>	-	€-cent 8.00/km	€-cent 8.00/km
	Total	€-cent 18.70/km	€-cent 21.48/km	€-cent 21.48/km

**Sources:** T&E calculations based on European Commission (2013), Kühnel et al. (2018), BFStrMG (2020) and Council of the European Union (2020).

## Referenzen

---

- <sup>1</sup> Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Auszug aus <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>
- <sup>2</sup> Bundesregierung (2019). Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Auszug aus <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf>
- <sup>3</sup> Kraftfahrtbundesamt (2019). Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten). Auszug aus [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz25\\_2019\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz25_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8)
- <sup>4</sup> Kraftfahrtbundesamt (2019). Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. Auszug aus [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13\\_2019\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=10)
- <sup>5</sup> Transport & Environment (2020). How to decarbonise the French freight sector by 2050. Auszug aus [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_05\\_TE\\_how\\_to\\_decarbonise\\_the\\_french\\_freight\\_sector\\_by\\_2050\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_05_TE_how_to_decarbonise_the_french_freight_sector_by_2050_final.pdf)
- <sup>6</sup> Transport & Environment (2020). How to decarbonise the UK's freight sector by 2050. Auszug aus [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Study\\_How%20to%20decarbonise%20the%20UKs%20freight%20sector%20by%202050.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Study_How%20to%20decarbonise%20the%20UKs%20freight%20sector%20by%202050.pdf)
- <sup>7</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2008). Verkehr in Zahlen 2008/2009. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen\\_2008-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2008-pdf.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>8</sup> Öko-Institut (2014). eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Auszug aus [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_um\\_11\\_96\\_106\\_elektromobilitaet\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_um_11_96_106_elektromobilitaet_bf.pdf)
- <sup>9</sup> Intraplan Consult et al. (2014). Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>10</sup> Intraplan Consult (2020). Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Sommer 2020. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/gleitende-mittelfristprognose-sommer-2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/gleitende-mittelfristprognose-sommer-2020.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>11</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Verkehr in Zahlen 2020/2021. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf?__blob=publicationFile)

- 
- <sup>12</sup> Nationale Plattform Zukunft Mobilität (2020). Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Auszug aus <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf>
- <sup>13</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Masterplan Schienenverkehr. Auszug aus <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/masterplan-schienenverkehr.pdf?blob=publicationFile>
- <sup>14</sup> Rodrigue et al. (2013). The geography of transport systems, Routledge, New York.
- <sup>15</sup> Kille et al. (2008). Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs. Studie zum Vergleich der Verkehrsträger im Rahmen des Logistikprozesses in Deutschland. Auszug aus [https://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/de/dokumente/studien/Wirtschaftliche\\_Rahmenbedingungen\\_des\\_Gueterverkehrs.pdf](https://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/de/dokumente/studien/Wirtschaftliche_Rahmenbedingungen_des_Gueterverkehrs.pdf)
- <sup>16</sup> Europäischer Rechnungshof (2016). Schienengüterverkehr in der EU: noch nicht auf dem richtigen Kurs [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR16\\_08/SR\\_RAIL\\_FREIGHT\\_DE.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR16_08/SR_RAIL_FREIGHT_DE.pdf)
- <sup>17</sup> Jöhrens et al. (2017). Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland. Auszug aus [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/201712\\_ifeu\\_M-Five\\_Roadmap-OH-Lkw\\_SWOT-analysis\\_EN.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/201712_ifeu_M-Five_Roadmap-OH-Lkw_SWOT-analysis_EN.pdf)
- <sup>18</sup> Daimler (no date). eActros goes into customer operation. Auszug aus <https://www.daimler.com/products/trucks/mercedes-benz/eactros.html>
- <sup>19</sup> Daimler (no date). eCanter. Sustainable success thanks to successful sustainability. Auszug aus <https://www.fuso-trucks.de/content/eu/germany/en/models/ecanter.html>
- <sup>20</sup> Volvo Trucks (2020). Volvo Trucks launches a complete range of electric trucks starting in Europe in 2021. Auszug aus <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2020/nov/news-3820395.html>
- <sup>21</sup> DAF (no date). Battery Electric Vehicles. Zero-emissions technology for inner-city distribution. Auszug aus <https://www.daf.com/en/about-daf/sustainability/alternative-fuels-and-drivelines/battery-electric-vehicles>
- <sup>22</sup> MAN Truck & Bus (no date). Fully electric, whisper-quiet and highly efficient: the MAN eTGM. Auszug aus <https://www.man.eu/de/en/truck/models/man-etgm/etgm.html>
- <sup>23</sup> Renault Trucks (2020). Renault Trucks starts serial production of its electric trucks. Auszug aus <https://corporate.renault-trucks.com/en/press-releases/2018-06-26-renault-trucks-unveils-its-second-generation-of-electric-trucks.html>
- <sup>24</sup> Ricardo Energy & Environment (2019). Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. Final project report. Auszug aus [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790\\_jrc\\_circular\\_econ\\_for\\_ev\\_batteries\\_ricardo2019\\_final\\_report\\_pubsy\\_online.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batteries_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf)
- <sup>25</sup> Earl et al. (2018). Analysis of long haul battery electric trucks in the EU. Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives. Amended paper originally presented at the 8th Commercial Vehicle Workshop in Graz, 17-18 May 2018. Auszug aus [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/20180725\\_T%26E\\_Battery\\_Electric\\_Trucks\\_EU\\_FINAL.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/20180725_T%26E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf)

