

# SCHWERE BATTERIE-LKW IN DER LOGISTIK

EINE ÜBERSICHT ZU ANWENDUNGEN, ENTWICKLUNGSTAND SOWIE NETZINTEGRATION



Karlsruhe und Berlin,  
Juli 2025

Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm „IKT für Elektromobilität“

# INHALT

<b>1. MOTIVATION UND EINLEITUNG</b>	<b>3</b>	<b>7. WEITERE ALTERNATIVE ANTRIEBE</b>	<b>35</b>
<b>2. ÜBERSICHT VERFÜGBARER UND GEPLANTER LKW SOWIE REICHWEITEN</b>	<b>6</b>	<b>8. FORSCHUNGSBEDARFE</b>	<b>38</b>
<b>3. TECHNISCHE MACHBARKEIT VON E-LKW IN LOGISTIKFLOTTEN</b>	<b>11</b>	<b>9. HANDLUNGSOPTIONEN</b>	<b>43</b>
<b>4. ROLLE DES DEPOT- UND MEGAWATT-LADENS</b>	<b>18</b>	<b>10. FAZIT UND AUSBLICK</b>	<b>45</b>
<b>5. HERAUSFORDERUNGEN BEIM DEPOTLADEN</b>	<b>29</b>	<b>11. FUSSNOTENVERZEICHNIS</b>	<b>47</b>
<b>6. BIDIREKTIONALES LADEN VON E-LKW</b>	<b>33</b>	<b>IMPRESSUM</b>	<b>55</b>



**MOTIVATION UND  
EINLEITUNG**





### HINTERGRUND

Deutschland und die Europäische Union haben sich ambitionierte Ziele in der Reduktion von Treibhausgasemissionen gesetzt. Hierbei spielt der Verkehrssektor eine sehr wichtige Rolle, da er der einzige Emissionssektor in der Europäischen Union ist, in dem die Emissionen in den letzten Jahrzehnten nicht gesunken sind.<sup>1</sup> Innerhalb des Verkehrs verursachen schwere Lkw trotz ihres kleinen Anteils an der Flotte einen erheblichen Anteil der Emissionen. Gründe hierfür sind der hohe durchschnittliche Verbrauch von ca. 25–35 Litern Diesel pro 100 km und die hohe durchschnittliche Laufleistung von 100–150 Tausend km pro Jahr und Fahrzeug.<sup>2</sup> „Schwere Lkw“ bezeichnet hier und im Folgenden Fahrzeuge zur Beförderung von Gütern mit mindestens 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht (zGG).

Schwerpunkt der vorliegenden Broschüre sind batterieelektrische Lkw, oder kurz Batterie-Lkw oder E-Lkw, d. h. schwere Lkw, die vollständig elektrisch angetrieben werden und ihre Antriebsenergie in einer wiederaufladbaren Batterie (genauer „Akkumulator“) speichern, welche über das Stromnetz extern geladen werden kann.

Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sind batterieelektrische Lkw eine vielversprechende Lösung zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor. Darüber hinaus tragen E-Lkw zur Verbesserung der Luftqualität bei, indem sie die Emission von Schadstoffen wie Stickoxiden und Feinstaub minimieren. Dies ist besonders in urbanen Gebieten von Bedeutung, wo die Luftverschmutzung oft ein ernstes Gesundheitsrisiko darstellt. Ein weiterer Vorteil ist die Reduktion der Lärmbelastung, da elektrische Antriebe deutlich leiser sind als herkömmliche Verbrennungsmotoren. E-Lkw ermöglichen zudem eine Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen, was nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch von Vorteil ist. Angesichts der globalen Bemühungen, die Klimaziele zu erreichen, stellen E-Lkw daher eine wichtige Technologie dar, um den Übergang zu einer nachhaltigen und emissionsarmen Zukunft zu fördern.

Die letzte Bundesregierung hatte sich zum Ziel gesetzt, dass bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Straßengüterverkehrsleistung elektrisch erfolgt.<sup>3</sup> Gleichzeitig macht die Europäische Union deutliche Vorgaben an die Hersteller von Lkw, denn diese müssen bis 2030 auch eine Reduktion von 65 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer neu zugelassenen Fahrzeuge in Europa gegenüber dem Referenzzeitraum 2019/2020 erreichen.<sup>4</sup>

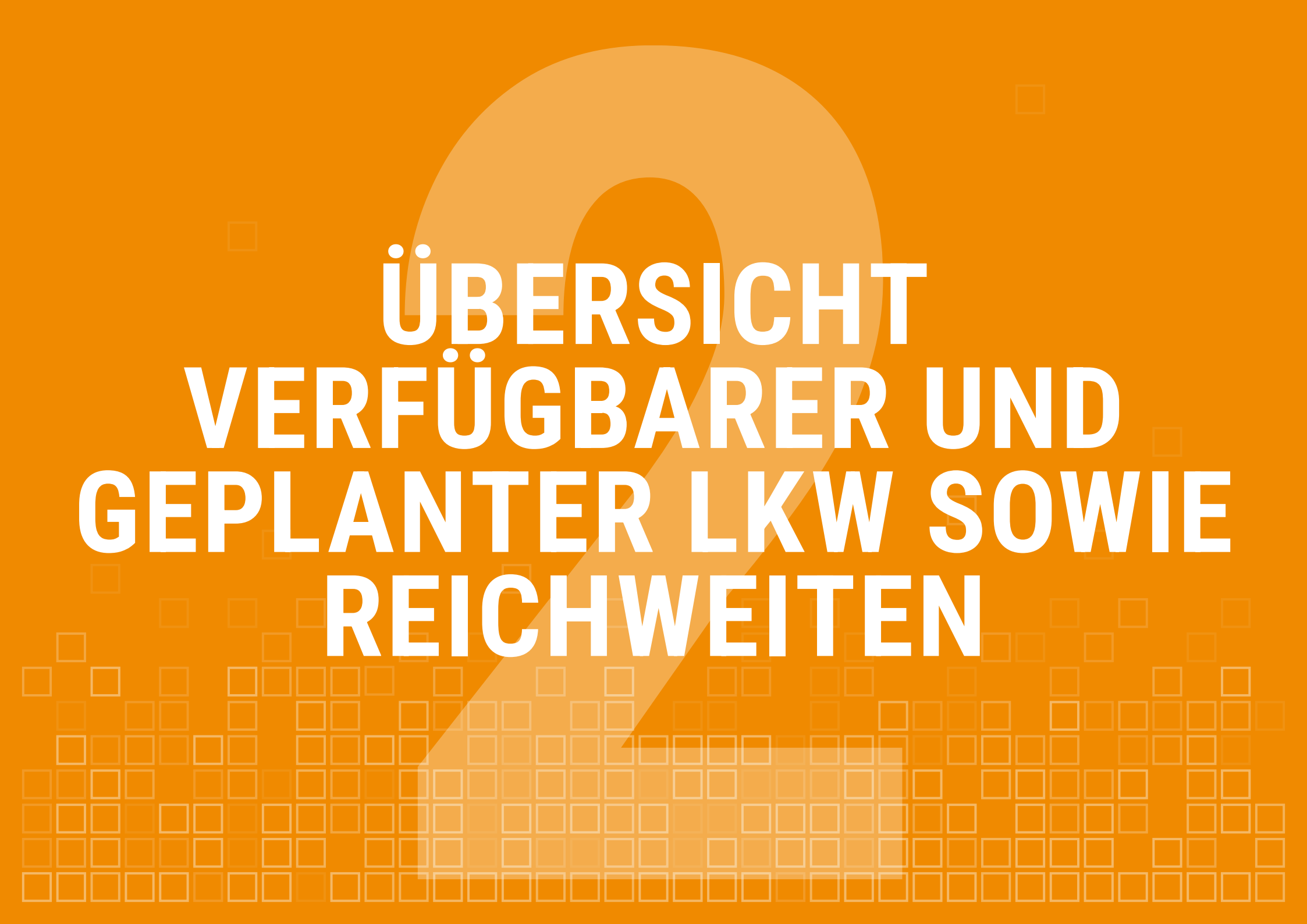
Die Forschung im Bereich Batterie-Lkw hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Aktuelle Modelle erreichen Reichweiten von bis zu 500 km und darüber, was den Einsatz im Regionalen- und teilweise auch im Fernverkehr ermöglicht. Zudem nimmt die Energiedichte von Batterien stetig zu, während die Kosten pro Kilowattstunde sinken. Dennoch bleibt die Reichweite, insbesondere im Fernverkehr

und somit für die Elektrifizierung der schweren Lkws, eine der größten Herausforderungen. Hinzu kommen hohe Anschaffungskosten sowie die Anforderungen an das Gewicht und die Ladezeiten der Batterien, die insbesondere bei langen Transportketten relevant sind.

Neben den Fahrzeugen selbst ist die Ladeinfrastruktur ein entscheidender Faktor für die breite Marktdurchdringung von E-Lkw. Der Aufbau eines flächendeckenden Netzes an Hochleistungs-Ladepunkten entlang zentraler Verkehrsachsen ist von essenzieller Bedeutung, um die Betriebsfähigkeit dieser Fahrzeuge zu gewährleisten. Dabei sind nicht nur technische Aspekte wie Ladeleistung und Standardisierung wichtig, sondern auch strategische und wirtschaftliche Überlegungen zur Integration der Ladeinfrastruktur in bestehende Logistiksysteme. Die Herausforderung besteht darin, Investitionen, Netzausbau und Energiemanagement in Einklang zu bringen.

### ZIELSETZUNG

Ziel des vorliegenden Textes ist es, einen Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklung von batterieelektrischen Lkw zu geben und aufzuzeigen, in welchen Bereichen intelligentes Laden von Batterie-Lkw in Zukunft eine Rolle spielen kann. Dabei werden sowohl verschiedene Ladesysteme als auch verschiedene Anwendungsfälle und Nutzungsszenarien von schweren Lkw betrachtet und Forschungsbedarfe aufgezeigt.

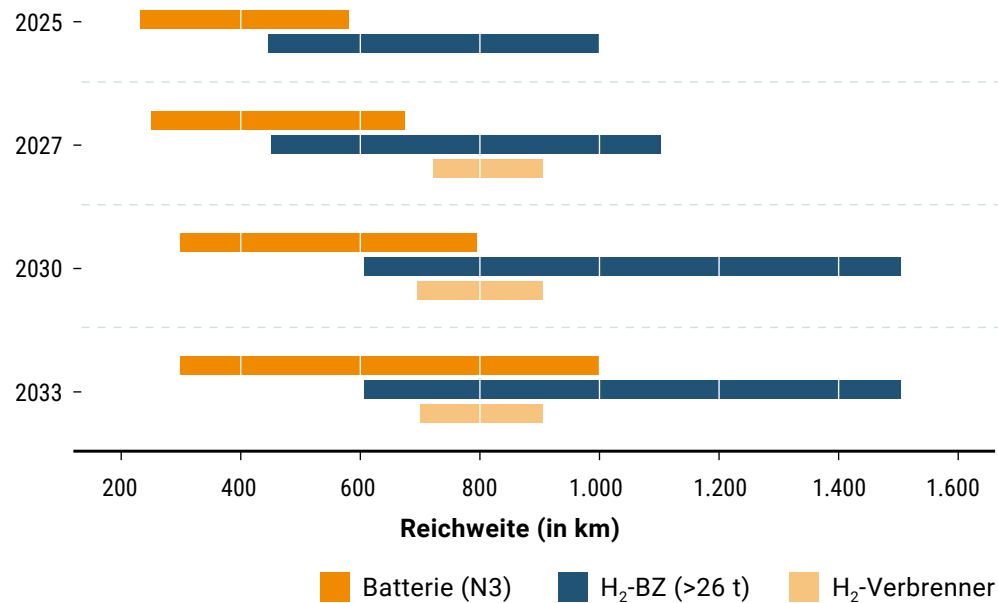


# **ÜBERSICHT VERFÜGBARER UND GEPLANTER LKW SOWIE REICHWEITEN**

## 2.0 ÜBERSICHT VERFÜGBARER UND GEPLANTER LKW SOWIE REICHWEITEN

ABBILDUNG 1

### DURCH HERSTELLER ANGEKÜNDIGTE REICHWEITEN VON BATTERIE- UND WASSERSTOFF-LKW BIS 2033 (QUELLE: NOW)<sup>5</sup>



### REICHWEITENENTWICKLUNG BATTERIEELEKTRISCHER LKW

Batterieelektrische Lkw profitieren hinsichtlich der Reichweite von Erfahrungen aus dem Pkw-Bereich. Die dort gesammelten Erfahrungen bezüglich gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte, möglicher Be- und Entladeleistung, Zykluslebensdauer und Kosten ermöglichen eine kurzfristige kommerzielle Skalierbarkeit im Lkw-Bereich<sup>6,7</sup>. Batterieelektrische Lkw werden inzwischen von allen großen Lkw-Herstellern in Europa angeboten. Ihre Reichweite liegt aktuell vor allem im Bereich 250 und 420 km. Einzelne Fahrzeuge bieten eine Reichweite von bis zu 600 km oder mehr<sup>8</sup>. Eine Befragung aller relevanten Lkw-Hersteller in Europa zeigt, dass die angebotenen Reichweiten bis 2033 auf bis zu 1.000 km ansteigen sollen (vgl. [Abbildung 1](#)).

### AKTUELLE EINSATZMÖGLICHKEITEN VON BATTERIE-LKW

#### Reichweiten und der Beginn der Elektrifizierung

Die aktuellen Reichweiten von batterieelektrischen Lkw reichen aus, um bereits heute eine breite Elektrifizierung im urbanen und regionalen Güterverkehr einzuleiten. Mit realistischen Reichweiten von bis zu 400 km können bestehende Transportaufgaben, wie sie typischerweise in der städtischen Belieferung oder im regionalen Verteilerverkehr anfallen, zuverlässig abgedeckt werden. Die weiter steigenden Reichweiten batterie-elektrischer Lkw eröffnen auch Möglichkeiten für anspruchsvollere Anwendungen im Fernverkehr. Es empfiehlt sich für Logistiker, die Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge schrittweise vorzunehmen. Eine rollierende Modernisierung der Fahrzeugflotten ermöglicht es, Erfahrungen zu sammeln und technologische Fortschritte sukzessive zu integrieren, ohne den Betrieb vollständig umstellen zu müssen.

#### Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Aufbauten

Die Verfügbarkeit von batterieelektrischen Fahrzeugen und Fahrgestellen für diverse Transportaufgaben ist heute grundsätzlich gegeben. Viele Hersteller bieten bereits eine breite Palette an elektrischen Modellen, die für unterschiedliche Einsatzbereiche geeignet sind.<sup>9</sup> Allerdings sind nicht alle speziellen Aufbauten und Nebenaggregate, wie beispielsweise Kühlaggregate oder Kranaufbauten, derzeit voll elektrifiziert verfügbar. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf, um auch diese Komponenten in die Elektrifizierung einzubeziehen. Die Weiterentwicklung solcher Technologien ist ein entscheidender Faktor,

um die vollständige Elektrifizierung aller Anwendungsfälle im Güterverkehr zu ermöglichen und die Praxistauglichkeit weiter zu erhöhen.

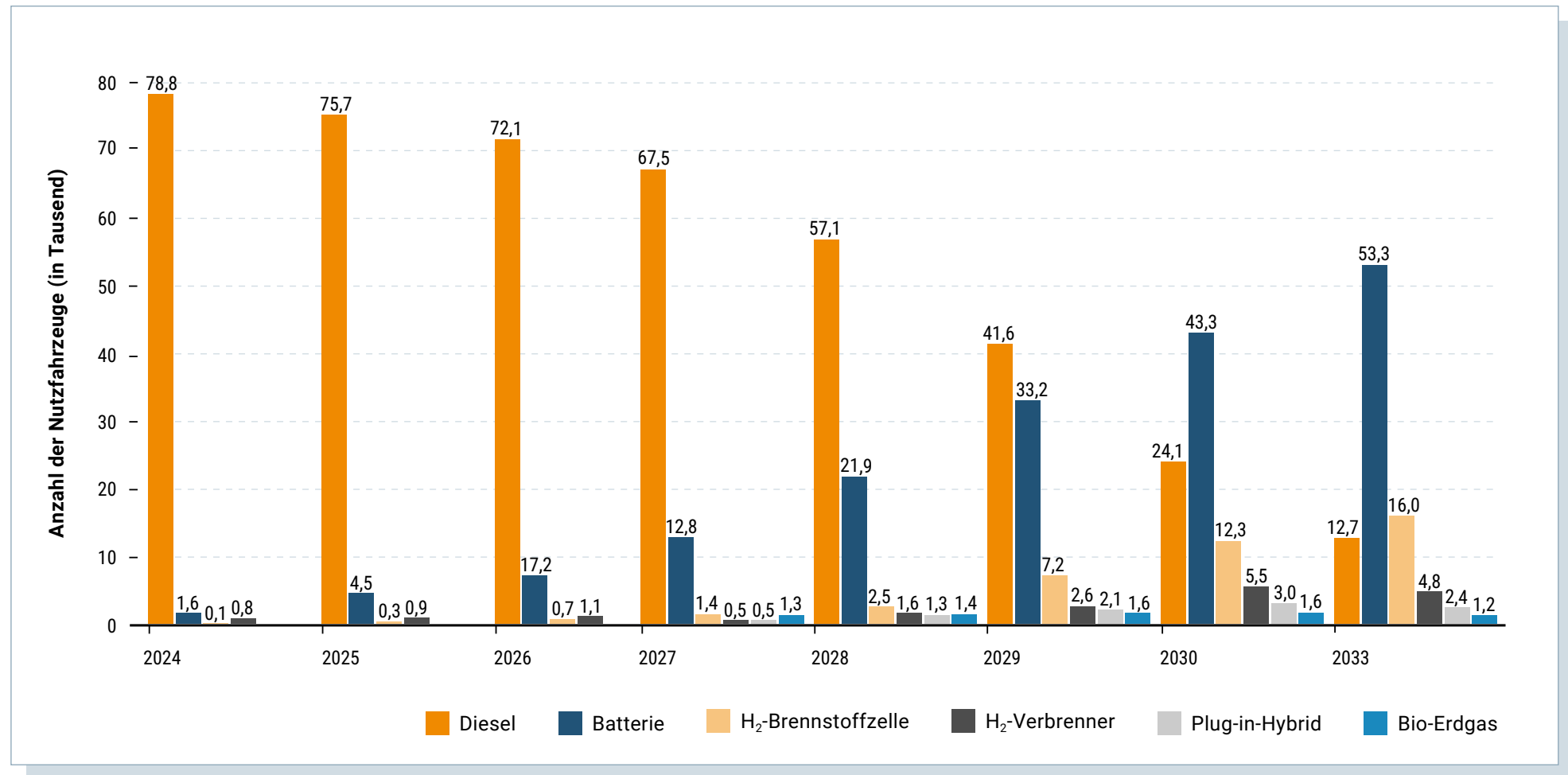
Bei den heute verfügbaren batterieelektrischen Lkw handelt es sich in der Regel um Fahrzeuge, die auf der Plattform eines Diesel-Lkw aufbauen. Dies ermöglicht eine zügige Umstellung der Lkw-Produktion, bedeutet aber, dass die Fahrzeuge noch nicht voll auf batterieelektrischen Antrieb optimiert sind. Bspw. entsteht durch den Wegfall des Verbrennungsmotors und einiger anderer Aggregate viel Platz im Fahrzeug, der je nach Marke und Modell nur teilweise ausgenutzt wird. Eine bessere Ausnutzung des Bauraums sowie eine optimierte Gewichtsverteilung auf dem Fahrzeug erhöhen die Reichweite sowie die mögliche Zuladung. Zukünftige Generationen elektrischer Lkw, die bereits zu Beginn der Planung verstärkt als batterieelektrische Lkw entworfen wurden, werden jedoch zunehmend effizienter sein, und durch ihre größere Reichweite noch mehr den Einsatz auf der Langstrecke ermöglichen.

### LKW-HERSTELLER PLANEN SCHNELLEN UMSTIEG AUF E-LKW

Im Jahr 2024 lag der Anteil rein batterieelektrischer Nutzfahrzeuge (hier alle über 3,5 t zGG) an den Neuzulassungen in der Europäischen Union bei 2,3 %<sup>10</sup>. In Deutschland lag der Anteil im ersten Halbjahr 2024 bei rund 5,4 %<sup>11</sup>. Ein relevanter Teil dieser Neuzulassungen ist jedoch auf leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG) zurückzuführen. Dieser Anteil wird aber auch bei schweren Lkw in den kommenden Jahren deutlich steigen ([vgl. Erwartungen der Hersteller in Abbildung 2](#)).

ABBILDUNG 2

**DURCH HERSTELLER ERWARTETE JÄHRLICHE ABSÄTZE VON BATTERIE- UND BRENNSTOFFZELLEN-LKW (>12T ZGG) IN DEUTSCHLAND BIS 2030 (QUELLE: NOW)<sup>12</sup>**



## 2.0 ÜBERSICHT VERFÜGBARER UND GEPLANTER LKW SOWIE REICHWEITEN

Die Fahrzeughersteller erwarten, dass bis 2030 gut die Hälfte der Neuzulassungen schwerer Lkw in Deutschland und Europa auf batterieelektrische Nutzfahrzeuge entfällt ([siehe Abbildung 2](#)). Dies ist unter anderem durch die CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für Nutzfahrzeuge der Europäischen Union getrieben. Die EU hat erstmals im Jahr 2019 mit der Verordnung (EU) 2019/1242 CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge eingeführt. Diese Verordnung legte eine Reduzierung der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer schwerer Lkw über 16 Tonnen um 15 % bis 2025 fest. Im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets wurde die Verordnung überarbeitet und die neuen Vorgaben traten am 26. Juni 2024 in Kraft. Die überarbeitete Verordnung hat einen erweiterten Geltungsbereich und umfasst nun nahezu alle emissionsverursachenden Lkw, darunter nicht nur schwere Lkw, sondern auch mittelschwere Lkw, Stadtbusse, Reisebusse und Anhänger. Gleichzeitig wurden die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele ambitionierter gestaltet: bis 2030 sollen die Emissionen der Neuwagen um 45 % sinken, bis 2035 um 65 % und bis 2040 um 90 %. Diese Vorgaben gelten für die durchschnittlichen Flottenemissionen der Hersteller und betreffen alle in einem Berichtszeitraum neu zugelassenen Lkw.<sup>13</sup>



# **TECHNISCHE MACHBARKEIT VON E-LKW IN LOGISTIKFLOTTEN**

#### EINSATZBEREICHE UND HÄUFIGKEIT VON LKW NACH TAGESFAHRLEISTUNG

Basierend auf der durchschnittlichen Tagesfahrleistung wird zwischen unterschiedlichen Einsatzbereichen für schwere Lkw unterschieden. Die kürzesten Tagesfahrleistungen von bis zu ca. 200 km pro Tag liegen im städtischen Lieferverkehr vor. Größere Strecken werden hingegen im Regionalverkehr von circa bis zu 400 km pro Tag erreicht. Die anspruchsvollste Variante des Lkw-Verkehrs in Bezug auf E-Lkw ist der Fernverkehr. Typische Definitionen von Fernverkehr legen als Schwelle eine mittlere Tagesfahrleistung von mindestens 400 oder 500 km pro Tag zugrunde.<sup>14</sup>

Abbildung 3 zeigt eine Unterscheidung der Tagesfahrleistungen nach Lkw-Typen und deren Verteilung innerhalb einer großen Flotte von Lkw in den Niederlanden.<sup>15</sup> Lkw mit Aufbau, die allein Güter transportieren können<sup>16</sup> (blau), dominieren bei kürzeren Strecken bis etwa 300 km, was auf ihren Einsatz im städtischen Lieferverkehr und Baustellenverkehr hinweist. Sattelzugmaschinen (orange) sind für längere Strecken ausgelegt, insbesondere im Langstreckenverkehr, mit einem Schwerpunkt bei Tagesfahrleistungen zwischen 400 und 800 km. Die Balken stellen die tatsächliche Verteilung der Tages-km und damit der effektiven Reichweitenanforderungen<sup>17</sup> dar, während gestrichelte Linien modellierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zeigen. Die kumulative Kurve (rechte y-Achse) verdeutlicht, dass etwa 80 % der Flotte eine Reichweite von bis zu 400 km benötigen, was die Bedeutung des regionalen Verkehrs unterstreicht.

ABBILDUNG 3

## TAGESFAHRLEISTUNGEN UND REICHWEITENANFORDERUNGEN VERSCHIEDENER LKW-TYPEN (QUELLE: TOLL ET AL. 2022)<sup>18</sup>

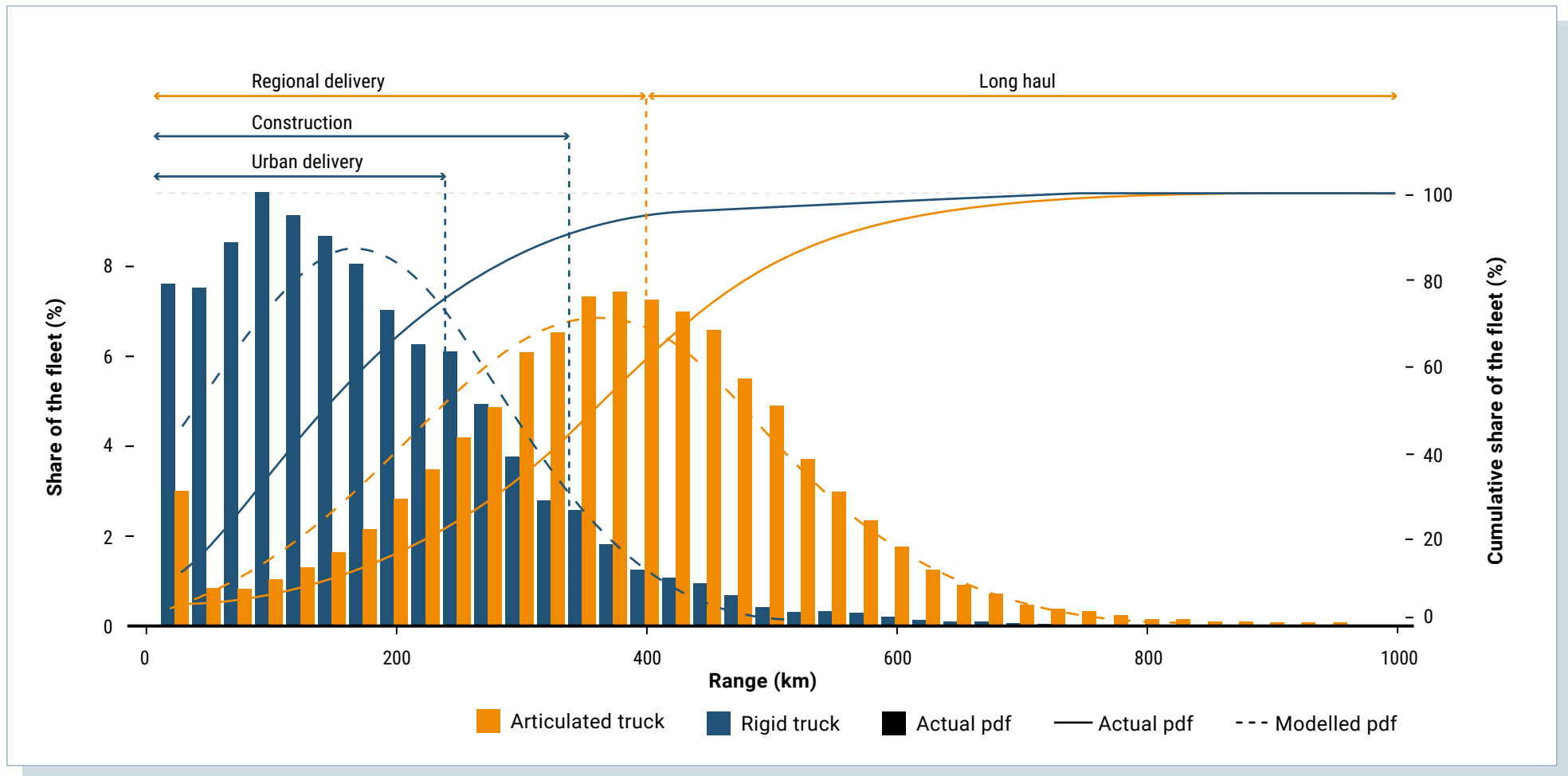


ABBILDUNG 4

## VERTEILUNG VON TAGESFAHRLEISTUNGEN SCHWERER LKW (QUELLE: BASMA ET AL., 2021)<sup>19</sup>

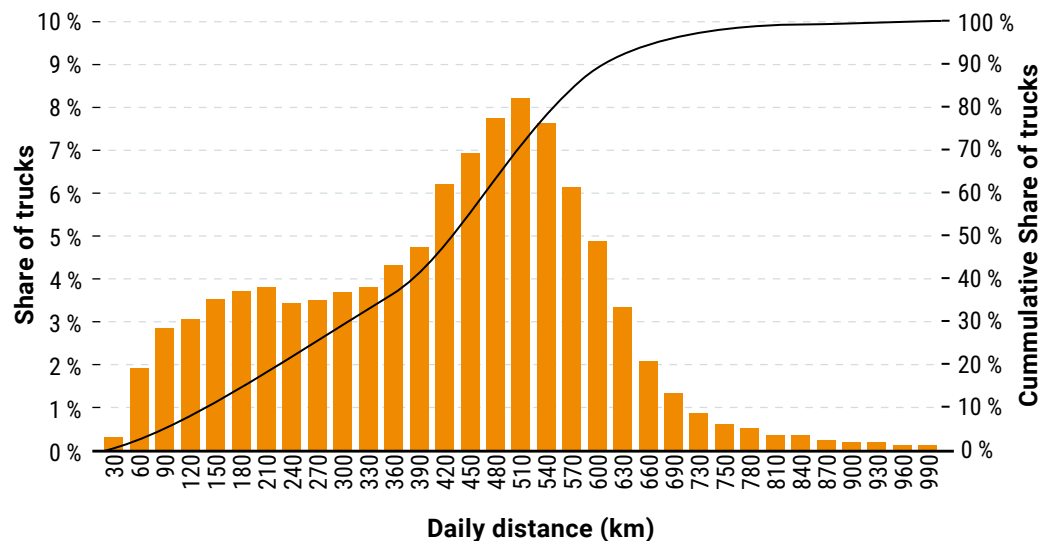


Abbildung 4 zeigt die tägliche Fahrdistanz von Sattelzugmaschinen in km und deren Verteilung innerhalb einer großen Flotte von Sattelzugmaschinen von Scania. Auf der x-Achse sind die Tages-km dargestellt, während die vertikale Achse links den Anteil der Lkw an der Gesamtflotte in Prozent zeigt. Die Darstellung verdeutlicht, dass die meisten Fahrzeuge eine tägliche Distanz zwischen 330 und 550 km zurücklegen. Die kumulative Kurve auf der rechten y-Achse zeigt, dass rund 80 % der Lkw eine Reichweite von bis zu 540 km benötigen, was auf die Bedeutung des regionalen und mittleren Langstreckenverkehrs hinweist.

