



# Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen und Aufbau von Ladeinfrastruktur – Entwicklungsperspektiven und Handlungsempfehlungen aus Sicht von Nutzfahrzeugherstellern und Ladeinfrastrukturexperten

1. Teilbericht des Forschungsvorhabens  
„ELV LIVE – Begleitforschung zum Einsatz  
batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge  
im logistischen Regelbetrieb“  
FKZ 16EM6003-1

Berlin, Sept. 2024

## Autorinnen und Autoren

Florian Hacker  
Juliette Le Corguillé  
Dr. Katharina Göckeler  
Lukas Minnich  
Lukas Ziegler  
Theresa Dolinga

## Kontakt

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

## Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71  
79017 Freiburg

## Hausadresse

Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg  
Telefon +49 761 45295-0

## Büro Berlin

Borkumstraße 2  
13189 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0

## Büro Darmstadt

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### **Danksagung**

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich herzlich bei den Vertretern von Daimler Truck, Traton, Volvo, DAF, Tesla, Milence und der NOW für Ihre Mitwirkung an der Studie im Rahmen von Einzelinterviews und einem gemeinsamen Workshop. Ihre Einschätzungen zu den Marktperspektiven von elektrischen Lkw und der erforderlichen Ladeinfrastruktur bilden die Grundlage für den vorliegenden Bericht.

### **Zitierempfehlung**

Florian Hacker, Juliette Le Corguillé, Dr. Katharina Göckeler, Lukas Minnich, Lukas Ziegler, Theresa Dolinga (2024): Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen und Aufbau von Ladeinfrastruktur – Entwicklungsperspektiven und Handlungsempfehlungen aus Sicht von Nutzfahrzeugherstellern und Ladeinfrastrukturexperten, 1. Teilbericht des Forschungsvorhabens ELV LIVE, Öko-Institut.

## Zusammenfassung

Der Straßengüterverkehr stellt weltweit nach dem Pkw-Verkehr den zweitwichtigsten Verursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor dar. Der Antrieb mit Dieselmotoren dominiert den Lkw-Verkehr. Zahlreiche wissenschaftliche Analysen, aber auch Entwicklungsaktivitäten der Hersteller und deren Prognosen legen nahe, dass der batterieelektrische Antrieb auch bei schweren Nutzfahrzeugen eine zentrale Technologie für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs darstellt. Dennoch bleiben zahlreiche Fragen zur konkreten Umsetzung und zur erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur offen. Zudem weisen die Einschätzungen zu vielversprechenden Technologiepfaden teilweise weiterhin je nach Akteursgruppe noch sehr unterschiedliche Positionen und Wissensstände auf. Dieses Papier gibt auf Basis von Gesprächen mit Marktakteuren Antworten auf diese offenen Fragen und stellt die verschiedenen Perspektiven dar.

### **Perspektiven von E-Lkw und notwendige Ladeinfrastruktur aus Sicht von Nutzfahrzeugherstellern und Ladeinfrastrukturexperten**

Dieses Papier gibt zunächst einen Überblick über die Entwicklung des Lkw-Sektors in den wichtigsten Märkten weltweit. Anschließend werden die Perspektiven von alternativen Antrieben bei schweren Nutzfahrzeugen mit einem Fokus auf den batterieelektrischen Antrieb im deutschen bzw. europäischen Markt diskutiert und die notwendige Ladeinfrastruktur sowie die damit verbundenen Herausforderungen thematisiert und Handlungsempfehlungen gegeben.

Die dargestellten Ergebnisse beruhen auf den Aussagen von insgesamt fünf in Europa aktiven Nutzfahrzeugherstellern, die zusammen etwa 90 % des europäischen Nutzfahrzeugmarkts abdecken. Die Vertreter der Hersteller wurden im Rahmen von 60- bis 90-minütigen leitfragengestützten Interviews befragt. Die anonymisierten Ergebnisse der Interviews und daraus ableitenden Handlungsempfehlungen wurden im Rahmen eines gemeinsamen Workshops im Juni 2024 vertieft. Die Gespräche fanden im Zeitraum von Ende 2023 bis Mitte 2024 statt. In dem Prozess wurden Gespräche mit Herstellervertretern von DAF, Daimler Truck, Tesla, Traton (Scania, MAN) und Volvo Group Trucks (Volvo Trucks, Renault Trucks) geführt. Zusätzlich wurden Vertreter des Infrastrukturunternehmens Milence sowie der deutschen Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) mit einem Schwerpunkt auf die notwendige Ausgestaltung der Ladeinfrastruktur befragt. Die dargestellten Aussagen spiegeln nicht zwangsweise die Einschätzungen der Autor\*innen wider.

### **Entwicklungstendenzen im internationalen Lkw-Markt**

Der internationale Lkw-Markt wird weiter vom Dieselantrieb dominiert. In den letzten Jahren ist aber eine starke Dynamik bei den Neuzulassungen von batterieelektrischen Lkw zu beobachten. China ist mit etwa 92 % mit Abstand der größte Markt für emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge. Die EU liegt an zweiter Stelle mit Deutschland als Land mit dem höchsten Anteil an den Neuzulassungen. Zentrale Treiber für die Dynamik beim Absatz von E-Lkw sind in wichtigen Absatzmärkten verschärfte CO<sub>2</sub>-Standards für schwere Nutzfahrzeuge sowie monetäre Anreize für emissionsfreie Antriebe durch die direkte Förderung der Beschaffung bzw. Vorteile bei Abgaben und Steuern.

### **Technische Eigenschaften und Perspektiven von batterieelektrischen Lkw (BET)**

Fortschritte bei der Batterietechnologie machen schon heute den Einsatz von BET jenseits des Regionalverkehrs technisch möglich. Die Hauptanwendung von Batterie-Lkw verlagert sich auf Grund von v. a. Betriebskostenvorteilen jedoch voraussichtlich schon bald vom Regional- auf den

Fernverkehr. Die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur als zentraler Einflussfaktor und Engstelle zugleich wird die Geschwindigkeit des Markthochlaufs bestimmen.

### **Technische Eigenschaften und Potenziale weiterer Antriebs- und Kraftstoffalternativen**

Die H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle zeigt Effizienzvorteile gegenüber dem Verbrennungsmotor, angesichts fehlender Marktreife wird aber zunächst eher der Einsatz von Wasserstoff im Verbrennungsmotor erwartet. Gleichzeitig wird auf die grundsätzliche H<sub>2</sub>-Nutzungskonkurrenz mit anderen Nachfragesektoren verwiesen. Eine Hybridisierung des verbrennungsmotorischen Lkw-Antriebs wird von den befragten Nutzfahrzeugherstellern angesichts der beschränkten Effizienzsteigerungspotenziale nicht mehr als Lösungsoption verfolgt. Alternative Kraftstoffe (Biokraftstoffe, synthetische Kraftstoffe) wurden nicht als Bestandteil der Technologiestrategie der Hersteller benannt.

### **Herstellerstrategien und erwarteter Markthochlauf für E-Lkw**

Die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte werden als Haupttreiber und zentraler Orientierungspunkt für die Produktstrategie genannt. Die Prognosen für E-Lkw aus den Clean-Room-Gesprächen des BMDV, die im Jahr 2022 in Deutschland mit Nutzfahrzeugherstellern durchgeführt wurden, werden bestätigt bzw. teilweise eine noch dynamischere Marktentwicklung erwartet. Insbesondere mit der Einführung von elektrischen Fern-Lkw ab 2024 wird eine deutliche Belebung verbunden. Bereits im Jahr 2030 wird ein Anteil von batterieelektrischen Lkw an den Neuzulassungen von über 50 % angestrebt und der batterieelektrische Antrieb als langfristig dominierende Technologie bei Lkw gesehen. Die Förderung der Fahrzeuganschaffung wird im Vergleich zur betriebskostenrelevanten CO<sub>2</sub>-Bepreisung (inkl. der Lkw-Maut) von den Herstellern als weniger bedeutender Anreiz bewertet. E-Lkw-Anbieter könnten insbesondere vor Erreichen der CO<sub>2</sub>-Zielwerte im Jahr 2030 versuchen, Marktanteile zu Lasten etablierter Hersteller zu gewinnen.

### **Herstellerstrategien zu weiteren Antriebs- und Kraftstoffalternativen**

Alle Hersteller erwarten eine Dominanz des batterieelektrischen Lkw im zukünftigen Straßengüterverkehr. Gleichzeitig engagieren sich alle Hersteller auch in der Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Antrieben (in Kombination mit Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor). Die Mehrheit der Hersteller sieht auch längerfristig keine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von wasserstoffbetriebenen Lkw und lediglich Anwendungen in Nischenmärkten, da sie das für den Massenmarkt notwendige Wasserstoffpreisniveau ohne anhaltende Subventionen für nicht wahrscheinlich erreichbar erachten. Ein einzelner Hersteller nennt ein relevantes Potenzial von wasserstoffbetriebenen Lkw in der Größenordnung von 10 bis 20 % Marktanteil. Plug-in-Hybridantriebe sowie alternative biogene und strombasierte Kraftstoffe wurden in keinem der Gespräche als Lösungsoption für die Dekarbonisierung von schweren Lkw erwähnt.

### **Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw**

#### *Allgemein*

Die Verfügbarkeit einer ausfallsicheren Ladeinfrastruktur ist die zentrale Voraussetzung für den Markthochlauf von E-Lkw. Ein Vorlauf des Ausbaus gegenüber dem geplanten Anstieg der E-Lkw-Zahlen muss immer sichergestellt werden und eine temporäre Überdimensionierung wird als tolerierbar eingeschätzt.

### *Depotladen*

Die Ladeinfrastruktur im Depot bildet einen zentralen Baustein der Elektrifizierung. Die Bedeutung kann bisher aber nur anhand von Simulationen und wenigen Praxisbeispielen abgeschätzt werden. Die Netzanbindung stellt sowohl hinsichtlich vorhandener Anschlussleistung als auch der Umsetzung neuer bzw. leistungsstärkerer Netzanschlüsse die größte Restriktion dar.

### *Öffentliches Laden*

Öffentliche (Schnell-)ladeinfrastruktur ist insbesondere für den Fernverkehr relevant und muss vorrangig entlang und in der Nähe des Autobahnnetzes aufgebaut werden. Ladeparks werden voraussichtlich eine Kombination aus CCS- und MCS-Lademöglichkeiten umfassen – mit zunehmendem Schwerpunkt auf MCS-fähigen Ladepunkten, insbesondere für den Fernverkehr. Die Vorgaben der AFIR stellen eine gute Grundabdeckung für Europa dar, für Deutschland muss aber bereits heute ein deutlich höherer Ausbau realisiert werden. Es wird eine vorwiegend privatwirtschaftliche Umsetzung der öffentlichen Ladeinfrastruktur in Deutschland erwartet. Insbesondere der notwendige schnelle Aufbau in den kommenden 10 Jahren wird v. a. mit Blick auf den notwendigen Netzanschluss als herausfordernd bewertet. Der Mangel an geeigneten Flächen mit ausreichender Netzanschlussleistung und die Notwendigkeit von längerfristigen Konzessionen zur wirtschaftlichen Standorterschließung verschärfen die Problematik.

## **Markthochlauf von E-Lkw – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen**

### *1: Netzanschluss von Ladeinfrastruktur*

Begrenzte Netzanschlusskapazität und lange Vorlaufzeiten bis zur Umsetzung des Netzanschlusses stellen die größte Limitierung für den Aufbau von leistungsfähiger Ladeinfrastruktur dar.

- Es ist eine vorausschauende Netzausbauplanung notwendig, die sich an Zielzuständen orientiert sowie eine kurzfristige Schaffung von Transparenz über verfügbare Netzkapazitäten.

### *2: Aufbau von privater Ladeinfrastruktur:*

Der Aufbau von Depotladeinfrastruktur wird stark durch standortspezifische Rahmenbedingungen erschwert und bisher liegt nur wenig Praxiserfahrung vor, die belastbare Prognose der realisierbaren Potenziale erlaubt.

- Eine Sensibilisierung von Transportunternehmen für teilweise lange Vorlaufzeiten des Ladeinfrastrukturausbaus, eine Förderung bei hohen Netzanschlusskosten und der Ausbau des Beratungsangebots sollte umgesetzt werden.

### *3: Langfristig verlässliche Rahmenbedingungen*

Regulatorische und finanzielle Rahmenbedingungen, die den Umstieg auf E-Lkw und den Aufbau der Ladeinfrastruktur für die betroffenen Akteure sicherstellen, sind politisch nicht abgesichert.

- Bestehende Rahmenbedingungen (u. a. AFIR, CO<sub>2</sub>-Flottenzielwert, CO<sub>2</sub>-Preis) sollten ambitioniert und langfristig fortgeschrieben werden und um weitere Instrumente (z. B. E-Lkw-Quote für Flottenbetreiber) ergänzt werden.

#### 4: Aufbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur

Die Vorgaben der AFIR schaffen lediglich eine Basisabdeckung für öffentliche Ladeinfrastruktur und geben keine langfristige Planungssicherheit.

- Die AFIR sollte fortgeschrieben und die Verbindlichkeit der nationalen Ziele in Deutschland erhöht durch geeignete Sanktionierungsmöglichkeiten ergänzt werden. Zudem sollte sich Förderung schwerpunktmäßig auf MCS-Ladepunkten konzentrieren.

#### 5: Change Management bei Anwendern

Die Einführung von E-Lkw erfordert Transformationsprozesse bei zahlreichen Akteuren und setzt insbesondere kleine Transportunternehmen mit geringen Margen unter Druck.

- Die Beratung von Transportunternehmen, die sich an den jeweiligen Gegebenheiten orientiert, sollte ausgebaut werden

#### 6: Flächen für (öffentliche) Ladeinfrastruktur

Es fehlen ausreichend Flächen für den Aufbau von Ladeparks entlang von Fernstraßen und der Flächendruck auf bestehende Stellplatzflächen erhöht sich durch den Ausbau von Ladeinfrastruktur.

- Politik und Verwaltung sollte sich stärker für die Gewinnung von Stellplatzflächen entlang von Fernverkehrskorridoren einsetzen sowie Informationen zu geeigneten Flächen öffentlich bereitgestellt werden.

### Hintergründe zur vorliegenden Publikation

Das vorliegende Papier ist im Rahmen des Forschungsprojekts ELV-LIVE<sup>1</sup> entstanden, das den frühen Einsatz von batterieelektrischen Lkw im logistischen Regelbetrieb im Zeitraum von 2023 bis 2025 wissenschaftlich begleitet. Vor diesem Hintergrund sei darauf verwiesen, dass das vorliegende Papier vorrangig die Perspektive der Fahrzeugindustrie darstellt, auch wenn teilweise auch anwenderbezogene Aspekte thematisiert werden. Im laufenden Forschungsvorhaben werden über die Begleitung von Fallstudienpartnern und die standardisierte Befragung von Transportunternehmen auch Erkenntnisse zu den Erfahrungen und Perspektiven der Anwender mit alternativen Antrieben erfasst. Diese werden in vergleichbaren Publikationen zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt veröffentlicht und somit eine weitere wichtige Perspektive auf die Transformation des Nutzfahrzeugmarkts beleuchten.

---

<sup>1</sup> Projektwebsite: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elv-live>

## Abstract

Road freight transport is the second most important source of CO<sub>2</sub> emissions in the transport sector worldwide after passenger car traffic. Diesel-powered internal combustion engines dominate truck traffic. Numerous scientific analyses, as well as manufacturers' development activities and their forecasts, suggest that battery electric drive systems are also a key technology for decarbonizing road freight transport in heavy duty vehicles. Nevertheless, numerous questions remain unanswered regarding the specific implementation and the required energy supply infrastructure. In addition, the assessments of promising technology paths still differ greatly depending on the stakeholder group. Based on discussions with market players, this paper provides answers to these open questions and presents the various perspectives.

### **Prospects for e-trucks and necessary charging infrastructure from the perspective of vehicle manufacturers and charging infrastructure experts**

This paper first provides an overview of the development of the truck sector in the most important markets worldwide. It then discusses the prospects for alternative drive systems for heavy duty vehicles with a focus on battery electric drive systems in the German and European markets, addresses the necessary charging infrastructure and the associated challenges, and makes recommendations for action.

The results presented are based on the statements of a total of five heavy duty vehicle manufacturers active in Europe, which together cover around 90 % of the European commercial vehicle market. The manufacturers' representatives were interviewed in the course of 60- to 90-minute guided interviews. The anonymized results of the interviews and the resulting recommendations for action were discussed in more detail at a joint workshop in June 2024. The interviews took place between the end of 2023 and mid-2024. During the process, discussions were held with manufacturer representatives from DAF, Daimler Truck, Tesla, Traton (Scania, MAN) and Volvo Group Trucks (Volvo Trucks, Renault Trucks). In addition, representatives of the infrastructure company Milence and the German National Organization for Hydrogen and Fuel Cell Technology (NOW) were interviewed with a focus on the necessary design of the charging infrastructure. The statements presented do not necessarily reflect the opinions of the authors.

### **Trends in the international truck market**

The international truck market continues to be dominated by diesel drives. In recent years, however, there has been strong momentum in new registrations of battery electric trucks. At around 92 %, China is by far the largest market for zero-emission heavy duty vehicles. The EU is in second place with Germany as the country with the highest share of new registrations. The key drivers for the momentum in e-truck sales in key sales markets are stricter CO<sub>2</sub> standards for heavy duty vehicles and monetary incentives for zero-emission drives through direct subsidies for procurement and advantages in terms of duties and taxes.

### **Technical characteristics and prospects of battery electric trucks (BET)**

Advances in battery technology are already making it technically possible to use BET beyond regional transport. However, the main application of battery-powered trucks will probably soon shift from regional to long-distance transportation due to operating cost advantages in particular. The availability of charging infrastructure as a key influencing factor and bottleneck at the same time will determine the speed of the market ramp-up.

## Technical properties and potential of other drive and fuel alternatives

The H<sub>2</sub> fuel cell provides efficiency advantages over the internal combustion engine, but in view of the lack of market maturity of H<sub>2</sub> fuel cells, the use of hydrogen in internal combustion engines is expected to be the initial approach. At the same time, the fundamental competition for the use of H<sub>2</sub> with other demand sectors is noted. In view of the limited potential for increasing efficiency, the commercial vehicle manufacturers surveyed are no longer pursuing hybridization of the internal combustion engine truck drive as a solution option. Alternative fuels (biofuels, synthetic fuels) were not named as part of the manufacturers' technology strategy.

## Manufacturer strategies and expected market ramp-up for e-trucks

The European CO<sub>2</sub> fleet targets are named as the main driver and key point of orientation for product strategy. The forecasts for e-trucks from the BMDV's clean room discussions with commercial vehicle manufacturers in Germany in 2022 are confirmed and in some cases an even more dynamic market development is expected. In particular, the introduction of electric long-distance trucks from 2024 is expected to provide a significant boost. The aim is for battery-electric trucks to account for over 50 % of new registrations as early as 2030 and battery-electric drives are seen as the dominant technology for trucks in the long term. Compared to CO<sub>2</sub> pricing (including the truck toll), which is relevant to operating costs, manufacturers consider the promotion of vehicle purchase to be a less significant incentive. Electric truck providers could try to gain market share at the expense of established manufacturers, particularly before the CO<sub>2</sub> target values for 2030 are reached.

## Manufacturer strategies for further drive and fuel alternatives

All manufacturers expect battery-electric trucks to dominate road freight transport in the future. At the same time, all manufacturers are also involved in the development of hydrogen-powered drives (in combination with fuel cells and combustion engines). The majority of manufacturers do not believe that hydrogen-powered trucks will be economically competitive in the longer term and only see applications in niche markets, as they do not believe that the hydrogen price level required for the mass market is likely to be achievable without continued subsidies. A single manufacturer mentions a relevant potential for hydrogen-powered trucks in the order of 10–20 % market share. Plug-in hybrid drives and alternative biogenic and electricity-based fuels were not mentioned in any of the discussions as an option for the decarbonization of heavy-duty trucks.