- <sup>26</sup> Bundesgesetzblatt (2013). Verordnung zur Neufassung der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). Auszug aus [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl113s0367.pdf%27%5D#\\_bgbl\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl113s0367.pdf%27%5D\\_1606218053130](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl113s0367.pdf%27%5D#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl113s0367.pdf%27%5D_1606218053130)
- <sup>27</sup> Moultak et al. (2017). Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks\\_ICCT-white-paper\\_26092017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf)
- <sup>28</sup> Sharpe (2018). Zero-emission tractor-trailers in Canada. Auszug aus <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ZETractorTrailers%20Working%20Paper042019.pdf>
- <sup>29</sup> Tesla (kein Datum). Tesla Semi. Auszug aus <https://www.tesla.com/semi>
- <sup>30</sup> Electric Vehicle Database (2021). EV Database Data. Auszug aus <https://ev-database.org/>
- <sup>31</sup> Ricardo Energy & Environment (2019). Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. Auszug aus [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790\\_jrc\\_circular\\_econ\\_for\\_ev\\_batteries\\_ricardo2019\\_final\\_report\\_pubsy\\_online.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batteries_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf)
- <sup>32</sup> Fraunhofer ISI (2017). Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergiebatterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Auszug aus <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>
- <sup>33</sup> Löbbberding et al. (2020). From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types. *World Electric Vehicle Journal*, 11(4). Auszug aus <https://www.mdpi.com/2032-6653/11/4/77>
- <sup>34</sup> Hill et al. (2020). Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final Report for the European Commission, DG Climate Action. Auszug aus <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1>
- <sup>35</sup> Reuters (2020). Tesla-Chef stellt im Vorfeld zum „Battery Day“ Sprung bei Energiedichte in Aussicht. Auszug aus <https://www.reuters.com/article/us-tesla-batteries-idUSKBN25L0MC>
- <sup>36</sup> Bundesrat (2020). Beschluss des Bundesrates. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften. Drucksache 397/20. Auszug aus <http://dipbt.bundestag.de/dip21/brd/2020/0397-20B.pdf>
- <sup>37</sup> Hall et al. (2019). Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EV\\_HDVs\\_Infrastructure\\_20190809.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_HDVs_Infrastructure_20190809.pdf)
- <sup>38</sup> European Union (2019). Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council. Auszug aus <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>
- <sup>39</sup> Thielmann et al. (2020). Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Auszug aus <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>
- <sup>40</sup> Harlow et al. (2019). A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies. *Journal of the Electrochemical Society*, 166(13). Auszug aus <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0981913jes/pdf>

