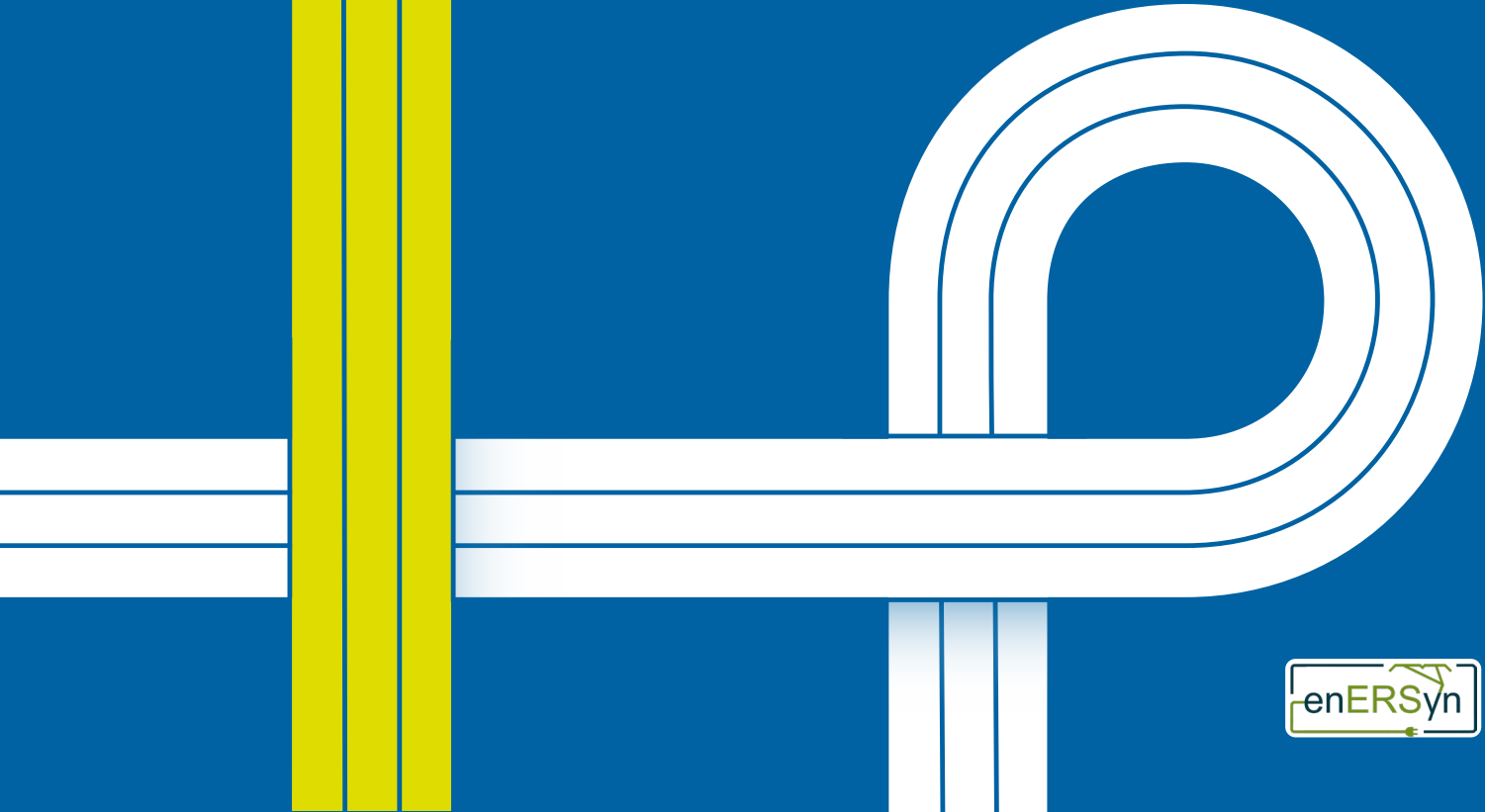





ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg,  
Technische Universität Dresden, DIW Berlin

# enERSyn

Potenziale & Synergien von  
Lkw-Antriebstechnologien





Julius Jöhrens  
Florian Heining  
Hinrich Helms  
Julia Pelzeter



Markus Werner  
Martin Ruscher  
Arnd Stephan



Wolf-Peter Schill

Stand: November 2025

Zitierempfehlung: J. Jöhrens, F. Heining, H. Helms,  
J. Pelzeter, M. Werner, M. Ruscher, A. Stephan, W.-P. Schill  
(2025): enERSyn – Potenziale und Synergien von  
Lkw-Antriebstechnologien. ifeu, TU Dresden, DIW Berlin.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Kernbotschaften</b>                                | <b>2</b>  |
| <hr/>   |           |
| <b>Wo stehen wir bei der Lkw-Antriebswende?</b>       | <b>4</b>  |
| <hr/>   |           |
| <b>Rein batterieelektrisch in die Zukunft?</b>        | <b>6</b>  |
| <hr/>   |           |
| <b>Kann die Ladeinfrastruktur mithalten?</b>          | <b>10</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Welche Technologien könnten ergänzen?</b>          | <b>14</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Welche Vorteile hat ein Batteriewechselsystem?</b> | <b>16</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Welche Vorteile hat dynamisches Laden?</b>         | <b>18</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Welche Vorteile hat Wasserstoff?</b>               | <b>20</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Wie passt das alles zum Energiesystem?</b>         | <b>22</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Und wie kann es nun weitergehen?</b>               | <b>24</b> |
| <hr/>   |           |
| <b>Annahmen und Modelle</b>                           | <b>26</b> |
| <hr/>   |           |
| Literaturverzeichnis                                  | 28        |
| <hr/>   |           |
| Impressum   | 30        |

# Kernbotschaften

---

Batterie-Lkw schicken sich an, den Lkw-Markt aufzurollen – sie verzeichnen bei den Neuzulassungen ein beachtliches Wachstum und sind für viele Anwendungsfälle absehbar die wirtschaftlichste Alternative. Im Zentrum des Projekts „enERSyn“ stand die Frage, ob bei der Antriebswende im Straßengüterverkehr eine Technologievielfalt plausibel ist und welche Gründe für und gegen den Einsatz von Ergänzungstechnologien wie Batteriewechselsystemen, dynamischem Laden per Oberleitung und H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen-Lkw sprechen könnten.

Zu diesem Zweck wurden die Technologien entlang einer Vielzahl von Kriterien bewertet, die Infrastrukturanforderungen und mögliche Flottenentwicklungen modelliert und Auswirkungen auf das Energiesystem betrachtet. Die nun vorliegenden Ergebnisse ergeben ein geschärftes Bild des zu erwartenden Technologieportfolios im Straßengüterverkehr und liefern der Politik Hinweise für sinnvolle Prioritäten staatlichen Handelns.

Risiken beim Ladeinfrastrukturausbau stellen die künftige zentrale Rolle von Batterie-Lkw nicht grundsätzlich infrage. Gleichwohl könnten Restriktionen beim Ausbau (v.a. aufgrund der benötigten Verteilnetzkapazität, aber auch des Flächenbedarfs) den Markthochlauf von Batterie-Lkw spürbar ausbremsen. Dies birgt die Gefahr deutlich erhöhter THG-Emissionen und Betriebskosten auf dem Weg zur Klimaneutralität im Straßengüterverkehr.

Batteriewechselsysteme, dynamisches Laden an Oberleitungen und der H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenantrieb können jeweils einige dieser Herausforderungen adressieren und bilden daher potenzielle Ergänzungstechnologien zu Batterie-Lkw. Keine dieser Technologien scheint jedoch geeignet, alle Engpässe beim Hochlauf von Batterie-Lkw kurzfristig abzufedern.

Die Unterschiede zwischen den potenziellen Ergänzungstechnologien in puncto Kosten, THG-Emissionen und Energiesystemwirkung sind tendenziell gering. Auch die Gefahr eines ineffizienten Lock-ins durch punktuelle Förderung von Ergänzungstechnologien zu Batterie-Lkw ist aufgrund des großen Vorsprungs dieser Technologie gegenüber allen Ergänzungstechnologien (auch H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle) mittlerweile gering.

Entscheidend ist somit vor allem, inwiefern die Ergänzungstechnologien den Übergang zu einem defossilisierten Straßengüterverkehr tatsächlich beschleunigen können.



Batteriewechselsysteme könnten unter entsprechenden Rahmenbedingungen marktgetrieben in die Flotte kommen und eine sinnvolle Ergänzung zu Batterie-Lkw sein. Seitens der Politik wäre dafür eine Standardisierung zu fördern und ggf. punktuelle Marktaktivierung zu betreiben.



Oberleitungen entfalten erst bei einer großen und europäischen Ausdehnung des Netzes für die vordringlich zu adressierenden Anwendungsfälle hinreichenden Nutzen. Der Aufbau einer solchen Infrastruktur hat einen erheblichen zeitlichen Vorlauf, geht mit hohen Investitionsbedarfen einher und macht klare politische Entscheidungen notwendig (Top-Down-Technologie). Die Politik könnte Oberleitungen jedoch als Backup in der Hinterhand halten, sollten sich bestimmte Restriktionen nicht vermeiden lassen.

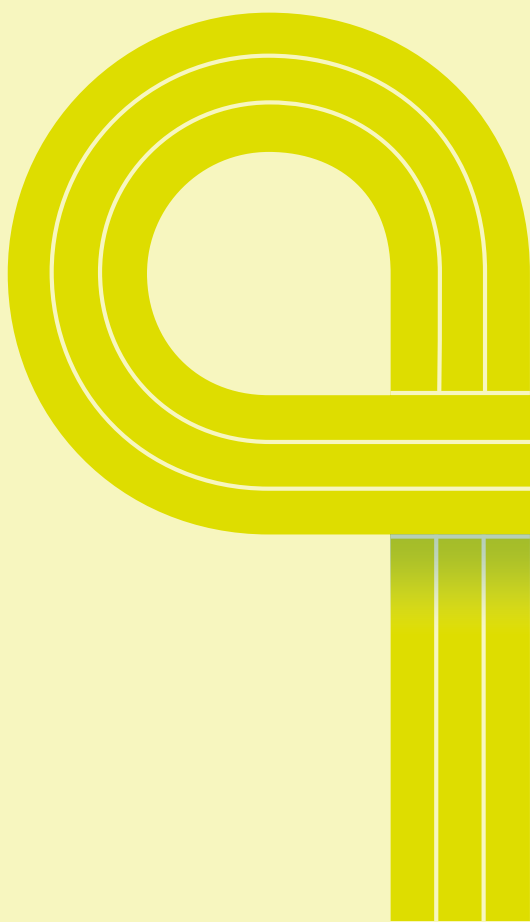


Bei H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenfahrzeugen bestehen aufgrund der geringen Energieeffizienz auch langfristig Unsicherheiten bezüglich der Wirtschaftlichkeit. Die Neudefinition von H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen als potenzielle Ergänzungstechnologie für Batterie-Lkw in bestimmten Anwendungsfällen (und nicht als Alternative dazu) könnte Klarheit für Anwender schaffen. Die Politik sollte hier nur mit Fokus auf plausible Spezialanwendungen weiter fördern.

Da es unter den Ergänzungstechnologien keine alleinige Lösung für alle Herausforderung gibt, sollten Batterie-Lkw und Aufbau entsprechender Ladeinfrastruktur (öffentlich und betrieblich) als klarer Fokus und Priorität für den Klimaschutz im Straßengüterverkehr definiert werden.