## Charging infrastructure for battery electric trucks

### *General*

The availability of a fail-safe charging infrastructure is the key prerequisite for market ramp-up of e-trucks. A lead time for such infrastructure expansion ahead of the planned increase in the number of e-trucks must always be ensured and temporary oversizing is considered tolerable.

### *Depot charging*

The charging infrastructure in the depot is a central component of electrification. However, its importance can only be estimated based on simulations and a few practical examples. Grid connection represents the greatest restriction, both in terms of available connected load capacity and implementation of new or more powerful grid connections.



## *Public charging*

Public (fast) charging infrastructure is particularly relevant for long-distance transport and must be developed primarily along and near the highway network. Charging parks will probably include a combination of CCS and MCS charging options – with an increasing focus on MCS-capable charging points, especially for long-distance transport. The AFIR specifications represent good basic coverage for Europe, but a significantly higher level of expansion is already required for Germany today. A predominantly private-sector implementation of the public charging infrastructure in Germany is expected. In particular, the necessary rapid expansion over the next 10 years is seen as challenging, especially with regard to the requisite grid connections. The lack of suitable sites with sufficient grid connection capacity and the need for longer-term concessions to develop sites economically exacerbate the problem.

## **Market ramp-up of e-trucks - challenges and recommendations for action**

### *1: Grid connection of charging infrastructure*

Limited grid connection capacity and long lead times until grid connection is implemented represent the greatest limitation for the development of high-performance charging infrastructure.

- Forward-looking grid expansion planning based on target conditions is essential, as is the short-term establishment of transparency regarding available grid capacities.

### *2: Development of private charging infrastructure:*

The development of depot charging infrastructure is greatly hampered by location-specific framework conditions and there is little practical experience to date that would allow a reliable forecast of the potential that can be realized.

- Transport companies should be made aware of the sometimes long lead times for expanding the charging infrastructure, funding should be provided for high grid connection costs and the range of advisory services needs to be expanded.

### *3: Reliable framework conditions in the long term*

Regulatory and financial framework conditions that ensure the switch to e-trucks and the development of charging infrastructure for the players concerned are not politically secured.

- Existing framework conditions (including AFIR, CO<sub>2</sub> vehicle standards, CO<sub>2</sub> price) should be updated ambitiously and in the long term and supplemented with additional instruments (e.g. e-truck quota for fleet operators).

### *4: Development of public charging infrastructure*

The AFIR requirements only create basic coverage for public charging infrastructure and do not provide any long-term planning security.

- The AFIR should be updated and the binding nature of the national targets in Germany should be increased by adding suitable sanctioning options. In addition, funding should focus on MCS charging points.

### 5: *Change management for users*

The introduction of e-trucks requires transformation processes for numerous players and puts pressure on small transport companies with low margins in particular.

- Advice for transport companies, geared to the specific circumstances, should be expanded.

### 6: *Sites for (public) charging infrastructure*

There is a lack of sufficient space for the construction of charging parks along trunk roads and the pressure on existing parking spaces is increasing due to the expansion of charging infrastructure.

- Politicians and administrators should do more to promote the acquisition of parking spaces along long-distance transport corridors and information on suitable spaces should be made publicly available.

## **Background to this publication**

This paper was produced as part of the ELV-LIVE research project<sup>2</sup>, which is scientifically monitoring the early use of battery electric trucks in day-to-day logistics operations in the period from 2023 to 2025. Against this background, it should be noted that this paper primarily represents the perspective of the vehicle industry, even if user-related aspects are also addressed in some cases. In the current research project, findings on the experiences and perspectives of users with alternative drive systems are also being collected through the monitoring of case study partners and standardized survey of transport companies. These will be published in similar publications at a later stage in the project and thus shed light on another important perspective on the transformation of the heavy duty vehicle market.

---

<sup>2</sup> Project website: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elv-live>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>12</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
<b>2 Internationaler Lkw-Marktüberblick, Bedeutung elektrischer Nutzfahrzeuge und relevante Regulierungen</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Weltweiter Lkw-Markt und Rolle der Hersteller</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Status quo elektrischer schwerer Nutzfahrzeuge im internationalen Vergleich</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Regulierung von Lkw im internationalen Vergleich</b>	<b>18</b>
2.3.1 Überblick	18
2.3.2 China	19
2.3.3 USA	20
2.3.4 Europäische Union	20
2.3.5 Deutschland	22
2.3.6 Weitere Beispiele aus ausgewählten europäischen Ländern	23
<b>3 Alternative Antriebe und Kraftstoffe für schwere Nutzfahrzeuge</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Eigenschaften und Entwicklungsperspektiven von batterieelektrischen Lkw</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Eigenschaften und Entwicklungsperspektiven von weiteren Antriebs- und Kraftstoffalternativen</b>	<b>27</b>
3.2.1 Wasserstoffbasierter Brennstoffzellen- bzw. verbrennungsmotorischer Lkw	27
3.2.2 Hybrid-Lkw	28
3.2.3 Alternative Kraftstoffe	29
<b>3.3 Markthochlauf E-Lkw: Herstellerstrategien und Risiken</b>	<b>30</b>
<b>4 Ladeinfrastruktur für batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge</b>	<b>33</b>
<b>5 Handlungsfelder für den erfolgreichen Markthochlauf von E-Lkw in Deutschland – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen</b>	<b>39</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>45</b>

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1: Marktanteile von schweren Lkw verschiedener Hersteller im Vergleich: EU und Nordamerika 17
- Abbildung 3-1: Übersicht verfügbarer Lkw-Modelle mit alternativen Antrieben, differenziert nach Antriebstyp, zulässigem Gesamtgewicht, Motorleistung und Batteriekapazität 25

## Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (alternating current)
ACEA	European Automobile Manufacturers' Association
AFIR	Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (alternative fuels infrastructure regulation)
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BET	Batterieelektrischer Lkw, in diesem Dokument auch als E-Lkw bezeichnet (battery-electric truck)
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (battery-electric vehicle)
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMVI	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CCS	Combined Charging System
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DC	Gleichstrom (direct current)
EP	European Parliament
EPA	Environmental Protection Agency
ETS	Emissionshandelssystem (emission trading system)
EU	Europäische Union
EV	Elektrisches Fahrzeug (electric vehicle)
FCEV	Brennstoffzellen-Fahrzeug (fuel cell electric vehicle)
FCET	Brennstoffzellen-Lkw (fuel cell electric truck)
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HDV	Lkw (heavy duty vehicle)
IRA	Inflation Reduction Act
KSG	Klimaschutzgesetz
KsNI	Förderprogramm "Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur"
LIS	Ladeinfrastruktur
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Verflüssigtes Erdgas (liquefied natural gas)
MCS	Megawatt Charging System

MoU	Memorandum of Understanding
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
OEM	Fahrzeughersteller (original equipment manufacturer)
PHEV	Plug-in Hybridfahrzeug (plug-in hybrid electric vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PtL	Flüssigkraftstoff aus elektrischer Energie (power to liquid)
RED	Erneuerbare-Energien Richtlinie (renewable energy directive)
TCO	Gesamtnutzungskosten (total cost of ownership)
THG	Treibhausgase
USD	United States Dollar

## 1 Einleitung

Der Straßengüterverkehr stellt weltweit nach dem Pkw-Verkehr den zweitwichtigsten Verursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor dar. Der Antrieb mit Dieselmotoren dominiert den Lkw-Verkehr (IEA 2024). Dabei werden die Emissionen im Straßengüterverkehr zum überwiegenden Teil von schweren Nutzfahrzeugen verursacht, die vorrangig im Fernverkehr zum Einsatz kommen und sich durch besonders hohe Fahrleistungen charakterisieren lassen.

Eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors kann vor diesem Hintergrund nur unter Einbezug des Straßengüterverkehrs gelingen. Dies spiegelt sich unter anderem in ambitionierten Zielsetzungen und verschärften regulatorischen Vorgaben auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene wider, die in jüngster Zeit etabliert wurden und beginnen, ihre Wirkung zu entfalten.

Zahlreiche wissenschaftliche Analysen liefern mittlerweile ein klares Bild wie eine Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in den kommenden Dekaden gelingen kann, welche Technologiepfade technisch und ökonomisch besonders vorteilhaft und welche Energieversorgungsinfrastrukturen erforderlich sind. Auch geben aktuelle Entwicklungsaktivitäten der Hersteller und deren Prognosen zu den zukünftigen Marktanteilen von alternativen Antrieben wichtige Hinweise. Dennoch bleiben zahlreiche Fragen zur konkreten Umsetzung offen und die Einschätzungen zu vielversprechenden Technologiepfaden weisen teilweise je nach Akteursgruppe noch sehr unterschiedliche Positionen und Wissensstände auf. Dieses Papier gibt auf Basis von Gesprächen mit Marktakteuren Antworten auf diese offenen Fragen und stellt die verschiedenen Perspektiven dar.

Im Folgenden wird zunächst (Kapitel 2) ein Überblick über den internationalen Lkw-Markt und die zunehmende Bedeutung von alternativen Antrieben im Kontext der im jeweiligen Markt etablierten Rahmenbedingungen geben.

Schwerpunkt des Papiers (Kapitel 3 und 4) stellt die Bewertung des batterieelektrischen Lkw-Antriebs sowie möglicher Antriebs- und Kraftstoffperspektiven aus Perspektive von Fahrzeugherstellern und Ladeinfrastrukturexperten dar. Dabei werden sowohl die technischen Eigenschaften und Entwicklungsperspektiven der Technologie als auch die Markthochlaufprognosen (Kapitel 3) und notwendigen Ladeinfrastrukturvoraussetzungen thematisiert (Kapitel 4). Abschließend (Kapitel 5) werden zentrale Handlungsfelder identifiziert und konkrete Handlungsempfehlungen aus Sicht der beteiligten Vertreter von Fahrzeugherstellern und Ladeinfrastrukturexperten formuliert. Diese spiegeln nicht zwangsweise die Einschätzungen der Autor\*innen wieder.

Die dargestellten Ergebnisse beruhen auf den Aussagen von insgesamt fünf im europäischen Markt aktiven Nutzfahrzeugherstellern, die zusammen etwa 90 % des europäischen Nutzfahrzeugmarkts abdecken. Die Vertreter der Hersteller wurden im Rahmen von 60- bis 90-minütigen, leitfragengestützten Interviews befragt. Die anonymisierten Ergebnisse der Interviews und daraus ableitenden Handlungsempfehlungen wurden im Rahmen eines gemeinsamen Workshops im Juni 2024 vertieft. Die Gespräche fanden im Zeitraum von Ende 2023 bis Mitte 2024 statt. In dem Prozess wurden Gespräche mit Herstellervertretern von Daimler Truck, Traton (Scania, MAN), Volvo, DAF und Tesla geführt. Zusätzliche wurden Vertreter des Infrastrukturunternehmens Milence sowie der deutschen Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) mit einem Schwerpunkt auf die notwendige Ausgestaltung der Ladeinfrastruktur befragt.

In den folgenden Ausführungen wird ein besonderer Fokus auf Aussagen mit großer Überschneidung in den Einschätzungen der befragten Personen gelegt. Ergänzend werden aber auch Aussagen, die nur Einzelmeinungen darstellen oder nur von einem Teil der befragten Personen geteilt werden, aufgeführt und entsprechend gekennzeichnet. Die Aussagen zur Einschätzung der Technologieoptionen und Marktprognose (Kapitel 3) stellen weitgehend die Einschätzung der

Vertreter der Fahrzeughersteller dar. Die Einschätzungen zur Ladeinfrastruktur sowie den zentralen Handlungsfeldern (Kapitel 4 und 5) umfasst zusätzlich die Perspektive der befragten Ladeinfrastrukturexperten.

Dieses Papier ist im Rahmen des Forschungsprojekts ELV-LIVE<sup>3</sup> entstanden, das den frühen Einsatz von batterieelektrischen Lkw im logistischen Regelbetrieb im Zeitraum von 2023 bis 2025 wissenschaftlich begleitet. Vor diesem Hintergrund sei darauf verwiesen, dass das vorliegende Papier vorrangig die Perspektive der Fahrzeugindustrie darstellt, wenn teilweise auch anwenderbezogene Aspekte thematisiert werden. Im laufenden Forschungsvorhaben werden über die Begleitung von Fallstudienpartnern und die standardisierte Befragung von Transportunternehmen auch Erkenntnisse zu den Erfahrungen und Perspektiven der Anwender mit alternativen Antrieben erfasst. Diese werden in vergleichbaren Publikationen zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt veröffentlicht und somit eine weitere wichtige Perspektive auf die Transformation des Nutzfahrzeugmarkts beleuchtet.

Im Rahmen des Vorläuferprojekts StratES<sup>4</sup> wurden im Jahr 2020 vergleichbare Interviews mit Vertretern von Fahrzeugherstellern und Zulieferern zum Technologiestand und den Entwicklungsperspektiven alternativer Antriebe und Kraftstoffe geführt (Göckeler et al. 2020), so dass im vorliegenden Papier ein Vergleich über die Veränderung der Einschätzungen über die Zeit hergestellt werden kann.

## 2 Internationaler Lkw-Marktüberblick, Bedeutung elektrischer Nutzfahrzeuge und relevante Regulierungen

### 2.1 Weltweiter Lkw-Markt und Rolle der Hersteller

Im Jahr 2022 wurden weltweit etwa 6,5 Millionen schwere Nutzfahrzeuge, d. h. Nutzfahrzeuge ab 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht, verkauft. Lastkraftwagen (Lkw) machten etwa 77 % und Busse etwa 23 % der Verkäufe aus (IEA 2023). Der globale Lkw-Markt überstieg im Jahr 2022 den Wert von 250 Milliarden US-\$. Zum Vergleich wurden im Pkw-Bereich 1,55 Billionen US-\$ umgesetzt (Global Market Insights 2023a). Aufgrund der für die Zukunft erwarteten steigenden Transportleistungen und des damit verbundenen Wachstums bei Lkw-Fahrleistung und Lkw-Fahrzeugbestand wird Prognosen zufolge der globale Lkw-Markt weltweit auf geschätzte 400 Milliarden US-\$ im Jahr 2032 ansteigen (Global Market Insights 2023b). In Nordamerika werden derzeit die meisten Lkw verkauft (38 %), gefolgt von der Europäischen Union (EU) (30 %) und Asien (22 %) (Global Market Insights 2023b). In der EU sind die größten nationalen Absatzmärkte Deutschland, Frankreich, Polen, Italien und Spanien (Statista 2023).

Die Marktanteile verschiedener Fahrzeughersteller (sogenannte Original Equipment Manufacturer (OEMs)) unterscheiden sich grundlegend zwischen den weltweiten Absatzmärkten. In China spielen ausschließlich chinesische OEMs eine bedeutende Rolle im Lkw-Markt (Mao und Rodriguez 2022). In Nordamerika (USA und Kanada) (s. Abbildung 2-1) verkaufen Daimler (38,5 %), Paccar (30,6 %), Volvo (16,6 %) und Navistar (11 %) die meisten schweren Lkw (> 15 t) (Buysse 2022). In der EU (s. Abbildung 2-1) gibt es einen differenzierteren Markt für schwere Lkw (> 15 t) mit Daimler (21 %), Volvo (17 %), DAF (15 %), MAN (13 %), Scania (12 %), Renault Trucks (10 %), Iveco (8 %), Ford (2 %) und anderen (2 %) als Akteure (Mulholland und Rodríguez 2023). Die Hersteller entstammen

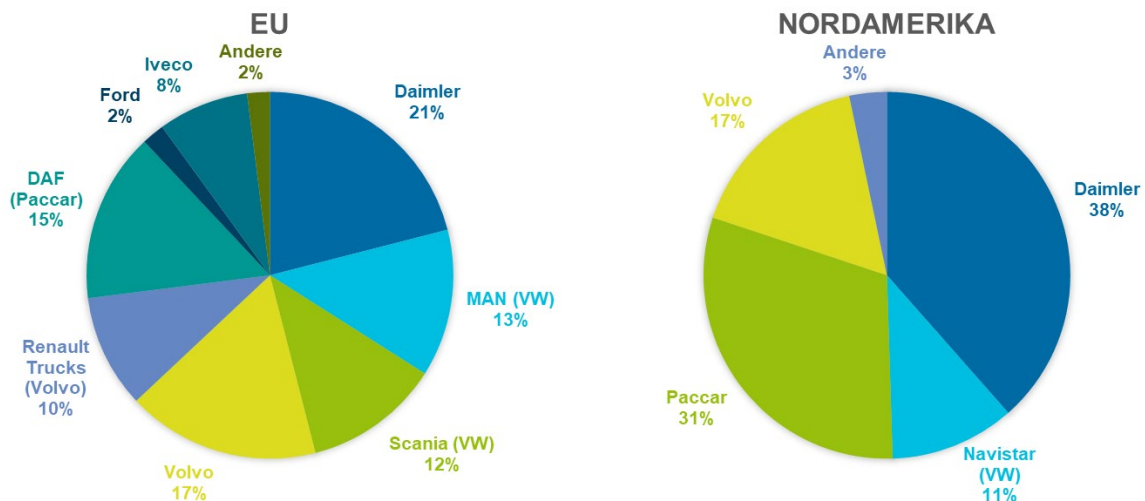
<sup>3</sup> Projektwebsite: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elv-live>

<sup>4</sup> Projektwebsite: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/strates>



teils denselben Konzernen: MAN, Scania und Navistar gehören zur VW-Tochter Traton, Renault Trucks zur Volvo Group und DAF zur US-Firma Paccar.

**Abbildung 2-1: Marktanteile von schweren Lkw verschiedener Hersteller im Vergleich: EU und Nordamerika**



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung mit Daten von (Buysse 2022). (Mulholland und Rodriguez 2023).

## 2.2 Status quo elektrischer schwerer Nutzfahrzeuge im internationalen Vergleich

Die Einführung elektrisch betriebener schwerer Nutzfahrzeuge startete mit elektrisch betriebenen Bussen für den Nah- und Stadtverkehr: Noch 2021 machten in der EU die Busse etwa zwei Drittel der Neuzulassungen von emissionsfreien schweren Nutzfahrzeugen aus, in China und Nordamerika lag der Anteil jeweils etwa bei drei Vierteln (Mulholland und Rodríguez 2023; Buysse 2022). Aktuell stagnieren bzw. sinken die Zulassungszahlen von emissionsfreien Bussen (weltweit ca. 49.000 im Jahr 2023, -17 % gegenüber 2022), während der Hochlauf bei den Lkw fortschreitet (weltweit ca. 54.000 im Jahr 2023, +35 % gegenüber 2022).

China ist mit einem Anteil von ca. 92 % bisher mit Abstand der größte Markt für emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge (Buysse 2022). In China führte die finanzielle Förderung der Fahrzeuganschaffung zu einem massiven Schub für emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge. Die schrittweise deutliche Absenkung der Fördersumme pro Fahrzeug ließ die Zulassungszahlen nach dem Höhepunkt 2016 um mehr als die Hälfte absinken, bevor diese sich nach 2020 stabilisierten.

In China, wie auch weltweit, machen konventionelle, mit fossilen Kraftstoffen betriebene, schwere Nutzfahrzeuge allerdings noch den weitaus größten Anteil an den jährlichen Absatzzahlen aus. Der Anteil emissionsfreier Fahrzeuge ist von 0 % im Jahr 2012 auf 4 % im Jahr 2021 gestiegen. Die absoluten Neuzulassungszahlen schwerer Nutzfahrzeuge in allen anderen weltweiten Märkten machen bisher nur einen Bruchteil derer in China aus. Gleichwohl ist aber eine deutliche Dynamik erkennbar, in den vergangenen Jahren mit Schwerpunkt in der EU (Mulholland und Rodriguez 2023; Mao et al. 2023).