- 
- <sup>41</sup> Europäische Union (2019). Richtlinie (EU) 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates. Auszug aus [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5cf5ebde-d494-40eb-86a7-2131294ccbd9.0005.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5cf5ebde-d494-40eb-86a7-2131294ccbd9.0005.02/DOC_1&format=PDF)
- <sup>42</sup> Kühnel et al. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftsvergleich. Auszug aus <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>
- <sup>43</sup> CharIN (2020). The CharIN path to Megawatt Charging (MCS): Successful connector test event at NREL. Auszug aus <https://www.charin.global/news/the-charin-path-to-megawatt-charging-mcs-successful-connector-test-event-at-nrel/>
- <sup>44</sup> Hildermeier et al. (2020). Electrifying EU city logistics. An analysis of energy demand and charging cost. Auszug aus <https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-logistics-electrification-fv-202011.pdf>
- <sup>45</sup> Gustavsson et al. (2019). Overview of ERS concepts and complementary technologies. Auszug aus <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1301679/FULLTEXT01.pdf>
- <sup>46</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (no date). Elektro-Lastwagen an der langen Leine. Auszug aus <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/elektro-lastwagen/>
- <sup>47</sup> Siemens (2019). eHighway - Lösungen für den elektrifizierten Straßengüterverkehr. Auszug aus <https://press.siemens.com/global/en/feature/ehighway-solutions-electrified-road-freight-transport>
- <sup>48</sup> Siemens AG (2012). ENUBA - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Auszug aus [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba\\_1.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba_1.pdf)
- <sup>49</sup> Siemens AG et al. (2016). ENUBA 2 - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Auszug aus [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2\\_Abschlussbericht\\_V3\\_TIB\\_31-08-2016.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2_Abschlussbericht_V3_TIB_31-08-2016.pdf)
- <sup>50</sup> Siemens AG (2012). ENUBA - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Auszug aus [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba\\_1.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba_1.pdf)
- <sup>51</sup> Wietschel et al. (2017). Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Auszug aus [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS\\_Machbarkeitsstudie\\_Hybrid-Oberleitungs\\_Lkw\\_Bericht\\_2017.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS_Machbarkeitsstudie_Hybrid-Oberleitungs_Lkw_Bericht_2017.pdf)
- <sup>52</sup> Jöhrens et al. (2018). Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. Auszug aus [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw\\_Hemmnisanalyse.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf)
- <sup>53</sup> International Energy Agency (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Auszug aus <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- <sup>54</sup> International Energy Agency (2020). The Oil and Gas Industry in Energy Transitions. Insights from IEA analysis. Auszug aus <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-energy-transitions>
- <sup>55</sup> National Research Council (2013). Transitions to Alternative Vehicles and Fuels, The National Academies Press, Washington, DC/US. Auszug aus <https://www.nap.edu/catalog/18264/transitions-to-alternative-vehicles-and-fuels>

- 
- <sup>56</sup> Daimler Trucks & Buses (2019). Daimler Trucks presents technology strategy for electrification – world premiere of Mercedes-Benz fuel-cell concept truck. Auszug aus <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Trucks-presents-technology-strategy-for-electrification--world-premiere-of-Mercedes-Benz-fuel-cell-concept-truck.xhtml?oid=47453560>
- <sup>57</sup> Hyundai (2020). Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use. Auszug aus <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use/>
- <sup>58</sup> Gnann et al. (2017). Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>59</sup> Adolf et al. (2017). Shell hydrogen study. Energy of the future? Sustainable mobility through fuel cells and H<sub>2</sub>. Auszug aus [https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen/jcr\\_content/par/keybenefits\\_150847174/link.stream/1496312627865/6a3564d61b9aff43e087972db5212be68d1fb2e8/shell-h2-study-new.pdf](https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen/jcr_content/par/keybenefits_150847174/link.stream/1496312627865/6a3564d61b9aff43e087972db5212be68d1fb2e8/shell-h2-study-new.pdf)
- <sup>60</sup> Internationale Energie-Agentur (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Auszug aus <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- <sup>61</sup> U.S. Department of Energy (2018). Hydrogen Refueling Analysis of Fuel Cell Heavy-Duty Vehicles Fleet. Auszug aus <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/08/f54/fcto-truck-workshop-2018-9-elgowainy.pdf>
- <sup>62</sup> Staffell et al. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environmental Science*, 2019(12). Auszug aus <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2019/ee/c8ee01157e>
- <sup>63</sup> Internationale Energie-Agentur (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Auszug aus <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- <sup>64</sup> National Renewable Energy Laboratory (2014). Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs. Auszug aus <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/58564.pdf>
- <sup>65</sup> Internationale Energie-Agentur (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Auszug aus <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- <sup>66</sup> Delgado et al. (2017). Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020-2030 timeframe. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential\\_ICCT-white-paper\\_14072017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf)
- <sup>67</sup> Plötz et al. (2018). Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr - Handlungsempfehlungen für Deutschland. Auszug aus <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Climate-friendly-road-freight-transport.pdf>
- <sup>68</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Auszug aus [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html)
- <sup>69</sup> Searle et al. (2018). What is the role for renewable methane in European decarbonization? Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Role\\_Renewable\\_Methane\\_EU\\_20181016.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Role_Renewable_Methane_EU_20181016.pdf)
- <sup>70</sup> CNG Europe (2018). Average high-calorific CNG price in Germany. Auszug aus <http://cngueurope.com/countries/germany/>
- <sup>71</sup> Zukunft Erdgas (2019). Durchschnittliche Tankstellenpreise für Erdgas (Stand: Jahresdurchschnitt 2019). Auszug aus <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-fahren-rechnet-sich/>