### EINSATZ VON E-LKW IM STÄDTISCHEN UND REGIONALEN VERKEHR

Im städtischen und regionalen Lieferverkehr sind E-Lkw bereits heute eine praktikable Lösung, da hier regelmäßig kürzere Distanzen von 200 bis 400 km zurückgelegt werden. Diese Anwendungsfälle zeichnen sich durch häufige Stopps, ein hohes Maß an Planbarkeit und die Möglichkeit aus, Batterien über Nacht am Depot oder während Ladezeiten beim Kunden zu laden. E-Lkw werden bereits heute in diesem Bereich insbesondere für die Belieferung von Einzelhandel<sup>20</sup>, Gastronomie oder in der Abfallwirtschaft eingesetzt, wo ihre emissionsfreie Fahrweise zusätzliche Vorteile für die Luftqualität in Städten bietet.<sup>21</sup>

#### ELEKTRIFIZIERUNG IM FERNVERKEHR

Im Langstreckenverkehr stellen Tagesfahrleistungen von bis zu 700 km höhere Anforderungen an die Reichweite und Ladeinfrastruktur von E-Lkw. Diese Distanzen sind insbesondere im europäischen Güterverkehr keine Seltenheit, in dem enge Zeitfenster und ein hoher Anteil an Just-in-Time-Lieferungen die Planbarkeit erschweren. Aktuelle Entwicklungen zeigen jedoch, dass mit leistungsstärkeren Batterien und der Integration von Hochleistungsladesäulen an zentralen Verkehrsknotenpunkten auch längere Tagesstrecken (über 400 km) technisch machbar werden.<sup>22,23,24</sup> Die Elektrifizierung des Langstreckenverkehrs rückt damit zunehmend in greifbare Nähe. Dennoch bleibt der Fernverkehr eine Herausforderung, die nicht nur technologischen Fortschritt, sondern auch eine gut koordinierte Ladeinfrastruktur und optimierte Transportplanung erfordert, um E-Lkw langfristig wirtschaftlich und praktikabel zu machen.<sup>25</sup>

Zwischen dem Einsatz von Lkw im Fernverkehr und im Regionalverkehr zeigt sich ein wichtiger Unterschied: dem Verkehr zwischen internationalen Transporten mit variierenden Zielen und den stets gleichen wenigen Depots. Im ersten Fall, bei dem Fahrzeuge am Tageseende an die betriebseigene Infrastruktur zurückkehren, können bereits heute erste Ansätze der Elektrifizierung realisiert werden, da hier planbare Ladezeiten und -orte bestehen. Für internationale Transporte bleibt die Herausforderung bestehen, ein länderübergreifendes und flächendeckendes Ladeinfrastrukturnetz aufzubauen, um einen unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Elektrifizierung des Langstreckenverkehrs ist die

Verfügbarkeit leistungsstarker Ladeinfrastruktur entlang der wichtigsten Verkehrsachsen. Besonders die Bereitstellung von Megawatt Charging Systems (MCS) für den schnellen Ladevorgang und Übernachtladen an Raststätten und Logistikhubs wird als kritischer Punkt angesehen ([siehe Abschnitt Rolle des Depot- und Megawatt-Ladens](#)). Ein koordinierter Ausbau dieser Infrastruktur ist essenziell, um den Anforderungen des Langstreckenverkehrs gerecht zu werden und die Elektrifizierung in diesem Segment zu ermöglichen.

#### TOURENPLANUNG UND ZWISCHENLADEN ERMÖGLICHEN MEHR ELEKTRIFIZIERUNG

Verschiedene Optionen können helfen, mehr E-Lkw erfolgreich in Logistikflotten zu integrieren und werden hier kurz vorgestellt.

##### **Optimierte Touren- und Einsatzplanung für batterieelektrische Lkw**

Die Einführung von E-Lkw erfordert ein Umdenken in der Touren- und Einsatzplanung. Ein 1:1-Ersatz heutiger Diesel-Lkw (d.h. ein Diesel-Lkw mit all seinen Touren wird direkt durch einen E-Lkw ersetzt) ist nicht immer die effizienteste Lösung, da die Reichweiten und Ladezeiten der Fahrzeuge berücksichtigt werden müssen. Stattdessen bietet sich eine schrittweise Optimierung an: von der Machbarkeit einzelner Touren über die Planung von Tagestouren bis hin zur Betrachtung der Summe aller Touren im Monatsverlauf, wie es etwa im Modell der REWE-Logistik bereits getestet wird.<sup>26</sup> Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Anpassung von Kundentouren an die verfügbare Reichweite der E-Lkw. Sollte die Reichweite nicht ausreichen, können Zwischenladungen im Wartebereich zwischen zwei Touren eingeplant werden,

um die Flexibilität zu erhöhen, d. h. der gleiche Lkw kann je nach Tag auf verschiedenen Touren eingesetzt werden.

#### **Zwischenladen als Schlüssel zur Effizienz**

Das Zwischenladen entlang der Route oder am Zielort ermöglicht es, die Betriebszeiten von E-Lkw effektiv zu maximieren. Bereits bestehende gesetzliche Pausenregelungen – wie die 45-minütige Pause nach 4,5 Stunden Fahrzeit oder zwischen zwei Schichten – bieten einen idealen Rahmen, um Ladezeiten in den Tourenplan zu integrieren. Darüber hinaus können Ladepunkte am Ankunftsort genutzt werden, sodass Fahrzeuge während des Ent- oder Beladens gleichzeitig mit Strom versorgt werden. Diese Ansätze erfordern jedoch eine sorgfältige Abstimmung zwischen Ladeinfrastruktur, Tourenplanung und Kundenanforderungen, um die Machbarkeit und Effizienz im Logistikbetrieb sicherzustellen.

#### **Abgestimmte Fahrzeugauswahl für den Einsatz von Batterie-Lkw**

Während heutige Diesel-Lkw oft nach dem Prinzip „One Size Fits All“ eingesetzt werden, bietet die Elektrifizierung die Chance, die Fahrzeugauswahl gezielt auf den jeweiligen Einsatzzweck abzustimmen.

Hersteller von batterieelektrischen Lkw bieten mittlerweile modulare Optionen für Batteriegrößen an, typischerweise mit zwei oder drei verschiedenen Kapazitäten (bspw. 200, 400 oder 600 kWh). Durch den gezielten Einsatz von Fahrzeugen mit kleineren oder mittleren Batteriegrößen im städtischen und regionalen Verkehr können die Anforderungen dieser Bereiche optimal abgedeckt werden.

#### **Wirtschaftlichkeit durch angepasste Batteriekapazitäten**

Insbesondere im urbanen und regionalen Güterverkehr ermöglichen kleinere Batterien eine höhere Wirtschaftlichkeit, da sie ausreichend Reichweite für typische Tagesstrecken bieten und gleichzeitig geringere Anschaffungs- und Betriebskosten verursachen.<sup>27</sup> Grundsätzlich sind Batterie-Lkw teurer in der Anschaffung aber günstiger im Betrieb als Diesel-Lkw. Je größer die Batterie im E-Lkw, desto höher der Aufpreis und die notwendige Fahrleistung zur Wirtschaftlichkeit ggü. einem Diesel-Lkw. D. h. die Wirtschaftlichkeit kann bei einer kleineren Batterie auch schon bei kürzeren Fahrleistungen erreicht werden. Eine bedarfsorientierte Fahrzeugauswahl, die das modulare Angebot der Hersteller nutzt, trägt somit maßgeblich zur Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Flottenumstellung bei.

### FORSCHUNGSBEDARFE

#### **Forschungsbedarf für die Optimierung von Touren und Einsatzstrategien**

Die Integration von E-Lkw in bestehende Logistiksysteme erfordert eine intensivere Erforschung von Tourenoptimierungsansätzen. Ein zentraler Bedarf besteht darin, Algorithmen und digitale Tools zu entwickeln, die spezifische Anforderungen wie Reichweitenbeschränkungen, Ladezeiten und die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur berücksichtigen. Besonders relevant ist dies für die Planung komplexer Lieferketten, bei denen Einzeltouren, Tagestouren und Monatsziele gleichzeitig optimiert werden müssen. Weiterhin ist es wichtig, flexible Modelle zu entwickeln, die das Zwischenladen während gesetzlicher Pausen oder an Wartebereichen in die Tourenplanung integrieren, um die Betriebszeiten der Fahrzeuge zu maximieren.

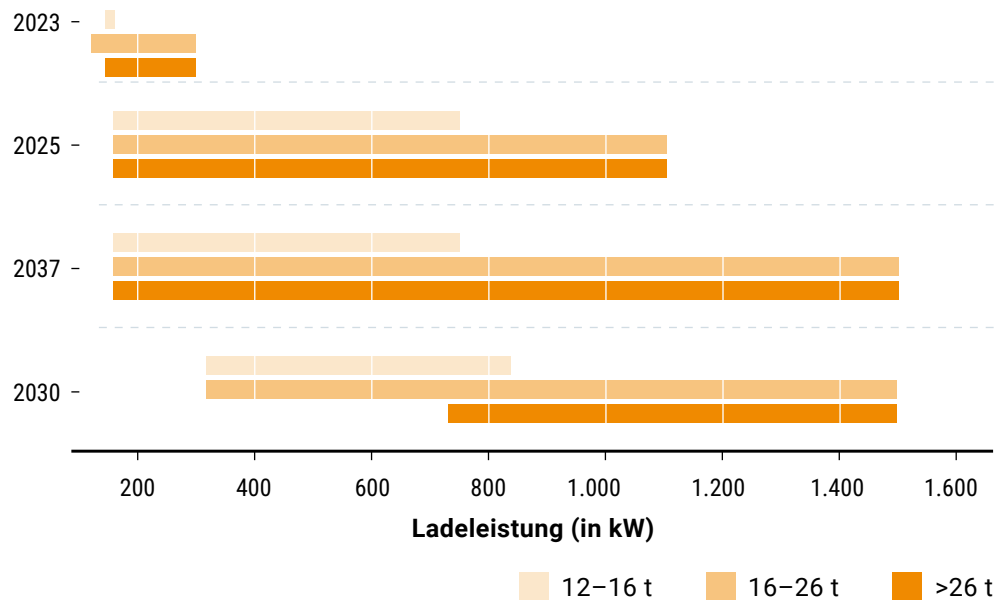
#### **Technologische und infrastrukturelle Anforderungen**

Neben der Tourenoptimierung besteht ein erheblicher Forschungsbedarf in der Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnologien und der Ladeinfrastruktur. Untersuchungen sollten sich darauf konzentrieren, wie modulare Batteriegrößen effizient mit spezifischen Anwendungsfällen abgestimmt werden können, um die Wirtschaftlichkeit weiter zu steigern. Eine enge Verzahnung dieser technischen Lösungen mit neuen Planungsstrategien ist entscheidend, um E-Lkw langfristig in allen Einsatzbereichen wettbewerbsfähig zu machen. Darüber hinaus ist noch unsicher, welche Rolle die verschiedenen anderen alternativen Antriebe wie Bio-Diesel, HVO, elektrische Straßensysteme und Wasserstoff im Einzelnen spielen werden ([vgl. auch Abschnitt Weitere alternative Antriebe](#)).

# ROLLE DES DEPOT- UND MEGAWATT-LADENS

ABBILDUNG 5

## VERFÜGBARE UND GEPLANTE MAXIMALE LADELEISTUNGEN VON E-LKW (QUELLE: NOW)<sup>28</sup>

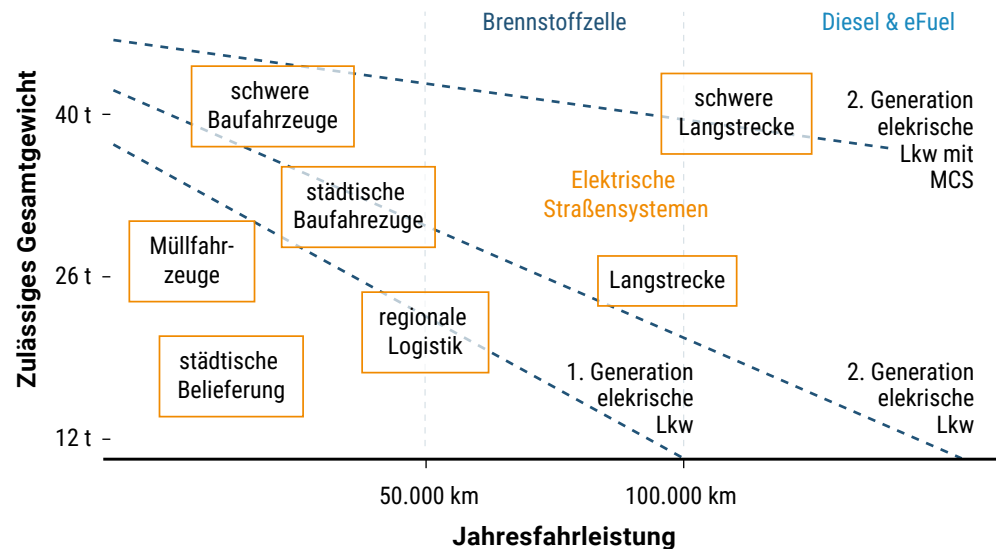


### ANGEKÜNDIGTE LADELEISTUNGEN UND EINSATZGEBIETE

Das Megawatt Charging System (MCS) ermöglicht in Zukunft das Laden von Lkw und anderen großen Fahrzeugen (wie bspw. heute schon Fähren<sup>29</sup>) mit bis zu 3,75 MW. Es erweitert damit in Bezug auf die Ladeleistung das Combined Charging System (CCS), das derzeit vor allem für das Schnellladen von batterieelektrischen Pkw eingesetzt wird. Heutige CCS-Ladestationen liefern typischerweise bis zu 350 oder maximal 400 kW. Der MCS-Standard ist notwendig, um das Nachladen der Lkw in ihrer vorgeschriebenen Pause von 45 Minuten nach 4,5 Stunden Fahrzeit zu ermöglichen. Es wird dafür eine Peak-Leistung von etwa 1 MW benötigt. Die europäischen Lkw-Hersteller haben entsprechend steigende Ladeleistungen bei E-Lkw angekündigt (siehe [Abbildung 5](#)).