Mit Blick auf den Ladeinfrastruktur-Ausbau als hauptsächliche Restriktion im Hochlauf eines Batterie-Lkw-Systems ist dabei vor allem Folgendes zu tun:

- Kurz- bis mittelfristig sind die Dauer von Planungsprozessen und Baumaßnahmen hauptsächliche Risikofaktoren für einen hinreichend schnellen Ladeinfrastruktur-Aufbau. Hier sind insbesondere die aktuell langwierigen Netzanschlussprozesse zu beschleunigen. Bundesweit einheitliche, digitalisierte Verfahren und transparente Kapazitätswissensinformationen können Anschlussverfahren verkürzen. Bis diese etabliert sind, helfen gebündelte, fachlich klar spezifizierte und durch Sicherheiten unterlegte Netzanschlussbegehren.
- Langfristig können Restriktionen vermieden werden, indem die Dimensionierung der Netzanschlüsse entlang der Autobahnen von Beginn an auf den absehbaren Zielzustand der Elektrifizierung (mit zentraler Rolle von Batterie-Lkw) ausgerichtet wird. Dies erspart zudem kosten- und zeitintensive Zwischenlösungen beim Netzausbau.



# Wo stehen wir bei der Lkw-Antriebswende?

---

## Der Straßengüterverkehr steht vor besonderen Herausforderungen

Der Straßengüterverkehr ist das Rückgrat der deutschen Transportwirtschaft, dabei jedoch auch für hohe Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verantwortlich. Derzeit (2024) verursacht der Straßengüterverkehr etwa 32 % der verkehrsbedingten THG-Emissionen in Deutschland, was rund 7 % der gesamten nationalen Emissionen entspricht<sup>1</sup>. Zum Erreichen des kurzfristigen Klimaschutzziels über alle Sektoren (65 % Reduktion gegenüber 1990 bis 2030) sollten daher möglichst auch die THG-Emissionen aus dem Straßengüterverkehr reduziert werden, auch wenn es seit 2024 kein sektorspezifisches Klimaziel für den Verkehr mehr gibt. Langfristig müssen die nationalen THG-Emissionen sogar vollständig vermieden werden, da sich Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität ab 2045 gesetzt hat. Der Straßengüterverkehr steht dabei vor der besonderen Herausforderung, dass nach der aktuellen Verkehrsprognose der Bundesregierung [3] die Gesamtgütertransportleistung in Deutschland in den nächsten Jahren sogar deutlich ansteigt (bis 2040 um 31 % gegenüber 2019). Es stellt sich also die Frage, wie der Straßengüterverkehr trotzdem möglichst viel zur Erreichung der Klimaschutzziele beitragen kann.

Die Möglichkeiten zur gänzlichen Vermeidung einzelner Fahrten oder zumindest einer Verlagerung auf die Schiene sollten zwar prioritär ausgeschöpft werden, sind aber insgesamt begrenzt [4]. Es wird also nötig sein, in großem Umfang CO<sub>2</sub>-freie Energieträger einzusetzen, um den aktuell vor allem durch Dieselkraftstoff gedeckten Bedarf zu defossilisieren. Biokraftstoffe allein werden diesen Bedarf auf nachhaltige Weise nicht decken können, da die Anbauflächen begrenzt sind und diese auch in anderen

Sektoren gebraucht werden [5]. Daher müssen Klimaschutzmaßnahmen im Straßengüterverkehr vor allem auf die sogenannte Antriebswende fokussieren, also den Ersatz von Diesel-Lkw durch Lkw mit alternativen Antrieben unter Nutzung erneuerbaren Stroms. Ihr großflächiger Einsatz erfordert entsprechende Anpassungen und Erweiterungen der Energieversorgungsinfrastruktur.

## Batterie-Lkw stehen in den Startlöchern

Am Markt zeigt sich bereits, dass der batterieelektrische Lkw (Batterie-Lkw) in der Antriebswende eine zentrale Rolle einnehmen wird [6], [7], [8]. Zwar sind in Deutschland erst ca. 10.000 Lkw > 3,5 t (1,3 %) batterieelektrisch. Die Anteile bei Neuzulassungen sind jedoch bereits höher: Im dritten Quartal 2025 waren 10,5 % aller neuen Lkw und 4,2 % der neuen Sattelzugmaschinen batterieelektrisch [9], [10]. Dem Segment der schweren Lkw > 26 t Gesamtgewicht kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Sie haben zwar nur einen Anteil von knapp zwei Dritteln an der Fahrzeugflotte > 3,5 t, legen aufgrund ihres vorwiegenden Einsatzes im Fernverkehr jedoch ganze 76 % der Gesamtfahrleistung im Straßengüterverkehr zurück und verursachen aufgrund des hohen spezifischen Verbrauchs sogar 84 % der Gesamtemissionen [1].

Auch die Verfügbarkeit von elektrischen Lkw-Modellen ist stark gestiegen: Im Oktober 2024 gab es 164 Fahrzeugmodelle in Deutschland, davon 86 % direkt verfügbar. Die meisten dieser Modelle sind batterieelektrisch (80 %), der Rest Brennstoffzellenfahrzeuge, deren Anzahl sich seit 2022 verdreifacht hat [11].

Mit Blick auf das Jahr 2030 haben die Hersteller dann ein Ziel von 75 % für den Anteil von Nullemissionsfahrzeugen an ihren Lkw-Neuzulassungen ausgegeben [5].

---

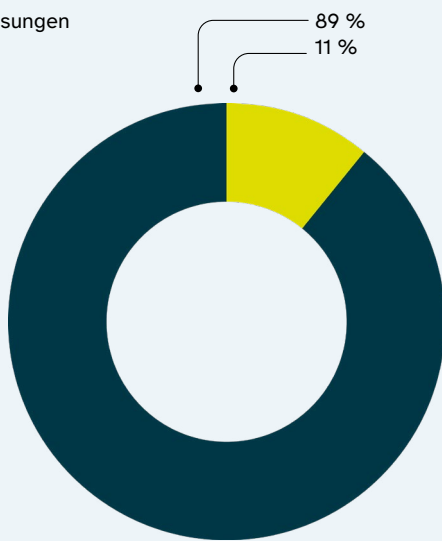
<sup>1</sup> Eigene Berechnungen auf Basis von [1] sowie Daten des Umweltbundesamtes [2]

Die dominierende Technologie würden demnach mit einem Marktanteil von 48 % in Deutschland die Batterie-Lkw sein. Damit sind die Fahrzeughersteller mittlerweile proaktiv dabei, ein Ökosystem für den Betrieb von Batterie-Lkw aufzubauen bzw. zu gestalten, sowohl im Bereich betrieblicher als auch öffentlicher Ladeinfrastruktur. Dies unterstreicht, dass Batterie-Lkw für die Erreichung der Flottenzielwerte fest eingeplant sind und hierfür eine solide Basis geschaffen werden soll [12].

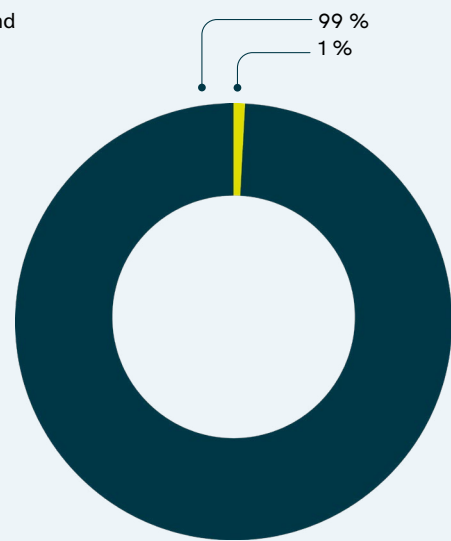
Aus Klimaschutzsicht sind Batterie-Lkw als direkt-elektrische Antriebe ebenfalls die richtige Wahl, da sie Strom ohne weitere Umwandlung, also besonders effizient nutzen. Bei Sattelzügen liegen die THG-Emissionen damit 2030 über den Lebensweg voraussichtlich gut 50 % niedriger als bei Diesel-Lkw [13]. Mit einem weiteren Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung verbessert sich die Klimabilanz dann nach 2030 weiter.

### Lkw > 3,5 t inkl. Sattelzugmaschinen

Neuzulassungen

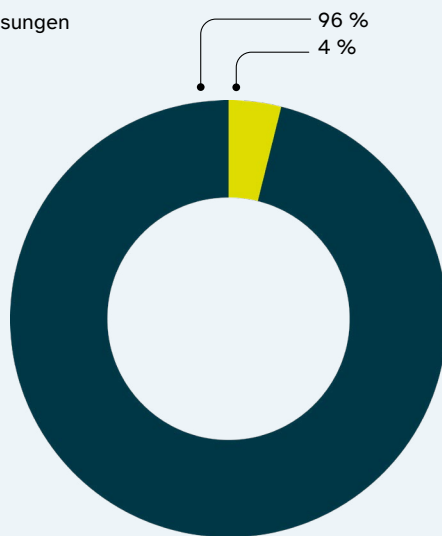


Bestand



### Sattelzugmaschinen

Neuzulassungen



■ Diesel  
■ Batterieelektrisch

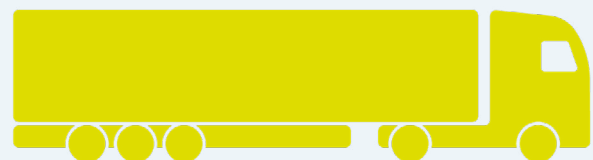


Abbildung 1: Marktanteil elektrischer Lkw und Sattelzugmaschinen im dritten Quartal 2025<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Wasserstoff-Fahrzeuge und Plug-in-Hybride haben Neuzulassungsanteile von < 0,1 %.



# Rein batterieelektrisch in die Zukunft?

## Der Hochlauf von Batterie-Lkw wird vom Markt getragen

Vor dem Hintergrund der bisherigen Marktentwicklung, Kostensituation und Klimabilanz liegt es nahe, für die Defossilisierung des Straßengüterverkehrs vornehmlich auf Batterie-Lkw zu setzen. Kostenbasierte Modellierungen mit dem ifeu-Technologiewahlmodell InGRID (siehe Seite 27) im Rahmen des Projektes enERSyn zeigen, dass der Lkw-Markt bei einem bedarfsgerechten Ausbau von stationärer Ladeinfrastruktur ab spätestens 2035 von batterieelektrischen Lkw dominiert werden kann. Bis 2045 würde dann der marktgetriebene Anteil batterieelektrischer Neuzulassungen sogar auf über 90 % steigen. Der Bestand läuft den Neuzulassungen aufgrund der Haltedauern zwar hinterher, bis 2045 könnten jedoch bereits mehr als drei Viertel der deutschen Lkw-Flotte (670.000 Fahrzeuge) batterieelektrisch unterwegs sein (siehe Abbildung 2).

Die Abhängigkeit von politischen Förderungen ist vergleichsweise gering bzw. wird weiter abnehmen, denn spätestens ab 2030 wird bezogen auf die Kosten für Fahrzeugbetreiber (Total Cost of Ownership = TCO) ein Kostenvorteil im Vergleich zu Diesel-Lkw in der Breite des Marktes erwartet, so dass Subventionen an Bedeutung verlieren. Die bereits erfolgte Ausschreibung öffentlicher Ladeinfrastruktur schafft weitere Investitionssicherheit [14]. Auch wenn dabei keine grundsätzlich neue Verteilungs- und Produktionsinfrastruktur erforderlich ist (wie bei Wasserstoff), sind mindestens punktuelle Verstärkungen der Mittelspannungsnetze sowie die Verstärkung bestehender und teils auch die Herstellung neuer Netzanschlüsse notwendig. Dies sollte zentral gesteuert werden. Der Aufbau der Ladepunkte selbst kann dann teilweise auch durch die Privatwirtschaft erfolgen, ohne zentrale politische Steuerung.

Eine zentrale Rolle bei so gut wie allen Einsatzprofilen von Batterie-Lkw spielt betriebliche Ladeinfrastruktur in Depots und in geringerem Maße auch an Umschlagorten (z.B. Laderampen). Hier wird ein großer Teil der gesamten Traktionsenergie bezogen<sup>3</sup>. Der Aufbau entsprechender Infrastruktur kann abhängig von der Situation vor Ort (Flächenverfügbarkeit, Stromnetzanschluss) herausfordernd, kostenintensiv und mit erheblichem zeitlichem Vorlauf verbunden sein. Für die Modellierung wurde ein Durchschnittswert der zu erwartenden Kosten angesetzt und über die Betriebsdauer der Ladeinfrastruktur von 15 Jahren auf die Stromkosten mit etwa 2 ct/kWh umgelegt.