- 
- <sup>72</sup> Europäisches Komitee für Normung (2017). Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 2: Automotive fuels specification. Auszug aus [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP\\_PROJECT:41008&cs=1D7CD581175157FBF537040E3716A707E](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:41008&cs=1D7CD581175157FBF537040E3716A707E)
- <sup>73</sup> Volvo Trucks (kein Datum). The New Gas-Powered Volvo FH LNG. Auszug aus <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/new-heavy-duty-range/volvo-fh/volvo-fh-lng.html>
- <sup>74</sup> U.S. Department of Energy (kein Datum). Alternative Fuels Data Center. Natural gas vehicles. Auszug aus [https://afdc.energy.gov/vehicles/natural\\_gas.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/natural_gas.html)
- <sup>75</sup> Transport & Environment (2020). Electrofuels? Yes, we can ... if we're efficient. Auszug aus [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_12\\_Briefing\\_feasibility\\_study\\_renewables\\_decarbonisation.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_12_Briefing_feasibility_study_renewables_decarbonisation.pdf)
- <sup>76</sup> Fraunhofer ISE (2020). Jährliche Nettostromerzeugung in Deutschland in 2020. Auszug aus <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.html?l=en&c=DE&year=2020&interval=year&source=all>
- <sup>77</sup> Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020). Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Auszug aus [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB\\_V111.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB_V111.pdf)
- <sup>78</sup> Meszler et al. (2018). European heavy-duty vehicles: Cost-effectiveness of fuel-efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025-2030 timeframe. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU-HDV-tech-2025-30\\_20180424\\_updated.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-HDV-tech-2025-30_20180424_updated.pdf)
- <sup>79</sup> U.S. Department of Energy (2019). Hydrogen Class 8 Long Haul Truck Targets. Auszug aus [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19006\\_hydrogen\\_class8\\_long\\_haul\\_truck\\_targets.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19006_hydrogen_class8_long_haul_truck_targets.pdf)
- <sup>80</sup> Europäische Kommission (2013). Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change (TRACCS). Auszug aus <https://tracccs.emisia.com/>
- <sup>81</sup> Roland Berger (2020). Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Duty's High Performance Green Solution. Auszug aus [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/201211%20FCH%20HDT%20-%20Study%20Report\\_final\\_vs.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/201211%20FCH%20HDT%20-%20Study%20Report_final_vs.pdf)
- <sup>82</sup> BloombergNEF (2020). Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. Auszug aus <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- <sup>83</sup> Lutsey et al. (2019). Update on electric vehicle costs in the United States through 2030. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV\\_cost\\_2020\\_2030\\_20190401.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV_cost_2020_2030_20190401.pdf)
- <sup>84</sup> Ricardo Energy & Environment (2019). Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. Auszug aus [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790\\_jrc\\_circular\\_econ\\_for\\_ev\\_batteries\\_ricardo2019\\_final\\_report\\_pubsy\\_online.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batteries_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf)
- <sup>85</sup> Mercedes-Benz (2020). Strategie-Update. Auszug aus <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/presentationen/daimler-ir-mercedes-benz-strategy-update-2020-presentation.pdf>
- <sup>86</sup> Tesla (2020). Battery Day. Auszug aus <https://tesla-share.thron.com/content/?id=96ea71cf-8fda-4648-a62c-753af436c3b6&pkey=S1dbei4>