ABBILDUNG 6

## SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON GÜTERVERKEHRSARTEN UND POTENZIELLER ANWENDUNGEN FÜR EMISSIONSFREIE LKW



Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung sowie dem zulässigen Gesamtgewicht der Fahrzeuge (Quelle: Plötz 2022)<sup>30</sup>

Mit dem sich derzeit in Entwicklung befindlichen MCS-Standard können die Fahrzeuge auch mit hoher Zuladung im schweren Langstreckenverkehr eingesetzt werden. In diesem Segment konkurrieren die E-Lkw mit Brennstoffzellen-Lkw, Diesel-Lkw sowie elektrischen Straßensystemen (Oberleitungs-Lkw). Aufgrund der hohen Effizienz des elektrischen Antriebsstrangs sind batterieelektrische Antriebe in der Regel auch gegenüber Konkurrenztechnologien wirtschaftlich im Vorteil, insbesondere falls andernfalls biogener oder synthetischer Diesel eingesetzt werden muss. [Abbildung 6](#) stellt das Einsatzspektrum batterieelektrischer Lkw schematisch dar.

Bereits mit der heutigen ersten Generation batterieelektrischer Lkw sind städtischer Lieferverkehr und erhebliche Teile der regionalen Logistik elektrifizierbar. Mit der jetzt kommenden zweiten Generation von E-Lkw werden noch höhere Zuladungen und Fahrleistungen möglich. Wenn zudem mit MCS zwischengeladen werden kann, sind sehr große Teile der Logistik möglich, insbesondere auch der schwere Straßengüterverkehr. Herausfordernd bleiben besonders schwere Verkehre (über 40 t zGG oder Sondertransporte) und auch vielleicht seltene sehr lange Fahrten im Zweischichtbetrieb.



#### SIMULATION HEUTIGER DIESEL-LKW ALS BATTERIE-LKW

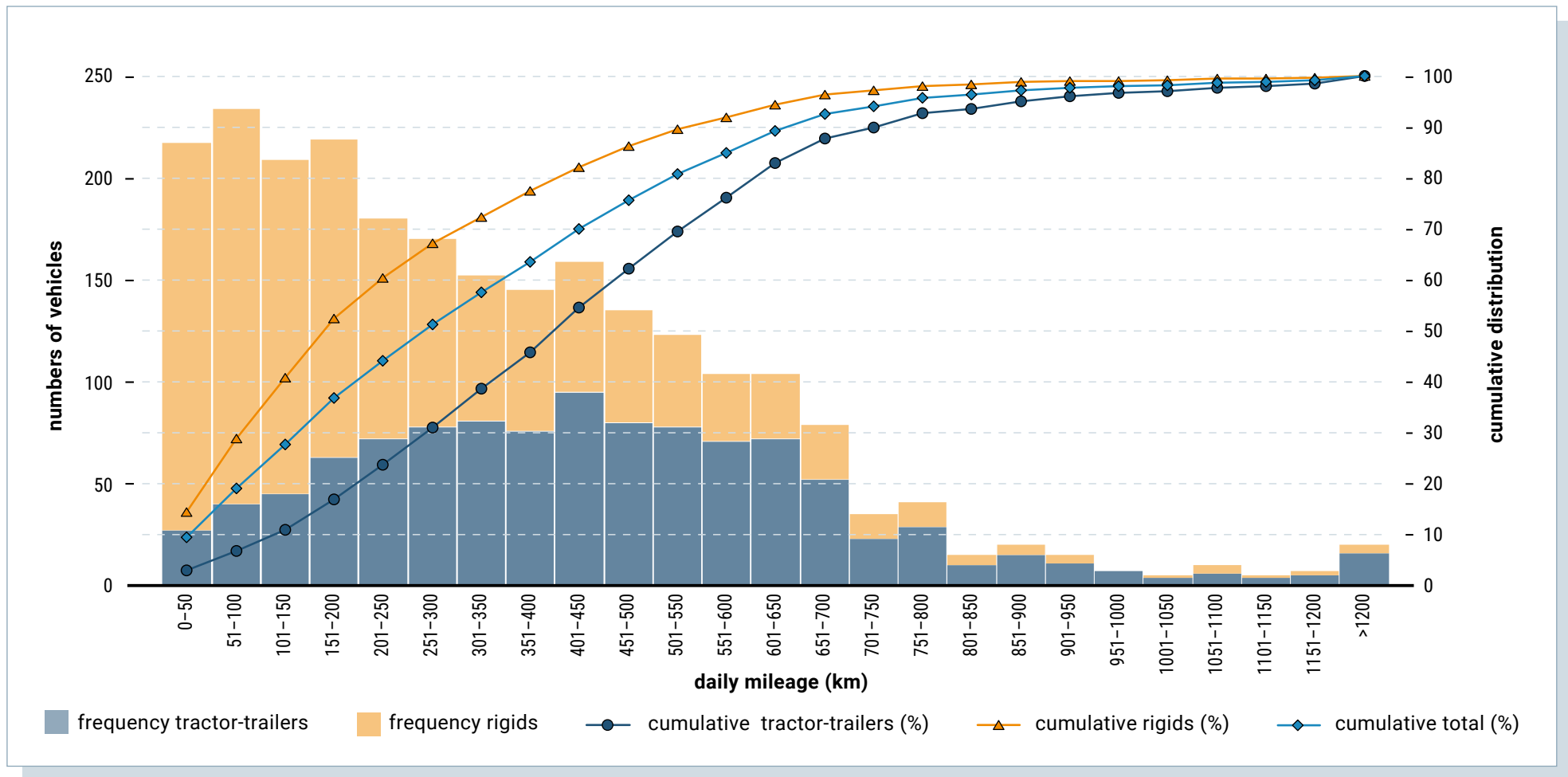
Um besser zu verstehen, welche Ladeleistungen für welche Teile der Lkw-Flotte notwendig sind, hilft eine Simulation heutiger Diesel-Lkw als Batterie-Lkw.<sup>31</sup>

Datenbasis bildet die Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ zum Fahrverhalten von Lkw in Deutschland<sup>32</sup> mit ca. 2.400 Tagesfahrprofile von Lkw und Sattelzugmaschinen mit Dieselantrieb.

Abbildung 7 zeigt die Fahrzeugstichprobe, die für die Simulation verwendet wurde, geclustert nach der Tagesfahrleistung der Fahrzeuge. Für alle Fahrzeuge enthält die Stichprobe Informationen über die Fahrten eines Tages. Eine einzelne Fahrt besteht aus der Startzeit, der Ankunftszeit, der zurückgelegten Entfernung und Informationen über den Zielort (privater oder öffentlicher Standort).

ABBILDUNG 7

TAGESFAHRLEISTUNGEN VON DIESEL-LKW IN DER KID 2010 (QUELLE: SPETH UND PLÖTZ 2024)<sup>33</sup>



### **Fast die gesamte Flotte kann auf batteriebetriebene Lkw umgestellt werden**

Für das Jahr 2030 wurde eine Fahrzeugreichweite von 450 km und eine durchschnittliche Ladeleistung von 900 kW für Sattelzugmaschinen und 800 kW für Lkw angenommen. Das sind eher mittlere Werte und Hersteller haben bereits größere Reichweiten und Ladeleistungen angekündigt. Bei dieser Konfiguration können 93 % aller Fahrzeuge elektrifiziert werden. 58 % aller Fahrprofile benötigen nur einen Ladevorgang, 29 % zwei Ladevorgänge und der Rest benötigt mehr. Auf die ersten beiden Gruppen entfallen 70 % der täglichen Fahrleistung aller Fahrprofile.

Für das Jahr 2035, mit 500 km Fahrzeugreichweite und einer durchschnittlichen Ladeleistung von 1.100 kW für Sattelzugmaschinen und 1.000 kW für Lkw, steigt der Anteil der elektrifizierbaren Fahrzeuge auf 95 %, was 88 % der täglichen Fahrleistung entspricht. Maximal zwei Stopps pro Tag ermöglichen 91 % aller Fahrprofile und 78 % der gesamten Tageskilometerleistung.

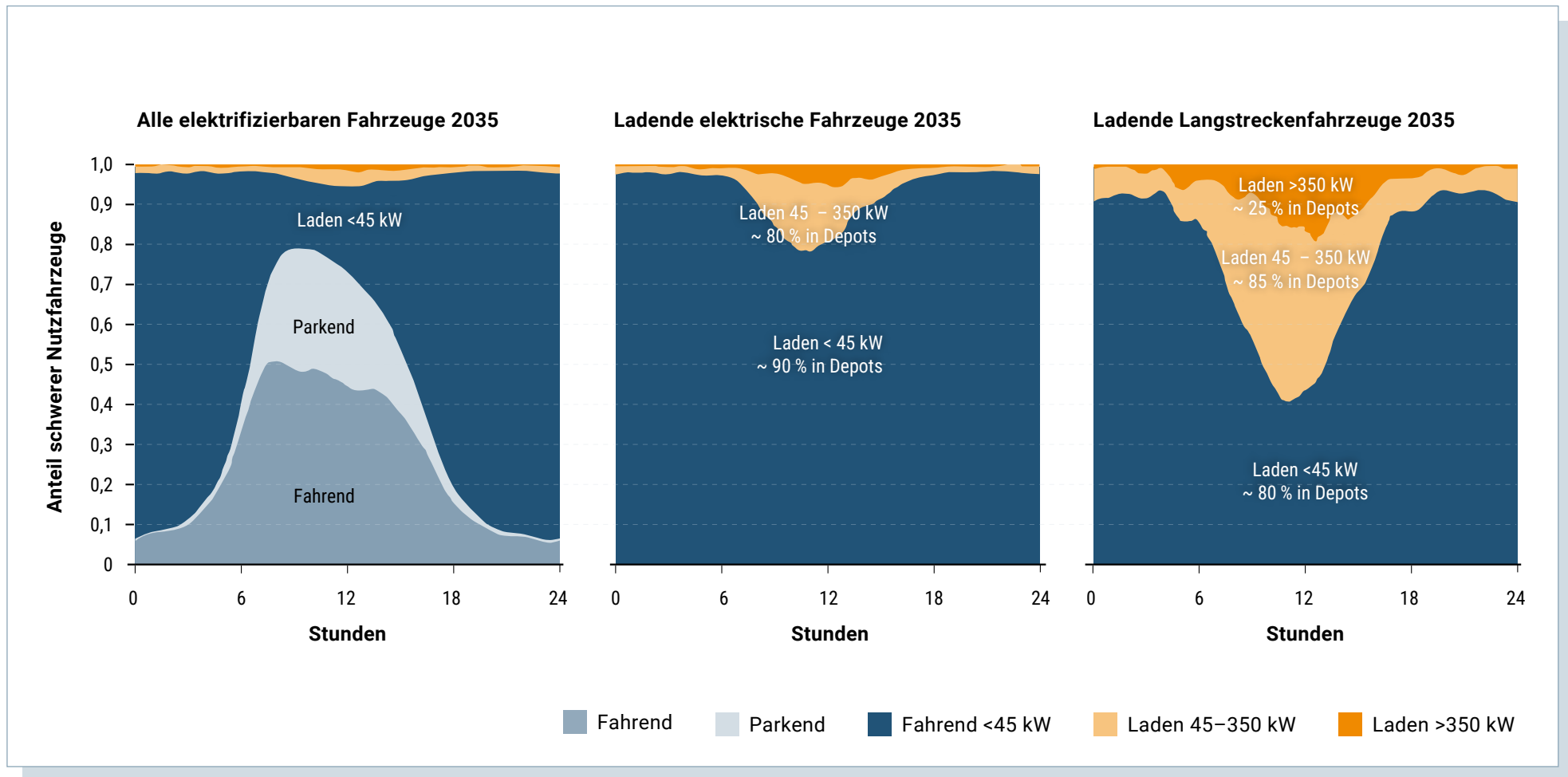
### **Langsames Laden im Depot wird bei E-Lkw dominieren, aber Schnellladen ist für Fernverkehr notwendig**

Um das erwartete Ladeverhalten besser zu verstehen, werden die simulierten Ladevorgänge in drei Leistungsstufen zusammengefasst: (1) Ladeleistung  $\leq 44$  kW, da diese Stufe mit AC-Laden abgedeckt werden kann, (2) Laden mit durchschnittlich 45–350 kW, da diese Stufe heute mit dem bestehenden CCS-Standard abgedeckt werden kann, und (3) Ladung mit mehr als 350 kW, da diese Stufe wahrscheinlich mit dem MCS-Standard bedient wird. Es ist möglich, dass künftige Lkw nur noch mit MCS-Steckern für alle Leistungsstufen ausgestattet werden. Die hier vorgenommene Zuordnung enthält keine technische Definition der Ladetechnik, sondern dient der besseren Übersichtlichkeit. Es ist zu beachten, dass die durchschnittliche Leistung innerhalb einer Gruppe kleiner ist als die obere Grenze, z. B. liegt die durchschnittliche Leistung in der Gruppe 45–350 kW unter 350 kW, in der Simulation typischerweise um 200 kW. [Abbildung 8](#) zeigt wie sich der Zustand (fahren, parken, laden mit unterschiedlichen Leistungen) über unterschiedliche Teile der Fahrzeugflotte im Tagesverlauf verteilt. Die linke Grafik in [Abbildung 8](#) zeigt die gesamte Lkw-Flotte, die technisch elektrifiziert werden kann (fahrende Lkw in dunkelgrau und parkende Fahrzeuge ohne Ladevorgang in hellgrau). Die mittlere Grafik zeigt nur ladende Fahrzeuge. Die rechte Grafik enthält nur Fahrzeuge mit einer täglichen Fahrleistung von mindestens 500 km, die als Langstreckenfahrzeuge bezeichnet werden.