Bei zusätzlichem Ausbau einer öffentlichen Schnellladeinfrastruktur können prinzipiell auch Langstreckenrelationen von Batterie-Lkw mit den bereits heute verfügbaren Batteriegößen bedient werden. Die ohnehin gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitpausen reichen zum Nachladen in der Regel aus. Lediglich auf sehr langen Relationen, auf denen ein Betrieb mit Fahrerwechsel angenommen wird, kommt es perspektivisch zu zusätzlichem Zeitbedarf fürs Laden.

Die batteriebasierte Elektrifizierung macht daher voraussichtlich leichte Anpassungen im Betriebsablauf notwendig. In der Modellierung wurde dies berücksichtigt, indem zusätzliche Ladezeiten außerhalb von Lenkzeitpausen als Opportunitätskosten bepreist werden. Wenn keinerlei Verzögerung im Betriebsablauf toleriert würde, verringert dies insbesondere das Potenzial der Batterie-Sattelzüge, was dann auch im Gesamtpotenzial von Batterie-Lkw sichtbar wird (siehe Linien in Abbildung 2).

<sup>3</sup> Bei Last- und Sattelzügen ca. 95 % im Jahr 2030 und ca. 85 % in 2040. Bei allen anderen Größenklassen sind es durchgehend mindestens 95 %.

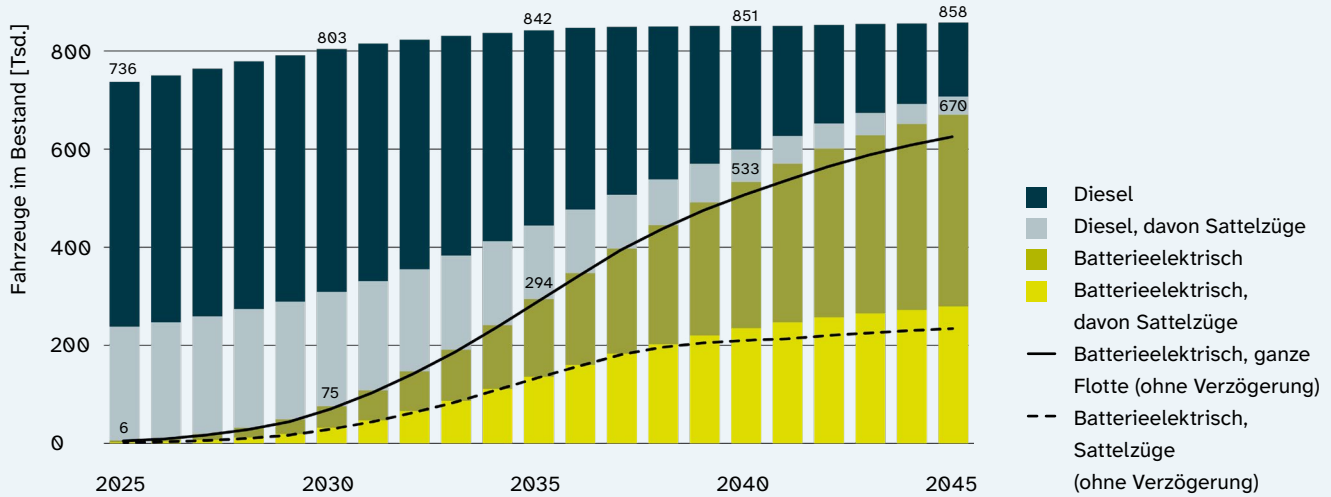


Abbildung 2: Bestandsentwicklung im reinen Batterie-Lkw-Szenario

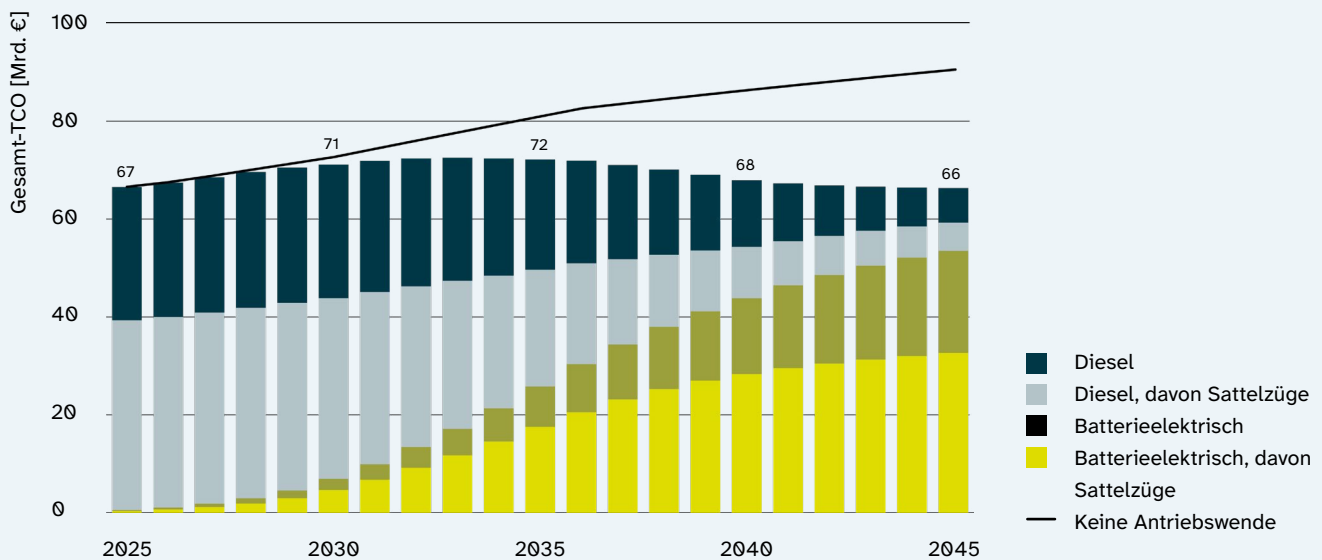


Abbildung 3: Systemkosten im reinen Batterie-Lkw-Szenario

## Die Elektrifizierung verhindert einen Anstieg der Betriebskosten

Der Vorteil für die Betreiber ist aber, dass trotz höherer Fahrzeugkosten für einen wachsenden Anteil der Flotte eine deutlich positive Kostenbilanz gegenüber Diesel erreicht wird, die den Antriebswechsel wirtschaftlich trägt. Die Gesamtkosten bleiben damit trotz eines Verkehrswachstums um mehr als ein Drittel

näherungsweise konstant. Dabei hilft auch der CO<sub>2</sub>-Preis<sup>4</sup>, der den Diesel-Lkw im direkten Vergleich teurer macht. Ein mit Diesel-Lkw verbundener Anstieg der Betriebskosten bis 2045 um 36 % wird durch die batteriebasierte Elektrifizierung vermieden. Die zentralen politischen Instrumente wie der CO<sub>2</sub>-Preis und die CO<sub>2</sub>-basierte Lkw-Maut sind für diesen Kostenvorteil der Batterie-Lkw jedoch essentiell.

<sup>4</sup> In der Modellierung wurde für den europäischen Emissionshandel für Verkehr und Wärme (ETS2) ein Anstieg des CO<sub>2</sub>-Preises zwischen 2030 und 2045 von 85 auf 181 €/t CO<sub>2</sub> angenommen. Gleichzeitig wird über die Maut ein zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t CO<sub>2</sub> fällig.

Für die Betreiber sind höhere Anschaffungskosten für die Fahrzeuge natürlich dennoch eine Herausforderung. Hier können möglicherweise politische Instrumente das Risiko abfedern, um die Antriebswende weiter zu beschleunigen. Zwar gibt es bei den Kostenentwicklungen Unsicherheiten, die Kostenersparnis durch Batterie-Lkw ist in den meisten Fällen jedoch so hoch, dass von einem robusten Ergebnis ausgegangen werden kann.

Allerdings sinken in diesem Szenario die Einnahmen für den Staat – das Aufkommen aus der Energiesteuer für Diesel-Lkw geht bis 2045 um 85 % zurück, die Mauteinnahmen um 32 %. Mehreinnahmen aus der Stromsteuer gleichen dies nur in geringem Maße aus und können durch zusätzliche Einnahmen aus der Stromsteuer bei weitem nicht ausgeglichen werden. Es wird daher voraussichtlich notwendig sein, Steuern und Abgaben im Straßengüterverkehr neu zu justieren, um bei ähnlichen Kosten der Antriebe relativ zueinander das Niveau der staatlichen Einnahmen insgesamt zu stabilisieren.

## Die THG-Emissionen sinken bis 2045 deutlich, aber nicht auf Null

Die THG-Emissionen können durch den möglichen Markthochlauf batterieelektrischer Lkw von 2025 bis 2045 um 66 %<sup>5</sup> sinken, und dies trotz der höheren Herstellungsemissionen durch die Batterien. Betrachtet man nur die energiebedingten Emissionen, beträgt der Rückgang sogar 73 %. Dem stark sinkenden Dieselverbrauch steht dann in 2045 ein zusätzlicher jährlicher Stromverbrauch von 78 TWh gegenüber. Das entspricht 15 % des gesamten heutigen Stromverbrauchs in Deutschland<sup>6</sup>, zukünftig aber voraussichtlich einem geringeren Anteil, da auch in anderen Sektoren eine weitere Elektrifizierung zu erwarten ist. Die Bereitstellung dieser Strommenge erfordert eine entsprechende Integration in das Energiesystem. Zusätzlich werden 2045 weiterhin jährlich 2,2 Mt Diesel verbraucht (hauptsächlich durch in der Flotte verbliebene ältere Bestandsfahrzeuge).

Der batteriebasierte Markthochlauf ist zusätzlich mit einem zunächst stark steigenden Bedarf an Rohstoffen

verbunden, der sich ab 2035 jedoch stabilisiert (siehe Abbildung 5). Langfristig ist unter Nutzung heute absehbarer Technologien mit einem jährlichen Bedarf an etwa 5 kt Lithium, 6 kt Nickel und 0,7 kt Kobalt zu rechnen. Diese Rohstoffe unterscheiden sich jedoch in ihrer Kritikalität<sup>7</sup>. Die Lithiumbeschaffung unterliegt beispielsweise Risiken durch ein hohes Nachfragewachstum und Preisschwankungen. Nickel ist u.a. verbunden mit einer hohen Konzentration der globalen Vorkommen in wenigen Ländern. Kobalt kommt heute überwiegend aus der Demokratischen Republik Kongo, in der die Einhaltung sozialer Standards oftmals nicht gegeben ist. Auch das Anodenmaterial Graphit zeigt Risiken wie die Konzentration der Produktion in China und damit verbundene mögliche Handelshemmnisse.

Der Rohstoffbedarf für Lkw-Batterien ist auch gegenüber dem parallel entstehenden Bedarf für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge nicht zu vernachlässigen<sup>8</sup>. Durch höhere Energiedichten und eine stärkere Nutzung von kobalt- und nickelfreien Lithium-Eisenphosphat-Batterien lässt sich der Bedarf und die Kritikalität jedoch zukünftig reduzieren. Auch das Batterierecycling kann dem Primärrohstoffbedarf entgegenwirken. Würde man die Lkw-Batterien in einem geschlossenen Kreislauf führen, könnte man die in der EU-Batterieverordnung vorgegebenen Quoten an recyceltem Lithium, Nickel und Kobalt jedoch erst 2037 aus dem nationalen Markt decken.