Mit der Verbesserung der Batterietechnologie und der damit einhergehenden Reichweitenerhöhung kommen nach den Stadtbussen nun zunehmend auch batterieelektrische Lkw auf den Markt. Die meisten schweren batterieelektrischen Lkw wurden in den ersten beiden Quartalen 2023 in Deutschland (29 %), Frankreich (17 %) und den Niederlanden (17 %) verkauft. In Europa sind Volvo (26 %) und Renault (21 %) Vorreiter auf dem Markt für schwere batterieelektrische Lkw (Mulholland

und Rodríguez 2023). Die USA und Kanada liegen als viertgrößter Markt für emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge (0,9 % des globalen Markts) hinter Asien ohne China (2,3 %). Hier beläuft sich der Anteil schwerer batterieelektrischer Lkw an den Neukäufen noch im Promillebereich mit 94 schweren batterieelektrischen Lkw im Jahr 2021. Der Großteil dieser Verkäufe fällt auf Lion Electric (41 %) und BYD (31 %) (Buysse 2022).

Im zweitgrößten Markt für elektrisch betriebene schwere Nutzfahrzeuge (Europa, 4,3 % des weltweiten Markts) werden in einigen Ländern mittlerweile ausschließlich batterieelektrische Stadtbusse verkauft (Mulholland und Egerstrom 2024). Im Jahr 2022 wurden in Europa 3.000 batterieelektrische Busse abgesetzt. Das entspricht einem Anteil von 13 % am gesamten Markt verkaufter Busse (Mulholland und Rodríguez 2023). Dieser Trend gewinnt nun auch im Lkw-Bereich an Fahrt. Es wird erwartet, dass die Verkäufe von emissionsfreien Nutzfahrzeugen in den nächsten Jahren sowohl in China als auch im Rest der Welt weiterhin stark zunehmen. Dabei wird der batterieelektrische Antrieb voraussichtlich die Hauptrolle spielen (Mao und Rodriguez 2022).

Haupttreiber der fortlaufenden Entwicklung hin zu emissionsfreien Antrieben sind nationale Gesetze und internationale Abkommen bezüglich Emissionsstandards und Klimaschutz. Bei den Stadtbusen besteht beispielsweise für die EU das Ziel, die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2035 auf Null zu senken (European Commission 18.01.2024). Die Regulierungen im Lkw-Bereich werden in Abschnitt 2.3 genauer erläutert.

## 2.3 Regulierung von Lkw im internationalen Vergleich

### 2.3.1 Überblick

Um die Erreichung nationaler Klimaziele durch den Markthochlauf emissionsfreier Lkw zu unterstützen, haben Staaten auf nationaler Ebene Anreize und Regularien für batterieelektrische Lkw eingeführt. 70 % der weltweiten emissionsfreien schweren Nutzfahrzeuge-Verkäufe (engl., Heavy Duty Vehicle (HDV)) finden unter der Wirkung von EV-Policies statt (IEA - International Energy Agency 2023). Art, Zielgruppe und Umfang der gebotenen Anreize und Regularien variieren zwischen den Staaten (IEA - International Energy Agency 2023). Zielgruppen können entweder nachfrageseitig Betreiber von Lkw sein (Spediteure, Transportunternehmen) oder angebotsseitig Hersteller batterieelektrischer Lkws (OEMs).

Im Folgenden werden weltweite allgemeine Trends in den Regulations- und Anreizstrukturen beschrieben. Daraufhin werden mit Fokus auf relevante Märkte und Staaten mit hohen Verkaufszahlen batterieelektrischer Lkw Instrumente zur Markteinführung vorgestellt und im Zusammenhang mit der Größe der jeweiligen nationalen Märkte diskutiert.

Eine unverbindliches, aber als Rahmensetzung relevantes Instrument sind Absichtserklärungen: Im „Memorandum of Understanding (MoU) on Zero-Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles“ haben sich 36 Staaten das Ziel gesetzt, den Verkauf neuer Lkw und Busse bis 2040 zu 100 % emissionsfrei zu gestalten, bis 2030 ein Zwischenziel von 30 % emissionsfreier Fahrzeuge und bis 2050 eine Netto-Null-Emission zu erreichen (Drive to Zero 2024).

Zahlreiche Staaten haben solche Zielmarken bereits verbindlich beschlossen – bislang vorwiegend für Pkw, vermehrt aber auch für schwere Nutzfahrzeuge (IEA - International Energy Agency 2023). Um auf dem Weg dorthin Planungssicherheit hinsichtlich der Produktentwicklung und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, müssen Fahrzeughersteller zu bestimmten Zieljahren eine Obergrenze des mittleren CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der verkauften Fahrzeuge erreichen oder unterschreiten. Insbesondere die relevantesten Fahrzeugmärkte in Nordamerika, Europa und Ostasien regulieren mittlerweile mittels dieser CO<sub>2</sub>-Flottenwerte angebotsseitig den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von schweren

Nutzfahrzeugen. Dies stellt weltweit einen zentralen Mechanismus zur Förderung des Markthochlaufs dar (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA)).

Ein weiteres häufiges Politikinstrument sind Steuererleichterungen des Kaufs oder Besitzes batterieelektrischer Lkw sowie direkte finanzielle Unterstützungen des Fahrzeugkaufs oder der Ladeinfrastruktur. Dabei ist der Trend zu beobachten, dass hohe Kaufsubventionen emissionsfreier Fahrzeuge nach und nach abgebaut werden, nachdem elektrische Fahrzeuge im Markt an Bedeutung gewinnen. Subventionen im Bereich der Ladeinfrastruktur nehmen daraufhin eine höhere Bedeutung ein, welche teilweise bereits simultan eingeführt wurden. Im Bereich der elektrischen Stadtbusse ist beispielsweise bereits eine hohe Marktdurchdringung zu beobachten, wobei in einigen Staaten bereits Ambitionen bestehen ab den 2030er Jahren lediglich elektrische Stadtbusse zu kaufen (London 2034; EU 2035; Guangdong 2025). Die höhere Verfügbarkeit von emissionsfreien Modellen sowie der damit einhergehende stärkere Wettbewerb schaffen eine günstigere Preislage als im Bereich der emissionsfreien Lkws, was wiederum hohe Kaufsubventionen im Bereich der Stadtbusse unnötig macht (IEA - International Energy Agency 2023).

In Deutschland lässt sich erkennen, dass die Besteuerung der Straßennutzung und Energieträger (CO<sub>2</sub>-Bepreisung von Kraftstoff, CO<sub>2</sub>-Komponente der Lkw-Maut), im Zusammenwirken mit den CO<sub>2</sub>-Flottenzielen für schwere Nutzfahrzeuge an Relevanz gewinnt, während die Förderung der Anschaffung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur ausgelaufen ist. Es bleibt abzuwarten, ob sich durch die auf den Lkw-Verkehr bezogenen Maßnahmen des Green Deal, die erst beginnen zu wirken, diese Tendenz in der gesamten EU beobachten lässt.

Außerdem gibt es weltweit industriepolitische Anstrengungen, um die Marktstellung der jeweiligen nationalen Wirtschaft beim Markthochlauf emissionsfreier Fahrzeuge zu verbessern und von den erwarteten Umsätzen zu profitieren. Es wird versucht, produzierende Unternehmen (Fahrzeuge, Batterien, Infrastruktur etc.) im eigenen Land anzusiedeln und somit eine gewisse Unabhängigkeit in der Bereitstellung sowie eine Beteiligung an den erwartbaren Gewinnen zu erreichen. China, die USA und die EU nutzen hierfür große Subventionspakete wie den Inflation Reduction Act (IRA) oder den Green Deal Industry Plan (IEA - International Energy Agency 2023).

Im Folgenden wird die Regulierung in China, USA und Europa als Regionen mit relevanten Verkaufszahlen batterieelektrischer Lkw und weltweit entscheidenden Märkten dargestellt. Zusätzlich werden ausgewählte Maßnahmen der verkaufsstärksten europäischen Mitgliedsstaaten beschrieben.

### **2.3.2 China**

Chinas Präsident Xi Jinping kündigte 2020 an, in seinem Land bis 2060 CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen (IEA - International Energy Agency 2021). Um dieses Ziel zu erreichen, sind im Transportsektor (10 % der nationalen Emissionen) und somit auch im Straßengüterverkehr weitreichende Emissionsreduktionen vonnöten. China hat aktuell die höchsten Verkaufszahlen für emissionsfreie Nutzfahrzeuge weltweit.

China reguliert die CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen im Rahmen von Emissionsstandards, die den Energieverbrauch von Neufahrzeugen vorgeben (Mao und Rodriguez 2022). Darüber hinaus verfolgt China durch massive Fördermaßnahmen das Ziel, die herstellende Industrie für Elektrofahrzeuge aufzubauen und zu fördern. Es gibt weitreichende angebotsseitige Steuererleichterungen wie die Befreiung der Automobilhersteller von der Konsum- und Fahrzeugsteuer. Außerdem gewährt die Regierung den produzierenden Unternehmen Kredite. Nachfrageseitige Kaufprämien wurden Ende 2022 eingestellt. Steuererleichterungen beim

Fahrzeugkauf sollen bis zum Jahr 2027 auslaufen. Unterstützende Maßnahmen zum Aufbau der Ladeinfrastruktur sollen vorerst beibehalten werden (Yu 2023).

### 2.3.3 USA

In den USA hat die nationale Umweltschutzbehörde (engl., Environmental Protection Agency (EPA)) einen Vorschlag für Treibhausgasemissionsnormen (Phase 3) für schwere Lkws veröffentlicht, mit denen die CO<sub>2</sub>-Emissionen tank-to-wheel bis 2050 auf 31 % unter das Niveau von 1990 gesenkt werden sollen (Xie und Minjares 2023; Ragon et al. 2023). Außerdem sind im Inflation Reduction Act (IRA) 369 Milliarden USD für klimafreundliche Investitionen geplant, von denen 1 Milliarde USD für Fahrzeuge und Infrastruktur im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge vorgesehen sind. Zusätzlich zu den nachfrageseitigen Steuererleichterungen beim Fahrzeugkauf (bis zu 40.000 USD pro Fahrzeug) umfasst das IRA auch angebotsseitige Steuergutschriften für die Produktion (IEA - International Energy Agency 2023; Wolf 2023). „Im Rahmen dieser Regelung gewährt die US-Regierung Subventionen für die inländische Batterieproduktion von bis zu 35 USD / kWh und weitere 10 USD / kWh für die Modulmontage. Unter der Annahme durchschnittlicher Batteriepreise im Jahr 2022 von etwa 150 USD pro kWh könnten diese neuen US-Produktionsanreize fast ein Drittel des gesamten Batteriepreises ausmachen“ (IEA - International Energy Agency 2023).

### 2.3.4 Europäische Union

In der EU stellen die **CO<sub>2</sub>-Flottenstandards** das zentrale Politikinstrument zur Dekarbonisierung der schweren Nutzfahrzeuge dar. Im Juni 2024 trat die Richtlinie 2024/1610 ((EU) 2024/1610 2024) in Kraft, die von den Herstellern eine Reduktion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer verkauften Neufahrzeuge in allen relevanten Lkw-Segmenten um 45 % bis 2030, 65 % bis 2035 und 90 % bis 2040 verlangt, jeweils in Relation zum Flotten-CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Jahres 2019. Die Fahrzeugklassen werden entsprechend ihrer Fahrleistung gewichtet, dadurch sind insbesondere Fahrzeuge im Fernverkehr wie Sattelzugmaschinen für die Zielerreichung besonders relevant. Bei Zielverfehlung fallen hohe Strafzahlungen an. Es gibt zudem Überlegungen, das zulässige Gesamtgewicht von emissionsfreien Lkw weiter zu erhöhen, über das heute zulässige Zusatzgewicht von 2 Tonnen hinaus, um eine weitere Reichweitenentwicklung ohne Einschränkung der Zuladung angesichts des erhöhten Batteriegewichts zu erreichen (Westerheide 2024).

Auf der Nachfrageseite machen die Clean Vehicle Directive ((EU) 2019/1161 2019) – bzw. ihre jeweilige nationale Umsetzung, etwa das deutsche Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG 2021) – Vorgaben für die Beschaffung emissionsfreier Stadtbusse und kommunaler Arbeitsfahrzeuge, was indirekt auch auf die Technologieentwicklung bei Lkw wirkt. Es wird zudem diskutiert, auch für Unternehmensflotten verpflichtende Ziele zu setzen, ihre Flotten von Pkw und Nutzfahrzeugen auf emissionsfreie Antriebe umzustellen. Hierzu läuft aktuell ein Anhörungsverfahren der Europäischen Kommission (T&E 2024a).

Der **Aufbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur** ist die wichtigste Aufgabe, mit der die Regierungen der EU-Mitgliedsstaaten den Markthochlauf flankieren. Dieser Ausbau ist seit 2023 über die AFIR-Verordnung ((EU) 2023/1804 2023) geregelt. Es werden verbindliche nationale Zielzahlen für öffentlich-zugängliche Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe und Ladestrom als Mindeststandards festgelegt, die durch nationale Zielsetzungen auch übertroffen werden können. Der Schwerpunkt liegt auf Ladestationen für Personenkraftwagen (Pkw) und Lkw. Für diese werden, abgestuft nach der Relevanz von Strecken und Örtlichkeiten, Mindest-Ladeleistungen und Maximalabstände für Ladepunkte festgelegt (Göckeler et al. 2023). Auch ein Netz an Wasserstofftankstellen wird, allerdings in geringerem Umfang, durch die Verordnung für alle Mitgliedsstaaten definiert.

Ein relevanter Hebel, um die Nutzung emissionsfreier Nutzfahrzeuge anzureizen, sind Straßennutzungsgebühren. Die Eurovignette-/Wegekosten-Richtlinie (1999/62/EC 1999) setzt den Rahmen für die nationale Gesetzgebung für die Mauterhebung auf Fernstraßen. So können etwa noch bis einschließlich 2025 emissionsfreie Fahrzeuge vollständig von der Maut befreit werden, anschließend ist noch in begrenztem Maß eine Reduzierung gegenüber emissionsintensiven Fahrzeugen zulässig. Die Reform der Richtlinie im Jahr 2022 verpflichtete diejenigen Mitgliedsstaaten, die eine Lkw-Maut erheben, eine CO<sub>2</sub>-Komponente in diese zu integrieren.

Auch die verschärften Luftschadstoffgrenzwerte für Lkw im Rahmen des im Jahr 2024 beschlossenen Euro-7-Standards (Europäisches Parlament 2024) können für den Markthochlauf emissionsfreier Lkw förderlich sein, indem sie die Kosten für Verbrennerfahrzeuge erhöhen.

In der Umsetzung von Instrumenten zur Förderung des Markthochlaufs unterscheiden sich die Mitgliedsländer teils erheblich. Es gibt eine große Diversität bei der Umsetzung von EU-Richtlinien, nationalen Förderungen und Steuererleichterungen – von Deutschland, wo bis 2023 80 % der Mehrkosten übernommen wurden bis Bulgarien, wo praktisch keine Förderung oder Subventionen bestehen. Daher werden im Folgenden die Rahmenbedingungen in Deutschland sowie in weiteren europäischen Staaten mit vergleichsweise hohem Anteil an emissionsfreien Nutzfahrzeugen dargestellt, um näher zu beschreiben, wie der Übergangspfad ausgestaltet wird.

### 2.3.5 Deutschland

Die Grundlage für Emissionsreduktionsziele im Straßengüterverkehr stellt in Deutschland das nationale **Klimaschutzgesetz** dar. Dieses enthält für jeden Sektor Minderungsziele. Im Verkehrssektor soll bis zum Jahr 2030 ein Rückgang auf 85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente erreicht werden, also etwa eine Halbierung der THG-Emissionen gegenüber dem heutigen Niveau. Bisher (KSG 2023) galten für jeden Sektor bindende Jahresemissionsmengen. Durch die Novelle des Klimaschutzgesetzes im Mai 2024 wurden diese zugunsten einer mehrjährigen und sektorübergreifenden Gesamtrechnung abgeschafft (Die Bundesregierung 2024b). Bis 2030 soll laut Klimaschutzprogramm 2030 ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr über elektrische Antriebe oder strombasierte Kraftstoffe abgedeckt werden (BMU 2019).

Bis 2023 stellte die **finanzielle Förderung der Anschaffung** von emissionsfreien Nutzfahrzeugen ein zentrales Politikinstrument zu Erreichung dieser Ziele und die höchste derartige Förderung in der EU dar. Im Förderprogramm „Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur“ (KsNI) wurden zuletzt 80 % der Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug sowie die Anschaffung der zum Betrieb benötigten Tank- oder Ladeinfrastruktur gefördert. Im Zuge der Konsolidierung des Bundeshaushalts Anfang des Jahres 2024 entschied die Bundesregierung jedoch, dass es keine weitere Kaufförderung geben wird.

Umso mehr steht seither bei der Förderung der Elektromobilität der **Aufbau von Ladeinfrastruktur** im Mittelpunkt. Die deutschen Zielsetzungen erfordern einen deutlich höheren LIS-Ausbau als in der AFIR (s. Abschnitt 2.3.4) vorgesehen. Den Aufbau von Ladeinfrastruktur adressiert die Bundesregierung im Masterplan Ladeinfrastruktur II (BMDV 2022). Im September 2024 soll eine Ausschreibung für den Aufbau von Ladepunkten auf etwa 130 unbewirtschafteten Rastplätzen erfolgen, zusätzlich zur geplanten Ladeinfrastruktur auf ca. 220 bewirtschafteten Rastanlagen. Nach Einschätzung des BMDV wären dadurch zwei Drittel des Bedarfs an öffentlich zugänglichen Ladepunkten an deutschen Autobahnen gedeckt (BMDV 2024).

Zudem enthält die deutsche Gesetzgebung mehrere Instrumente, um die laufenden Kosten klimafreundlicher Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen im Vergleich mit dem fossil betriebenen Straßengüterverkehr zu senken. Der Ansatz, die Kilometerkosten im Güterverkehr über die Besteuerung klimaschutzorientiert zu gestalten, wird auch aus Sicht von Wirtschaftsexpert\*innen wie dem Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (Sachverständigenrat für Wirtschaft 2024) empfohlen. Dabei stehen ein **CO<sub>2</sub>-Preis** auf Kraftstoffe und die Umgestaltung der Lkw-Maut im Fokus. Ersterer wurde in Deutschland im Jahr 2021 im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) eingeführt. Nach anfänglich 25 €/t CO<sub>2</sub> liegt er seit Anfang 2024 bei 45 €/t CO<sub>2</sub>. Dies entspricht für einen Last- und Sattelzug in etwa Kosten von 3,6 ct/km. Der Preis soll 2025 weiter auf 55 €/t CO<sub>2</sub> steigen und ab 2026 innerhalb eines engen Korridors marktlich ermittelt werden bzw. ab 2027 ggf. durch das europäische Emissionshandelssystem ETS 2 ersetzt werden (Die Bundesregierung 2024a).

Ein wichtiger Bestandteil der Regulierung von Transportkosten ist die Ausgestaltung der in Deutschland 2005 eingeführten **Lkw-Maut**. Die ab Ende 2023 in Kraft getretenen Änderungen (Die Bundesregierung o.D.) am Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG 2011) stellen die Umsetzung der EU-Wegekostenrichtlinie dar (vgl. Abschnitt 2.3.4). Neu sind dabei der Einbezug von Fahrzeugen zwischen 3,5 und 7,5 t (mit Ausnahme sog. Handwerkerfahrzeuge) sowie die Erhebung einer CO<sub>2</sub>-Komponente in Höhe von 3,7 bis 16,2 ct/km je nach Gewichtsklasse und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Lokal emissionsfrei angetriebene Lkw, u. a. E-Fahrzeuge, zahlen aktuell keine Maut. Ab 2026 werden dann weiterhin keine CO<sub>2</sub>-Komponente, geringe Sätze für Lärm- und Luftschadstoffbelastung und nur 25 % der Infrastrukturkomponente der Maut fällig sein.

Die deutsche Umsetzung der **Treibhausgas-Emissionsminderungsquote** gemäß dem europäischen Renewable Energies Directive ((EU) 2023/2413 2023) verpflichtet Inverkehrbringer fossiler Kraftstoffe, die THG-Intensität der Energiemengen im Straßen- und Schienenverkehr schrittweise zu reduzieren, wobei auch die Nutzung von Strom im Straßenverkehr zur Zielerfüllung angerechnet werden kann. Dadurch ist ein Zertifikatehandel entstanden, durch den E-Fahrzeughalter und Ladeinfrastrukturbetreiber Einnahmen generieren können (Kasten und Jöhrens 2022), wobei die Preise in den Jahren 2023 und 2024 spürbar gesunken sind (Paulsen 2024).