- 
- <sup>87</sup> Freyr (2021). Clean Battery Solutions for a Better Planet. Auszug aus <https://www.freyrbattery.com/assets/Documents/FREYR-Investor-Presentation-20210129.pdf>
- <sup>88</sup> Volkswagen (2021). Power Day: Volkswagen presents technology roadmap for batteries and charging up to 2030. Auszug aus <https://www.volkswagenag.com/en/news/2021/03/power-day--volkswagen-presents-technology-roadmap-for-batteries-.html#>
- <sup>89</sup> Hill et al. (2016). Improving understanding of technology and costs for CO2 reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Auszug aus [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/ldv\\_co2\\_technologies\\_and\\_costs\\_to\\_2030\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/ldv_co2_technologies_and_costs_to_2030_en.pdf)
- <sup>90</sup> Daimler Trucks & Buses (2019). Daimler Trucks presents technology strategy for electrification – world premiere of Mercedes-Benz fuel-cell concept truck. Auszug aus <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Trucks-presents-technology-strategy-for-electrification--world-premiere-of-Mercedes-Benz-fuel-cell-concept-truck.xhtml?oid=47453560>
- <sup>91</sup> Volvo Group (2020). Volvo Trucks launches a complete range of electric trucks starting in Europe in 2021. Auszug aus <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2020/nov/news-3820395.html>
- <sup>92</sup> MAN Truck & Bus (2020). MAN presents Zero-Emission Roadmap. Auszug aus <https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-presents-zero-emission-roadmap/>
- <sup>93</sup> Renault Trucks (2021). Renault Trucks to offer an electric range for each market segment from 2023. Auszug aus <https://www.renault-trucks.com/en/newsroom/press-releases/renault-trucks-offer-electric-range-each-market-segment-2023>
- <sup>94</sup> FCH JU and Hydrogen Europe (2020). Coalition Statement on the deployment of fuel cell and hydrogen heavy-duty trucks in Europe. Auszug aus <https://hydrogeneurope.eu/news/coalition-statement-another-milestone-uptake-fuel-cell-trucks>
- <sup>95</sup> ACEA (2019). Consolidated Commercial Vehicle Registrations - By Country. Auszug aus [https://www.acea.be/uploads/statistic\\_documents/2019\\_by\\_country\\_and\\_type\\_EU%2BEFTA.xlsx](https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/2019_by_country_and_type_EU%2BEFTA.xlsx)
- <sup>96</sup> ACEA (2019). Consolidated Commercial Vehicle Registrations - By Manufacturer. Auszug aus [https://www.acea.be/uploads/statistic\\_documents/2019\\_by\\_manuf\\_and\\_type\\_EU%2BEFTA.xlsx](https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/2019_by_manuf_and_type_EU%2BEFTA.xlsx)
- <sup>97</sup> Hill et al. (2015). Light weighting as a means of improving Heavy Duty Vehicles' energy efficiency and overall CO2 emissions. Auszug aus [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/heavy/docs/hdv\\_lightweighting\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_lightweighting_en.pdf)
- <sup>98</sup> Department for Transport (2020). RFS0125: Percentage empty running and loading factor by type and weight of vehicle. Auszug aus [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/898715/rfs0125.ods](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/898715/rfs0125.ods)
- <sup>99</sup> Agora Verkehrswende et al. (2018). PtG/PtL-Rechner. Auszug aus <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/ptg-ptl-calculator/>
- <sup>100</sup> Searle et al. (2018). Decarbonization potential of electrofuels in the European Union. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Electrofuels\\_Decarbonization\\_EU\\_20180920.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Electrofuels_Decarbonization_EU_20180920.pdf)