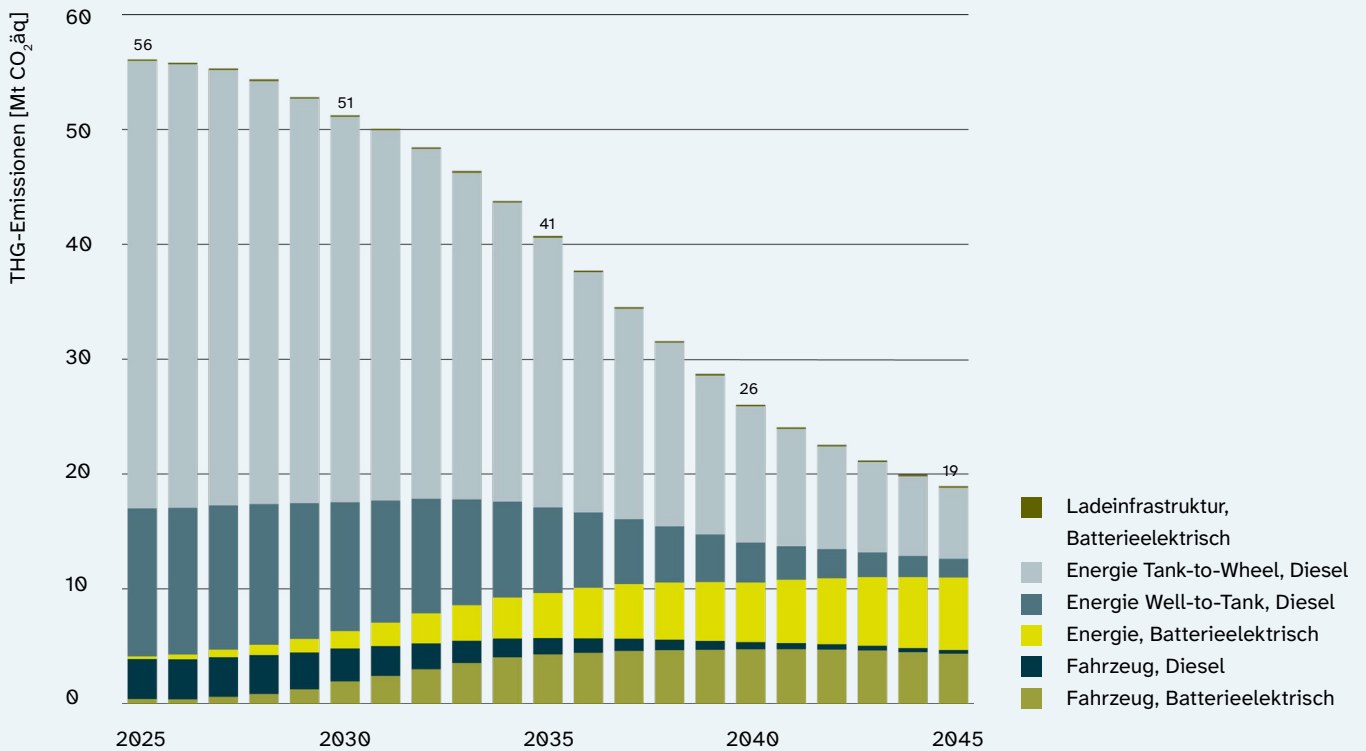
**Fazit:** Insgesamt zeigen sich also positive Perspektiven für den Batterie-Lkw. Trotz hoher Fahrzeugkosten ist eine vorteilhafte Kostenbilanz absehbar, die den Markthochlauf ökonomisch tragen kann. Auch viele operationelle Herausforderungen dürften sich durch Anpassungen im Betriebsablauf lösen lassen. Der Rohstoffbedarf für die Batterien ist zwar relevant, es stehen jedoch alternative Batterietechnologien zur Verfügung bzw. werden entwickelt, die den Bedarf an einigen kritischen Rohstoffen dämpfen können. Die größte Herausforderung für einen Markthochlauf von Batterie-Lkw besteht voraussichtlich in einem bedarfsgerechten Ausbau der Ladeinfrastruktur. Nicht nur sind die Planungs- und Baudauern lang und Flächen für die Infrastruktur knapp: Auch das Stromnetz wird voraussichtlich stärker ausgebaut werden müssen.

5 Wenn die Anlagen für die Erzeugung von erneuerbarem Strom zukünftig mit einem grüneren Strommix hergestellt werden, kann die Reduktion der THG-Emissionen auch höher ausfallen.

6 Eigene Berechnung mithilfe von [15]

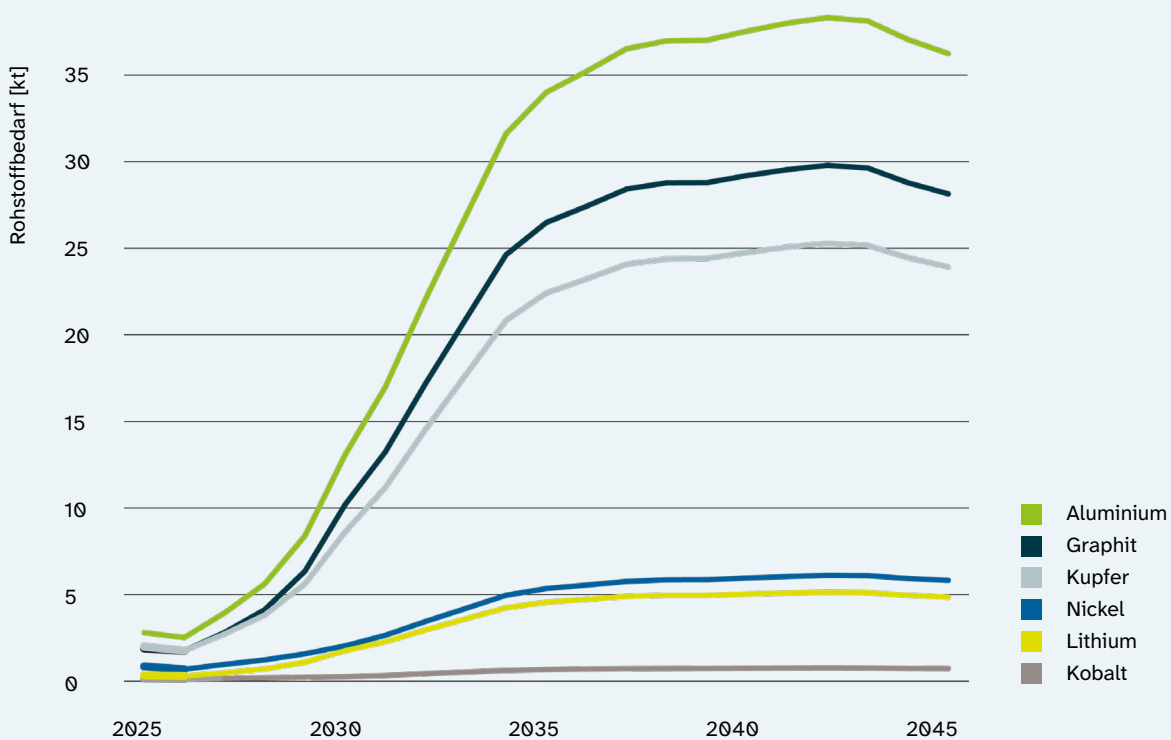
7 In enERSyn mithilfe der ESSENZ+-Methode bewertet.

8 Anteil der Lkw-Batteriematerialien am Rohstoffbedarf für Fahrzeugbatterien in 2035 ca. 11-16 %, bei Nickel und Kobalt nur etwa 5 % aufgrund des höheren Einsatzes von Lithium-Eisenphosphat-Batterien in Lkw. Abgeschätzt über Abgleich mit Modellierungsergebnissen aus dem AutoResS-Projekt (Auftraggeber: Umweltbundesamt).



**Abbildung 4:** THG-Emissionen der Flotte im reinen Batterie-Lkw-Szenario<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Fahrzeugbezogene Emissionen umfassen die Fahrzeug- und Akkuherstellung sowie die Wartung und das End-of-Life der Fahrzeuge im jeweiligen Jahr.



**Abbildung 5:** Rohstoffbedarf der Flotte im reinen Batterie-Lkw-Szenario

# Kann die Ladeinfrastruktur mithalten?

---

## Die Integration der Ladeinfrastruktur in den Straßenraum benötigt neue Flächen

Ein wichtiges Nadelöhr für den Ausbau von Ladeinfrastrukturanlagen entlang der Verkehrsachsen stellt die Verfügbarkeit von Betriebsflächen dar. Bereits jetzt gibt es überbelegte Lkw-Parkplätze, insbesondere auf Park- und Rastanlagen an den Bundesautobahnen [16]. Das Bundesamt für Straßenwesen gab schon für 2018 einen Lkw-Stellplatzmangel von über 20.000 fehlenden Stellplätzen an [17], Abschätzungen des BGL gehen sogar von bis zu 40.000 fehlenden Lkw-Stellplätzen aus [18]. Durch den Aufbau der stationären Ladeinfrastruktur auf den Park- und Rastanlagen wird das Flächenproblem zusätzlich verschärft. Es kann davon ausgegangen werden, dass Ladeplätze durch die notwendige technische Infrastruktur und Manövrierflächen etwa 1,5-mal so viel Fläche wie ein herkömmlicher Lkw-Stellplatz in Anspruch nehmen, trotz effizienter und platzsparender Ladehub-Designs [19], [20].

Das bedeutet konkret: Es werden im großen Maßstab zusätzliche Flächen für die Ladeinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen erforderlich. Jedoch sind dafür notwendige Planungs-, Genehmigungs- und Pachtverfahren für die Nutzbarmachung und Erschließung von Flächen zeitaufwändig und anspruchsvoll. Die Identifikation und Aktivierung geeigneter Flächen entlang von Autobahnen und in Gewerbegebieten benötigt also Vorlauf und eine entsprechende politische Rahmensetzung.

## Die Integration der Ladeinfrastruktur in die Stromnetze ist die zentrale Herausforderung

Die Integration der Ladeinfrastruktur in die Stromnetze ist eine weitere zentrale Herausforderung für den Markthochlauf von Batterie-Lkw. Die bedarfsgerechte Dimensionierung und gegebenenfalls Ertüchtigung der vorgelagerten Stromnetze ist eine notwendige Voraussetzung, um die Leistungsanforderungen des elektrischen Schwerlastverkehrs zuverlässig, effizient und systemstabil erfüllen zu können. Der elektrische Schwerlastverkehr wird in der langfristigen Ausbauplanung der Netzbetreiber jedoch bisher nicht maßgeblich berücksichtigt. Hinzu kommen fortschreitende Transformationsprozesse in anderen Sektoren sowie historisch bedingt geringe Netzkapazitäten entlang von Autobahnkorridoren. Daher weisen die bestehenden Mittel- und Hochspannungsnetze bereits heute vielfach hohe Vorbelastungen und entsprechend begrenzte Netzanschlusskapazitäten auf.

Dabei brauchen die mittelfristig erforderlichen Anschlüsse an Mittel- und Hochspannungsnetze lange Planungs- und Realisierungszeiträume von teilweise 10 Jahren und mehr. Die Realisierungszeiten und Randbedingungen variieren zudem standortabhängig stark [16]. In der Ausschreibung des Lkw-Schnellladenetzes an Rastanlagen entlang der Bundesautobahnen sind die erwartbar notwendigen Netzanschlüsse bereits spezifiziert. Dies ist zwar ein wichtiger Schritt, die Bedarfsprognose gilt jedoch zunächst nur für den Zeithorizont bis 2035 und nicht darüber hinaus. Nach 2035 wird die Zahl der Batterie-Lkw jedoch weiter stark zunehmen (siehe Abbildung 2). Die bis 2035 errichtete Netzinfrastruktur dürfte daher den steigenden Anforderungen bis 2045 nicht gerecht werden.