Zudem sind E-Lkw bei Zulassung vor Ende 2025 für zehn Jahre von der **Kraftfahrzeugsteuer** befreit. Diese macht allerdings nur einen geringen Teil der Betriebskosten aus; für eine Sattelzugmaschine der Schadstoffklasse Euro VI liegt sie bei 665 € im Jahr.

### 2.3.6 Weitere Beispiele aus ausgewählten europäischen Ländern

Hinter Deutschland lag Frankreich in den vergangenen Jahren auf Rang zwei der absoluten Verkaufszahlen von emissionsfreien schweren Nutzfahrzeugen in der EU. Darauf folgten Schweden und die Niederlande, die zusammen etwa ein Drittel der Neuzulassungen von emissionsfreien schweren Lkw repräsentierten, obwohl sie nur 5 % Anteil an den Verkäufen konventioneller Fahrzeuge haben. Beide Länder fördern diese über Kaufprämien: in Schweden 20 % des Kaufpreises und in den Niederlanden bis zu 60 % des Aufpreises (Mulholland und Rodríguez 2023; Pölös 2022). In Dänemark wird ab 2025 die Besteuerung von Lkw auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge festgelegt. Das Nicht-EU-Land Norwegen hat sich zum Ziel gesetzt, dass bis zum Jahr 2030 75 % der neuen Fernbusse und 50 % der neu verkauften Lkw emissionsfrei sein sollen. Diese Ziele wurden durch eine Subventionsregelung und eine Kraftstoffsteuer für HDVs in Höhe von etwa 200 € pro Tonne CO<sub>2</sub> auf den Weg gebracht (IEA 2022).

Welche Wirkung verschiedene Implementierungen der CO<sub>2</sub>-Komponente bei der Lkw-Maut im Sinne der Eurovignette-/Wegekosten-Richtlinie (vgl. Abschnitt 2.3.4) haben wird, lässt sich aufgrund des frühen Stadiums noch nicht bewerten. Die Umsetzung gestaltet sich derzeit in den EU-Mitgliedstaaten heterogen, denn schon die Ausgangslage ist sehr uneinheitlich (T&E 2024b): Es gibt neben streckenbezogenen Systemen auch zeitbezogene Vignetten. Die Maut wird teils von staatlicher Seite, teils von privaten Konzessionären erhoben. Einzelne Länder haben in den vergangenen Jahren die Maut eingeführt, abgeschafft oder das System gewechselt. Mehrere Länder wie Österreich, Tschechien und Ungarn mit einem streckenbezogenen System haben eine an der deutschen Umsetzung orientierte CO<sub>2</sub>-Komponente umgesetzt (Gowans 2024). In vielen Ländern mit einem Vignettensystem oder mit privaten Betreibern ist die CO<sub>2</sub>-Komponente bisher noch nicht umgesetzt (Eurowag 2024).

### Entwicklungstendenzen im internationalen Lkw-Markt:

- Der internationale Lkw-Markt wird weiter vom Dieselantrieb dominiert. In den letzten Jahren ist aber eine starke Dynamik bei den Neuzulassungen von batterieelektrischen Lkw zu beobachten.
- China ist mit etwa 92 % mit Abstand der größte Markt für emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge. Die EU ist allerdings weltweit der weitsichtigste Markt für E-Lkw mit Deutschland als Land mit dem höchsten Marktanteil.
- Zentrale Treiber für die Dynamik beim Absatz von E-Lkw sind in wichtigen Absatzmärkten verschärfte CO<sub>2</sub>-Standards für schwere Nutzfahrzeuge sowie monetäre Anreize für emissionsfreie Antriebe durch die direkte Förderung der Beschaffung bzw. Vorteile bei Abgaben und Steuern.

## 3 Alternative Antriebe und Kraftstoffe für schwere Nutzfahrzeuge

Der Markt der schweren Nutzfahrzeuge wird weiterhin durch den Einsatz von Diesel-Fahrzeugen dominiert. Alternative Kraftstoffe und Antriebe spielen bisher eine untergeordnete Rolle (vgl. Kapitel 2.2). Bis vor wenigen Jahren wurde der Einsatz von batterieelektrischen Lkw noch nicht als ernsthafte Technologieoption diskutiert.

In den vergangenen Jahren hat die Entwicklung von elektrischen Nutzfahrzeugen jedoch deutlich an Dynamik gewonnen und es zeichnet sich ein klarer Trend in Richtung Elektrifizierung von Lastkraftwagen und Omnibussen ab, der sich sowohl in industriellen als auch politischen Strategien widerspiegelt (vgl. Kapitel 2.3). Im Folgenden wird für die verfügbaren Antriebs- und Kraftstoffalternativen jeweils zunächst ein Überblick über den Stand des Wissens gegeben. Im Anschluss werden die aktuellen Einschätzungen der befragten Vertreter der Nutzfahrzeughersteller dargestellt.

### 3.1 Eigenschaften und Entwicklungsperspektiven von batterieelektrischen Lkw

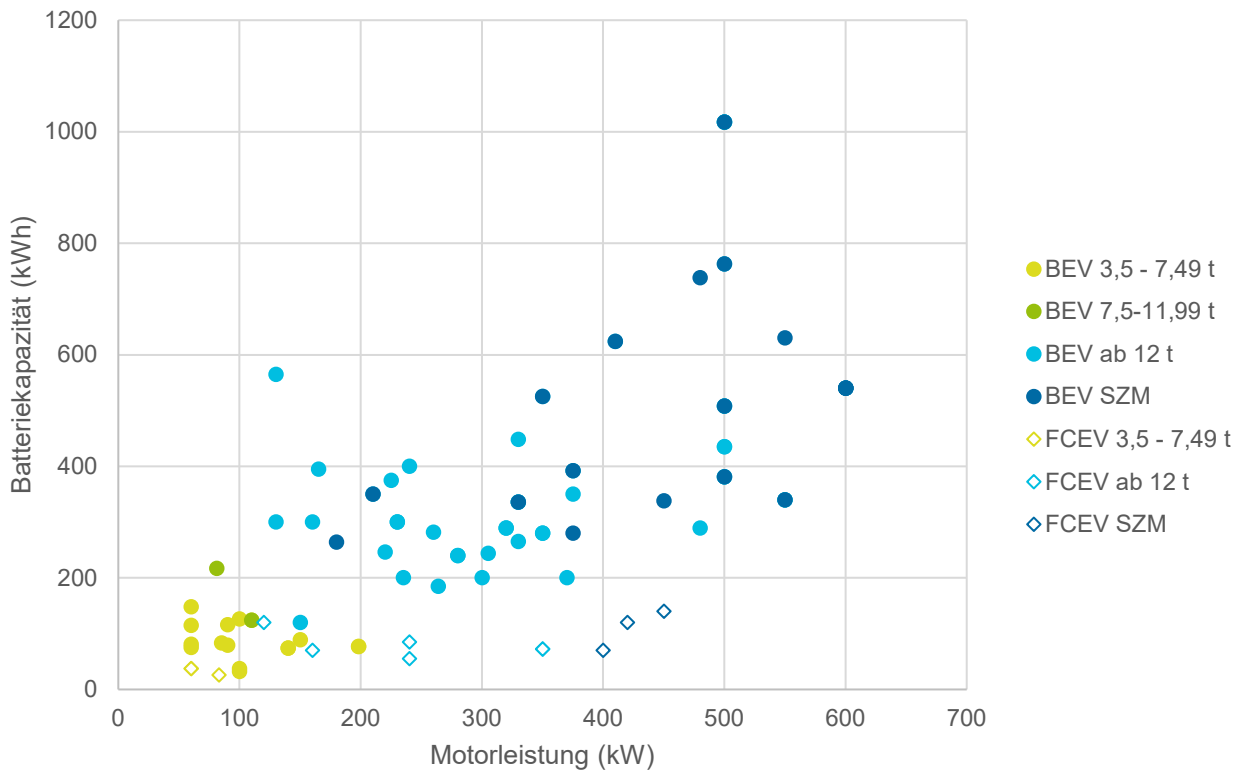
#### Überblick

Die hohe Energieeffizienz des elektrischen Antriebs macht batterieelektrische Lkw sowohl mit Blick auf den effizienten Einsatz von erneuerbarem Strom als auch mit Blick auf einen möglichst wirtschaftlichen Fahrzeugbetrieb besonders attraktiv. Die Hauptherausforderung stellt angesichts der hohen Leistung als auch hoher Fahrleistungen – noch stärker als bei Pkw – die Energiespeicherung dar. Das erforderliche Batteriesystem verursacht erhebliche Zusatzkosten und verringert auf Grund seiner Masse die Nutzlast des Fahrzeugs.

Dank der großen Fortschritte bei der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien, zunächst v.a. für die Pkw-Anwendung, können mittlerweile schwere Nutzfahrzeuge für den Einsatz im Regionalverkehr mit einer Reichweite von etwa 300 Kilometern ohne signifikanten Nutzlastverlust realisiert werden (Göckeler et al. 2023). Dabei kann ein Mehrgewicht von bis zu 2 Tonnen toleriert werden, da dieses für emissionsfreie Nutzfahrzeuge durch eine EU-Regulierung gedeckt ist (EP Committee on Transport and Tourism 14.02.2024). E-Lkw mit bis zu 300 km Reichweite wurden zunächst vor allem von Umrüstern und anderen Kleinunternehmen angeboten. In den vergangenen Jahren hat sich der Markt deutlich belebt und alle großen europäischen Lkw-Hersteller sind in die Entwicklung und den Vertrieb von entsprechenden Fahrzeugen eingestiegen (siehe Abbildung 3-1).



**Abbildung 3-1: Übersicht verfügbarer Lkw-Modelle mit alternativen Antrieben, differenziert nach Antriebstyp, zulässigem Gesamtgewicht, Motorleistung und Batteriekapazität**



Quelle: eigene Darstellung

Angesichts der hohen Bedeutung des Straßengüterfernverkehrs und der vorteilhaften Kilometerkosten von batterieelektrischen Lkw liegt deren verstärkter Einsatz im Fernverkehr prinzipiell nahe. Dem gegenüber steht jedoch das Erfordernis eines noch größeren Batteriesystems und damit verbundene höhere Investitionskosten und potenzielle Nutzlastverluste sowie einer besonders leistungsfähigen Ladeinfrastruktur. Während vor wenigen Jahren in Forschung und Industrie noch strittig war, ob der batterieelektrische Antrieb für diese Anwendungen perspektivisch geeignet sein kann, zeichnet sich diesbezüglich in der jüngsten Vergangenheit ein klares Bild ab. Alle europäischen Nutzfahrzeughersteller sind in die Entwicklung von v. a. batterieelektrischen Sattelzugmaschinen mit mehr als 500 Kilometern Reichweite für den Fernverkehrseinsatz eingestiegen und es werden Serienfahrzeuge von allen Herstellern ab dem Jahr 2024 erwartet. Die Umsetzung entsprechender batterieelektrischer Fahrzeugvarianten ist mit vernachlässigbaren Nutzlastverlusten möglich. Zentrale Anreize für die Entwicklung der Fahrzeuge ist deren besondere hohe Bedeutung für die Erreichung der europäischen CO<sub>2</sub>-Standards für Neufahrzeuge und die besonderen wirtschaftlichen Anreize im Betrieb angesichts der Begünstigung bei der Lkw-Maut. Diese Einschätzung wird durch aktuelle wissenschaftliche Analysen gedeckt (Göckeler et al. 2023; Basma et al. 2022), die den Kostenvorteil von E-Lkw im Fernverkehrseinsatz bestätigen.

### Aktuelle Experteneinschätzungen

Vor diesem Hintergrund ist bemerkenswert, aber auch nachvollziehbar, dass sich die Einschätzung zum Haupteinsatzgebiet von batterieelektrischen Lkw in den vergangenen Jahren verschoben hat. Noch vor wenigen Jahren standen die technischen Restriktionen der Batterie im Vordergrund und

es wurde daraus ein vorrangiger Einsatz von E-Lkw im Regionalverkehr abgeleitet (vgl. Göckeler et al. 2020). Aktuell stehen jedoch zunehmend Überlegungen zum wirtschaftlichen Betrieb im Vordergrund, die einen beschleunigten Einsatz von batterieelektrischen Lkw im Fernverkehr nahelegen, nachdem technische Herausforderungen sich durch den technischen Fortschritt relativiert haben. So betonen mehrere Herstellervertreter, dass die Betriebskostenvorteile von elektrischen Lkw im Fernverkehr deutlich größer als im Regionalverkehr ausfallen. Durch die Einführung einer CO<sub>2</sub>-basierten Maut auf deutschen Fernstraßen im Dezember 2023 verstärkt sich dieser Effekt.

Mit Blick auf die technische Reife des elektrischen Lkw-Antriebs wird insbesondere auf die Fortschritte bei der Batterietechnologie und bei der Energieeffizienz des elektrischen Antriebsstrangs in den vergangenen Jahren verwiesen. Die Anpassung der Batteriegröße an das jeweilige Nutzungsprofil des Fahrzeugs und der verfügbaren Ladeoptionen wird als wichtige Optimierungsgröße und Flexibilität beim E-Lkw gesehen. In diesem Kontext wird betont, dass die Nutzfahrzeugproduktion bei den etablierten Herstellern ohnehin eine starke, an den spezifischen Kundenbedürfnissen orientierte Fahrzeugkonfiguration gewohnt ist. Einzelne Hersteller verfolgen jedoch auch die Strategie lediglich ein Standardprodukt in großer Stückzahl anzubieten und auf diese Weise die Produktionskosten zu reduzieren.

Die Entwicklung der Anschaffungspreise von E-Lkw lässt sich nach Einschätzung der befragten Vertreter der Hersteller für die kommenden 10 Jahre nicht seriös prognostizieren. Wesentliche Einflussfaktoren sind die Geschwindigkeit des Markthochlaufs und der damit einhergehenden Prozessverbesserungen in der Fahrzeugproduktion. Angesichts der im Vergleich zu Pkw etwa zehnmal größeren Batterie wird auf die besondere Bedeutung der Batteriekosten verwiesen. Es wird jedoch auch betont, dass die Anschaffungspreise von E-Lkw auch von der herstellerseitigen Preispolitik abhängen und in welchem Ausmaß eine Querfinanzierung aus der Gewinnmarge der abgesetzten Diesel-Lkw oder durch den Einsatz von Risikokapital realisiert wird. Angesichts der verschärften Emissionsanforderungen wird gleichzeitig von einer Kostensteigerung bei zukünftigen Fahrzeugmodellen mit Verbrennungsmotor ausgegangen. Im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen wird bei batterieelektrischen Lkw eine schnellere Kostendegression in den nächsten Jahren erwartet. Der auch in den kommenden Jahren verbleibende Aufpreis von E-Lkw wird von den Herstellervertretern dennoch mit Verweis auf die im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen deutlich relevanteren Betriebskostenvorteile als wenig kritisch eingestuft, da sie bereits kurzfristig und auch ohne Fahrzeugförderung einen Gesamtkostenvorteil von E-Lkw im Fernverkehr sehen.

Als Hauptherausforderung für den Markterfolg von E-Lkw wird, wie auch in wissenschaftlichen Analysen, von den befragten Herstellern und Infrastrukturexperten die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur benannt. Insbesondere für den Fernverkehr wird dabei auf die zukünftige besondere Bedeutung der öffentlichen Hochleistungsladeinfrastruktur verwiesen.

#### **Technische Eigenschaften und Perspektiven von batterieelektrischen Lkw:**

- Fortschritte bei der Batterietechnologie machen schon heute den Einsatz von BET jenseits von Regionalverkehr technisch möglich.
- Hauptanwendung von Batterie-Lkw verlagert sich auf Grund von v.a. Betriebskostenvorteilen bald vom Regional- auf den Fernverkehr.
- Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur als zentraler Einflussfaktor und Engstelle zugleich bestimmt die Geschwindigkeit des Markthochlaufs.

## 3.2 Eigenschaften und Entwicklungsperspektiven von weiteren Antriebs- und Kraftstoffalternativen

### 3.2.1 Wasserstoffbasierter Brennstoffzellen- bzw. verbrennungsmotorischer Lkw

#### Überblick

Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger ermöglicht den emissionsfreien Antrieb von Lkw sofern der Wasserstoff perspektivisch vollständig mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Für die Nutzung von Wasserstoff als Antriebsenergie für Lkw werden zwei technische Lösungen verfolgt. Diese umfassen zum einen die Verbrennung von Wasserstoff analog zu Dieselkraftstoff in einem Verbrennungsmotor. Alternativ wird die Umwandlung von Wasserstoff in Strom in einer Brennstoffzelle zum Antrieb eines Elektromotors – analog zum batterieelektrischen Antrieb – als Lösungsweg verfolgt. In gängigen Fahrzeugkonzepten wird die Brennstoffzelle auf etwa die Hälfte der Motorleistung ausgelegt und Lastspitzen sowie die Aufnahme von Rekuperationsenergie über ein ergänzendes Batteriesystem sichergestellt. Insbesondere der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb wird schon seit vielen Jahren als technische Lösung für den emissionsfreien Schwerlastverkehr diskutiert.

Die zusätzlichen Energieumwandlungsprozesse in der Brennstoffzelle bei der Wasserstofferzeugung führen zu einem Energieverlust von mindestens 40 %. Ähnlich sieht es auch bei der Wasserstofferzeugung und Nutzung im Verbrennungsmotor aus. Deshalb weisen die wasserstoffbasierten Antriebsoptionen gegenüber dem batterieelektrischen Antrieb eine deutliche geringere Gesamtenergieeffizienz auf (Göckeler et al. 2023).

Für die Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug wird eine gasförmige als auch flüssige Speicherung als Lösungsoption verfolgt. Bisher gibt es hierzu jedoch noch keine herstellerübergreifende Festlegung. Bis zum Jahr 2030 wird eine Fahrzeugreichweite von 800 bis 1000 Kilometer angestrebt. Die vergleichsweise hohe Reichweite als auch die relativ kurze Betankungsdauer wird als Hauptvorteil gegenüber batterieelektrischen Lkw ins Feld geführt.

Die Mehrheit der aktuellen Studien zum Technologievergleich geht jedoch auch mittelfristig von höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu Diesel- und batterieelektrischen Lkw aus und es werden nur unter sehr optimistischen Wasserstoffpreisannahmen Gesamtkostenvorteile gegenüber den Antriebsalternativen – auch dem batterieelektrischen Lkw – erzielt (Göckeler et al. 2023; Basma et al. 2023).

Alle Nutzfahrzeughersteller engagieren sich in der Entwicklung von wasserstoffbasierten Lkw-Antrieben. Bisher sind jedoch nur von einzelnen Herstellern Fahrzeugmodelle verfügbar (Göckeler et al. 2023).

#### Aktuelle Experteneinschätzungen

Die Entwicklungs- und Marktperspektiven von wasserstoffbasierten Lkw-Antrieben werden von den befragten Herstellervertretern grundsätzlich und durchgängig im Vergleich zum batterieelektrischen Lkw deutlich konservativer eingeschätzt. Während die Rückmeldungen zu den Perspektiven von batterieelektrischen Lkw eine äußerst große, herstellerübergreifende Überschneidung aufweisen, zeigen sich beim Thema Wasserstoff Unterschiede in den Einschätzungen der Hersteller. Dennoch sei darauf verwiesen, dass die deutliche Mehrzahl der befragten Hersteller sich auch an der Entwicklung von wasserstoffbasierten Lkw-Antrieben beteiligen und eine Anwendung der Technologie – mindestens in Teilmärkten – nicht ausschließen.