- 
- <sup>101</sup> Agora Verkehrswende et al. (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Kraftstoffe. Auszug aus [https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynKost\\_Study\\_EN\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf)
- <sup>102</sup> Destatis (2019). Strompreise für Nicht-Haushalte: Deutschland, Halbjahre, Jahresverbrauchsklassen, Preisarten. Auszug aus <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61243-0006&language=de#abreadcrumb>
- <sup>103</sup> Hydrogen Council (2021). Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Auszug aus <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>
- <sup>104</sup> Gas for Climate (2020). European Hydrogen Backbone. How a dedicated hydrogen infrastructure can be created. Auszug aus [https://gasforclimate2050.eu/sdm\\_downloads/european-hydrogen-backbone/](https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone/)
- <sup>105</sup> U.S. Department of Energy (2019). DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. Auszug aus [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001\\_hydrogen\\_liquefaction\\_costs.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf)
- <sup>106</sup> Hydrogen Council (2020). Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. Auszug aus [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf)
- <sup>107</sup> Runge et al. (2020). Economic Comparison of Electric Fuels Produced at Excellent Locations for Renewable Energies: A Scenario for 2035. Retrieved from [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3623514](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3623514)
- <sup>108</sup> Pfennig et al. (2017). Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H2-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen. Auszug aus [http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/includes/reports/Teilbericht\\_Potenziale\\_PtL\\_H2\\_Importe\\_FraunhoferIWES.pdf](http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/includes/reports/Teilbericht_Potenziale_PtL_H2_Importe_FraunhoferIWES.pdf)
- <sup>109</sup> Mottschall et al. (2019). Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Auszug aus [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-19\\_texte\\_114-2019\\_energieversorgung-verkehr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-19_texte_114-2019_energieversorgung-verkehr.pdf)
- <sup>110</sup> Fashihi et al. (2016). Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. Auszug aus <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216310761>
- <sup>111</sup> Büniger et al. (2016). Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr. Auszug aus [http://www.lbst.de/ressources/docs2016/1605\\_CNG\\_LNG\\_Endbericht\\_public.pdf](http://www.lbst.de/ressources/docs2016/1605_CNG_LNG_Endbericht_public.pdf)
- <sup>112</sup> Destatis (2020). Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen bis September 2020. Auszug aus [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Publikationen/Energiepreise/energiepreisentwicklung-xlsx-5619001.xlsx?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Publikationen/Energiepreise/energiepreisentwicklung-xlsx-5619001.xlsx?__blob=publicationFile)
- <sup>113</sup> ACEA (2019). ACEA tax guide 2019 edition. Auszug aus [https://www.acea.be/uploads/news\\_documents/ACEA\\_Tax\\_Guide\\_2019.pdf](https://www.acea.be/uploads/news_documents/ACEA_Tax_Guide_2019.pdf)
- <sup>114</sup> Zoll (2020). Steuersatz für Nutzfahrzeuge. Auszug aus [https://www.zoll.de/DE/Unternehmen/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerhoehe/steuerhoehe\\_node.html](https://www.zoll.de/DE/Unternehmen/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerhoehe/steuerhoehe_node.html)

- 
- <sup>115</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). Staatlich veranlasste Bestandteile des Strompreises. Auszug aus <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/strompreise.html>
- <sup>116</sup> Bundesamt für Güterverkehr (2016). Struktur der Unternehmen des gewerblichen Straßengüterverkehrs und des Werkverkehrs 2015 - überarbeitet. Auszug aus [https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Unternehmen/Ustat/Ustat\\_2015.html?nn=13102](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Unternehmen/Ustat/Ustat_2015.html?nn=13102)
- <sup>117</sup> Destatis (2019). Destatis (2019). Strompreise für Nicht-Haushalte: Deutschland, Jahre, Jahresverbrauchsklassen, Preisbestandteile. Auszug aus <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61243-0006&language=de#abreadcrumb>
- <sup>118</sup> Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019). Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG). Auszug aus [https://www.gesetze-im-internet.de/enwg\\_2005/EnWG.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/EnWG.pdf)
- <sup>119</sup> Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (ErneuerbareEnergien-Gesetz - EEG 2021). Auszug aus [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/EEG\\_2021.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2021.pdf)
- <sup>120</sup> Internationale Energie-Agentur (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Auszug aus <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- <sup>121</sup> Merten et al. (2020). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Auszug aus <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>
- <sup>122</sup> Matthes et al. (2020). Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe. Eine Überblicksuntersuchung. Auszug aus <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe.pdf>
- <sup>123</sup> Agora Energiewende und AFRY Management Consulting (2021). No-regret hydrogen. Charting early steps for H<sub>2</sub> infrastructure in Europe. Auszug aus [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2021/2021\\_02\\_EU\\_H2Grid/A-EW\\_203\\_No-regret-hydrogen\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2021/2021_02_EU_H2Grid/A-EW_203_No-regret-hydrogen_WEB.pdf)
- <sup>124</sup> Rose (2020). Modeling a potential hydrogen refueling station network for fuel cell heavy-duty vehicles in Germany in 2050. Auszug aus <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000119521/74256597>
- <sup>125</sup> Christensen (2020). Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe. Auszug aus [https://theicct.org/sites/default/files/publications/final\\_icct2020\\_assessment\\_of%20hydrogen\\_production\\_costs%20v2.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/final_icct2020_assessment_of%20hydrogen_production_costs%20v2.pdf)
- <sup>126</sup> Brändle et al. (2020). Estimating Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen. Auszug aus [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2020/11/EWI\\_WP\\_20-04\\_Estimating\\_long-term\\_global\\_supply\\_costs\\_for\\_low-carbon\\_Schoenfish Braendle Schulte-1.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2020/11/EWI_WP_20-04_Estimating_long-term_global_supply_costs_for_low-carbon_Schoenfish Braendle Schulte-1.pdf)
- <sup>127</sup> Zoll (2020). Steuersätze für Energieerzeugnisse nach § 2 Abs. 1 EnergieStG. Auszug aus [https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Energie/Grundsaeetze-Besteuerung/Steuerhoehe/steuerhoehe\\_node.html](https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Energie/Grundsaeetze-Besteuerung/Steuerhoehe/steuerhoehe_node.html)