## Was ist beim Thema Netzanschluss zu tun?

### Stromnetzausbau „vom Ende her“ denken:

Die Grundlage für die Netzausbauplanung und Dimensionierung von Stromnetzanschlüssen für Ladeparks sollte auf dem Zielzustand der Elektrifizierung des Verkehrssektors fußen, um teure und verzögernde Zwischenschritte im Netzausbau zu vermeiden. Aktuell müssen Netzbetreiber bedarfsorientiert und effizient ausbauen. Investitionen in neue Netzkapazitäten dürfen in der Regel erst bei qualifizierten Netzanschlussgesuchen erfolgen. Diese Regelung soll zwar wirtschaftliche Effizienz sichern und Überdimensionierungen vermeiden, sie erschwert jedoch zugleich einen vorausschauenden Netzausbau. Das kann ein zeitverzögernder Faktor im Hochlauf der Ladeinfrastruktur und der Bereitstellung zusätzlicher Netzanschlussleistungen werden. Um einen allein reaktiven Netzausbau zu überwinden, müssten die rechtlichen Rahmenbedingungen (etwa bzgl. der Anreizregulierung) angepasst werden.

### Beschleunigung von Netzanschlussprozessen durch Standardisierung und Transparenz:

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur wird aktuell durch langwierige und uneinheitliche Netzanschlussverfahren gehemmt. Im Zuge der Transformationen in Verkehr, Wärme und Industrie sehen sich Netzbetreiber mit zahlreichen, teils unverbindlichen Netzanschlussgesuchen konfrontiert. Das bindet personelle Ressourcen bei den Netzbetreibern, verlängert Bearbeitungszeiten und blockiert die angefragten Netzkapazitäten. Zudem erschwert die unzureichende Transparenz über verfügbare Netzkapazitäten die Standortsuche der Ladeinfrastrukturbetreiber, was zu Verzögerungen und mehrfachen Anschlussanfragen führt. Um die aufwändigen und zwischen den Netzbetreibern teilweise unterschiedlichen Antrags- und Genehmigungsprozesse zu beschleunigen, sollten diese Verfahren bundesweit standardisiert und digitalisiert werden. Digitale Kapazitätskarten, wie sie bereits in anderen europäischen Ländern verfügbar sind [21], könnten zudem die Transparenz erhöhen und die Standortwahl beschleunigen. Die Standardisierung und Digitalisierung historisch gewachsener Prozesse sind jedoch zeitaufwändig. Um den Ausbau der Ladeinfrastruktur kurzfristig zu unterstützen, sollten Anfragen für Ladeparks gebündelt, fachlich klar spezifiziert und durch Sicherheiten unterlegt werden.

### Batteriespeicher zur Entspannung der Netzanschlusssituation:

Stationäre Batteriespeicher können Autobahn-Netzanschlüsse entlasten und als Puffer die Zeit bis zur Bereitstellung leistungsfähiger Netzanschlüsse überbrücken. Aus Sicht der Verteilnetzbetreiber ist ihr Einsatz jedoch ambivalent. Betreiber der Speicher sind private Akteure. Bei privatwirtschaftlicher Optimierung über Spot und Regelleistungsmärkte entstehen zusätzliche Lastdynamiken im Verteilnetz, während ein ausschließlicher Betrieb zur Bewältigung begrenzter lokaler Anschlusskapazitäten diesen Zielkonflikt weitgehend vermeidet. Mobilitätsökonomisch gelten solche singulär betriebenen Netzpuffer derzeit jedoch meist als nicht eigenwirtschaftlich tragfähig. Dies erfordert daher flankierende Fördermaßnahmen sowie klare regulatorische Vorgaben für netzschonende Betriebsweisen von Speichern im Mobilitätskontext.

## Die bisher ausgeschriebene Ladeinfrastruktur reicht nicht für die Batterie-Lkw Flotte

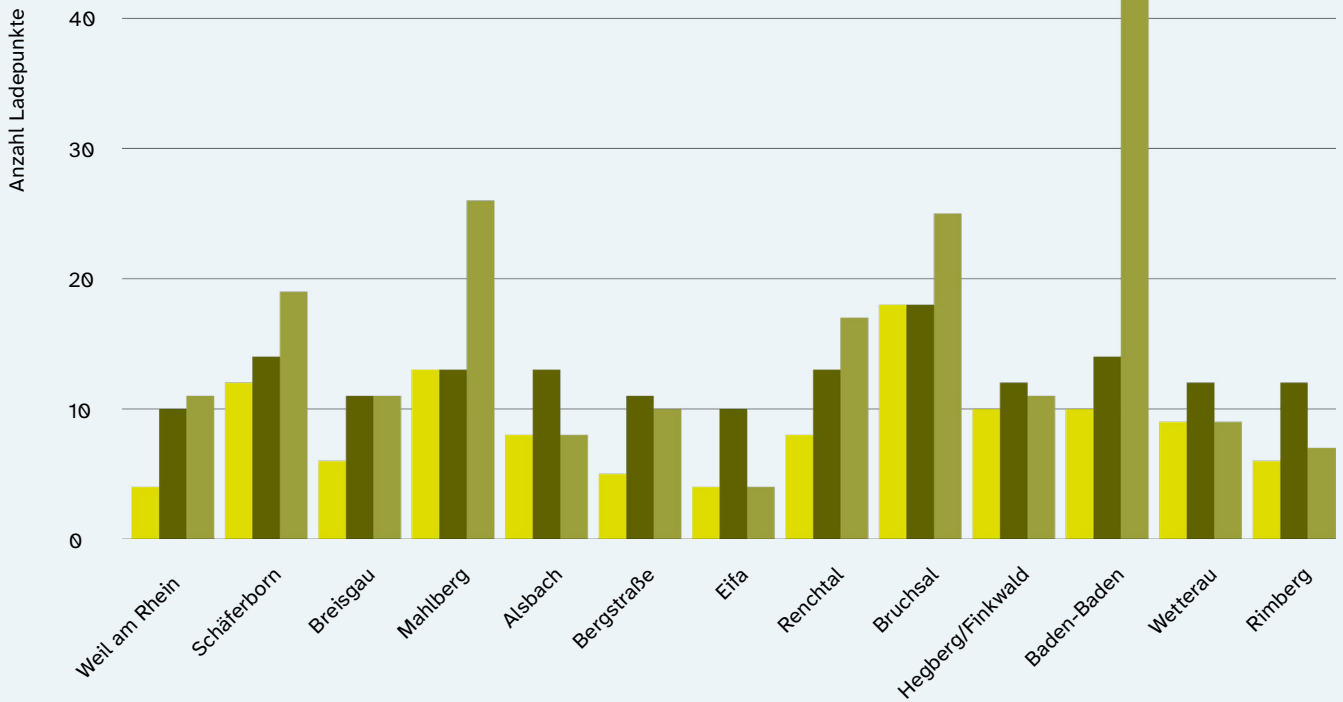
Um zu überprüfen, ob die bisher ausgeschriebene öffentliche Ladeinfrastruktur einem bedarfsgerechten Ausbau entspricht, wurden in enERSyn standortspezifische Lkw-Ankünfte, Energiebedarfe und Ladeabläufe für einen Beispielkorridor mit dem Modell InKo simuliert (siehe Seite 27). Dazu wurde ein reines Batterie-Lkw Szenario im Jahr 2035 am Beispiel der A5 betrachtet, in dem dann etwa 40 % der Schwerlast-Lkw-Flotte Batterie-Lkw sind (siehe Abbildung 2). Die Modellierung zeigt, dass 2035 die Hälfte der elektrifizierten Flotte unterwegs einen Ladevorgang benötigt. Damit müssen in Summe etwa 20 % des gesamten Schwerlastaufkommens unterwegs öffentlich geladen werden. Mit der ausgeschriebenen Ladeinfrastruktur können jedoch im Beispiel der A5 nur etwa 75 % der öffentlich ladenden Fahrzeuge tagsüber tatsächlich abgefertigt werden. Eine vollständige und zuverlässige Bedienung des Ladebedarfs erfordert zusätzliche Ladepunkte (Abbildung 6) sowie teils stärkere Netzanschlüsse über die derzeitige Planung hinaus.

Bereits bei einem Elektrifizierungsgrad von rund 40 % stoßen die bisherigen Ausbaupläne der Ladeinfrastruktur also an ihre Grenzen. Mit fortschreitender Elektrifizierung in den Jahren nach 2035 erhöht sich der Lade- und Infrastrukturbedarf weiter, sodass ein strukturelles Defizit entstehen kann. Überträgt man diese für die A5 ermittelten Infrastrukturrestriktionen auf den Gesamtbestand an Batterie-Lkw, ergibt sich ein potenziell deutlich gebremster Markthochlauf, wie in Abbildung 7 dargestellt.

Neben der reinen Zahl der Ladepunkte gibt es zusätzlich noch Risiken bezüglich der Marktreife und flächendeckenden Verfügbarkeit von Megawattladen sowie das Risiko, dass die bislang öffentlich ausgeschriebene Ladeinfrastruktur bis 2035 nicht vollständig realisiert wird. Zusätzlich sind auch die Deckung eines signifikanten Anteils des Energiebedarfs durch Nacht- und Depotladen und ein möglichst paralleler Ausbau der Infrastruktur in den Nachbarländern notwendig.

Zusätzlich zu dem von der Bundesregierung koordinierten initialen Ladenetz bestehen auf einigen Strecken bereits privatwirtschaftliche Planungen einzelner Konzerne oder Zusammenschlüsse zum Aufbau eines Netzes von Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw in Deutschland und Europa [12]. Dass es sich beim elektrischen Lkw-Verkehr um einen potenziell lukrativen Markt handelt (siehe den Kostenvorteil ggü. Diesel-Lkw in Abbildung 3), spricht für starke privatwirtschaftliche Aktivitäten. Auch diese sind allerdings im Zweifel auf Netzausbaumaßnahmen und die Verfügbarkeit geeigneter Betriebsflächen angewiesen. Ob sie die Lücke füllen können, ist aktuell noch unklar.

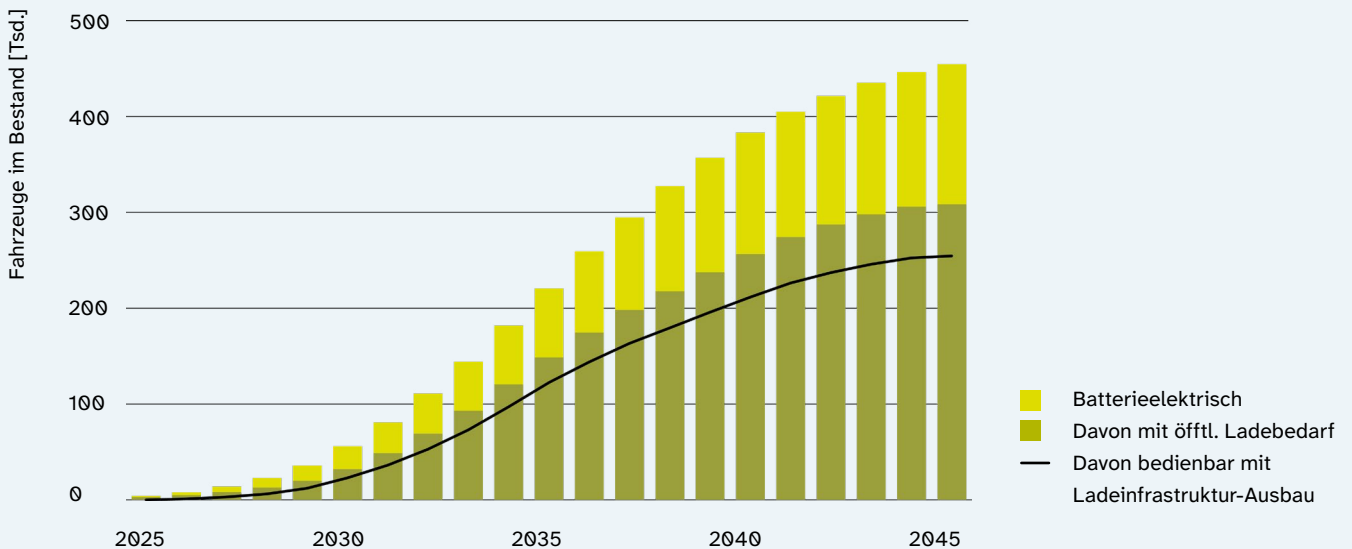
**Fazit:** Der großflächige Technologiehochlauf der Batterie-Lkw stößt hinsichtlich der Integration der Ladeinfrastruktur in den Straßenraum und die Energienetze auf Herausforderungen. Dies ist eines der zentralen Risiken für den Markthochlauf. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob andere Technologien den Markthochlauf von Batterie-Lkw sinnvoll ergänzen können, um die Defossilisierung im Straßengüterverkehr zu beschleunigen.