Als besonders kritisch für die Konkurrenzfähigkeit der Technologie werden die vergleichsweise hohen Betriebskosten genannt. Angesichts der weiterhin höheren Anschaffungspreise von Brennstoffzellenfahrzeugen, müssten die Betriebskosten für einen wirtschaftlich konkurrenzfähigen Einsatz jedoch unter denen für batterieelektrische Lkw liegen, um einen relevanten Marktanteil zu realisieren. Das hierfür erforderliche Wasserstoffpreisniveau wird von der großen Mehrheit der befragten Hersteller auch langfristig als nicht realisierbar oder allenfalls unter Inanspruchnahme anhaltender Subventionen als erreichbar eingeschätzt. Zudem wird auf die hohe Konkurrenz mit anderen Industrie- und Verkehrsanwendungen verwiesen, die nach Einschätzung mehrerer Interviewpartner mangels Dekarbonisierungsalternativen bei diesen Anwendungen voraussichtlich eine höhere Zahlungsbereitschaft für Wasserstoff zeigen werden.

Einzelne Hersteller sehen Einsatzmöglichkeiten für wasserstoffbasierte Lkw-Antriebe in Anwendungsfällen, in denen Stromnetzrestriktionen den Einsatz von batterieelektrischen Lkw nicht oder nur zu sehr hohen Kosten ermöglichen oder wo einsatzbedingt nur sehr kurze Fahrzeugstandzeiten auftreten, die für eine Batterienachladung nicht ausreichen. Zudem werden auch Off-Road-Anwendungen im Nutzfahrzeugbereich von einzelnen Interviewpartnern als mögliche Einsatzfelder von Wasserstoff gesehen.

Mit Blick auf die technischen Varianten des Wasserstoffeinsatzes im Lkw-Bereich, wird unter Berücksichtigung der Technologiereife zunächst der Einsatz von Wasserstoff in Kombination mit einem verbrennungsmotorischen Antrieb als realistischer angesehen. Angesichts der höheren Energieeffizienz des Brennstoffzellen-Antriebs wird jedoch im Vergleich der beiden Technologieoptionen der Einsatz von Brennstoffzellen-Lkw im Fernverkehr vorteilhafter bewertet, da dieser mit signifikanten Betriebskostenvorteilen verbunden wäre. Allerdings ist die Brennstoffzellentechnologie für diesen Anwendungsbereich noch nicht für den Serieneinsatz marktreif. Diese Einschätzung wird von mehreren Herstellern geteilt.

### 3.2.2 Hybrid-Lkw

#### Überblick

Unter dem Hybridantrieb wird eine Kombination aus einem verbrennungsmotorischen mit einem elektrischen Antrieb verstanden. Die fahrzeugseitige Batterie ermöglicht es, bei Anfahrts- und Beschleunigungsvorgängen den verbrennungsmotorischen Antrieb zu unterstützen und bei Bremsvorgängen, Bewegungsenergie wieder in Strom umzuwandeln und in der Batterie zu speichern. Diese Antriebskonfiguration ermöglicht einen effizienteren Betrieb des Verbrennungsmotors und ermöglicht Kraftstoffeinsparungen, ohne dass eine externe Ladung der Batterie erforderlich ist. In früheren Expertengesprächen wurden bis zu 15 % Kraftstoffeinsparungen als realistisch erachtet (Göckeler et al. 2020).

#### Aktuelle Experteneinschätzungen

Einzelne Hersteller haben in den vergangenen Jahren auch Hybridantriebe für den Einsatz bei schweren Nutzfahrzeugen entwickelt. Im Interview wurde der hohe Entwicklungsaufwand betont. Zukünftige Marktanteile werden für die Technologie nicht gesehen, da sie unter den veränderten technologischen Rahmenbedingungen u. a. auf Grund ihrer, im Vergleich zum rein elektrischen Antrieb, deutlich geringeren Energieeffizienz wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig ist und zudem nicht die monetären Vorteile von emissionsfreien Antrieben bei der Lkw-Maut in Anspruch nehmen kann.

Alle Fahrzeughersteller setzen daher als Hauptstrategie mittlerweile für die Erreichung der europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte stark auf die Einführung von emissionsfreien Antrieben und nicht

auf die Effizienzsteigerung des verbrennungsmotorischen Antriebs. Folglich sind nur wenige Hybrid-Modelle am Markt verfügbar, wovon nur eines in den letzten 5 Jahren in den Markt eingeführt wurde.

### 3.2.3 Alternative Kraftstoffe

#### Überblick

Alternative Kraftstoffe bieten die Möglichkeit, weiterhin den Verbrennungsmotor zum Einsatz zu bringen, dabei aber nicht mehr auf fossilen Dieselmotorkraftstoff angewiesen zu sein und gleichzeitig CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren zu können. Vor diesem Hintergrund werden der Einsatz von verflüssigtem Erdgas (LNG), Biokraftstoffen und sogenannten E-Fuels in der öffentlichen Diskussion ebenfalls als Lösungsoption für die Dekarbonisierung von schweren Nutzfahrzeugen angeführt.

Flüssiges Erdgas (LNG) ist zwar ebenfalls fossilen Ursprungs, hat aber um etwa 25 % geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieeinheit. Biokraftstoffe verursachen ebenfalls CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verbrennungsprozess, entziehen der Atmosphäre jedoch CO<sub>2</sub> beim Biomasseaufbau. E-Fuels, oft auch Power-to-Liquid (PtL) Kraftstoffe genannt, entstehen aus der Synthese von Wasserstoff mit Kohlendioxid. Wird der Wasserstoff mittels regenerativ erzeugten Stroms und Elektrolyse hergestellt und das Kohlendioxid aus der Atmosphäre gewonnen, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung im Dieselmotor klimaneutral sein. Vorliegende wissenschaftliche Studien weisen mit Blick auf die diskutierten Kraftstoffe und ihrer Bedeutung für die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs insbesondere auf die begrenzte Verfügbarkeit, große Nutzungskonkurrenzen (v.a. bei Biokraftstoffen und E-Fuels), insbesondere mit Blick auf den Einsatz im Luftverkehr, die sehr hohen Produktionskosten (v.a. E-Fuels) und die vernachlässigbaren CO<sub>2</sub>-Vorteile auf einer Well-to-wheel-Basis (im Falle von LNG) sowie weiterhin entstehende NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der Verbrennung hin (Göckeler et al. 2020; Kühnel et al. 2018; Mottschall et al. 2020).

#### Aktuelle Experteneinschätzungen

In den Experteninterviews wurde keine der genannten alternativen Kraftstoffoptionen als Bestandteil der Entwicklungsstrategie des jeweiligen Herstellers oder als Bestandteil eines herstellerübergreifenden zukünftigen Technologiemies für die Dekarbonisierung von schweren Nutzfahrzeugen im europäischen Markt benannt.

#### **Technische Eigenschaften und Potenziale weiterer Antriebs- und Kraftstoffalternativen:**

- Wasserstoffbasierte Antriebe werden angesichts höherer Kraftstoffkosten, wenn, dann nur in Teilmärkten erwartet und es wird auf die H<sub>2</sub>-Konkurrenz mit anderen Nachfragesektoren verwiesen.
- Die H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle zeigt Effizienzvorteile, angesichts fehlender Marktreife wird aber zunächst eher der Einsatz von Wasserstoff im Verbrennungsmotor erwartet.
- Eine Hybridisierung des verbrennungsmotorischen Lkw-Antriebs wird nicht mehr als Lösungsoption verfolgt.
- Alternative Kraftstoffe (Biokraftstoffe, synthetische Kraftstoffe) wurden nicht als Bestandteil der Technologiestrategie der Hersteller benannt.

### 3.3 Markthochlauf E-Lkw: Herstellerstrategien und Risiken

#### Überblick

Aktuell bewegt sich der Neuzulassungsanteil von batterieelektrischen Lkw in Deutschland und Europa noch im Promille- bis niedrigen, einstelligen Prozentbereich (siehe Kapitel 2.2). Im Klimaschutzprogramm 2030 hat die deutsche Bundesregierung bereits im Jahr 2019 das Ziel formuliert, dass bis 2030 ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr über elektrische Antriebe oder strombasierte Kraftstoffe abzudecken ist (BMU 2019). Im „Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge“ aus dem Jahr 2020 (BMVI 2020) wurden mögliche Technologiepfade zur Zielerreichung und notwendige Maßnahmen aufgezeigt. Im dort aufgeführten „Fahrplan Antriebstechnologien“ wurden Pfadentscheidungen für den Zeitraum 2023 bis 2026 angepeilt, die eine Skalierung erfolversprechender Technologien in den Folgejahren ermöglichen sollen.

Die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge, die 2019 in Kraft getreten sind, geben bereits bis zum Jahr 2030 eine deutliche Effizienzsteigerung vor und zeichnen nach der aktuellen Revision der Verordnung mit einem Reduktionsziel von 90 % bis zum Jahr 2040 bereits eine klare Richtung hin zu emissionsfreien Antrieben (siehe Kap. 2.3.4).

Im Jahr 2022 wurden auf Basis von vertraulichen und anonymisierten Herstellergesprächen (sogenannte Cleanroom-Gespräche) erstmals Zielzahlen der europäischen Nutzfahrzeughersteller für Deutschland und Europa kommuniziert (NOW 2023). Die Hersteller bestätigten in den damaligen Gesprächen, dass die Vorgaben der europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte den zentralen Treiber für die Entwicklung und die Markteinführung von alternativen Antrieben bei schweren Nutzfahrzeugen darstellt. Bereits im Jahr 2022 wurde von allen Herstellern der batterieelektrische Lkw als zentrale Säule für die Zielerreichung bezeichnet. Dies wurde begründet mit den technischen Möglichkeiten, die sich durch die fortschreitende Batterietechnologieentwicklung ergeben haben, sowie mit den besonders vorteilhaften Betriebskosten im Vergleich der Antriebsalternativen. Der Aufbau und die zeitnahe Verfügbarkeit von privater und öffentlicher Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge wurde als entscheidende Voraussetzung für den angestrebten Markthochlauf genannt.

Interessanterweise gingen die Ankündigungen der Hersteller in den Cleanroom-Gesprächen im Jahr 2022 bereits für das Jahr 2030 deutlich über die Zielwerte der europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte hinaus. So lag der von den Herstellern prognostizierte Neuzulassungsanteil emissionsfreier Nutzfahrzeuge über 12 Tonnen Gesamtgewicht in Europa für BET bei 53 % und für FCET bei 10 %. Für Deutschland wurde sogar ein Anteil von 57 % BET und 17 % FCET an den Neuzulassungen im Jahr 2030 genannt.

Insbesondere im Regionalverkehr wurde zum damaligen Zeitpunkt batterieelektrischen Lkw eine kurzfristig hohe Bedeutung beigemessen. Auf der Fernstrecke war die Perspektive der Hersteller mit Verweis auf die Restriktionen der Batterie in den Cleanroom-Gesprächen weniger einhellig. Die Bedeutung von wasserstoffbasierten Antrieben wurde ebenfalls unterschiedlich bewertet. Während einige Hersteller im Fernverkehrseinsatz eine perspektivische Kostenparität als erreichbar bewerteten, schlossen dies andere Hersteller aus. Einigkeit herrschte in der Einschätzung, dass Brennstoffzellen-Lkw erst nach Batterie-Lkw in relevanter Stückzahl in den Markt eintreten würden – voraussichtlich in der zweiten Hälfte dieser Dekade. Der Einsatz von wasserstoffbasierten verbrennungsmotorischen Lkw wurde mit Blick auf die Gesamteffizienz und verbleibende Schadstoffemissionen in den damaligen Gesprächen als weniger attraktiv eingeschätzt.

## Aktuelle Experteneinschätzungen

### *Markthochlauf batterieelektrischer Lkw*

Die aktuell befragten Herstellervertreter erwarten unter den gegebenen Rahmenbedingungen einen in den kommenden Jahren schnell wachsenden Absatz von schweren Lkw mit batterieelektrischem Antrieb (BET). Die in den Clean-Room-Gesprächen (NOW 2023) getroffenen Prognosen zur Marktentwicklung von batterieelektrischen Lkw werden bestätigt bzw. teilweise sogar mittlerweile eine noch dynamischere Marktentwicklung erwartet. Es wird ein S-kurvenförmiger Hochlauf angenommen. In diesem Kontext wird auf die zahlreichen Modellankündigungen für das Jahr 2024 verwiesen, die die Grundlage für die Marktentwicklung bilden. Die Markteinführung von fernstreckentauglichen E-Lkw in den Jahren 2024/25 wird als bedeutender Durchbruch für die Elektrifizierung von Lkw gesehen. Es wird betont, dass sich bereits heute ein großes Interesse an elektrischen Fern-Lkw aus der Transportbranche zu verzeichnen ist und dies die Hersteller optimistisch stimmt. Ein möglicher zweiter Durchbruch könnte bis zum Jahr 2030 gelingen, wenn der Neuzulassungsanteil von E-Lkw die 50 %-Marke übersteigt. Die verfügbare Ladeinfrastruktur wird als dominierender limitierender Faktor gesehen. Bei voller Ladeinfrastrukturverfügbarkeit wäre laut Aussage einzelner Hersteller ansonsten bis 2030 auch ein Marktanteil von E-Lkw von deutlich über 50 % bis 2030 realistisch. Die Aussage „der E-Lkw wird mit Blick auf den Marktanteil der neue Diesel-Lkw“ wird zwar nicht in dieser Absolutheit von allen Herstellern geteilt, aber eine Entwicklung in diese Richtung wird von der großen Mehrheit der Befragten erwartet.

Als Haupttreiber für diese dynamische Entwicklung werden einhellig die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte genannt, an denen die Hersteller ihre Produktpolitik ausrichten. Kostenseitige Anreize für die Anwender, wie ein steigender CO<sub>2</sub>-Preis und eine CO<sub>2</sub>-basierte Maut, wie in Deutschland eingeführt, werden als wichtige Instrumente für die Nachfrage nach E-Lkw gesehen. Die Einführung von Stromcredits im Zuge der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU 2023) in mehreren EU-Staaten und die damit verbundenen günstigeren Stromkosten sowie die Revision der EU-Regulierung zu Abmessung und Masse zugunsten von alternativen Lkw werden als weitere wichtige förderliche Rahmenbedingungen genannt. Die staatliche Förderung der Fahrzeuganschaffung wird zwar als relevant in der Anfangsphase gesehen, da sie auch bei Lkw-Anwendungen mit geringen Fahrleistungen einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglicht und ein wichtiges Signal in Richtung der Anwender für die Transformation setzt. Dieses Förderinstrument wird jedoch gleichzeitig von den Herstellern als ineffizient und wenig zielgerichtet bewertet und sollte nach deren Einschätzung in der Zukunft von geringerer Bedeutung sein. Die kurzfristige Kürzung von Fördermitteln bei der Fahrzeugbeschaffung bewerten die Befragten hinsichtlich der Wirkung in Richtung der Transportbranche für sehr ungünstig, da es der erforderlichen Planungssicherheit für ein schnelles Handeln entgegensteht und für eine nachhaltige Verunsicherung bei den Anwendern Sorge. Als Herausforderung für den Markthochlauf wird in diesem Kontext zudem auf die Gegebenheiten in der Transportbranche verwiesen. Die hohe Anzahl an kleinen Unternehmen und geringe Margen erschweren die Einführung neuer Technologien mit veränderter Kostenstruktur. In diesem Kontext wird auch auf die verbleibende Restwertunsicherheit von E-Lkw hingewiesen. In der frühen Marktphase werden daher große Transportunternehmen als Hauptzielgruppe für den Absatz von E-Lkw gesehen.

Interessant stellt sich die mögliche Rolle neuer Marktteilnehmer dar. Diese könnten nach Einschätzung einzelner Experten insbesondere im Zeitfenster bis zu den vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Zielwerten im Jahr 2030 ihre Gelegenheit sehen, sich frühzeitig Marktanteile durch das Angebot von E-Lkw zu sichern, bevor alle – und damit auch die etablierten Hersteller -- einen verstärkten Absatz von E-Lkw zur Zielwerterreichung im Jahr 2030 anstreben müssen. Insbesondere mit Blick auf chinesische Nutzfahrzeughersteller wird von einzelnen Interviewpartnern auf das Spannungsfeld zwischen uneingeschränktem Zugang von ausländischen Herstellern zum europäischen

Fahrzeugmarkt und der großen Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen und der Batterietechnologie aus China verwiesen, die eine ausgewogene Handelspolitik nahelegen.

#### **Herstellerstrategien und erwarteter Markthochlauf für E-Lkw:**

- Die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte werden als Haupttreiber und zentraler Orientierungspunkt für die Produktstrategie genannt.
- Die Marktprognosen für E-Lkw aus den Clean-Room-Gesprächen aus dem Jahr 2023 werden bestätigt bzw. teilweise eine noch dynamischere Marktentwicklung erwartet.
- Insbesondere mit der Einführung von elektrischen Fern-Lkw ab 2024 wird eine deutliche Marktbelebung verbunden.
- Bereits im Jahr 2030 wird ein Marktanteil von batterieelektrischen Lkw von über 50 % angestrebt und der batterieelektrische Antrieb als langfristig dominierende Technologie bei Lkw gesehen.
- Die Förderung der Fahrzeuganschaffung wird im Vergleich zur betriebskostenrelevanten CO<sub>2</sub>-Bepreisung (inkl. der Lkw-Maut) als weniger relevanter Anreiz bewertet.
- Neue Marktteilnehmer könnten als Anbieter von E-Lkw insbesondere vor Erreichen der CO<sub>2</sub>-Zielwerte im Jahr 2030 versuchen, Marktanteile zu Lasten etablierter Hersteller zu gewinnen.

#### *Marktperspektiven weiterer Antriebs- und Kraftstoffalternativen*

Zwar herrscht in den Einschätzungen der konsultierten Experten große Einigkeit über die weitgehende Dominanz des batterieelektrischen Lkw im zukünftigen Straßengüterverkehr, jedoch sehen die meisten Hersteller auch weitere Antriebsalternativen – wenn auch mit deutlich geringerer Bedeutung – in ausgewählten Anwendungen. Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, dass alle etablierten Hersteller auch auf eigene Entwicklungsaktivitäten, wenn auch zumeist in wesentlich geringerem Ausmaß und insbesondere mit Blick auf wasserstoffbasierte Antriebe verweisen. Dabei wird sowohl der Einsatz von Wasserstoff in der Brennstoffzelle als auch im Verbrennungsmotor als Strategie verfolgt. Der wasserstoffbasierte verbrennungsmotorische Lkw-Antrieb könnte nach Ansicht der Herstellervertreter angesichts einer höheren Technologiereife zunächst eine größere Bedeutung spielen. Langfristig weist jedoch der Brennstoffzellen-Lkw angesichts einer höheren Energieeffizienz und damit geringeren Betriebskosten nach Einschätzung der Hersteller die größeren Potenziale – insbesondere im Fernverkehr mit hohen Laufleistungen – auf. Es wird erwartet, dass Wasserstoff-Lkw zumindest kurz- bis mittelfristig angesichts starker monetärer Anreize im Markt vertreten sein werden. Große Skepsis zeigt die Mehrheit der Herstellervertreter hingegen hinsichtlich der längerfristigen wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit von wasserstoffbasierten Antriebsoptionen im Vergleich zum batterieelektrischen Lkw. Vertreter eines Herstellers nennen ein Marktpotenzial von Wasserstoff-Lkw von 10 bis 20 %, das sich vor allem durch Engpässe im Energiesystem und der notwendigen stationären Energiespeicherung ergeben könnte. Andere Hersteller weisen hingegen auf die ökonomisch effizientere stationäre Rückverstromung von Wasserstoff hin.

Der Einsatz von Plug-in-Hybridantrieben bei Lkw wurde lediglich von einem Hersteller erwähnt und auf vergangene Entwicklungsaktivitäten verwiesen. Die zukünftigen Marktpotenziale werden jedoch als sehr gering eingeschätzt.



Alternative Kraftstoffe, wie biogene oder strombasierte Kraftstoffe (sogenannte E-Fuels) wurden in keinem der Gespräche als Lösungsoption für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs erwähnt.