- 
- <sup>128</sup> Zoll (2020). Befristete abweichende Steuersätze für Erdgase und Flüssiggase als Kraftstoff. Auszug aus [https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchsteuern/Energie/Grundsaeetze-Besteuerung/Steuerhoehe/steuerhoehe\\_node.html](https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchsteuern/Energie/Grundsaeetze-Besteuerung/Steuerhoehe/steuerhoehe_node.html)
- <sup>129</sup> Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019). Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Bundesfernstraßenmautgesetz - BFStrMG). Auszug aus <https://www.gesetze-im-internet.de/bfstrmg/BFStrMG.pdf>
- <sup>130</sup> Europäische Union (2019). Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlaments und des Rates. Auszug aus <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>
- <sup>131</sup> Rat der Europäischen Union (2020). Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 1999/62/EG über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge - Mandat für Verhandlungen mit dem Europäischen Parlament. Auszug aus <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13827-2020-INIT/en/pdf>
- <sup>132</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>133</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018). Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO<sub>2</sub>-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. Auszug aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-maut-harmonisierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-maut-harmonisierung.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>134</sup> Deutscher Bundestag (2020). Ergänzung zu den Beschlussempfehlungen des Haushaltsausschusses (8. Ausschuss) zu dem Entwurf eines Gesetzes über die Feststellung des Bundeshaushaltsplans für das Haushaltsjahr 2021 (Haushaltsgesetz 2021). Auszug aus <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/233/1923324.pdf>
- <sup>135</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018). Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO<sub>2</sub>-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. Aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-maut-harmonisierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-maut-harmonisierung.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>136</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>137</sup> Destatis (2019). Absatz von versteuerten Energieerzeugnissen. Aus <https://www.destatis.de/DE/Themen/Staat/Steuern/Verbrauchsteuern/Tabellen/mineraloel.html>
- <sup>138</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>139</sup> Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (2021). Ausnahmen vom CO<sub>2</sub>-Preis für den Straßengüterverkehr? Aus [https://foes.de/publikationen/2021/2021-03\\_FOES\\_Policy-Brief-BEHG-Ausnahmen.pdf](https://foes.de/publikationen/2021/2021-03_FOES_Policy-Brief-BEHG-Ausnahmen.pdf)