#### 4.0 ROLLE DES DEPOT- UND MEGAWATT-LADENS

ABBILDUNG 8

### SIMULIERTER ANTEIL VON E-LKW NACH EINSATZART (FAHREND, PARKEND, LADEND) SOWIE LEISTUNG UND ORT DES LADENS (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG NACH SPETH UND PLÖTZ 2024)<sup>34</sup>



## 4.0 ROLLE DES DEPOT- UND MEGAWATT-LADENS

Es zeigt sich, dass die meisten Ladevorgänge nur das Langsamladen bis einschl. 44 kW erfordern, zumeist an Depots: 90 % aller langsamen Ladevorgänge finden in Betriebshöfen statt, und 80 % der Ladevorgänge mit 45 bis 350 kW werden in Betriebshöfen durchgeführt. Hochleistungsladungen mit mehr als 350 kW Leistung sind vor allem für Langstrecken-Lkw von Bedeutung, und nur 25 % der MCS-ladenden Lkws befinden sich in Betriebshöfen. In der Regel wird das Schnellladen als Zwischenladen in den Mittagsstunden durchgeführt. In Summe folgt, dass das Depotladen mit geringer Leistung der Hauptladeort für die meisten zukünftigen batterieelektrischen Lkw sein sollte und dass MCS mit hoher Leistung nur für den Langstreckenbetrieb erforderlich ist.

### LADENETZE NACH EU-VORGABEN

#### Gesetzliche Vorgaben

Die Europäische Union (EU) hat in der Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR – Verordnung (EU) 2023/1804) Mindestanforderungen für öffentliche Schnellladenetze für Batterie-Lkw für jeden EU-Mitgliedstaat festgelegt. [Tabelle 1](#) fasst die Anforderungen für die europäischen Fernverkehrsnetze (getrennt

nach Kern- und Gesamtnetz) zusammen. So müssen in festen maximalen Abständen Ladeorte auf oder nahe den Autobahnen zum Laden von Batterie-Lkw errichtet werden. Die Bundesregierung hat bereits einen öffentlichen Prozess für entsprechende Ausschreibung gestartet.<sup>35</sup>

#### Mindestmengen von Anzahl und Leistung von Lkw-Ladeorten in Europa

Auf Basis der AFIR-Vorgaben in den Autobahn-km (sofern sie zum europäischen Kern- oder Gesamtnetz der TEN-V-Korridore gehören), lassen sich ungefähr die Anzahl der Lkw-Ladestationen und der installierten Mindestleistung zum öffentlichen Schnellladen entlang der Autobahnen abschätzen.<sup>36</sup> [Tabelle 2](#) zeigt die Ergebnisse nach Mitgliedstaaten der EU.

#### 4.0 ROLLE DES DEPOT- UND MEGAWATT-LADENS

TABELLE 1

### VORGABEN DER AFIR ÜBER DIE ZEIT (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)<sup>37</sup>

FAHRZEUGART	2025	2027	2030
<b>Kernnetz</b>	<b>Alle 120 km auf mindestens 15 % des Netzes je Fahrtrichtung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mindestens 1,4 MW Gesamtleistung</li> <li>▪ 1 Ladepunkt mit mindestens 350 kW</li> </ul>	<b>Alle 120 km auf mindestens 50 % des Netzes je Fahrtrichtung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mindestens 2,8 MW Gesamtleistung</li> <li>▪ 2 Ladepunkte mit mindestens 350 kW</li> </ul>	<b>Alle 60 km des Netzes je Fahrtrichtung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mindestens 3,6 MW Gesamtleistung</li> <li>▪ 2 Ladepunkte mit mindestens 350 kW</li> </ul>
<b>Gesamtnetz</b>	<b>Alle 100 km auf mindestens 15 % des Netzes je Fahrtrichtung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mindestens 1,4 MW Gesamtleistung</li> <li>▪ 1 Ladepunkt mit mindestens 350 kW</li> </ul>	<b>Alle 100 km auf mindestens 50 % des Netzes je Fahrtrichtung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mindestens 1,4 MW Gesamtleistung</li> <li>▪ 2 Ladepunkte mit mindestens 350 kW</li> </ul>	<b>Alle 100 km des Netzes je Fahrtrichtung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mindestens 1,5 MW Gesamtleistung</li> <li>▪ 1 Ladepunkt mit mindestens 350 kW</li> </ul>
<b>Sichere &amp; geschützte Parkplätze</b>		<b>Mindestens 2 Ladestationen mit jeweils mindestens 100 kW</b>	<b>Mindestens 4 Ladestationen mit jeweils mindestens 100 kW</b>

TABELLE 2

**ANZAHL UND LEISTUNG LKW-LADEORTE ENTLANG DER AUTOBAHNEN NACH AFIR  
(QUELLE: EIGENE BERECHNUNG).<sup>38</sup>**

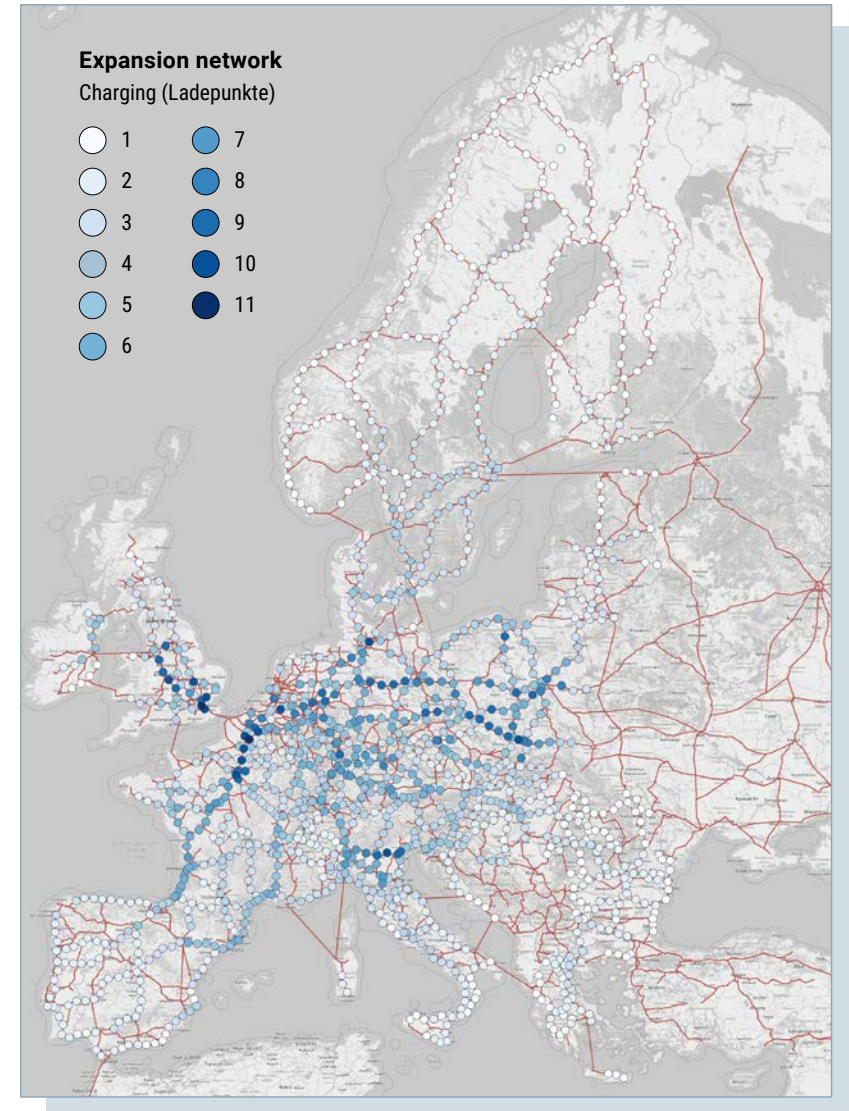
	AUTOBAHNNETZ LINIEN-KM		LKW-LADEORTE			LKW-LADELEISTUNG IN MW		
	KERN	GESAMT	2025	2027	2030	2025	2027	2030
Österreich	1.097	730	6	17	52	10,9	62	156
Belgien	805	1.038	6	18	48	10,1	53	129
Belgien	1.508	1.340	8	27	78	16,4	90	224
Kroatien	1.153	780	6	18	55	11,6	66	164
Zypern	157	336	2	5	13	2,7	13	32
Tschechien	1.015	1.134	6	20	57	12,0	64	157
Dänemark	813	849	5	16	45	9,5	51	126
Estland	375	975	4	14	33	6,9	32	77
Finnland	1.040	4.572	17	55	127	26,7	113	264
Frankreich	5.555	8.960	41	137	366	76,9	386	940
Deutsch-land	6.369	5.027	32	104	314	65,9	369	918
Griechen-land	1.760	3.079	14	46	121	25,4	126	305
Ungarn	1.102	1.607	8	26	70	14,7	75	183
Irland	504	1.715	7	22	52	10,9	48	114
Italien	4.319	6.416	31	101	273	57,3	292	712
Lettland	719	1.012	5	17	45	9,5	48	118
Litauen	609	1.450	6	20	50	10,5	50	119
Luxemburg	70	20	1	2	4	0,8	5	12
Malta	16	111	1	2	4	0,8	4	8
Niederlande	670	1.417	7	21	52	10,9	53	126
Polen	3.700	4.398	23	75	212	44,5	235	578
Portugal	946	2.015	9	29	73	15,3	74	177
Rumänien	2.575	2.268	14	45	132	27,7	153	379
Slowakei	834	747	5	15	43	9,0	50	123
Slowenien	446	157	2	6	19	4,0	24	60
Spanien	5.774	6.365	34	113	321	67,4	360	887
Schweden	3.010	3.435	18	60	170	35,7	190	467
EU	46.939	61.958	304	1.012	2.805	589	3.059	7.494

ABBILDUNG 9

### MÖGLICHES LKW-SCHNELLADENETZ ENTLANG DER AUTOBAHNEN IN EUROPA MIT JE 50 KM ABSTAND (QUELLE: SPETH ET AL. 2022)<sup>39</sup>

Die größten Einzelnetze des europäischen Kern- und Gesamtnetzes an Autobahnen finden sich in Frankreich, Spanien, Italien und Deutschland. In der gesamten EU handelt es sich in Summe um ca. 47.000 km Kernnetz und 62.000 km Gesamtnetz. Daraus ergeben sich bis 2030 ca. 250–350 Ladeorte in den großen Ländern mit ca. 700–950 MW Mindestleistung. In kleineren Ländern wie Belgien, Kroatien oder Portugal sind es eher 50–70 Ladeorte mit mindestens 130–180 MW Ladeleistung. Für ganz Europa sieht die AFIR ca. 2.800 Ladeorte ausschließlich für Lkw entlang der Autobahnen mit insgesamt 7,5 GW Ladeleistung vor.

Die von der AFIR vorgesehenen Ladepunkte für E-Lkw in Europa könnten nach verschiedenen Studien so lange reichen, bis ca. 15 % des Lkw-Fernverkehrs in Europa batterie-elektrisch sind<sup>40</sup> was je nach Markthochlauf ca. 2030–2035 der Fall sein könnte.



A large, semi-transparent orange number '5' is centered in the background. The bottom part of the '5' is overlaid by a semi-transparent orange circle.

# HERAUSFORDERUNGEN BEIM DEPOTLADEN

## 5.0 HERAUSFORDERUNGEN BEIM DEPOTLADEN

Der Umstieg auf batterieelektrische Lkw stellt hohe Anforderungen an die Ladeinfrastruktur in Logistikdepots. Die wichtigsten technischen Optionen umfassen leistungsfähige Netzanschlüsse, den möglichen Einsatz von Pufferspeichern zur Netzstabilisierung sowie intelligente Lademanagementsysteme (Smart Charging). Trotz vielversprechender Ansätze bestehen weiterhin Herausforderungen und Forschungsbedarfe für eine flächendeckende Umsetzung.

Die Integration von Ladeinfrastruktur in bestehende Logistikdepots wird durch mehrere Faktoren erschwert. Eine zentrale Hürde stellt die begrenzte Flächenverfügbarkeit dar, da Betriebsgelände oft bereits optimal ausgelastet sind und zusätzliche Ladepunkte so schwer zu integrieren sind. Zudem sind die bestehenden Netzanschlusskapazitäten teilweise nicht ausreichend, um den gleichzeitigen Ladevorgang vieler E-Lkw zu ermöglichen. Eine Erweiterung des Netzanschlusses ist oft kosten- und zeitintensiv, sodass alternative Lösungen wie Lastmanagement oder Pufferspeicher betrachtet werden können. Allerdings liegen außer einzelnen Fallstudien bisher kaum breite empirische Daten zu verfügbaren und erforderlichen Netzanschlussleistungen in Depots vor.<sup>41</sup> Eine große Zahl von Logistikdepots verfügt bereits über relativ gute Netzanschlüsse, sofern sie eine eigene PV-Anlage betreiben, da für den Erhalt der Einspeisevergütung ein Netzanschluss in Höhe der installierten PV-Leistung notwendig ist. Dieser kann bei großen Depots einige MW an Anschlussleistung betragen. In einer Erhebung in Baden-Württemberg besaß über die Hälfte der befragten Logistikunternehmen eigene PV-Anlagen.<sup>42</sup>

Eine weitere Herausforderung ist der Mangel an Erfahrung mit E-Lkw und Stromsystemen in Teilen der Logistik. Viele Logistikunternehmen verfügen nicht über das nötige Fachwissen zur Implementierung und zum Betrieb von Ladesystemen, da es bisher nicht Teil ihres Kerngeschäfts war, was zu Unsicherheiten in der Planung führt. Hinzu kommt, dass technische Standards für die Schnittstellen zwischen Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur uneinheitlich interpretiert werden. Auch die Tourenplanung muss teilweise angepasst werden, da Ladezeiten und Reichweiten in bestehende Optimierungsroutinen integriert werden müssen.