#### **Herstellerstrategien zu weiteren Antriebs- und Kraftstoffalternativen:**

- Alle Hersteller erwarten eine Dominanz des batterieelektrischen Lkw im zukünftigen Straßengüterverkehr.
- Gleichzeitig engagieren sich alle Hersteller auch in der Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Antrieben (in Kombination mit Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor).
- Die Mehrheit der Hersteller sieht auch längerfristig keine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von wasserstoffbetriebenen Lkw und lediglich Anwendungen in Nischenmärkten.
- Ein einzelner Hersteller nennt ein relevantes Marktpotenzial von wasserstoffbetriebenen Lkw in der Größenordnung von 10 bis 20 % Marktanteil.
- Plug-in-Hybridantriebe sowie alternative biogene und strombasierte Kraftstoffe wurden in keinem der Gespräche als Lösungsoption für die Dekarbonisierung von schweren Lkw erwähnt.

## **4 Ladeinfrastruktur für batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge**

Analog zur vorangegangenen Diskussion der Antriebs- und Kraftstoffalternativen für schwere Nutzfahrzeuge wird im Folgenden für die notwendige Energieversorgungsinfrastruktur für batterieelektrische Lkw jeweils zunächst ein Überblick über den Stand des Wissens gegeben. Im Anschluss werden die aktuellen Einschätzungen der befragten Vertreter der Nutzfahrzeughersteller und Ladeinfrastrukturexperten dargestellt.

### **Überblick**

Eine flächendeckende und verlässliche Ladeinfrastruktur ist – wie auch bei E-Pkw – die zentrale Voraussetzung, um E-Lkw betreiben zu können. Aktuelle Szenarioanalysen (u.a. Göckeler et al. 2023) zeigen, dass die Geschwindigkeit des Markthochlaufs von E-Lkw im Wesentlichen von der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur und insbesondere von der verfügbaren öffentlichen Hochleistungsladeinfrastruktur und dem dort anfallenden Ladestrompreis abhängig ist.

Während für E-Pkw bereits eine flächendeckende öffentliche Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht, existieren für schwere Nutzfahrzeuge bisher europaweit lediglich erste, vereinzelte öffentliche Ladestationen (Bundesnetzagentur; Varo Charging; Aral; Milence 2024b; 2024a; Manthey 2024). Die bisher im Einsatz befindlichen E-Lkw werden vor allem an nicht-öffentlichen Ladestationen in den Depots der Transportunternehmen geladen. Der bisher verfügbare Ladestandard Combined Charging System (CCS) erlaubt eine maximale Ladeleistung von 350 kW. Die tatsächliche Ladeleistung an bisherigen Standorten ist aber oft noch durch die geringere verfügbare Netzanschlussleistung oder auch die technisch limitierte Ladeleistung der verfügbaren Fahrzeugmodelle begrenzt. Im bisherigen Regionalverkehrseinsatz stellt eine geringere Ladeleistung angesichts der meist möglichen Ladung über Nacht im Depot und eines geringen Anteils von E-Lkw an der Gesamtflotte oft keine Nutzungsrestriktion dar.

Mit Blick auf Fernverkehrsanwendungen und deutlich größere Batteriekapazitäten entsprechender Fahrzeuge, gewinnt die Batterieladung mit höherer Leistung an Bedeutung. In der Initiative CharIN entwickeln Industrieunternehmen daher aktuell den Ladestandard *Megawatt Charging System* (MCS) der mit Ladeleistungen von über einem Megawatt das vollständige Aufladen großer Batteriesysteme in 30-45 min ermöglichen soll. Somit kann auch ein Nachladen der Batterie in der Fahrerruhepause und damit typische Tagesfahrleistungen im Fernverkehr von deutlich über 500 Kilometern realisiert werden.

Ladeinfrastruktur kann grundlegend in die Bereiche des nicht-öffentlichen Ladens auf Betriebsgeländen und des öffentlich zugänglichen Ladens unterschieden werden (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2023). Das nicht-öffentliche Laden umfasst Lademöglichkeiten auf dem eigenen Betriebsgelände (z. B. Depot) oder auch auf fremdem Betriebsgelände, das durch Kooperationen auch für andere Nutzer Ladeinfrastruktur zur Batterieladung der Lkw (z. B. am Be- und Entladepunkt eines Kunden) freigibt sowie mobile Ladepunkte (z. B. für Baustellenfahrzeuge). Das öffentlich zugängliche Laden umfasst Ladeinfrastruktur an wichtigen Umschlagpunkten (z. B. Güterverteilzentren), Lade-Hubs in Gewerbegebieten sowie Lade-Hubs an Fernstraßen, die sowohl das Nachladen in Lenkpausen mit hoher Leistung sowie Nachladen nachts und bei längeren Pausen mit mittlerer Leistung ermöglichen.

Die Zielzustände der Ladeinfrastruktur und die zukünftige Bedeutung der verschiedenen Ladeoptionen sind nicht verlässlich prognostizierbar, da sie von einer Vielzahl an Faktoren abhängig sind und da starke Wechselwirkungen zwischen dem Aufbau der Ladeinfrastruktur und der Elektrifizierung des Fahrzeugbestands bestehen. So beeinflusst die verfügbare Ladeinfrastruktur, welche Fahrzeuge und Touren frühzeitig elektrifiziert werden können. Und diese beeinflussen wiederum den weiteren Ausbau der Ladeinfrastruktur. Zentrale Einflussfaktoren sind u. a. an welchen Orten sich Ladeinfrastruktur technisch (verfügbare Netzanschlussleistung) und zu konkurrenzfähigen Kosten installieren lässt, welche Lkw und Touren sich technisch und ökonomisch frühzeitig durch E-Lkw substituieren lassen und wie sich die Abwägung zwischen Batteriegroße und Häufigkeit von Batterienachladung in der Praxis tatsächlich darstellt.

Trotz dieser Unsicherheiten geben Studien zur Markthochlaufmodellierung von E-Lkw (u.a. Göckeler et al. 2023) und Experteneinschätzungen Hinweise auf die Bedeutung der unterschiedlichen Ladeoptionen. Empirisch gestützte Analysen von Lkw-Fahrtenketten weisen darauf hin, dass perspektivisch über 50 % des Energiebedarfs über Ladeinfrastruktur im Depot und mit moderater Leistung (bis 150 kW) über Nacht gedeckt werden kann (Göckeler et al. 2023). Grundvoraussetzung hierfür ist, dass der Aufbau von Ladeinfrastruktur auf dem Betriebsgelände realisiert werden kann. Die Batterieladung von Fahrzeugen, die nicht ins Depot am Ende des Tages zurückkehren, erfolgt voraussichtlich vorwiegend an öffentlich zugänglichen Ladestationen und kann ebenfalls mit moderater Leistung (150 kW) erfolgen (Göckeler et al. 2023). CCS-Laden ist insbesondere für Fahrprofile relevant, deren Tagesfahrleistung die Batteriereichweite überschreiten und daher in einer Fahrerpause eine Schnellladung benötigen. MCS-Laden mit einer Ladeleistung von über einem Megawatt kommt v.a. im Fernverkehr zur Anwendung, wo ein einmaliger Ladestopp in der Lenkpause des Fahrers für die Erfüllung der Tagesfahrleistung erforderlich ist und eine Ladeleistung jenseits von 350 kW (CCS) dafür benötigt wird.

Die Analysen im Projekt StratES (Göckeler et al. 2023) kommen zu dem Ergebnis, dass auf Basis von repräsentativen Lkw-Einsatzprofilen etwa 80 % des Energiebedarfs (im Depot und beim öffentlichen Nachladen) mit maximal 150 kW gedeckt werden kann und ein Ladevorgang pro Tag ausreicht. Der Energieumsatz an CCS- und MCS-Ladestationen fällt mit jeweils etwa 10 % im Vergleich wesentlich geringer aus. Die Bedeutung der Schnellladeinfrastruktur für die Elektrifizierung des Fernverkehrs ist jedoch deutlich größerer als der Anteil am Gesamtenergieabsatz nahelegt, da viele Fahrten nur unter der Annahme einer Schnellladeinfrastruktur realisiert werden können.

Aus den dargestellten Analysen und unter der Maßgabe, dass der Netzanschluss an den jeweiligen Orten sichergestellt werden kann, lässt sich eine zukünftige Dominanz von Depot- und öffentlichen Nachladepunkten ableiten. Im oben erwähnten Szenario wird ein Bedarf von über 100.000 solcher Ladepunkte in Deutschland bis zum Jahr 2035 ermittelt, davon knapp ein Drittel im öffentlichen Raum. Der Bedarf an öffentlichen CCS- und MCS-Ladepunkten fällt mit etwa 4.000 bzw. 2.000 deutlich geringer aus. In einem möglichen öffentlichen Ladenetz mit einem Raster von 60 Kilometern Abstand bedeutet dies je nach regionaler Verkehrsstärke pro Standort 24 bis knapp 200 Ladepunkte für die öffentliche Nachladung und 2 bis 10 MCS-Ladepunkte. Ähnliche Analysen (Plötz et al. 2020; Burges et al. 2021) kommen unter Berücksichtigung von abweichenden Markthochlaufzahlen zu vergleichbaren Infrastrukturbedarfen. Gegenüber den Vorgaben der AFIR sind die modellierten Bedarfe im Jahr 2030 bereits doppelt so hoch und liegen im Jahr 2035 bereits achtmal so hoch wie die von der AFIR vorgegebene verfügbare Mindestleistung je Standort.

Die vorliegenden Analysen veranschaulichen die zentrale Bedeutung des Ladeinfrastrukturaufbaus für den Markthochlauf von E-Lkw. Trotz der verbleibenden Unsicherheiten über die Nutzungsnachfrage öffentlicher Ladepunkte und der Wechselwirkungen mit der Fahrzeugtechnologie (u. a. Batteriekapazität), zeigen die Simulationen robuste Bedarfe für den Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge auf. Unter Berücksichtigung der langen Planungs- und Realisierungszeiträume von Netzanschlüssen (bis zu 10 Jahre für die Anbindung an das Hochspannungsnetz) zeigt sich die besondere Dringlichkeit einer frühzeitigen Initiierung des Ladeinfrastrukturaufbaus, um den geplanten E-Lkw-Markthochlauf realisieren zu können.

## **Aktuelle Experteneinschätzungen**

### *Bedeutung Ladeinfrastruktur*

Einhellig wurde von den Vertretern der Hersteller und den konsultierten Ladeinfrastrukturexperten die herausragende Bedeutung der Ladeinfrastruktur für den Markthochlauf von E-Lkw betont und bestätigt. Nach deren Einschätzung ist der Aufbau der Ladeinfrastruktur für den Markthochlauf wichtiger als die Fahrzeugförderung und die monetären Anreize für E-Lkw bei der Lkw-Maut. Im Vergleich zur Elektrifizierung von Pkw wurde auf die noch höheren Anforderungen an die Verlässlichkeit der Ladeinfrastruktur angesichts der hohen ökonomischen Bedeutung hingewiesen, die bereits in einem frühen Marktstadium sichergestellt werden muss. Dies wird begründet mit den Konsequenzen eines Ausfalls von Ladeinfrastruktur beim Betrieb von E-Lkw, der unmittelbar mit hohen Folgekosten für das Transportunternehmen durch den resultierenden Ausfall von Transportdienstleistungen verbunden ist.

Insbesondere in der frühen Marktphase sehen die Interviewpartner eine hohe Bedeutung des Ladens im Depot, da der Aufbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur längere Vorlaufzeiten benötigt, es wurden etwa 3 Jahre genannt, und damit kurzfristig noch nicht zur Verfügung steht. Für erste Anwendungsfälle, wie Pendel- oder Linienverkehre ergeben sich aber auch bereits unter diesen Umständen nach Einschätzung der Interviewpartner attraktive Einsatzmöglichkeiten für batterieelektrische Lkw. Für die Erschließung des ökonomisch und emissionsseitig besonders relevanten Fernverkehrs ist jedoch ein zügiger Aufbau eines öffentlichen Ladenetzes entlang der Hauptkorridore notwendig. Perspektivisch muss dieses Netz auch jenseits der Korridore ausgebaut werden, um eine vollständige Netzabdeckung zu gewährleisten.

Die Ausbaubedarfe, die von zwei bei den Interviews vertretenen Organisationen ermittelt wurden, werden auf Basis der Marktankündigungen der Hersteller in Kopplung mit den Zielvorgaben der EU-CO<sub>2</sub>-Standards für schwere Nutzfahrzeuge abgeleitet. Es wird die Beobachtung geteilt, dass die Fahrzeugzielzahlen in den letzten Jahren nach oben angepasst wurden und dass in jedem Fall sichergestellt werden sollte, dass der Ladeinfrastrukturaufbau einen Vorlauf gegenüber dem

aktuellen Bedarf haben sollte. Das Risiko einer Überdimensionierung bei einem sich verzögernden Markthochlauf wird von allen Interviewpartnern mit Blick auf den Aufbau der Ladeinfrastruktur als eher vernachlässigbar bzw. in der Abwägung eher tolerierbar angesehen. Es wird erwartet, dass der Ladeinfrastrukturausbau vor allem privatwirtschaftlich erfolgen wird. Der Ausbau und der Anschluss an das Stromnetz sowie langwierige administrative Prozesse werden als Haupthemmnisse für den schnellen Ladeinfrastrukturausbau gesehen.

### *Fokus Depotladen*

Auch von den Interviewpartnern wurde das Depotladen als wichtiger Baustein für die Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen bewertet, da dort im Regelfall eine kostengünstige Energieversorgung während längerer Standzeiten (v. a. nachts) realisiert werden kann. Vor diesem Hintergrund erklärt sich, dass die ersten Kunden von E-Lkw aktuell v. a. Flottenbetreiber sind, die ihre Depots für den Einsatz erster E-Lkw elektrifizieren können und die die geringeren Energiekosten als einen Hauptanreiz sehen. In Kombination mit Photovoltaik-Eigenversorgung entstehen für viele Transportunternehmen bereits heute zusätzliche Anreize und es gibt Bestrebungen seitens der Anwender und Hersteller Kooperationen mit Energiedienstleistern weiter auszubauen. Es wurde jedoch auch darauf verwiesen, dass auf Grund der unterschiedlichen Voraussetzungen in Depots, z. B. mit Blick auf die Platzverhältnisse, die Lkw-Einsatzprofile und die Netzanschlussleistung, auch perspektivisch keine einheitlichen Lösungen ausgerollt werden können.

Für die aktuellen Anwendungen im Regionalverkehr sind bei einer Nachtladung geringe Ladeleistungen von 22 kW AC ausreichend und allenfalls für Zwischenladungen höhere Ladeleistungen von 150 bis 350 kW nötig. Es wurde betont, dass es auch in Zukunft viele Anwendungen geben wird, bei denen eine Leistung von 100 bis maximal 200 kW im Depot ausreicht. So ist auch bei einer deutlich größeren Batterie mit 500 kWh nutzbarer Kapazität eine Leistung von 100 kW pro Fahrzeug für die Nachtladung ausreichend.

Mit Blick in die Zukunft teilen die Experten Ergebnisse aktueller Simulationen, die von einem Anteil von etwa 80 % des Energieumsatzes an Ladeinfrastruktur in Depots ausgehen. Einzelne Akteure, die in den nächsten Jahren v.a. auf Kunden mit Depotlademöglichkeit abzielen, gehen sogar von einem noch höheren Anteil aus. Mit Blick auf diesen Aspekt wird aber auch von zahlreichen Interviewpartnern eine große Unsicherheit zum Ausdruck gebracht, die sich mit möglichen technischen Restriktionen und erhöhten Kosten beim Ladeinfrastrukturaufbau und Netzanschluss begründen. Sie verweisen darauf, dass die bisherigen Abschätzungen zu den Anteilen der Ladeoptionen v. a. auf der Befragung von Anwendern und der Analyse von Fahrtendaten beruhen. Bei den bisherigen Praxiserfahrungen handelt es sich aber um eine noch geringe Stichprobe, die noch keine robuste Hochrechnung auf den Gesamtmarkt erlaubt. Angesichts der möglichen Hemmnisse für die Installation einer geeigneten Ladeinfrastruktur in Depots und deren ökonomischen Betrieb, halten einige Akteure auch eine deutlich höhere Bedeutung von öffentlicher (Schnell-)Ladeinfrastruktur in der Größenordnung von 40 bis 50 % am Gesamtenergieumsatz für denkbar. Prinzipiell wird auf die Wechselwirkungen von öffentlicher und nicht-öffentlicher Ladeinfrastruktur verwiesen, die für den weiteren Ausbau daher immer in Kombination betrachtet werden sollten.

Als Hauptherausforderung für den Aufbau von Ladeinfrastruktur in Depots wird die Netzanbindung bewertet. Insbesondere für den kurzfristigen Bedarf ist angesichts langer Planungs- und Realisierungszeiträume und hoher Kosten für den Netzausbau oft eine Orientierung an der verfügbaren Netzanschlussleistung und der aktuellen Positionierung von Unterwerken erforderlich. In diesem Kontext wird auch auf die Vielzahl an Netzbetreibern in Deutschland verwiesen, die einen beschleunigten Netzanschluss erschweren. Als Positivbeispiel wird Frankreich angeführt, das durch die starke Zentralisierung des Netzbetriebs und -ausbaus eine bessere und einheitliche Koordination und ein damit schnelleres Vorgehen erreicht. Vor diesem Hintergrund wird für das Depotladen auch

eine Öffnung von geeigneten Depots für Dritte als attraktive Option erwähnt und die Grundidee skizziert, dass sich die räumliche Verortung von Ladeinfrastruktur in Gewerbegebieten zunächst v. a. an den Orten mit hoher Anschlussleistung orientiert und nicht zwangsläufig an den heutigen typischen Standorten der Fahrzeuge. Neben den hohen Kosten und der langen Vorlaufzeit des Netzanschlusses wird die bislang fehlende Expertise und Vorerfahrung sowohl bei den Anwendern von E-Lkw als auch auf der Netzbetreiberseite als Hemmnis für einen schnellen Hochlauf gesehen. Insbesondere mit Blick auf die zukünftige Skalierung der Technologie müssen Sicherheitsvorgaben (u. a. Brandschutz) und der Platzbedarf bei der Positionierung der Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden. Mit zunehmender Anzahl an E-Lkw wird ein Lastmanagement für die Ladeinfrastruktur am Depot für sehr relevant erachtet und es sollten Anreize für eine Flexibilisierung der Stromnachfrage gesetzt werden.

### *Fokus öffentliches Laden*

Der Bedarf für öffentliches Laden ergibt sich nach Einschätzung der befragten Experten – unter der Annahme einer verfügbaren Depotladeinfrastruktur – für Fahrten jenseits des Depots ab 150 Kilometern Länge, um mit den aktuell verfügbaren Fahrzeugmodellen Tagesfahrleitungen von mehr als 300 Kilometern realisieren zu können. Öffentliche Ladeinfrastruktur wird insbesondere für die Erschließung des Straßengüterfernverkehrs relevant, der für den Einsatz von batterieelektrischen Lkw nach Einschätzung der befragten Experten perspektivisch den attraktivsten „Business Case“ darstellt. Gleichzeitig wird aber auch betont, dass die dafür notwendige Ladeinfrastruktur in den nächsten Jahren sehr wahrscheinlich die größte Engstelle für den Markthochlauf darstellt. Ähnlich zu vorliegenden Studien, wird die Einschätzung geteilt, dass Megawattladen (MCS) hierfür zwar notwendig sein wird, dass in vielen Fällen und insbesondere bei der Nachtladung im öffentlichen Raum (z. B. an Rastanlagen entlang von Fernverkehrsstraßen) eine niedrigere Ladeleistung ausreichend ist und eine Flexibilität bei der Batterienachladung in diesen Fällen verbleibt. Vor diesem Hintergrund wird auch erwartet, dass öffentliche Ladepunkte auf eine kombinierte Nutzung für MCS- und CCS-Laden ausgelegt werden.