- 
- <sup>140</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Aus [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile)
- <sup>141</sup> California Air Resources Board (ohne Datum). Accessible clean transportation options SB 350. Aus <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/accessible-clean-transportation-options-sb-350>
- <sup>142</sup> Southern California Edison Company (ohne Datum). Charge Ready Transport Program. Aus <https://www.sce.com/business/electric-cars/charge-ready-transport>
- <sup>143</sup> Verband der Automobilindustrie (2021). Branchenübergreifendes Konsortium reicht Förderantrag zum Megawattladen für Nutzfahrzeuge ein. Aus <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/210309-Branchen-bergreifendes-Konsortium-reicht-F-rderantrag-zum-Megawattladen-f-r-Nutzfahrzeuge-ein.html>
- <sup>144</sup> Gesetze im Internet (2020). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Aus [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/EEG\\_2021.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2021.pdf)
- <sup>145</sup> Europäische Union (2003). Richtlinie 2003/96/EG des Rates zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom. Aus <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=DE>
- <sup>146</sup> Rat der Europäischen Union (2021). Vorschlag für einen Durchführungsbeschluss des Rates zur Ermächtigung der Niederlande, gemäß Artikel 19 der Richtlinie 2003/96/EG einen ermäßigten Steuersatz auf Strom anzuwenden, der an [Ladestationen für] Elektrofahrzeuge geliefert wird. Aus <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5566-2021-INIT/de/pdf>
- <sup>147</sup> Rat der Europäischen Union (2021). Durchführungsbeschluss des Rates zur Ermächtigung der Niederlande, einen ermäßigten Steuersatz auf Strom anzuwenden, der an Ladestationen für Elektrofahrzeuge geliefert wird - Annahme. Aus [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST\\_5996\\_2021\\_INIT&from=DE](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST_5996_2021_INIT&from=DE)
- <sup>148</sup> Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (2021). Zehn klimaschädliche Subventionen sozial gerecht abbauen - ein Zeitplan. Aus [https://foes.de/publikationen/2021/2021-02\\_FOES\\_Klimaschaedliche\\_Subventionen\\_sozial\\_gerecht\\_abbauen.pdf](https://foes.de/publikationen/2021/2021-02_FOES_Klimaschaedliche_Subventionen_sozial_gerecht_abbauen.pdf)
- <sup>149</sup> Destatis (2021). Verbraucherpreisindex für Deutschland - Lange Reihen ab 1948 - Februar 2021. Aus <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Verbraucherpreisindex/Publikationen/Downloads-Verbraucherpreise/verbraucherpreisindex-lange-reihen-pdf-5611103.html>
- <sup>150</sup> Daimler Trucks & Buses (2020). Daimler Trucks presents technology strategy for electrification – world premiere of Mercedes-Benz fuel-cell concept truck. Aus <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Trucks-presents-technology-strategy-for-electrification--world-premiere-of-Mercedes-Benz-fuel-cell-concept-truck.xhtml?oid=47453560>
- <sup>151</sup> Scania (2021). Scania's commitment to battery electric vehicles. Aus <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2021/Scania's-commitment-to-battery-electric-vehicles.html>
- <sup>152</sup> MAN Truck & Bus (2021). Executive Board and General Works Council agree on Key Issues Paper to realign the Company. Aus <https://press.mantruckandbus.com/corporate/executive-board-and-general-works-council-agree-on-key-issues-paper-to-realign-the-company/>

- 
- <sup>153</sup> Renault Trucks (2021). Renault Trucks bietet ab 2023 eine elektrische Baureihe für jedes Marktsegment an. Aus <https://www.renault-trucks.de/pressemitteilungen/renault-trucks-bietet-ab-2023-e-lkw-fuer-jedes-marktsegment.html>
- <sup>154</sup> California Air Resources Board (2020). Proposed advanced clean truck regulation. Appendix A - proposed regulation order. Aus <https://ww3.arb.ca.gov/regact/2019/act2019/30dayatta.pdf>
- <sup>155</sup> Milieu (2020). Phasing-out sales of internal combustion engine vehicles. Scoping study by Milieu for Transport & Environment. Aus [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_03\\_ICE\\_phase-out\\_legal\\_feasibility\\_study.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_03_ICE_phase-out_legal_feasibility_study.pdf)
- <sup>156</sup> Europäische Union (2019). Beschluss (EU) 2019/984 des Europäischen Parlaments und des Rates. Aus <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=DE>
- <sup>157</sup> Bundesrat (2020). Beschluss des Bundesrates. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften. Drucksache 397/20. Aus <http://dipbt.bundestag.de/dip21/brd/2020/0397-20B.pdf>
- <sup>158</sup> Otten et al. (2019). Charging infrastructure for electric vehicles in city logistics. Aus <https://www.cedelft.eu/en/publications/2356/charging-infrastructure-for-electric-vehicles-in-city-logistics>
- <sup>159</sup> Rijksoverheid (2020). Kabinet komt ondernemers tegemoet bij overstap op schone bestelbus of vrachtwagen. Aus <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/10/05/kabinet-komt-ondernemers-tegemoet-bij-overstap-op-schone-bestelbus-of-vrachtwagen>
- <sup>160</sup> Stadt Amsterdam (2019). Clean Air Action Plan. Aus [https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/867636/clean\\_air\\_action\\_plan\\_1.pdf](https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/867636/clean_air_action_plan_1.pdf)