### NETZANSCHLUSS UND SMART CHARGING

Ein leistungsfähiger Netzanschluss bleibt eine Grundvoraussetzung für den großflächigen Einsatz von Ladeinfrastruktur. Simulationen zeigen, dass trotz optimiertem Lastmanagement immer der erste Schritt ist, aber in vielen Fällen eine Verstärkung des Netzanschlusses trotzdem notwendig ist.<sup>43</sup> Smart Charging-Technologien können hier eine entscheidende Rolle spielen. Durch eine dynamische Steuerung der Ladeprozesse anhand von Strompreisen, Netzauslastung und eigenem erzeugtem Strom kann der Netzbezug und Netzanschluss optimiert werden. Dies trägt zur Senkung der Betriebskosten bei, da Lastspitzen vermieden und günstigere Stromtarife genutzt werden können. Die Potenziale sind laut ersten Simulationen erheblich, müssen aber weiter untersucht werden.<sup>44</sup>

### MÖGLICHE ROLLE VON PUFFERSPEICHERN

Mobile Batteriepufferspeicher sind eine zusätzliche mögliche Lösung für den schnellen Aufbau von Ladeinfrastruktur, insbesondere an Standorten mit begrenzter Netzverfügbarkeit. Sie ermöglichen den Betrieb von Ladestationen, ohne dass eine Erweiterung des Netzanschlusses notwendig ist. So können Ladepunkte kurzfristig realisiert werden, etwa für den Hochlauf elektrifizierter Lkw-Flotten.

Ein wesentlicher Vorteil der Pufferspeicher liegt in der Fähigkeit, Lastspitzen im Stromnetz zu verringern. Die gespeicherte Energie wird gezielt genutzt, um Ladeprozesse zu puffern, wodurch das Netz gleichmäßiger ausgelastet wird. Dies führt zu einer Reduzierung der Energiekosten, da teure Strombezugskosten und hohe Leistungspreise in Spitzenzeiten vermieden werden können. Die Kombination aus hoher Ladeleistung und Netzschonung macht mobile Pufferspeicher besonders attraktiv für Unternehmen mit dynamischem Ladebedarf.<sup>45</sup> Allerdings muss die Einsparung bei den Netzentgelten und Strombezug mit den Kosten für den Speicher verglichen werden. Dabei wirkt sich positiv aus, dass die Anschaffungskosten für Pufferspeicher in den letzten Jahren tendenziell stark gesunken sind und deren Einsatz zunehmend lukrativ machen. Besonders interessant wird der Speicher in Kombination mit einer PV-Anlage an Depots, um den selbst erzeugten PV-Strom verstärkt nutzen zu können. Weiterhin kann ein Pufferspeicher auch eine Übergangslösung sein, um mit dem Einsatz von E-Lkw zu beginnen, bis der Netzanschluss erweitert wurde.<sup>46</sup>

### AKTUELLE INITIATIVEN

In Deutschland existieren bereits mehrere Initiativen zur Förderung des Depotladens. Die Task-Force Depotladen des Bundesministeriums für Verkehr (BMV) hat Handlungsempfehlungen zur Planung und Normierung von Ladeinfrastruktur erarbeitet.<sup>47</sup> Der Leitfaden „Einfach laden am Depot“ bietet Unternehmen praktische Anleitungen zur Umsetzung von Ladeinfrastrukturprojekten, inklusive Wirtschaftlichkeitsanalysen.<sup>48</sup> Das Forschungsprojekt ELV LIVE untersucht die Wechselwirkungen zwischen der Elektrifizierung von Lkw und dem Netzausbau und gibt Aufschluss über die Anforderungen für den Schwerlastverkehr.<sup>49</sup> In Ci-LoCharging wurden 2 schwere Batterie-Lkw angeschafft zzgl. AC- und DC-Ladesäulen mit dem Ziel einer optimierten Integration von Lade-, Logistik-, Energie- und Verkehrsmanagement in Logistikdepots.<sup>50</sup> Im Projekt „megaWATT Logistics“ wurde in Österreich erprobt, wie sich E-LKW im Verteilerverkehr beim Warentransport vom Terminal zum Bestimmungsort bewähren.<sup>51</sup> Eine aktuelle Übersicht zur Rolle des Depotladens in mehreren Europäischen Ländern kommt zu dem Schluss, dass Depotladen in allen betrachteten Ländern dominieren sollten, aber die Voraussetzungen für Installation und Betrieb von Ladeinfrastruktur an den Depots teilweise unterschiedlich sind.<sup>52</sup>

# FAZIT

Die Elektrifizierung von Lkw-Depots stellt eine komplexe Herausforderung dar, die technische, infrastrukturelle und wirtschaftliche Aspekte umfasst. Während innovative Lösungen wie Pufferspeicher und Smart Charging vielversprechende Ansätze bieten, auch um Übergangsphasen zu überbrücken, bleiben Netzausbau und die betriebliche Integration langfristig zentrale Herausforderungen. Die derzeit laufenden Forschungsinitiativen leisten einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Ladeinfrastruktur, doch für eine flächendeckende Umsetzung sind weitere Schritte erforderlich.



# **BIDIREKTIONALES LADEN VON E-LKW**

## 6.0 BIDIREKTIONALES LADEN VON E-LKW

Bidirektionales Laden ermöglicht Energieflüsse zwischen Elektrofahrzeugen und Stromnetz in beide Richtungen. Für schwere Nutzfahrzeuge wie E-Lkw gewinnt diese Technologie zunehmend an Bedeutung, da sie neue Möglichkeiten zur Netzentlastung, Kostensenkung und Sektorenkopplung bietet.

Es existieren eine Reihe von technischen Ansätzen für das bidirektionale Laden. Beim Vehicle-to-Grid (V2G) speisen E-Lkw überschüssige Energie aus ihren Batterien ins öffentliche Netz ein, um Netzschwankungen auszugleichen und erneuerbare Energien besser zu integrieren. Dies erfordert bidirektionale DC-Ladestationen und intelligente Steuerungssysteme.<sup>53</sup> Bei der „Vehicle-to-Logistik“ (V2L) oder auch Vehicle-to-Depot<sup>54</sup> wird die Energie der Lkw-Batterien direkt für betriebliche Anwendungen genutzt, z. B. zur Versorgung von Lagerhallen oder mobilen Arbeitsgeräten.<sup>55</sup> Batteriekapazitäten in E-Lkw können auch über digitale Plattformen an Strommärkten vermarktet werden, z. B. zur Teilnahme am Intraday-Handel oder zur Bereitstellung von Regelleistung.<sup>56</sup>

Erste Forschungsprojekte in Deutschland untersuchen die Potenziale von bidirektionalem auch für Lkw. Im Projekt SPIRIT-E ist das Ziel eine Integration bidirektionaler E-Lkw in lokale Energiesysteme und Stromnetze. Es wird ein marktbasierter Aggregator zur Vermarktung von Batterie-Flexibilitäten entwickelt sowie Reallabore an Logistikstandorten mit reservierbarer Ladeinfrastruktur erprobt, einschl. Redispatch-Anwendungen über eine Crowd-Balancing-Plattform.<sup>57</sup> Mit einem Fokus

auf Pkw-Flotten leistet auch das Projekt BDL Next einen Beitrag über eine serienreife Entwicklung bidirektionaler Ladesysteme für E-Pkw, die später auch Vorlage für E-Lkw sein könnten.<sup>58</sup>

Herausforderungen und Entwicklungspotenziale beim bidirektionalen Laden von E-Lkw bestehen bspw. technisch in der Lebensdauer der Batterien bei häufigen Ladezyklen sowie der Harmonisierung von Lade- und Netzanschlussprotokollen. Regulatorisch könnte eine Anpassung des Messstellenbetriebsgesetzes für Rückspeisevergütungen und eine Klärung der Steuerpflicht bei Energiehandel einen Beitrag zur Entwicklung leisten.<sup>59</sup>

Insgesamt steckt das bidirektionale Laden von E-Lkws noch in den Kinderschuhen. Es gibt viele Ideen und erste Projekte, allerdings fehlt es an umfassenden Potenzialstudien, an der Identifikation und Bewertung von Geschäftsmodellen, an klaren regulatorischen Analysen und dem Abbau regulatorischer Hürden sowie einem Fahrplan für die weitere Umsetzung. In großer Menge kann das bidirektionale Laden von E-Lkw sowohl in den Depots als auch für das Stromsystem insgesamt große Veränderungen mit sich bringen und beispielsweise den Bedarf an Spitzenlast-Kraftwerken reduzieren. Allerdings bestehen hier noch große Unsicherheiten und weiterer Forschungsbedarf ist offensichtlich.



# **WEITERE ALTERNATIVE ANTRIEBE**



### WASSERSTOFFANTRIEBE FÜR LKW

Wasserstoff wird als weiterer alternativer Energieträger neben Strom in Batterie-Lkw für den Langstreckenverkehr gesehen, insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge, bei denen große Reichweiten und kurze Betankungszeiten entscheidend sind. Brennstoffzellen-Lkw wandeln Wasserstoff in elektrische Energie um, die den Antrieb des Fahrzeugs ermöglicht. Alternativ nutzen einige Hersteller auch Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. Der aktuelle Stand zeigt, dass erste Serienfahrzeuge von Hyundai bereits im Einsatz sind,<sup>60</sup> zudem haben Hersteller wie Daimler und Volvo angekündigt, bis Ende des Jahrzehnts serienreife Modelle anzubieten.<sup>61</sup> Herausforderungen bleiben jedoch der begrenzte Ausbau der Wasserstofftankstellen und die hohen Kosten für grünen Wasserstoff. Zudem zeigen Berechnungen der Gesamtnutzungskosten schwerer Lkw, dass es kostenseitig trotz sinkender Brennstoffzellenkosten schwer für Wasserstoff-Lkw wird, mit Batterie-Lkw zu konkurrieren.<sup>62</sup>

Die Rolle von Wasserstoff-Lkws wird voraussichtlich höchstens auf spezifische Anwendungsfälle begrenzt bleiben, bei denen batterieelektrische Antriebe an ihre Grenzen stoßen, etwa im Fernverkehr oder in Regionen mit unzureichender Ladeinfrastruktur. Experten gehen davon aus, dass die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff entscheidend für den Erfolg dieser Technologie sein wird.<sup>63</sup> Solange keine ausreichenden Kapazitäten für die Erzeugung von grünem Wasserstoff bestehen, sollte dieser prioritär in schwer dekarbonisierbaren Bereichen der Wirtschaft wie der Stahl- und Grundstoffindustrie aber auch der Luft- und Schifffahrt eingesetzt werden. Langfristig könnte Wasserstoff als ergänzende Lösung zur Elektrifizierung beitragen, insbesondere bei synchroner Entwicklung von Tankstellen- und Produktionskapazitäten. Allerdings könnte der weitere Aufbau von Tankstellen für Lkw anspruchsvoll werden, da die Hersteller unterschiedliche Formen von Wasserstoff (gasförmig oder flüssig) verfolgen. Lkw mit sehr stark gekühlten Flüssigwasserstoff bieten höhere Reichweiten, aber es sind derzeit keine öffentlichen Flüssigwasserstoff-Tankstellen in Europa verfügbar.<sup>64</sup>

### OBERLEITUNGEN UND ELEKTRISCHE STRASSENSYSTEME

Oberleitungs- und andere elektrische Straßensysteme (z. B. induktives Laden oder Stromschienen) zielen darauf ab, Lkws während der Fahrt mit Strom zu versorgen, wodurch schwere Batterien und lange Ladezeiten während des Stehens vermieden werden. In Deutschland wurden bereits mehrere Teststrecken für Oberleitungssysteme eingerichtet, und mehrere Studien haben die potenziellen Vorteile für den Fernverkehr hervorgehoben.<sup>65</sup> Allerdings ist die Technologie teuer im Ausbau und erfordert eine enge Koordination zwischen Infrastrukturplanung und Fahrzeugproduktion.

Elektrische Straßensysteme werden als mögliche Alternative oder Ergänzung zu Batterie-Lkws betrachtet, insbesondere für hochfrequentierte Strecken. Dennoch bleibt unklar, ob der Infrastrukturausbau in großem Maßstab wirtschaftlich und politisch durchsetzbar ist, die meisten Lkw-Hersteller stehen der Technologien eher kritisch gegenüber.<sup>66</sup> Die Weiterentwicklung von induktiven oder hybriden Systemen könnte die Akzeptanz erhöhen. Hier sind Beschlüsse zu groß angelegten Pilotprojekten und internationale Standardisierungen noch ausstehend, um das Potenzial weiter ausschöpfen zu können.

The background is a solid orange color. In the center, there is a large, semi-transparent orange number '0'. At the bottom of the page, there is a grid of small, white-outlined squares that forms a decorative border. The text 'FORSCHUNGSBEDARFE' is written in a bold, white, sans-serif font across the middle of the image.

# FORSCHUNGSBEDARFE

### TECHNISCHE MACHBARKEIT VON E-LKW

Die technische Machbarkeit von batterieelektrischen Lkw wird besonders herausfordernd, wenn es um Sonderfahrzeuge und Sonderfahrten geht, die von standardisierten Logistikabläufen abweichen. Dazu zählen etwa Bau- und Entsorgungsfahrzeuge, mobile Werkstätten oder auch Fahrzeuge im landwirtschaftlichen Einsatz, die nicht nur hohe Lasten bewegen, sondern auch lange Standzeiten mit Energiebedarf oder sehr unregelmäßige Fahrprofile aufweisen. Ebenso sind Transporte mit besonders langen Distanzen, spontanen Routenänderungen oder geringen Rückkehrraten zum eigenen Depot eine Herausforderung für die Elektrifizierung.

Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Frage, wie sich elektrische Antriebe unter diesen speziellen Bedingungen integrieren und betreiben lassen. Dazu zählen etwa Untersuchungen zur Optimierung der Tourenplanung bei stark schwankenden Tagesprofilen, zur Kombination von Depot- und Zwischenladung sowie zur Frage, inwieweit Reichweitenreserven oder modulare Batteriegrößen helfen können, die Einsatzflexibilität zu erhöhen. Auch die Rolle von Backup-Ladelösungen z. B. durch mobile Speicher sollte vertieft analysiert werden.

### DEPOTLADEN

Das Depotladen von batterieelektrischen Lkw ist ein zentraler Baustein für die Elektrifizierung des Güterverkehrs, insbesondere im regionalen und städtischen Bereich. Dennoch bestehen zahlreiche offene Forschungsfragen, die ein besseres Verständnis über die technischen,

wirtschaftlichen und betrieblichen Anforderungen ermöglichen sollen. Im Vordergrund stehen dabei Untersuchungen zur optimalen Dimensionierung von Ladeinfrastruktur im Depot: Wie viele Ladepunkte sind erforderlich, mit welcher Ladeleistung, und wie lassen sich Lastspitzen vermeiden? Auch die Integration erneuerbarer Energien und stationärer Speicher sowie der Einfluss von Betriebsabläufen – etwa Schichtplänen und Lieferzyklen – auf das Ladeverhalten müssen systematisch analysiert werden. Ziel ist es, robuste Planungsgrundlagen zu schaffen, die individuelle Betriebsprofile mit den Anforderungen des Energiesystems in Einklang bringen.