Der Aufbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur wird analog zu den Vorgaben der AFIR im unmittelbaren Umfeld des Autobahnnetzes gesehen und ein maximaler Abstand von 3 Kilometern bzw. 5 Minuten Fahrzeit von der Autobahn als tolerierbar angesehen. Dieser erweiterte „Suchraum“ ergibt sich auch aufgrund der Flächen- und Stellplatzknappheit entlang der Hauptverkehrsachsen. Die ersten öffentlichen Ladestandorte werden voraussichtlich an Orten mit besonders guten Voraussetzungen entstehen und diese sollen ein frühzeitiges „positives Nutzungserlebnis“ sicherstellen. Neben der verkehrsgünstigen Lage entlang besonders hoch frequentierter Verkehrskorridore, die sich durch eine hohe Anzahl an potenziell elektrifizierbaren Fahrten auszeichnen, spielen auch weitere nicht-verkehrliche Rahmenbedingungen für die Erschließung der Flächen eine große Rolle. Eine wirtschaftliche Erschließung einer Fläche ist nur dann gegeben, wenn eine langfristige Konzession vergeben werden kann, die eine langfristige Entwicklung des Standorts und eine sukzessive Skalierung der Ladeinfrastruktur ermöglicht. Die aktuell verfügbare Netzanschlussleistung ist dabei als Kriterium bei der Standortsuche der längerfristig verfügbaren Anschlussleistung am jeweiligen Standort nachgeordnet.

Nach Einschätzung der Interviewpartner liefern die Vorgaben der AFIR eine gute Grundabdeckung in Europa. Sie verweisen – ähnlich zu aktuellen Studien – jedoch auch darauf, dass in Deutschland basierend auf den prognostizierten Fahrzeugzahlen zwar eine vergleichbare Netzdichte, aber eine deutlich höhere Leistung je Standort angepeilt werden sollte und aktuell auch geplant wird. Es wird zudem darauf verwiesen, dass die Vorgaben der AFIR sich nur unter der Maßgabe, dass das Depotladen umfassend erschlossen werden kann, als zufriedenstellend darstellen. Die Zielzahlen von ACEA (2021) werden hingegen tendenziell als zu hoch eingeschätzt.

Mit Blick auf die Kosten des Hochleistungsladens wird von mehreren Experten ein eher positives Bild gezeichnet. Zwar sind die Investitionskosten – je nach standortbedingten Rahmenbedingungen – für einen MCS-Ladepunkt etwa 3 bis 5-mal höher als bei einem CCS-Ladepunkt. Jedoch kann aufgrund der hohen Ladeleistung bei hoher Auslastung auch ein deutlich höherer Energieumsatz realisiert werden. Gegenüber früheren Prognosen zum MCS-Laden und im Vergleich zum CCS-Laden bei Lkw können daher deutlich günstigere Preise angeboten werden. Ein Preisniveau von 0,4 € pro Kilowattstunde (netto) wird als realistischer Markteinstiegspreis genannt.

Mit Blick auf zukünftige Entwicklungen wird für das Hochleistungsladen auf die hohen Ladeverluste im Kabel zwischen Transformator und Fahrzeug verwiesen. Ziel sollte es sein, die Kabelverbindung auf ein Mindestmaß zu verringern und es werden auch automatisierte Ladeverbindungen über die Fahrzeugunterseite oder über dem Fahrerhaus via Stromabnehmer als mögliche Entwicklungen gesehen. Perspektivisch wird angesichts der Stellplatzknappheit zudem die Bedeutung von platzsparenden Ladelösungen nach Einschätzung der konsultierten Experten an Bedeutung gewinnen.

Der Aufbau des Ladeinfrastrukturnetzes wird nach Einschätzung der Experten durch die Privatwirtschaft erfolgen, dieser jedoch maßgeblich durch die staatliche Rahmensetzung beeinflusst. Es wird erwartet, dass der Markt im Vergleich zum Pkw-Ladenetz von einer geringeren Anzahl an Anbietern charakterisiert sein wird. Die Möglichkeit von Roaming und anbieterübergreifendem Reservieren von Ladesäulen sollte sicherstellen, dass auch zukünftig mehrere Akteure am Markt beteiligt sind und ein Wettbewerb geschaffen wird, der attraktive Preise für Anwender sicherstellt.

Analog zum Depotladen wird insbesondere bei der Nachtladung ein hohes Potenzial für netzdienliches Laden gesehen. Bei zunächst geringer Netzanschlussleistung werden von einzelnen Interviewpartnern auch stationäre Batteriespeicher zur Abdeckung von Lastspitzen als mögliche Zwischenlösung genannt. Es wird andererseits von anderen Interviewpartnern jedoch betont, dass Batteriespeicher einen leistungsfähigen Netzanschluss bei starker Elektrifizierung von Flotten bzw. einer Vielzahl an Ladepunkten an einem Standort nicht ersetzen können.

Als Hauptherausforderung wird der erforderliche schnelle Ladeinfrastrukturaufbau in den kommenden 10 Jahren bis zum Jahr 2035 gesehen, der die zentrale Voraussetzung für den geplanten Markthochlauf von batterieelektrischen Lkw darstellt. In diesem Kontext wurde bemerkt, dass zwar der technische Nachweis ohne Zweifel erbracht wurde, dass Ladeleistungen von 1 MW problemlos möglich und bis zu 3,7 MW denkbar sind, dass der Standardisierungsprozess aber noch nicht abgeschlossen ist und daher kurzfristig nur CCS-Ladestationen verfügbar sein werden. Perspektivisch wird beim öffentlichen Laden jedoch ein Schwerpunkt auf MCS-Ladern erwartet, der es dennoch erlaubt, zu bestimmten Nachfragezeiten (insbesondere nachts) auch mit geringerer (CCS-)Geschwindigkeit zu laden. Die Zuverlässigkeit der Ladeinfrastruktur für Lkw muss angesichts der hohen Kosten von Transportausfällen hingegen bereits zu einem frühen Zeitpunkt extrem hoch – und deutlich höher als bei Pkw – sein.

Angesichts des geplanten schnellen Markthochlaufs aller Hersteller für batterieelektrische Lkw wird die Gefahr einer Überdimensionierung von Netzanschlüssen und von Ladestandorten als äußerst gering eingeschätzt. Als positive Entwicklung wird die mittlerweile klare Technologiepräferenz im Lkw-Markt zugunsten des batterieelektrischen Lkw bewertet, der die Richtungssicherheit für Infrastrukturinvestitionen deutlich erhöht und eine neue Dynamik im Markt ermöglicht.

**Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw:****Allgemein:**

- Verfügbarkeit einer ausfallsicheren Ladeinfrastruktur ist die zentrale Voraussetzung für den Markthochlauf von E-Lkw.
- Ein Vorlauf des Ausbaus gegenüber dem geplanten Markthochlauf von E-Lkw muss immer sichergestellt werden und temporäre Überdimensionierung wird als tolerierbar eingeschätzt.

**Depotladen:**

- Ladeinfrastruktur im Depot bildet einen zentralen Baustein der Elektrifizierung. Die Bedeutung kann bisher aber nur anhand von Simulationen und wenigen Praxisbeispielen abgeschätzt werden.
- Die Netzanbindung stellt sowohl hinsichtlich vorhandener Anschlussleistung als auch der Umsetzung neuer bzw. leistungstärkerer Netzanschlüsse die größte Restriktion dar.

**Öffentliches Laden:**

- Öffentliche (Schnelllade-)Infrastruktur ist insbesondere für den Fernverkehr relevant und muss vorrangig entlang und in der Nähe des Autobahnnetzes aufgebaut werden.
- Ladeparks werden eine Kombination aus CCS- und MCS-Lademöglichkeiten umfassen – mit zunehmendem Schwerpunkt auf MCS-fähigen Ladepunkten, insbesondere für den Fernverkehr.
- Die Vorgaben der AFIR stellen eine gute Grundabdeckung für Europa dar, für Deutschland muss aber bereits heute ein deutlich höherer Ausbau realisiert werden.
- Es wird eine vorwiegend privatwirtschaftliche Umsetzung der öffentlichen Ladeinfrastruktur erwartet.
- Insbesondere der notwendige schnelle Aufbau in den kommenden 10 Jahren wird v. a. mit Blick auf den notwendigen Netzanschluss als herausfordernd bewertet.
- Der Mangel an geeigneten Flächen mit ausreichender Netzanschlussleistung und die Notwendigkeit von längerfristigen Konzessionen zur wirtschaftlichen Standorterschließung verschärfen die Problematik.

## **5 Handlungsfelder für den erfolgreichen Markthochlauf von E-Lkw in Deutschland – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen**

Die Interviewpartner zeigen sich grundsätzlich optimistisch hinsichtlich des langfristigen Markterfolgs von E-Lkw und es lässt sich herstellerübergreifend ein klarer Schwerpunkt bei der Produktstrategie auf batterieelektrische Nutzfahrzeuge für den deutschen bzw. europäischen Markt erkennen. Insbesondere für die kurz- bis mittelfristige Perspektive werden jedoch erhebliche Herausforderungen für den Markthochlauf gesehen. In einem gemeinsamen Workshop mit den Interviewpartnern wurden die zentralen Herausforderungen vertieft diskutiert und priorisiert und Handlungsempfehlungen aus Sicht der beteiligten Fahrzeughersteller und Infrastrukturexperten entwickelt. Im Folgenden sind die als besonders hoch bewerteten Herausforderungen zusammengefasst und in absteigender Priorisierung dargestellt und es werden konkrete Handlungsempfehlungen aus Sicht der beteiligten Experten benannt.

## 1: Netzanschluss von Ladeinfrastruktur

### *Herausforderung*

Der Ausbau von Ladeinfrastruktur wird durchgängig als wichtigster Hebel für den Markthochlauf von E-Lkw bewertet. Als besonders kritisch werden in diesem Zusammenhang – sowohl für die private als auch für die öffentliche Ladeinfrastruktur – die teilweise hohen Kosten, vor allem aber die langen Vorlaufzeiten beim Netzausbau und -anschluss bewertet. Insbesondere für Deutschland wird die Vielzahl an Verteilnetzbetreibern als kritisch gesehen, da diese u. a. ein einheitliches Vorgehen und einen schnellen Wissensaufbau erschweren. Wie sich das zukünftige Verhältnis von privater zu öffentlicher Ladeinfrastruktur entwickelt, wird nach Einschätzung der Befragten voraussichtlich auch durch die technische und ökonomische Realisierbarkeit des notwendigen Netzanschlusses an den jeweiligen Standorten stark beeinflusst werden.

### *Handlungsempfehlung*

Angesichts der herausragenden Bedeutung des Netzausbaus und -anschlusses wird eine vorausschauende Planung von Politik und Netzbetreibern als essenziell erachtet. Diese sollte die entstehenden Bedarfe durch die Elektrifizierung des Pkw- und Nutzfahrzeugbestands sowie weitere Ausbaubedarfe durch Photovoltaik, Wärmewende und Industrie betrachten, Zielzustände definieren und diese in der frühen Ausbauplanung bereits berücksichtigen. In diesem Kontext sind auch proaktive Investitionen in den Netzausbau durch die Netzbetreiber erforderlich.

Bereits kurzfristig wird eine größere Transparenz über die verfügbare Netzanschlusskapazität als hilfreich für die Standortplanung gesehen. In diesem Kontext wird auf Frankreich als Positivbeispiel verwiesen, das die verfügbaren Kapazitäten in öffentlichen Karten verfügbar hält.

Netzanschlussprozesse sollten beschleunigt, digitalisiert, vereinfacht und über die Vielzahl an Netzbetreibern standardisiert werden. In diesem Zuge wird auch ein kurzfristiger Personalaufbau bei den Netzbetreibern als notwendig gesehen, um die steigende Anzahl an Anfragen zu bewältigen und qualifiziert bearbeiten zu können.

Mit Blick auf die hohen Netzanschlusskosten wird sowohl eine zielgerichtete Förderung bei hohen Netzanschlusskosten gefordert als auch eine verstärkte Umlage der Kosten auf alle Nutzer erwogen. Ergänzend werden monetäre Anreize für die Flexibilisierung der Stromnachfrage als weiteres Handlungsfeld genannt.

## 2: Aufbau von privater Ladeinfrastruktur

### *Herausforderung*

Zwar ist das Laden im Depot für die überwiegende Anzahl der Anwendungsfälle die naheliegendste Option. Mit der praktischen Umsetzung sind aber häufig größere Herausforderungen verbunden.

Insbesondere bei großen Flotten mit hohem Elektrifizierungsgrad und intensiver Lkw-Nutzung mit geringen Standzeiten ist eine hohe Anschlussleistung notwendig. Angesichts der geringen Standortflexibilität sind Depots daher teilweise schlechter zu elektrifizieren als potenzielle öffentliche Ladeorte. Zusätzlich müssen Sicherheitsanforderungen beachtet werden, die die Positionierung der Depotladeinfrastruktur erschweren. Bisher liegen nur wenige Praxiserfahrungen von Anwendern vor, so dass die Herausforderungen für die Zukunft auf der Basis einer geringen Stichprobe noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können. Ob sich die prognostizierten Potenziale des Depotladens technisch und ökonomisch tatsächlich realisieren lassen, wird daher zumindest teilweise bezweifelt.



Erschwerend kommt hinzu, dass das Transportgewerbe von geringen Margen geprägt ist und sich angesichts geringer Investitionsspielräumen beim Aufbau von Ladeinfrastruktur bisher zurückhält und insbesondere kleine Unternehmen die Technologieentscheidung weiter aufschieben.

#### *Handlungsempfehlung*

Angesichts der Hauptherausforderung des Netzan Anschlusses von Depots wird eine Sensibilisierung der Unternehmen für die teilweise langen Vorlaufzeiten und Restriktionen bei der Netzan Anschlussleistung als wichtig erachtet. Bei hohen Netzan Anschlusskosten sollten möglichst unbürokratische staatliche Fördermittel zum Einsatz kommen. Zudem sollten verstärkt Anreize für das weniger netzbelastende Laden in der Nacht etabliert werden.

Ein Ausweichen auf Depotladeinfrastruktur von anderen Unternehmen wird als möglicher Lösungsweg bei Netzan Anschlussrestriktionen gesehen. In diesem Kontext wird eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen nahegelegt, um solche Nutzungsmodelle zu ermöglichen. Pilot- und Forschungsprojekte könnten in diesem Bereich wichtige Impuls für die Umsetzung liefern.

Angesichts des hohen Umsetzungsaufwands und der limitierten Kapazitäten bei Transportunternehmen wird Beratungsunternehmen, die Expertise zum Ladeinfrastrukturaufbau den betroffenen Unternehmen zur Verfügung stellen, eine hohe Bedeutung für die Erschließung des Depotladens beigemessen.

### **3: Langfristig verlässliche Rahmenbedingungen**

#### *Herausforderung*

Die Experten sehen durch die langfristigen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte, die Einführung des CO<sub>2</sub>-Preises über den ETS und – im Falle von Deutschland – die CO<sub>2</sub>-basierte Maut verlässliche Rahmenbedingungen gegeben, die die Wirtschaftlichkeit von E-Lkw robust absichern und Planungssicherheit für Hersteller und Anwender geben. Die aus der politischen Kräfteverschiebung infolge der Europawahlen im Juni 2024 möglicherweise resultierende weniger ambitionierte Ausgestaltung und Weiterentwicklung bestehender Regulierungen in der neuen europäischen Legislaturperiode wird als Risiko für die bereits getätigten Investitionsentscheidungen bewertet.

#### *Handlungsempfehlung*

Die Abschwächung von bestehenden Zielwerten und Rahmensetzungen als Folge der EU-Wahlen im Juni 2024 wurde als großes Risiko bewertet. Als besonders relevant wurde in diesem Kontext die Fortschreibung des CO<sub>2</sub>-Preises und der CO<sub>2</sub>-basierten Lkw-Maut in Deutschland genannt, da diese den Gesamtkostenvorteil von E-Lkw robust absichern. Deren Verstetigung und europaweite Ausweitung – im Falle der Lkw-Maut – wurden als wichtige Hebel benannt. Eine Fortführung der staatlichen Förderung der Fahrzeugbeschaffung wurde als weniger relevant bewertet und in Aussicht gestellt, dass E-Lkw ab 2030 ohne jegliche Förderung wirtschaftlich tragfähig sein und den Markt dominieren können.

Analog zur als höchst wirksam eingeschätzten Regulierung der Angebotsseite durch die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte wird auf bisher ausstehende regulative Impulse für die Nachfrageseite verwiesen. Es wird angemerkt, dass vergleichbare Ziele für die Nachfrageseite (beispielsweise Zulassungsquoten für E-Lkw für Flottenbetreiber) bereits kurzfristig Wirkung zeigen und den Fahrzeugabsatz beschleunigen könnten.

## 4: Aufbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur

### *Herausforderung*

Die europäische Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) schafft zwar Planungssicherheit für alle Stakeholder über den europaweiten Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge in einer Basisabdeckung. Es ist jedoch ein unterschiedliches Engagement der Mitgliedsländer beim Aufbau zu beobachten, so dass die Flächendeckung in den kommenden Jahren größere Unterschiede in Europa aufweisen wird und somit den Einsatz von E-Lkw in Europa unterschiedlich stark ermöglicht. Sollte sich die Umsetzung des Depotladens – insbesondere auf Grund von Restriktionen beim Netzanschluss – nicht im prognostizierten Maße realisieren lassen, werden die Vorgaben der AFIR als deutlich zu niedrig eingeschätzt. Als weitere Unsicherheit wird die Fortschreibung der Regulierung nach den Europawahlen im Juni 2024 benannt, die der erforderlichen Planungssicherheit für den Ladeinfrastrukturaufbau möglicherweise entgegensteht.

### *Handlungsempfehlung*

Die Fortschreibung der europäischen Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) wird als wichtige Maßnahme für die Planungssicherheit aller beteiligten Akteure gesehen. Die Formulierung von nationalen Ausbauplänen, die über das Ambitionsniveau der AFIR hinausgehen wird – u. a. für Deutschland – als wichtig und notwendig erachtet. Es werden ebenfalls Sanktionierungsmöglichkeiten für Mitgliedsstaaten bei Nichterfüllung der AFIR-Ziele in Erwägung gezogen, um die Verbindlichkeit des Ausbaus weiter zu erhöhen, wenn auch deren Umsetzungswahrscheinlichkeit als eher gering eingeschätzt wird.

Insbesondere beim Aufbau von (MCS-)Hochleistungsladeinfrastruktur wird eine staatliche Förderung bzw. Unterstützung für notwendig erachtet. Die staatliche Förderung von öffentlichen Ladestandorten sollte unter Berücksichtigung von privatwirtschaftlich erschlossenen Standorten erfolgen, um Marktverzerrungen zwischen geförderten und nicht geförderten Standorten zu vermeiden und eine optimale Netzabdeckung zu erreichen.

Für eine an den Nutzerbedürfnissen orientierte öffentliche Ladeinfrastruktur wird die Schaffung einer standardisierten und anbieterübergreifenden Datenplattform zur Reservierung und Buchung von Ladestationen als essenziell erachtet. Bisher werden jedoch Widerstände seitens der Ladeinfrastrukturanbieter beobachtet und Roamingansätze als mögliche Alternativen gesehen. Perspektivisch sollte ein intelligentes und vernetztes Gesamtsystem entstehen, das sich von der Routenplanung der Fahrzeuge, über die Buchung der Ladepunkte bis hin zu einem intelligenten Lastmanagement erstreckt.

## 5: Change Management bei Anwendern

### *Herausforderung*

Das Ausmaß der Transformation setzt ein Change Management bei allen Akteursgruppen voraus. Es wird jedoch in diesem Kontext auf die besondere Bedeutung der Transportunternehmen hingewiesen. Ein schneller Technologiewechsel kann nur gelingen, wenn auch die Anwender diesen aktiv angehen. Aktuell werden – u. a. angesichts des hohen Anteils von kleinen Unternehmen – noch relevante Wissensdefizite und eine Zurückhaltung bei der Fahrzeugbeschaffung beobachtet. Insbesondere für kleinere Unternehmen wird auf die schwierigeren Finanzierungsbedingungen für zusätzliche Investitionen bei der Fahrzeugbeschaffung und dem Aufbau von Ladeinfrastruktur verwiesen. Mit Blick auf die Perspektiven der Technologie wird von den Fahrzeugherstellern bei den Anwendern eine teilweise noch vorherrschende Skepsis wahrgenommen. Die fehlende Kontinuität

bei der öffentlichen Förderung und Ausgestaltung weiterer Rahmenbedingungen mit Blick auf alternative Antriebe wird als äußerst kontraproduktiv bewertet, da sie die Risiken für Investitionen für Transportunternehmen erhöht. Es wird befürchtet, dass ein verspätetes Handeln, insbesondere bei kleineren Unternehmen, die Transformation verlangsamen kann, v. a. aber die Wettbewerbsposition dieser Unternehmen perspektivisch deutlich verschlechtert. Angesichts der veränderten technologischen Eigenschaften und Kostenstruktur von E-Lkw werden von den Herstellern längerfristig auch Anpassungen im Logistiksystem erwartet, die auf den Einsatz von E-Lkw optimiert sind.