**Abbildung 6:** Vergleich geplanter und erforderlicher Ladepunkte<sup>10</sup> entlang der A5 für ein reines Batterie-Lkw-Szenario im Jahr 2035

- CCS/MCS geplant (≥400 kW)
- CCS/MCS erforderlich (≥400 kW)
- NCS geplant (≥150 kW)

<sup>10</sup> CCS = Combined Charging System, MCS = Megawatt Charging System, NCS = Night Charging System



**Abbildung 7:** Ladebedarf und infrastrukturelle Restriktionen für Batterie-Last- und Sattelzüge im reinen Batterie-Lkw-Szenario

# Welche Technologien könnten ergänzen?

## Bei einer rein batterieelektrischen Antriebswende kann es zu Verzögerungen kommen

Batterieelektrische Lkw sind auf dem Vormarsch und können sich unter den aktuellen Rahmenbedingungen voraussichtlich auch ohne harte Vorgaben am Markt durchsetzen. Verschiedene Risikofaktoren könnten aber dazu führen, dass sich die Umstellung der Flotte auf Batterie-Lkw deutlich verzögert. Das zentrale Risiko ist hier der Ausbau der Ladeinfrastruktur inklusive der benötigten Netzanschlüsse (siehe Seite 10). Zusätzlich entsteht durch Batterie-Lkw ein wachsender Bedarf an kritischen Rohstoffen, die limitierte Reichweite kann Anpassungen im Betriebsablauf notwendig machen und die hohen

Anschaffungskosten müssen durch niedrigere Energiekosten ausgeglichen werden (siehe Seite 6). Darüber hinaus muss auch die Integration der zusätzlichen Stromnachfrage in das Energiesystem gelingen (siehe Seite 22).

Es stellt sich daher die Frage, inwiefern andere technologische Optionen die Herausforderungen umgehen und damit die Antriebswende beschleunigen können. Im Projekt enERSyn wurden konkret direkt-elektrische Batteriewechselsysteme und dynamisches Laden sowie die Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie als mögliche Ergänzungstechnologien zum stationär geladenen Batterieantrieb in den Blick genommen. Ziel war es abzuschätzen, welchen Beitrag sie jeweils zur Vermeidung der Risiken einer rein batteriebasierten Antriebswende leisten könnten.



### Batteriewechselsystem (BWS):

Ein BWS basiert auf dem Einsatz standardisierter Wechselbatterien in Batterie-Lkw, die an öffentlichen Batteriewechselstationen automatisch innerhalb weniger Minuten ausgetauscht werden können. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit des stationären Ladens im Depot. Für die Modellierung in enERSyn wurde eine einheitliche Kapazität der Wechselbatterien von 500 kWh angenommen.



### Dynamisches Laden (Electric Road Systems = ERS):

Bei elektrischen Straßensystemen beziehen Batterie-Lkw Strom während der Fahrt, z.B. an einer Oberleitung (O-Lkw). Es besteht zusätzlich die Möglichkeit des stationären Ladens im Depot. Die Batterien können deutlich kleiner dimensioniert werden als bei Batterie-Lkw in Kombination mit stationärer Ladung, da sie lediglich für die Vor- und Nachlaufstrecken zum ERS-Netz ausgelegt sind.



### Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb:

Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden (BZ-Lkw), haben einen elektrischen Motor und tanken an öffentlichen H<sub>2</sub>-Tankstellen. Eine kleine Batterie nutzt Rekuperationsenergie und unterstützt bei Lastspitzen. Üblicherweise kann die Batterie allerdings nicht extern geladen werden, weshalb keine Ladeinfrastruktur im Depot benötigt wird.

## Alternative Technologien können diese Risiken nur teilweise mindern

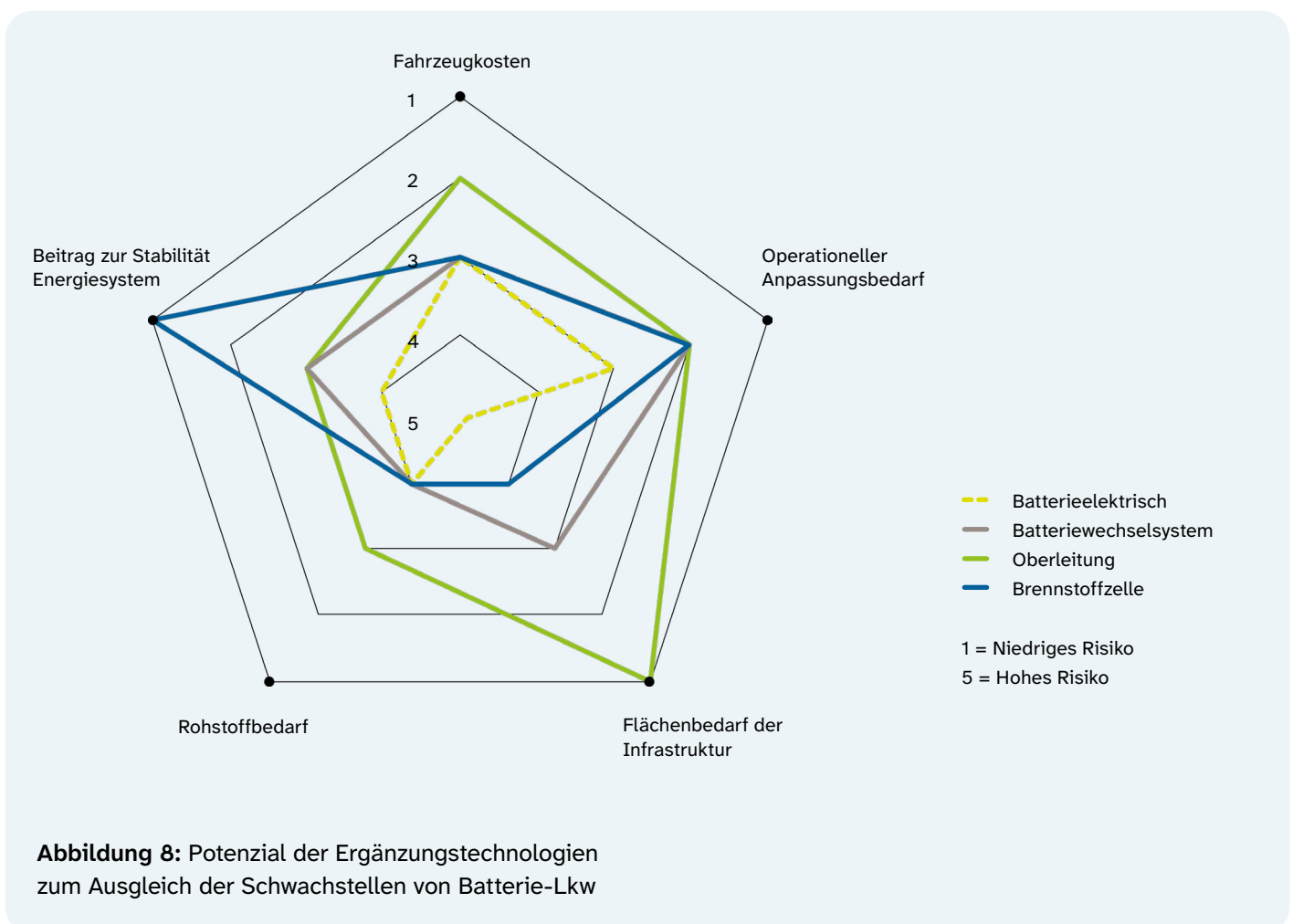
Die Ergänzungstechnologien bieten jeweils unterschiedliche Vorteile bezüglich der Risiken einer ausschließlichen Elektrifizierung mittels stationär geladener Batterie-Lkw (Abbildung 8) – keine der Technologien adressiert aber alle Schwachstellen gleichermaßen (siehe [22]):

- Batteriewechselstationen unterstützen vor allem den bedarfsgerechten Aufbau der Ladeinfrastruktur und haben zudem in gewissen Grenzen Vorteile bei der Bereitstellung von Netzanschlüssen. Mit der Technologie gibt es in Deutschland bisher aber nur wenig Erfahrung und die Standardisierung wird absehbar herausfordernd.
- Dynamisches Laden z.B. per Oberleitung bietet bezüglich der identifizierten Risiken insgesamt

die stärksten Verbesserungen, v.a. hinsichtlich der Herausforderungen beim Ladeinfrastrukturaufbau. Andererseits sind hier die größten Infrastrukturvorleistungen erforderlich, die mit langen Planungs- und Errichtungsdauern und entsprechenden Kosten verbunden sind.

- H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenfahrzeuge bieten vor allem erhöhte Flexibilität im Energiesystem und betriebliche Vorteile bei anspruchsvollen Nutzungsprofilen. Dagegen stehen deutlich höhere Energiekosten und neue Herausforderungen bei der Produktion und dem Transport von Wasserstoff.

Das Potenzial der Ergänzungstechnologien zur Absicherung der Risiken eines rein batterieelektrischen Hochlaufs wird in den nächsten Abschnitten näher analysiert. Dabei wird auch quantifiziert, inwieweit ein möglicher Engpass im Infrastrukturaufbau (siehe Abbildung 7) ausgeglichen werden kann.





# Welche Vorteile hat ein Batteriewechselsystem?

## Batteriewechselsysteme können lange Ladezeiten und hohe Ladeleistungen vermeiden

Die Technologie für ein Batteriewechselsystem basiert auf automatisch tauschbaren Wechselbatterien statt fest verbauter Batterien in Lkw. Sie wurde in Deutschland in den vergangenen Jahren vor allem im Projekt eHaul entwickelt [23]. Eine öffentliche Batteriewechselstation hält dabei im Allgemeinen mehrere Wechselbatterien vor und kann diese mit einer gewissen zeitlichen Flexibilität zwischen den Nutzungen aufladen. Batterien können aber wie bei „normalen“ Batterie-Lkw auch im Fahrzeug an herkömmlicher Ladeinfrastruktur geladen werden. Im Projekt enERSyn wurde zu BWS eine Fokusanalyse durchgeführt [24].

Anstoß für die Entwicklung von BWS war ursprünglich, lange Ladestopps zu umgehen und damit operationellen Anpassungsbedarf zu reduzieren. Bezogen auf mögliche Netzanschlussrestriktionen kommt ein weiterer Vorteil hinzu: Batteriewechselsysteme können die Aufladung der eingelagerten Traktionsbatterien gegenüber einer Aufladung im Fahrzeug prinzipiell zeitlich strecken. Daher könnten sie, wenn die verfügbare Netzanschlussleistung für stationäre Ladeinfrastruktur einen Flaschenhals darstellt, zum Schließen dieser infrastrukturellen Lücke beitragen.