Darüber hinaus sind Fragen zur Skalierbarkeit und zur langfristigen Netzanschlussplanung von zentraler Bedeutung. Während erste Pilotprojekte den Einstieg ermöglichen, stellt der flächendeckende Ausbau eine große Herausforderung für Verteilnetzbetreiber und Flottenbetreiber dar. Forschungsbedarf besteht daher auch in Bezug auf Koordinationsprozesse zwischen Unternehmen, Netzbetreibern und Behörden sowie zu regulatorischen Rahmenbedingungen und Förderinstrumenten. Interdisziplinäre Ansätze, die technisches Wissen mit betriebswirtschaftlicher und regulatorischer Perspektive verbinden, sind notwendig, um das Potenzial des Depotladens effizient und praxistauglich zu erschließen. Bspw. bestehen offene Fragen bei Betreiber- und Geschäftsmodellen: Wird es eine 1:1-Zuordnung von Batterie-Lkw und Ladepunkten geben, wie und zu welchen Bedingungen können Logistikpartner die Ladeinfrastruktur im Depot nutzen und wie kann das Laden ideal, aber einfach in bestehende Prozesse integriert werden?

### MEGAWATTLADEN

Das Megawattladen von schweren Nutzfahrzeugen stellt eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs dar. Dennoch bestehen noch erhebliche Forschungsbedarfe entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Einerseits betrifft dies die technische Entwicklung und Standardisierung der Ladeinfrastruktur: Es gilt, Fragen zur thermischen Belastbarkeit von Steckverbindungen, zur Sicherheit bei hohen Stromstärken sowie zur Lebensdauer der Komponenten unter realen Einsatzbedingungen zu klären. Auch das Zusammenspiel von Fahrzeugbatterie, Ladegerät und Netzanschluss muss in verschiedenen Anwendungsfällen – etwa im Fernverkehr, an Logistikzentren oder entlang von Korridoren – untersucht und optimiert werden.

Andererseits erfordert das Megawattladen auch systemische und planerische Forschung. Der zukünftige Bedarf an Ladepunkten mit sehr hoher Leistung muss räumlich und zeitlich differenziert ermittelt werden, um Netzengpässe zu vermeiden und Infrastruktur gezielt auszubauen. Dies beinhaltet die Integration von Megawattladestandorten in bestehende Energie- und Logistiknetze sowie die Bewertung möglicher Flexibilitätspotenziale im Energiesystem. Zusätzlich besteht Forschungsbedarf zu Geschäftsmodellen, Betreibermodellen und zur Rolle der öffentlichen Hand beim Aufbau dieser neuen Ladeinfrastruktur. Auch die soziale Akzeptanz, die gemeinsame Nutzung von Netzanschlüssen mit Pkw-Schnellladen und das Ladeverhalten der Nutzer sollten in interdisziplinären Studien betrachtet werden, um die Technologie erfolgreich in der Praxis zu verankern. Beim Aufbau

von Pkw- und Lkw-Schnellladeinfrastruktur, insbesondere entlang der Autobahnen, ist auch der unterschiedliche Flächenbedarf der Ladeinfrastruktur von Pkw und Lkw zu berücksichtigen. Weiterhin ist eine komplexe Frage, wie der Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur möglichst schnell und kosteneffizient gestaltet werden kann, und wie die sich ergänzende Rolle von staatlichen und privaten Akteuren parallel, effizient, rechtlich sicher und diskriminierungsfrei erfolgen kann.

### BIDIREKTIONALES LADEN

Bidirektionales Laden eröffnet die Möglichkeit, elektrische Fahrzeuge nicht nur als Verbraucher, sondern auch als flexible Speicher im Energiesystem zu nutzen. Während für Pkw bereits erste Pilotprojekte laufen, ist das Potenzial bei Nutzfahrzeugen, insbesondere bei Lkw, bislang kaum erschlossen. Dabei könnten gerade Lkw-Flotten durch ihre planbaren Standzeiten, großen Batteriegrößen und zentralen Ladeorte (z. B. Depots) systemrelevante Flexibilität bereitstellen. Ein zentraler Forschungsbedarf besteht daher in der quantitativen Bewertung dieses Potenzials: Wie viele Fahrzeuge stehen wann und wie lange für bidirektionales Laden zur Verfügung, und wie wirkt sich das aufs Depot und das Gesamtsystem aus? Zudem ist die Frage bzgl. der Konkurrenz oder möglicher Synergien des Einsatzes von bidirektionalem Laden auf unterschiedlichen Ebenen (Depot, Netz, Gesamtsystem) ([siehe Skizze V2Xplore](#)) interessant.

Darüber hinaus müssen technische, ökonomische und regulatorische Rahmenbedingungen weiter erforscht werden. Dazu zählen Fragen zur Lebensdauer der Batterien bei häufigem Be- und Entladen, zur

Standardisierung von Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen sowie zur Einbindung in Energiemärkte und Vergütungsmechanismen. Ebenso sind Geschäftsmodelle zu untersuchen, mit denen sich betriebswirtschaftliche Vorteile für Flottenbetreiber mit netzdienlichen Effekten kombinieren lassen. Schließlich sind rechtliche Unsicherheiten zu adressieren, etwa zu steuerlichen Aspekten bei bidirektionalen Energieflüssen.

### WEITERE ALTERNATIVE ANTRIEBE

Trotz der Fortschritte bei Batterie-Lkw bestehen erhebliche Forschungsbedarfe, um die verschiedenen Technologien zu optimieren und ihre Marktintegration zu beschleunigen. Dazu gehören innovative Batteriechemien, effiziente Ladeinfrastrukturen und hybride Ansätze für die Integration von elektrischen Straßensystemen und Batterien. Darüber hinaus fehlen umfassende Analysen zu den Interaktionen von Energiesystemen, Fahrzeugflotten und Logistikketten.

Zukünftige Forschung sollte sich auf die Optimierung der Energienutzung, die Kostenreduktion und die Integration in bestehende Logistiksysteme konzentrieren. Auch die Entwicklung intelligenter Ladetechnologien und die Harmonisierung von Standards zwischen den alternativen Antrieben sind entscheidend. Internationale Kooperationen und groß angelegte Demonstrationsprojekte werden notwendig sein, um die Praxistauglichkeit und Akzeptanz der Technologien sicherzustellen.

### ROLLE DES AUTONOMEN FAHRENS

#### Entwicklungsstand und Aussicht

Die großflächige Einführung autonomer Lkw steht kurz vor der kommerziellen Reife. Unter anderem das schwedische Unternehmen Einride nimmt dabei eine Vorreiterrolle ein. Aktuelle Projekte und Pilotversuche deuten darauf hin, dass eine breitere Marktdurchdringung bis 2030 erfolgen könnte. Allerdings hängt der Fortschritt maßgeblich von regionalen regulatorischen Rahmenbedingungen und technologischen Entwicklungen ab. So ist die Einführung unter Einsatz auf nicht öffentlichen Straßen, das heißt in geschlossenen Arealen wie Häfen, deutlich einfacher als im öffentlichen Straßenraum. Seit 2022 testet Einride seine autonomen Pods in geschlossenen Arealen, beispielsweise in Kentucky, USA. Derzeit wird ein umfassendes autonomes Netzwerk im Hafen von Dubai aufgebaut. Dort sollen hunderte kabinenlose E-Lkw im Hafen- und Nahverkehr operieren.<sup>67</sup> Auch das Unternehmen Bot Auto plant für 2025 einen viermonatigen „Driver-Out“-Pilotversuch zwischen Houston und San Antonio, bei dem erstmals reale Frachtaufträge mit autonomen Lkws abgewickelt werden.<sup>68</sup>

Die Einführung von Level-4-Autonomie erfolgt zunächst in begrenzten Betriebsbereichen, beispielsweise auf dedizierten Korridoren wie Häfen oder Autobahnen mit intelligenten Verkehrssystemen. Eine vollständige Marktrelevanz für Langstreckenverkehre wird jedoch erst nach 2030 erwartet, da hierfür eine internationale Harmonisierung der Standards erforderlich ist. Studien weisen zudem darauf hin, dass größere Auswirkungen auf Verkehr und Emissionen erst bei

TABELLE 3

## MÖGLICHE HERAUSFORDERUNGEN SPEZIELL BEIM LADEN VON AUTONOMEN E-LKW.

HERAUSFORDERUNG	LÖSUNGSANSATZ
24/7-Betrieb	Integration von automatisierten DC-Schnellladesystemen mit bis zu maximal 3,75 MW
Keine Fahrereteiligung	Autonomes Laden mittels Roboterarmen oder induktiver Systeme
Hoher Energiebedarf	Netzanschlüsse mit $\geq 10$ MW pro Depot und ggf. Pufferspeicher zur Lastglättung

einer hohen Bestandsdurchdringung mit autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Straßenraum zu erwarten sind, d. h. erst nach 2030.<sup>69</sup>

Grundsätzlich sind Batterie-Lkw besonders als autonome Lkw geeignet, da diese Lkw ohne Lenkzeitbeschränkung rund um die Uhr eingesetzt werden könnten und dann das Fahrzeug mit den geringsten Betriebskosten den größten betriebswirtschaftlichen Vorteil bringt. Durch die Ladezeiten steht ein Batterie-Lkw zwar etwas länger als ein Diesel- oder Wasserstoff-Lkw, aber nach derzeitigen Schätzungen überwiegt sein Betriebskostenvorteil trotzdem deutlich, zumal gesetzliche Rast- und Ruhezeiten ohnehin eingehalten werden müssen.<sup>70</sup>

### Auswirkungen auf die Ladeinfrastruktur und Netzintegration

Autonome E-Lkw erfordern angepasste Ansätze für die Ladeinfrastruktur, um einen durchgehenden Betrieb ohne Fahrerintervention zu ermöglichen. Dabei stellen sich verschiedene Herausforderungen (Tabelle 3): Das Laden muss autonom bspw. mit einem Roboterarm oder induktiv erfolgen und aufgrund möglichst kurzer Standzeit wären die Ladeleistungen nicht nur technisch an Fahrzeug und Ladesäule, sondern auch für den Netzanschluss oder die Systemintegration (im Depot oder Verteilnetz) anspruchsvoll. Mit der zunehmenden Elektrifizierung von autonomen Lkw steigen auch die Anforderungen an das Stromnetz. Es bedarf weiterer intelligenter Konzepte zur Optimierung der Energieversorgung. Bei einem möglichen Smart Charging 2.0 könnten Algorithmen die Ladezeiten autonomer Lkw nicht nur in Bezug auf Strompreise, sondern auch hinsichtlich Tourenplanung und Verfügbarkeit erneuerbarer Energien optimieren.

# HANDLUNGSOPTIONEN

Um die Elektrifizierung von Lkw und damit auch die Integration von E-Lkw und intelligentem Laden erfolgreich zu gestalten, müssen Logistikunternehmen, die Energiewirtschaft und die Forschungsförderung gezielt zusammenarbeiten.

**Logistikunternehmen** stehen vor der Herausforderung, ihre Betriebsabläufe an die neuen Anforderungen anzupassen. Dazu gehört die Optimierung des Flottenmanagements, indem Routenplanung, Ladezeiten und Stromtarife intelligent miteinander verknüpft werden. Investitionen in eigene DC-Langsam- und Schnelllader an Logistikstandorten sowie Megawatt-Ladesysteme an Hauptverkehrsachsen sind notwendig, für den elektrischen Logistikbetrieb. Eine enge Zusammenarbeit mit Energieversorgern und Netzbetreibern ist erforderlich, um Ladezeiten und Ladepeaks intelligent zu steuern sowie Netzlasten zu reduzieren und mittelfristig dynamische Stromtarife optimal zu nutzen. Zudem müssen Mitarbeitende gezielt weitergebildet werden, um die neuen Technologien effizient einzusetzen. Eine verstärkte Kooperation mit Energieversorgern und Netzbetreibern ist notwendig, um Geschäftsmodelle für netzdienliches Laden und flexible Tarife für gewerbliche Nutzer zu entwickeln.

Die **Energiewirtschaft** muss den Netzausbau vorantreiben und Netzanschlüsse für Logistikzentren ausbauen. Gleichzeitig ist ein dynamisches Lastmanagement essenziell, das Ladebedarfe von Logistikflotten in Echtzeit mit Netzkapazitäten abgleicht. Ein weiteres zentrales Handlungsfeld ist die Förderung bidirektionalen Ladens, um

E-Lkw-Batterien als netzdienliche Speicher zu nutzen und Lastspitzen auszugleichen. Microgrids in Logistikzentren können dazu beitragen, den Eigenverbrauch durch die Kombination von Photovoltaik, Batteriespeichern und lokalen Energiemanagementsystemen zu optimieren.

Die **Forschungsförderung** sollte sich auf die Weiterentwicklung von Technologien und Standards konzentrieren sowie die Erprobung neuer Technologien und Anwendungen. Dazu gehört insbesondere die Optimierung von Megawatt-Ladesystemen und Integration in lokale Energiesysteme und Netze. Um eine nahtlose Nutzung verschiedener Ladepunkte zu gewährleisten, sind standardisierte Schnittstellen für intelligente Lade- und Flottenmanagementsysteme erforderlich. Auch das autonome Laden sollte durch gezielte Pilotprojekte weiterentwickelt, getestet und skaliert werden. Gleichzeitig müssen die Auswirkungen der Netzintegration großer E-Lkw-Flotten untersucht werden, um Szenarien zu entwickeln, die eine stabile Stromversorgung sicherstellen. In diesem Zusammenhang kann insbesondere das intelligente und bidirektionale Laden eine Schlüsselrolle spielen. Schließlich ist es wichtig, wirtschaftliche Anreize und regulatorische Maßnahmen zu analysieren, die eine schnellere Marktdurchdringung von E-Lkw und intelligentem Laden unterstützen können.

Diese Maßnahmen können dazu beitragen, den schweren Straßengüterverkehr effizient zu elektrifizieren, wirtschaftliche Vorteile für Unternehmen zu schaffen und gleichzeitig eine stabile und effiziente Stromversorgung sicherzustellen.