#### *Handlungsempfehlung*

Die fundierte Beratung von Transportunternehmen wird als besonders wichtig für die Akzeptanz und den Umstieg auf E-Lkw in der Praxis beurteilt. Es wird darauf verwiesen, dass sich durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen kaum Blaupausen entwickeln lassen und eine stark individualisierte Beratung erforderlich ist.

Es wird erwartet, dass zunehmend ein Beratungsnetzwerk entsteht, auf das als Dienstleistung zurückgegriffen werden kann; sodass der Kompetenzaufbau im jeweiligen Transportunternehmen nicht zwingend erforderlich ist. Als wichtige Inhalte werden unter anderem maßgeschneiderte Touren- und TCO-Analysen (Total Cost of Ownership), die Beratung bei der Förderung und beim Aufbau von Ladeinfrastruktur sowie der notwendigen Netzanbindung genannt.

## **6: Flächen für (öffentliche) Ladeinfrastruktur**

#### *Herausforderung*

Insbesondere an Fernverkehrskorridoren ist eine hohe Nachfrage nach großen und leistungsfähigen Ladeparks zu erwarten. Gleichzeitig ist an diesen Orten der Flächendruck heute schon sehr hoch und es herrscht bereits Stellplatzknappheit, die sich durch den Platzbedarf von Ladestationen weiter verschärft. Für die wirtschaftliche Erschließung von Flächen für Ladestandorte sind langfristige Konzessionsverträge und ein gesicherter Netzanschluss für den Zielausbauzustand Bedingungen. Die beschränkte Verfügbarkeit von Flächen, die diese Kriterien erfüllen, stellt ein Hemmnis für den schnellen Aufbau von Ladeparks dar, die wiederum essenziell sind, um batterieelektrische Lkw im Fernverkehr zu etablieren.

#### *Handlungsempfehlung*

Für die Gewinnung zusätzlicher Lkw-Stellplätze entlang des Autobahnnetzes wird ein stärkeres Engagement von Politik und Verwaltung als notwendig erachtet. Dabei sollten insbesondere auch die hohen Bedarfe für öffentliches Nachladen Berücksichtigung finden. In diesem Kontext wird auch erwähnt, dass der Ausbau der Stellplatzkapazitäten auch jenseits der Ladeinfrastrukturanforderungen als Chance betrachtet werden sollte, attraktive und sichere Stellplätze für Transportunternehmen zur Verfügung zu stellen und damit vorherrschende Missstände zu beheben.

Für die zeitnahe Umsetzung von öffentlichen Ladeparks wird zudem eine öffentliche Bereitstellung verfügbarer Informationen zu geeigneten Flächen, voraussichtlichen Ladebedarfen und den Netzanschlussgegebenheiten vorgeschlagen.

## **Markthochlauf von E-Lkw – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen:**

### **1: Netzanschluss von Ladeinfrastruktur:**

Begrenzte Netzanschlusskapazität und lange Vorlaufzeiten bis zur Umsetzung des Netzanschlusses als größte Limitierung für den Aufbau von leistungsfähiger Ladeinfrastruktur.

- Vorausschauende Netzausbauplanung, die sich an Zielzuständen orientiert sowie eine kurzfristige Schaffung von Transparenz über verfügbare Netzkapazitäten.

### **2: Aufbau von privater Ladeinfrastruktur:**

Aufbau von Depotladeinfrastruktur durch standortspezifische Rahmenbedingungen erschwert und bisher wenig Praxiserfahrung, die Prognose der realisierbaren Potenziale erlaubt.

- Sensibilisierung von Unternehmen für teilweise lange Vorlaufzeiten des Ladeinfrastrukturausbaus, Förderung bei hohen Netzanschlusskosten und Ausbau des Beratungsangebots.

### **3: Langfristig verlässliche Rahmenbedingungen:**

Regulatorische und finanzielle Rahmenbedingungen, die den Umstieg auf E-Lkw und den Aufbau der Ladeinfrastruktur sicherstellen, sind politisch nicht abgesichert.

- Bestehende Rahmenbedingungen (u. a. AFIR, CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte, CO<sub>2</sub>-Preis) sollten ambitioniert und langfristig fortgeschrieben werden und um weitere Instrumente (z. B. E-Lkw-Quote für Flottenbetreiber) ergänzt werden.

### **4: Aufbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur:**

Vorgaben der AFIR schaffen lediglich Basisabdeckung für öffentliche Ladeinfrastruktur und geben keine langfristige Planungssicherheit.

- Fortschreibung der AFIR und Erhöhung der Verbindlichkeit der nationalen Ziele durch geeignete Sanktionierungsmöglichkeiten sowie Förderung von MCS-Ladepunkten.

### **5: Change Management bei Anwendern:**

Einführung von E-Lkw erfordert Transformationsprozesse bei zahlreichen Akteuren und setzt insbesondere kleine Transportunternehmen mit geringen Margen unter Druck.

- Ausbau der Beratung von Transportunternehmen, die sich an den jeweiligen Gegebenheiten orientiert.

### **6: Flächen für (öffentliche) Ladeinfrastruktur:**

Fehlende Flächen für Ladeparks entlang von Fernstraßen sowie ein erhöhter Flächendruck auf bestehende Stellplatzflächen durch den Ausbau von Ladeinfrastruktur.

- Stärkeres Engagement von Politik und Verwaltung für die Gewinnung von Stellplatzflächen entlang von Fernverkehrskorridoren sowie öffentliche Bereitstellung von Informationen zu geeigneten Flächen.

## 6 Literaturverzeichnis

- (EU) 2019/1161 (2019): European Parliament; European Council. DIRECTIVE (EU) 2019/ 1161 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of 20 June 2019 - amending Directive 2009/ 33/ EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles, (EU) 2019/1161, zuletzt geprüft am 23.12.2019.
- (EU) 2023/1804 (2023): European Council; European Parliament. Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU, (EU) 2023/1804. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- (EU) 2023/2413 (2023): European Parliament; European Council. DIRECTIVE (EU) 2023/2413 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, (EU) 2023/2413. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>.
- (EU) 2024/1610 (2024): Europäisches Parlament. Regulation (EU) 2024/1610 of the European Parliament and of the Council of 14 May 2024 amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, amending Regulation (EU) 2018/858 and repealing Regulation (EU) 2018/956 (Text with EEA relevance), (EU) 2024/1610. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1610>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- 1999/62/EC (1999): European Parliament; European Council. Consolidated text: Directive 1999/62/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 1999 on the charging of vehicles for the use of road infrastructures, 1999/62/EC. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A01999L0062-20220324>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- ACEA (2021): ACEA Position Paper: Proposal for the Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR). Online verfügbar unter [https://www.acea.auto/files/ACEA\\_Position\\_Paper-Alternative\\_Fuels\\_Infrastructure\\_Regulation.pdf](https://www.acea.auto/files/ACEA_Position_Paper-Alternative_Fuels_Infrastructure_Regulation.pdf).
- Aral: Elektro-Lkw Ladestation - E-Lkw laden bei Aral pulse. Online verfügbar unter <https://www.aral.de/de/global/retail/pulse/Ultraschnell-unterwegs/laden-fuer-elektro-lkw.html>, zuletzt geprüft am 23.08.2024.
- Basma, H.; Buysse, C.; Zhou, Y.; Rodriguez, F. (2023): Total cost of ownership of alternative powertrain technologies for Class 8 long-haul trucks in the United States. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/publication/tco-alt-powertrain-long-haul-trucks-us-apr23/>, zuletzt geprüft am 06.09.2024.
- Basma, H.; Zhou, Y.; Rodriguez, F. (2022): Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: A total cost of ownership analysis. International Council on Clean Transportation (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/eu-hvs-fuels-evs-fuel-cell-hdvs-europe-sep22.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- BFStrMG (2011): Deutscher Bundestag. Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Bundesfernstraßenmautgesetz), BFStrMG, Fassung vom 27.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bfstrmg/BFStrMG.pdf>, zuletzt geprüft am 04.07.2018.
- BMDV (2024): Pressemitteilung: BMDV informiert zur Ausschreibung für Lkw-Schnellladeinfrastruktur. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2024/061-wissing-lkw-schnellladeinfrastruktur.html>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.

- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 10.05.2021.
- BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge, Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 27.04.2021.
- Bundesnetzagentur: Ladesäulenkarte. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/Ladesaeulenkarte/start.html>, zuletzt geprüft am 23.08.2024.
- Burges, K.; Kippelt, S.; Probst, F. (2021): Grid-related challenges of high power charging stations for battery electric long haul trucks. Transport & Environment (Hg.). Online verfügbar unter [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/01/2022\\_01\\_TE\\_grid\\_integration\\_long\\_haul\\_truck\\_charging\\_study\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/01/2022_01_TE_grid_integration_long_haul_truck_charging_study_final.pdf), zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Buysse, C. (2022): Zero-emission bus and truck market in the United States and Canada: A 2021 update. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/update-ze-truck-bus-market-us-can-sept22.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Die Bundesregierung (2024a): CO<sub>2</sub>-Preis steigt auf 45 Euro pro Tonne. Die Bundesregierung (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622>, zuletzt aktualisiert am 05.09.2024.
- Die Bundesregierung (2024b): Ein Plan fürs Klima. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/klimaschutzgesetz-2197410>, zuletzt aktualisiert am 05.09.2024.
- Die Bundesregierung (o.D.): Reform der Lkw-Maut: Für mehr Klimaschutz im Güterverkehr. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/lkw-maut-co2-2194574>, zuletzt aktualisiert am 05.09.2024.
- Drive to Zero (2024): Memorandum of Understanding on Zero-Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles. Online verfügbar unter <https://globaldrivetozero.org/mou-nations/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- electrive.com (13.02.2024): Pressemitteilung: Private truck charging initiative PVSM Energy launched in Germany: Nora Manthey. Online verfügbar unter <https://www.electrive.com/2024/02/12/private-truck-charging-initiative-pvsm-energy-launched-in-germany/>.
- EP Committee on Transport and Tourism (14.02.2024): Pressemitteilung: Transport Committee pushes for “greener” trucks and buses. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240212IPR17627/transport-committee-pushes-for-greener-trucks-and-buses>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- EU - European Union (Hg.) (2023): DIRECTIVE (EU) 2023/2413 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>, zuletzt geprüft am 05.04.2024.
- Europäisches Parlament (2024): Pressemitteilung: Euro 7: Parliament adopts measures to reduce road transport emissions. Online verfügbar unter

- <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20240308IPR19017/euro-7-parliament-adopts-measures-to-reduce-road-transport-emissions>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- European Commission (18.01.2024): Pressemitteilung: Commission welcomes agreement on strong EU targets to reduce CO<sub>2</sub> emissions from new trucks and urban buses. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_24\\_287](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_24_287), zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Eurowag (2024): Latest Toll Rate Changes Across European Countries Due to the Implementation of CO<sub>2</sub> Classes. Online verfügbar unter <https://www.eurowag.com/blog/latest-toll-rate-changes-across-european-countries-due-to-the-implementation-of-co2-classes>, zuletzt aktualisiert am 05.09.2024.
- Global Market Insights (Hg.) (2023a): Cars Market Size, Sales Channel & Global Forecast, 2023 - 2032. Online verfügbar unter <https://www.gminsights.com/industry-analysis/cars-market>, zuletzt geprüft am 09.05.2024.
- Global Market Insights (Hg.) (2023b): Heavy-Duty Trucks Market & Forecast, 2023 – 2032. Online verfügbar unter <https://www.gminsights.com/industry-analysis/heavy-duty-trucks-market>, zuletzt geprüft am 09.05.2024.
- Göckeler, K.; Hacker, F.; Mottschall, M.; Blanck, R.; Görz, W.; Kasten, P.; Bernecker, T.; Heinzemann, J. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr - 1. Teilbericht, Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Öko-Institut; Hochschule Heilbronn. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Göckeler, K.; Steinbach, I.; Görz, W.; Hacker, F.; Blanck, R.; Mottschall, M. (2023): StratES – Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen., Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Öko-Institut. Öko-Institut (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Szenarien-Elektrifizierung-Strassengueterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 27.09.2023.
- Gowans, G. (2024): Not just Germany: the state of play as more countries roll out CO<sub>2</sub> road tolls for trucks. trans.info. Online verfügbar unter <https://trans.info/en/co2-road-tolls-for-trucks-385731>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- IEA - International Energy Agency (2021): An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. Paris. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- IEA - International Energy Agency (2022): Global Electric Vehicle Outlook 2022: International Energy Agency. International Energy Agency.
- IEA - International Energy Agency (2023): Global EV Outlook 2023, Catching up with climate ambitions. International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dac14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>, zuletzt geprüft am 06.09.2024.
- IEA - International Energy Agency (2023): Global EV Outlook. Paris. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- IEA - International Energy Agency (2024): Global EV Outlook 2024, Moving towards increased affordability. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVO Outlook2024.pdf>, zuletzt geprüft am 06.09.2024.
- Kasten, P.; Jöhrens, J. (2022): Anrechnung der Elektromobilität auf die THG-Quote – Motivation und Wirkung. Öko-Institut und ifeu gGmbH (Hg.). Online verfügbar unter

- [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Verkehr/thg\\_quote\\_anrechnung\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/thg_quote_anrechnung_bf.pdf), zuletzt geprüft am 06.09.2024.
- Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W. (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr, Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“. Öko-Institut. Freiburg, Berlin, Darmstadt. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 06.09.2024.
- Manthey, N. (2024): Private truck charging initiative PVSM Energy launched in Germany. electrive.com (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.electrive.com/2024/02/12/private-truck-charging-initiative-pvsm-energy-launched-in-germany/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Mao, S.; Rodriguez, F. (2022): The evolution of heavy-duty vehicles in China: A retrospective evaluation of CO2 and pollutant emissions from 2012 to 2021. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/10/china-hvs-ndc-tia-evolution-hdv-emissions-oct22.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Mao, S.; Zhang, Y.; Bieker, G.; Rodriguez, F. (2023): Zero-emission bus and truck market in China: A 2021 update. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/publication/china-hvs-zero-emission-bus-truck-market-2021-jan23/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Milence (06.05.2024): Pressemitteilung: Milence is building its second charging hub for heavy-duty vehicles along a key corridor in southern France. Online verfügbar unter <https://milence.com/press-release/milence-is-building-its-second-charging-hub-for-heavy-duty-vehicles-along-a-key-corridor-in-southern-france/>.
- Milence (2024a): Pressemitteilung: Milence announces new charging hub in Ödeshög, Sweden bridging key transport route between Stockholm and Malmö. Online verfügbar unter <https://milence.com/press-release/milence-announces-new-charging-hub-in-odeshog-sweden-bridging-key-transport-route-between-stockholm-and-malmo/>.
- Milence (2024b): Pressemitteilung: Milence is building its second charging hub for heavy-duty vehicles along a key corridor in southern France. Online verfügbar unter <https://milence.com/press-release/milence-is-building-its-second-charging-hub-for-heavy-duty-vehicles-along-a-key-corridor-in-southern-france/>.
- Milence (25.04.2024): Pressemitteilung: Milence announces new charging hub in Ödeshög, Sweden bridging key transport route between Stockholm and Malmö. Online verfügbar unter <https://milence.com/press-release/milence-announces-new-charging-hub-in-odeshog-sweden-bridging-key-transport-route-between-stockholm-and-malmo/>.
- Mottschall, M.; Kasten, P.; Rodríguez, F. (2020): Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective. Unter Mitarbeit von Öko-Institut und International Council on Clean Transportation (ICCT). Öko-Institut.
- Mulholland, E.; Egerstrom, N. (2024): European heavy-duty vehicle market development quarterly (January - June 2023). ICCT (Hg.). Online verfügbar unter [https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/01/ID-70-%E2%80%93-EU-R2Z-Q2\\_final.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/01/ID-70-%E2%80%93-EU-R2Z-Q2_final.pdf), zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Mulholland, E.; Rodriguez, F. (2023): Zero-emission bus and truck market in Europe: A 2022 update. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/08/EU-HDV-truck-market-update-fact-sheet-for-posting.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Mulholland, E.; Rodríguez, F. (2023): Zero-emission bus and truck market in Europe: A 2022 update. The International Council on Clean Transportation (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/08/EU-HDV-truck-market-update-fact-sheet-for-posting.pdf>, zuletzt geprüft am 07.08.2024.



- Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2023): Einfach E-Lkw laden. BMDV (Hg.). Online verfügbar unter [https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2023/06/UserJourney\\_Einfach-E-LKW-laden.pdf](https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2023/06/UserJourney_Einfach-E-LKW-laden.pdf).
- NOW (Hg.) (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr, Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern. Online verfügbar unter <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.
- Paulsen, T. (2024): Anrechnung der Elektromobilität auf die THG-Quote - Motivation und Wirkung. ADAC (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/thg-quote/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Plötz, P.; Speth, D.; Rose, P. (2020): Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw., Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA). Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung. Online verfügbar unter <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/8e4ba65c-887b-4338-a3fb-26ad89de936e/content>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Pölös, Z. (2022): Netherlands introduces subsidies for electric and hydrogen trucks. trans.info. Online verfügbar unter <https://trans.info/en/subsidies-285890>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Ragon, P.-L.; Buysse, C.; Sen, A.; Meyer, M.; Benoit, J.; Miller, J.; Rodriguez, F. (2023): Potential Benefits of the U.S. Phase 3 Greenhouse Gas Emissions Regulation for Heavy-Duty Vehicles. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/04/hdv-phase3-ghg-standards-benefits-apr23.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Sachverständigenrat für Wirtschaft (Hg.) (2024): Güterverkehr zwischen Infrastrukturanforderungen und Dekarbonisierung, Frühjahrsgutachten 2024.
- SaubFahrzeugBeschG (2021): Deutscher Bundestag. Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge, SaubFahrzeugBeschG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/saubfahrzeugbeschg/SaubFahrzeugBeschG.pdf>.
- Statista (Hg.) (2023): Medium and heavy commercial vehicle sales in the European Union between 2021 and 2022, by selected country. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1122751/medium-heavy-commercial-vehicle-sales-by-country-europe/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- T&E (Hg.) (2024a): Greening corporate fleets: an industrial and social policy for Europe. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/articles/greening-corporate-fleets-an-industrial-and-social-policy-for-europe>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- T&E (Hg.) (2024b): Tolling: the highway to green trucking, A briefing on how to implement the Eurovignette reform to clean up trucks. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/articles/tolling-the-highway-to-green-trucking>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Varo Charging: Your location for truck charging in the port of Rotterdam. Online verfügbar unter <https://varo-charging.com/en/>, zuletzt geprüft am 23.08.2024.
- Westerheide, C. (2024): EU-Verkehrsausschuss drängt auf höheres Maximalgewicht für Elektro-Lkw. electrive.net (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2024/02/15/eu-verkehrsausschuss-draengt-auf-hoeheres-maximalgewicht-fuer-elektro-lkw/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Wolf, C. (2023): How Government Incentives Drive Electric Truck Adoption. ttnews.com (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.ttnews.com/articles/-incentives-electric-truck>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.

- Xie, Y.; Minjares, R. (2023): How U.S. and EU proposals could steer the transition to zero-emission truck and bus fleets. ICCT (Hg.). Online verfügbar unter <https://theicct.org/us-and-eu-proposals-zev-truck-and-bus-fleets-sept23/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Yu, B. (2023): Life after subsidies for China's EVs. Dialogue Earth (Hg.). Online verfügbar unter <https://dialogue.earth/en/business/life-after-subsidies-for-chinas-evs/>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.