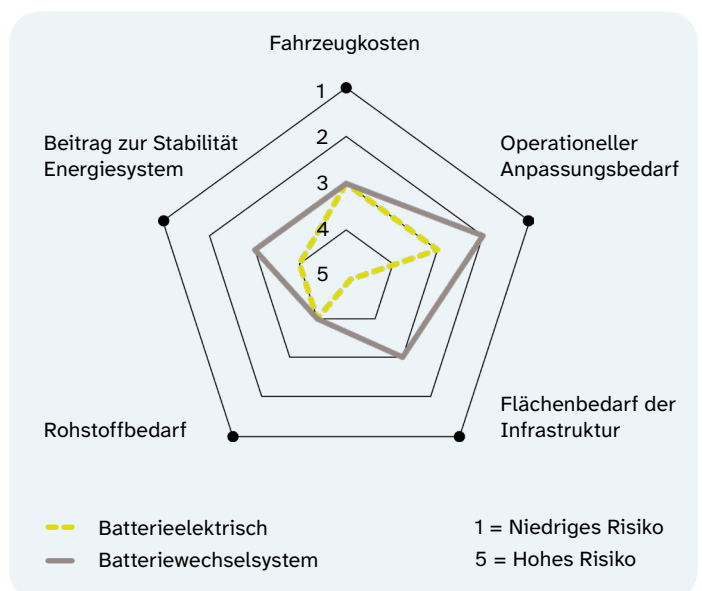
Dabei gilt: Je mehr Wechselbatterien im System, desto größer die zeitliche Flexibilität und desto geringer die auftretenden Lastspitzen. Andererseits verursachen zusätzliche Wechselbatterien Kosten. Bei der Modellierung wird angenommen, dass zu Beginn aufgrund der geringen Auslastung des Systems zwei Wechselbatterien pro Lkw notwendig sind. Mit zunehmendem Hochlauf des Systems können Skaleneffekte genutzt und die Anzahl der Wechselbatterien relativ zur Flottengröße reduziert werden<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Die Anzahl der Wechselbatterien sinkt auf 1,2 pro Fahrzeug im Jahr 2045. Die daraus resultierenden Batteriekosten werden auf die Anschaffungskosten aufgeschlagen. Die Flexibilität der Stromnachfrage wird im Modell durch einen gegenüber öffentlichem Schnellladen leicht verringerten Strompreis abgebildet. Diese Differenz beträgt im Jahr 2030 ca. 1,7 ct/kWh, im Jahr 2045 1,3 ct/kWh.

## BWS können mögliche Infrastrukturestrik-tionen weitgehend ausgleichen

Beschränkt man in der Flottenmodellierung den Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur wie in Abbildung 7 gezeigt und nimmt die Verfügbarkeit von BWS an, so ist der BWS-Anteil bei den Neuzulassungen zunächst gering, steigt über die Zeit jedoch an. Dies liegt an der Annahme einer mit zunehmendem Hochlauf sinkenden Zahl von pro Fahrzeug notwendigen Wechselbatterien und damit sinkenden Kosten. Mittelfristig können BWS so den größten Teil der durch die beschränkte Ladeinfrastruktur wegfallenden Batterie-Lkw-Neuzulassungen ersetzen. Es wird allerdings auch längerfristig keine über ein reines Batterie-Szenario hinausgehende Elektrifizierung erreicht, da BWS hinsichtlich der Systemkosten keine wesentlichen Einsparungen gegenüber einem System rein stationär geladener Batterie-Lkw versprechen.

Alternativ zu BWS wäre zur Umgehung von Netzanschlussrestriktionen auch die verstärkte Nutzung stationärer Pufferbatterien möglich. Diese konnte im Rahmen von enERSyn nicht quantitativ untersucht werden. Geprüft wurden allerdings die Auswirkungen einer Verfügbarkeit von



Batterie-Lkw mit einer erhöhten Reichweite von 1.000 km. Unter der Annahme entsprechend leistungsfähiger betrieblicher Ladeinfrastruktur (v.a. in Depots) könnte die angenommene Restriktion bei öffentlicher Ladeinfrastruktur in diesem Fall auch mit Batterie-Lkw weitgehend überwunden werden, sodass BWS dann nicht erforderlich wären.

Hinsichtlich der Systemkosten und THG-Emissionen bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen BWS-Technologie und stationär geladenen Batterie-Lkw. Die zeitliche Entwicklung von Kosten und THG-Wirkung wird hauptsächlich durch die Geschwindigkeit der Flottenelektrifizierung bestimmt. Können BWS hier zu einer Beschleunigung beitragen, indem bestimmte Hürden eines rein batterieelektrischen Hochlaufs umgangen werden (wie hier für eine denkbare Ladeinfrastruktur-Restriktion gezeigt), so beeinflusst dies beide Indikatoren positiv.

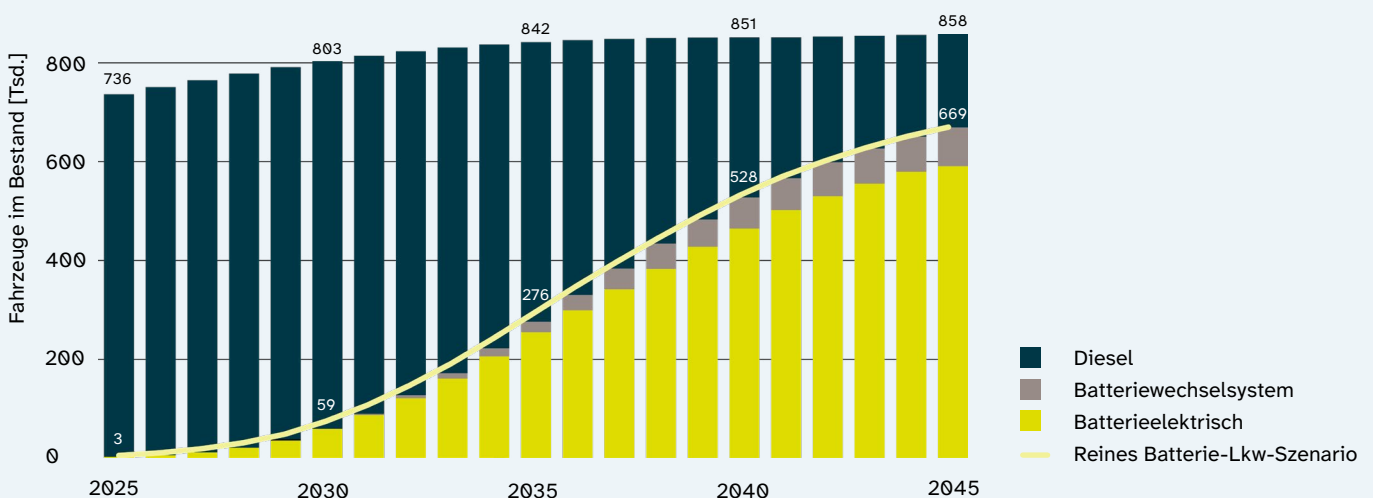
### BWS brauchen wenig zentrale Steuerung, aber starke Player im Markt

Ein wichtiger Vorteil von BWS ist, dass sie dezentral und mit geringerem Flächenbedarf aufgebaut werden können. Sie könnten dabei bereits kurzfristig von der aktuell sehr dynamischen Entwicklung im Bereich stationärer Batteriespeicher profitieren. Eine große Hürde ist allerdings das Thema

Standardisierung: Bisher haben Fahrzeughersteller wenig Interesse an einem einheitlichen Batteriesystem gezeigt.

Denkbar wäre, dass ein Hersteller vorangeht und selbst ein Netz von Batteriewechselstationen ausrollt. Da BWS-Fahrzeuge auch an herkömmlicher Ladeinfrastruktur laden können, wäre für den Start keine sehr dichte Abdeckung mit Wechselstationen erforderlich. In China werden BWS bereits in großem Maßstab eingesetzt, ein Drittel der neu zugelassenen Batterie-Lkw sind dort BWS-fähig [25]. Ein verstärkter Markteintritt chinesischer Hersteller in Europa könnte es somit wahrscheinlicher machen, dass hierzulande ein herstellereigenes BWS aufgebaut wird.

**Fazit:** BWS-Fahrzeuge haben aus Sicht der Fahrzeugbetreiber prinzipiell eine ähnliche Kostenstruktur wie Batteriefahrzeuge. Der Umgang mit den Wechselbatterien und den damit verbundenen Risiken kann dabei abhängig vom Geschäftsmodell unterschiedlich gehandhabt werden. Ein BWS kann in gewissem Umfang relevante Restriktionen eines Batterie-Lkw-Systems (Netzanschlusskapazität, Flächenbedarf) adressieren. Für einen BWS-Rollout ist aber nach heutigem Ermessen die Initiative eines großen und finanzstarken Players erforderlich, und dies in einer Situation, in der noch nicht klar ist, inwieweit sich mögliche Restriktionen eines Batterie-Lkw-Systems tatsächlich manifestieren werden.



**Abbildung 9:** Bestandsentwicklung der Lkw-Flotte mit Ladeinfrastruktur-Restriktion und BWS-Verfügbarkeit



# Welche Vorteile hat dynamisches Laden?

## Dynamisches Laden könnte zahlreiche Schwachstellen des Batterie-Lkw-Hochlaufs umgehen

Dynamisches Laden bezeichnet die Energieaufnahme während der Fahrt durch ein Oberleitungssystem, eine Stromschiene oder eine induktive Energieübertragung. Derart elektrifizierte Strecken werden auch als Electric Road Systems (ERS) bezeichnet. Die meiste Praxiserfahrung gibt es in Deutschland mit der Oberleitungstechnologie, die im Rahmen dreier Feldversuche auf Autobahnen und einer Bundesstraße bereits im Realbetrieb über mehrere Jahre getestet wurde [26]. Batterie-Lkw müssen als Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) mit einem Stromabnehmer ausgerüstet sein, um die Oberleitung nutzen zu können. Die Traktionsbatterie wird dann nur noch benötigt, um Strecken abseits des Oberleitungsnetzes zurückzulegen, und kann wie bei Batterie-Lkw auch an betrieblicher Ladeinfrastruktur geladen werden.

Wesentliche Vorteile des Systems sind die Vermeidung von Ladestopps auf dem Oberleitungsnetz und dort auch kein zusätzlicher Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur. Flächenbedarf entsteht nur am Straßenrand zur Aufstellung der Masten und Unterwerke. Dort gibt es aber zumindest bei nur abschnittsweise installierter Oberleitung wahrscheinlich keinen Engpass. Zudem können die Batterien im Fahrzeug kleiner gehalten werden, da nur Strecken außerhalb des Oberleitungsnetzes überbrückt werden müssen – das spart fahrzeugseitig Gewicht, Rohstoffe<sup>12</sup> und Kosten ein. Zusätzlich verteilt der Leistungsbedarf sich bei einem Oberleitungssystem gleichmäßiger in der Fläche, während er beim stationären Schnellladen auf einzelne Standorte konzentriert ist und dort entsprechende Netzkapazitäten erfordert.

Herausfordernd ist allerdings der relativ kostenintensive Aufbau eines Oberleitungsnetzes, der im öffentlichen Raum

12 Ein O-Sattelzug mit einer Batterie mit 150 km Reichweite abseits der Oberleitung benötigt 80 % weniger Batterierohstoffe als ein rein batterieelektrischer Sattelzug mit 700 km Reichweite.

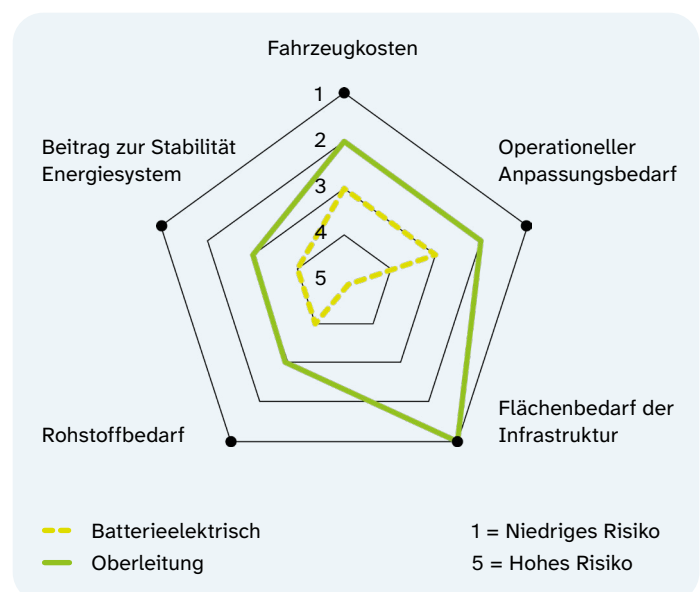
erfolgen muss und eine zentrale Koordination benötigt. Zudem hängt die Eignung eines bestimmten Einsatzprofils für O-Lkw stark vom Ausbauzustand des Oberleitungsnetzes ab.