# FAZIT UND AUSBLICK

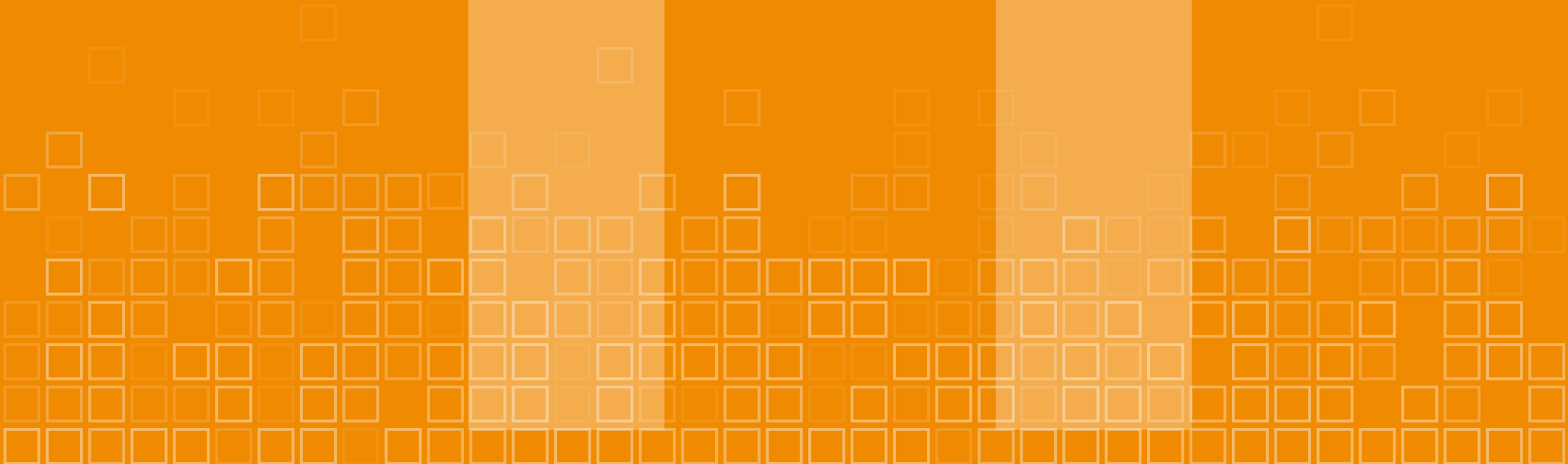
## 10.0 FAZIT UND AUSBLICK

Batterieelektrische Lkw befinden sich in einer frühen Marktphase. Aktuell kommen die ersten Fahrzeuge in relevanten Stückzahlen in den Markt und viele Logistikunternehmen beginnen, erste Erfahrungen zu sammeln. Wie üblich in einer frühen Marktphase existieren viele technische und ökonomische Herausforderungen, aber die Studienlage zeigt relativ klar, dass batterieelektrische Lkw nicht nur bei leichten und mittelschweren, sondern auch schweren Fahrzeugen mittelfristig bei den Antriebsarten von Lkw dominieren werden.

In dieser frühen Phase gibt es eine Reihe von Forschungsbedarfen im Umfeld von Elektro-Lkw. Dies betrifft sowohl die technische Machbarkeit als auch die Rolle des Depot- und Megawattladen sowie Herausforderungen bei der Integration ins Energiesystem mit zeitversetztem Laden oder auch der Rückspeisung von E-Lkw ins Netz. In den nächsten Jahren besteht daher ein hoher Forschungsbedarf und es wird eine deutliche kommerzielle Entwicklung gegeben. Insgesamt eröffnet sich hier ein faszinierendes und spannendes Feld der Energiewende im Verkehr, das sich uns die nächsten Jahre mit vielen spannenden Themen und Entwicklungen bieten wird



# FUSSNOTENVERZEICHNIS



## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 1 Siehe "Transport in Figure – EU Statistical Pocketbook 2024", [↗](#)
- 2 Wietschel, M. et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr (BMV). Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik; PTV Group; MFIVE; Technische Universität Hamburg-Harburg.
- 3 BMDV (2021): Gesamtkonzept klimafreundlicher Güterverkehr, [↗](#)
- 4 Verordnung (EU) 2019/1242 ([↗](#)) sowie Verordnung (EU) 2024/1610 [↗](#)
- 5 NOW (Hrsg.): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengüterverkehr -- Auswertung der Cleanroom-Gespräche mit Nutzfahrzeugherstellern 2024, [↗](#)
- 6 Nykvist, B.; Olsson, O. (2021): The feasibility of heavy battery electric trucks. In: Joule, 5 (4), pp. 901–913. [↗](#)
- 7 Phadke, A.; Khandekar, A.; Abhyankar, N.; Wooley, D.; Rajagopal, D. (2021): Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now. Lawrence Berkeley National Laboratory. Available at [↗](#)
- 8 Zero-Emission Technology Inventory [↗](#)
- 9 Vgl. ZETI Data Explorer [↗](#)
- 10 New commercial vehicle registrations [↗](#)
- 11 Neuzulassungen Alternative Antriebe [↗](#)

## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 12 NOW (Hrsg.): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengüterverkehr – Auswertung der Cleanroom-Gespräche mit Nutzfahrzeugherstellern 2024 [↗](#)
- 13 Vgl. Heavy-duty vehicles [↗](#)
- 14 Vgl. Toll et al. (2022): Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe. TNO Report 2022 R11862
- 15 Daten von der niederländischen Straßenbehörde (RDW). Die Abbildung zeigt die durchschnittliche tägliche Entfernungsverteilung der starren Lkw-Flotte und der Sattelzug-Flotte im niederländischen Kontext. Dies basiert auf der überwachten jährlichen Entfernung der überwiegenden Mehrheit der niederländischen Lkw-Flotte und wird durch 265 Arbeitstage geteilt. Quelle: Toll et al. (2022): Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe. TNO Report 2022 R11862
- 16 „Rigid Truck“ im englischen. Auf Deutsch bezeichnet „Lkw“ sowohl schwere Fahrzeuge, die selbst güter transportieren können, umfasst aber auch Sattelschlepper bzw. Sattelzugmaschinen, die nur mit einem Auflieger Güter transportieren können.
- 17 „effektive Reichweite,“ da laut europäischer Lenkzeitregelung nach spätestens 4,5 h Fahrzeit eine Pause von mind. 45 min dauern notwendig ist, die zum Zwischenladen verwendet werden könnte.
- 18 Quelle: Toll et al. (2022): Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe. TNO Report 2022 R11862
- 19 Quelle: Basma et al. (2021): Total Cost of Ownership for Tractor-Trailers in Europe: Battery-Electric vs. Diesel. ICCT White Paper. November 2021

## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 20 Vgl. bspw. Link and Plötz (2022): Technical Feasibility of Heavy-Duty Battery-Electric Trucks for Urban and Regional Delivery in Germany – A Real-World Case Study. World Electric Vehicle Journal 2022, 13(9), 161 [↗](#)
- 21 Siehe bspw. [↗](#) oder [↗](#) oder [↗](#) für eine Marktübersicht, in der vor allem starre Lkw elektrisch sind.
- 22 Zähringer et al. (2024): Optimizing the Journey: Dynamic Charging Strategies for Battery Electric Trucks in Long-Haul Transport [↗](#) sowie Nykvist and Olsson (2021): The feasibility of heavy battery electric trucks. [↗](#)
- 23 Mareev et al. (2018): Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation. [↗](#)
- 24 Lange, J.-H., Speth, D., & Plötz, P. (2024): Optimized demand-based charging networks for long-haul trucking in Europe. Environ. Research: Infrastructure & Sustainability 4 045004, [↗](#)
- 25 Zhang et al. (2024): Challenges and opportunities in truck electrification revealed by big operational data. [↗](#)
- 26 Link and Plötz (2022): Technical Feasibility of Heavy-Duty Battery-Electric Trucks for Urban and Regional Delivery in Germany – A Real-World Case Study. World Electric Vehicle Journal 2022, 13(9), 161 [↗](#)
- 27 Plötz, P., Link, S., Griener, J., & Moll, C. (2021). Lieferverkehr mit Batterie-LKW: Machbarkeit 2021: Fallbeispiel REWE Group-Region Nordost. Fraunhofer ISI.
- 28 NOW (Hrsg): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengüterverkehr – Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern, [↗](#)

## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 29 Elektro-Fähre E-Kat erreicht Einsatzort in der Nordsee [↗](#)
- 30 Plötz, P. (2022): Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. Nature Electronics 5 (1), pp. 8–10. [↗](#)
- 31 Speth, D. & Plötz, P. (2024): Depot slow charging sufficient for most electric trucks – the case of Germany. Transportation Research Part D: Transport and Environment 128, 104078. [↗](#)
- 32 Vgl. Weitere Details zu den Daten und der Erhebung unter [↗](#)
- 33 Speth, D. & Plötz, P. (2024): Depot slow charging sufficient for most electric trucks – the case of Germany. Transportation Research Part D: Transport and Environment 128, 104078. [↗](#)
- 34 Speth, D. & Plötz, P. (2024): Depot slow charging sufficient for most electric trucks – the case of Germany. Transportation Research Part D: Transport and Environment 128, 104078. [↗](#)
- 35 Vgl. Ausschreibung für Lkw-Schnellladeinfrastruktur gestartet [↗](#)
- 36 Die Berechnungen sind „ungefähr“ da teilweise Ladestationen doppelt angerechnet werden können wenn Sie von beiden Fahrtrichtungen der Autobahn direkt erreichbar sind.
- 37 Quelle: Eigene Übersicht der Vorgaben der AFIR, vgl. [↗](#)
- 38 Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der AFIR, vgl. [↗](#)
- 39 Speth et al. (2022): Where to Charge Electric Trucks in Europe – Modelling a Charging Infrastructure Network. World Electr. Veh. J. 2022, 13(9), 162 [↗](#)

## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 40 Vgl. Speth et al. (2022) [↗](#) sowie Shoman et al. (2023) [↗](#)
- 41 Umfangreiche Simulationsergebnisse bspw. aber hier: Borlaug et al. (2021). Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems. *Nature Energy*,6(6), 673–682. [↗](#)
- 42 VSL-Befragung Logistikfirmen in Baden-Württemberg von mehr als 400 VSL-Mitgliedsunternehmen im Februar 2024, N= 71.
- 43 Al-Hanahi, B., Ahmad, I., Habibi, D., & Masoum, M. A. (2022). Smart charging strategies for heavy electric vehicles. *ETransportation*, 13, 100182.
- 44 Will, C., & Ocker, F. (2024). Flexibility Potential of Smart Charging Electric Trucks and Buses. *World Electric Vehicle Journal*, 15(2), 56 sowie Garrido, J., Hidalgo, E., Barth, M. J., & Boriboonsomsin, K. (2023). An Intelligently Controlled Charging Model for Battery Electric Trucks in Drayage Operations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(4), 4530–4540.
- 45 Vgl. [↗](#) oder auch [↗](#)
- 46 Neue Initiative für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur für E-Lkw. [↗](#)
- 47 Depotladen [↗](#)
- 48 Einfach laden am Depot [↗](#)
- 49 Begleitforschung zum Einsatz batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge im logistischen Regelbetrieb. [↗](#)

## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 50 CiLoCharging [↗](#)
- 51 megaWATT Logistics: 530.000 km für nachhaltige Logistik. [↗](#)
- 52 Hacker et al. (2025): Truck depot charging. Study commissioned by Transport & Environment. Karlsruhe, Berlin: Fraunhofer ISI, Öko Institute.
- 53 Vgl. Bspw. [↗](#) oder [↗](#)
- 54 Vehicle to Depot vgl. [↗](#)
- 55 Forschungsprojekt zum Laden von schweren E-Lkw [↗](#) oder Projekt zum bidirektionalen Laden [↗](#)
- 56 Vgl. die Potenzialstudie von Will, C., & Ocker, F. (2024). Flexibility Potential of Smart Charging Electric Trucks and Buses. World Electric Vehicle Journal, 15(2), 56. [↗](#)
- 57 Shared Private Charging Infrastructure and Reservation for Bidirectionally Integrated Truck Electrification [↗](#) sowie SPIRIT-E: Forschungsprojekt zum Laden von schweren E-Lkw. [↗](#)
- 58 Bidirektionale Ladelösungen für Elektrofahrzeuge im massenfähigen Realbetrieb vgl. [↗](#)
- 59 BDEW Position zum bidirektionalen Laden vgl. [↗](#)
- 60 Hyundai forciert offenbar Fertigung von H2-Lkw und -Bussen in Korea. [↗](#)
- 61 Volvo bringt Wasserstoff-Lkw auf den Markt [↗](#) und GenH2 Truck geht in die Kundenerprobung [↗](#)

## 11.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- 62 Vgl. bspw. Link et al. (2024). Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. *Nature Energy*, 9(8), 1032–1039.
- 63 Plötz, P. (2022): Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. *Nature electronics*, 5(1), 8–10 sowie [↗](#) und Odenweller et al. (2022): Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply. *Nature Energy*, 7(9), 854–865 aber auch Odenweller & Ueckerdt (2025): The green hydrogen ambition and implementation gap. *Nature Energy* 1–14.
- 64 Gemeint ist subcooled liquid Hydrogen. Hierfür existiert eine Tankstelle in Europa auf einem Firmen-Betriebsgelände, vgl. [↗](#)
- 65 Vgl. Gnann et al. (2023): BOLD – Accompanying research for overhead catenary trucks in Germany. Final report. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI. [↗](#) sowie Mottschall et al. (2023). Herausforderungen und Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw.
- 66 Vgl. Gnann et al. (2023): BOLD – Accompanying research for overhead catenary trucks in Germany. Final report. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI. [↗](#)
- 67 Elektro-Offensive im Hafen von Dubai beginnt. [↗](#)
- 68 Bot Auto sets ambitious 2025 schedule for driverless freight operations. [↗](#)
- 69 Krail, M. (2019). Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. [↗](#)
- 70 Elektro-Lkw auch für den Fernverkehr vgl. [↗](#)

# IMPRESSUM

## PROJEKTLEITUNG

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe  
Annegret Stephan, annegret.stephan@isi.fraunhofer.de

## VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT DES TEXTES

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Patrick Plötz, patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de  
Daniel Speth, daniel.speth@isi.fraunhofer.de  
Steffen Link, steffen.link@isi.fraunhofer.de

## GESTALTUNG

Zum goldenen Hirschen Berlin GmbH  
Schlesische Str. 26, 10997 Berlin

## VERFASST IM AUFTRAG VON

Technologieprogramm „IKT für Elektromobilität“, gefördert vom  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 11019 Berlin

## ZITIEREMPFEHLUNG

Ploetz, Patrick; Speth, Daniel; Link, Steffen (2025):  
Schwere Batterie-Lkw in der Logistik. Auftraggeber: Technologie-  
programm „IKT für Elektromobilität“. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut  
für System- und Innovationsforschung ISI.

## BILDNACHWEISE

Titel, Seiten 4, 21, 36: Adobe Stock

## VERÖFFENTLICHT

Juli 2025

## HINWEISE

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.