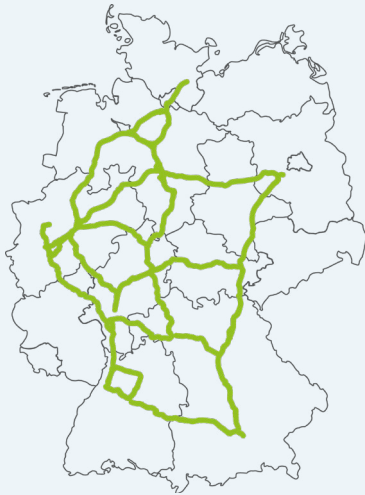
## In einem nationalen Netz bleibt das Potenzial von O-Lkw begrenzt

Für die quantitative Potenzialbetrachtung wird der sukzessive Aufbau eines Oberleitungsnetzes bis auf eine Gesamtlänge von etwa 3.000 km im Jahr 2035 angenommen (siehe Abbildung 10). Die Investitionskosten dafür liegen im Bereich von mindestens 5 Mrd. €. Haben die O-Lkw-Batterien eine Reichweite von bis zu 300 km, kann damit theoretisch etwa 24 % der innerhalb Deutschlands anfallenden Lkw-Fahrleistung durch O-Lkw erbracht werden<sup>13</sup>. Wird in den europäischen Nachbarländern keine analoge Infrastruktur aufgebaut, bleibt dies auch das maximale Potenzial für O-Lkw.

Bleibt der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur begrenzt, wie in Abbildung 7 gezeigt, werden O-Lkw in gewissem Umfang wirtschaftlich, allerdings erst nach

13 Dieses Potenzial bezieht sich auf das techno-ökonomische Potenzial von O-Lkw gegenüber Diesel-Lkw ohne Berücksichtigung von Batterie-Lkw in der Flotte.





**Abbildung 10:** Angenommenes Oberleitungsnetz im Zielzustand 2035

weitgehend erfolgtem Aufbau des angenommenen Oberleitungsnetzes. Sie können aber die durch die begrenzte Ladeinfrastruktur reduzierte Menge an Batterie-Lkw nur zum Teil ausgleichen. Grund ist hier hauptsächlich die Potenzialrestriktion durch die Netzausdehnung. Bleibt das Netz auf Deutschland beschränkt sind O-Lkw zudem bei den meisten internationalen Relationen ausgeschlossen.

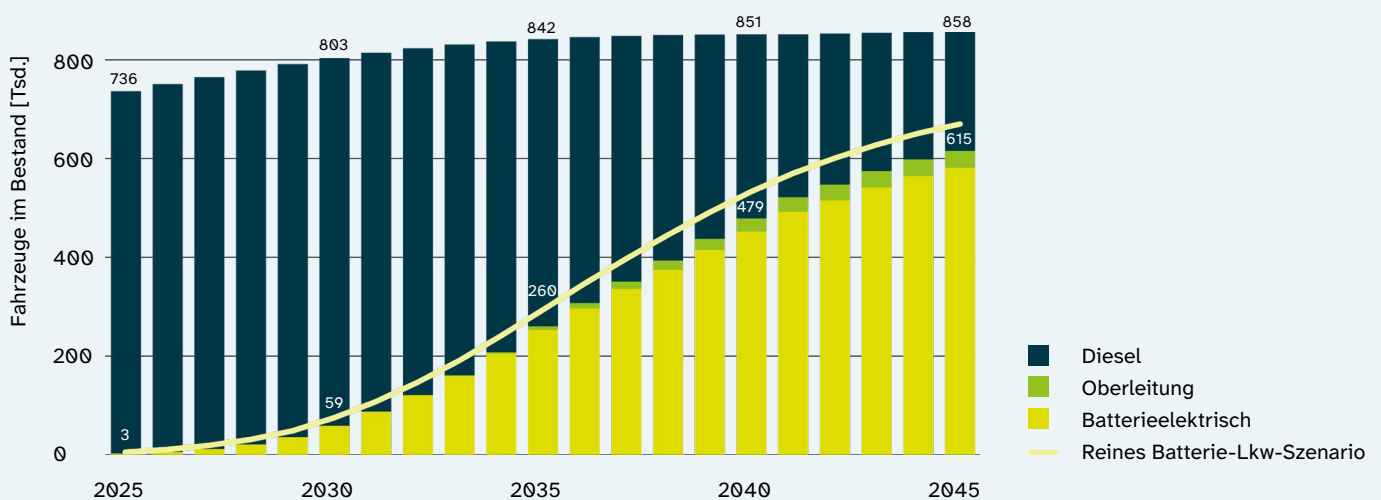
### Die Infrastrukturkosten müssen von der Allgemeinheit getragen werden

Die Oberleitungstechnologie erfordert im Vergleich zu anderen Technologien besonders hohe initiale Investitionen durch den Netzaufbau. Werden diese Kosten in

irgendeiner Form auf die nutzenden O-Lkw umgelegt, ist die Technologie gegenüber Batterie-Lkw unter den hier getroffenen Annahmen nicht konkurrenzfähig. Anders sähe dies aus, wenn auch in den Nachbarländern Oberleitungsnetze errichtet würden, so dass internationale Relationen mit hoher Fahrleistung in größerem Maßstab die Oberleitung nutzen könnten.

**Fazit:** O-Lkw können bei gegebener Infrastruktur auf dafür geeigneten Strecken sehr kostengünstig betrieben werden. Selbst bei ambitioniertem Infrastrukturausbau kommen O-Lkw allerdings nur für einen vergleichsweise kleinen Teil der Lkw-Fahrleistung infrage, wenn der Netzausbau allein in Deutschland erfolgt. Die Technologie ist auf eine perspektivisch starke Flottendurchdringung angewiesen, um die hohen Infrastrukturkosten einzuspielen. Dafür wäre ein Oberleitungsausbau über die deutschen Grenzen hinaus erforderlich.

Wenn der Staat entscheidet, gemeinsam mit Nachbarstaaten in den Aufbau eines Oberleitungsnetzes zu investieren, so könnte die Technologie prinzipiell für einen großen Teil des Lkw-Verkehrs attraktiv sein. Dann würde es sich aber weniger um eine Ergänzungstechnologie zum Ausgleich von Restriktionen bei Batterie-Lkw handeln, sondern eher um eine gleichwertige Ergänzungstechnologie für die öffentliche stationäre Schnellladeinfrastruktur (insbesondere MCS), die dann ihrerseits eine zentrale Rolle bei der Antriebswende übernehmen würde. Momentan ist eine solche Entwicklung nicht absehbar.



**Abbildung 11:** Bestandsentwicklung der Lkw-Flotte mit Ladeinfrastruktur-Restriktion und Oberleitungsnetz



# Welche Vorteile hat Wasserstoff?

## Brennstoffzellen-Lkw haben operationelle und energiesystemische Vorteile

Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw) sind im Vergleich zu BWS und O-Lkw diejenige Ergänzungstechnologie, bei der der Markt in Deutschland und Europa bisher am weitesten entwickelt ist. Es sind Fahrzeugmodelle in verschiedenen Größenklassen erhältlich und es existieren in Deutschland etwa 50 Tankstellen, die H<sub>2</sub> mit dem für Lkw erforderlichen Druck von 350 bar anbieten. Gegenüber Batterie-Lkw sind sie in der Flotte quantitativ aber derzeit nicht relevant und auch das Fahrzeugangebot ist deutlich kleiner [11].

BZ-Lkw haben typischerweise Reichweiten von bis zu 800 km und damit mehr als die derzeit reichweitenstärksten serienmäßig verfügbaren Batterie-Lkw. In Kombination mit einer gegenüber Schnellladung von Batterie-Lkw etwas kürzeren Betankungszeit von 20-30 Minuten könnten sie in anspruchsvollen Einsatzprofilen operationellen Anpassungsbedarf vermeiden, der sich bei Batterie-Lkw ergeben würde. Während die anderen betrachteten Technologien ihre Energie aus dem Stromnetz beziehen (und damit prinzipiell Netzrestriktionen unterworfen sein können), wird der Wasserstoff mit einer eigenen Infrastruktur verteilt. Dies erfolgt bei geringem Bedarf durch Anlieferung per Lkw, bei höherem Bedarf ist auch ein eigenes Pipelinenetz denkbar. Da H<sub>2</sub>-Erzeugung und -vertankung zeitlich nicht gekoppelt sind, bestehen hier mehr Freiheitsgrade zur Stabilisierung des Energiesystems.

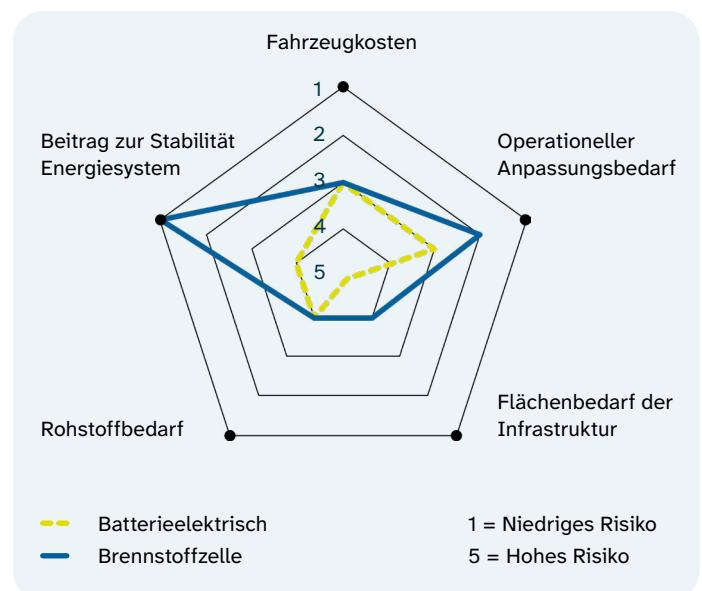
## Die Wirtschaftlichkeit spricht gegen Brennstoffzellen-Lkw

Herausforderungen bestehen vor allem bei der Wirtschaftlichkeit, da sowohl die Anschaffungskosten des Fahrzeugs als auch die Energiekosten signifikant höher sind als bei Batterie-Lkw und es unsicher ist, ob grüner Wasserstoff in

den kommenden Jahren tatsächlich die erhoffte Kostendegression zeigt. Angesichts der zuletzt starken Marktentwicklung bei Batteriefahrzeugen und eines schwierigen wirtschaftlichen Umfelds haben mehrere Hersteller den Start strategisch wichtiger BZ-Lkw-Modelle entweder deutlich verschoben oder vorerst ganz abgesagt. Es ist daher mit einer gegenüber Batteriefahrzeugen deutlich verzögerten Degression bei den Fahrzeugkosten zu rechnen. Ein Unsicherheitsfaktor aus Betreibersicht ist die zukünftige Entwicklung der Erlöse aus dem THG-Quotenhandel [8].

Für die Modellierung der BZ-Lkw wird vereinfachend eine für alle Einsatzfälle hinreichende Reichweite bzw. ein ausreichendes Angebot an H<sub>2</sub>-Tankstellen unterstellt<sup>14</sup>. Werden BZ-Lkw in einem Flottenszenario mit eingeschränkter Ladeinfrastruktur-Verfügbarkeit zugelassen, ist dennoch erst ab 2035 ein merklicher Hochlauf zu beobachten. Dann werden BZ-Lkw aufgrund gesunkener

14 Die europäische Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) macht hier auch bereits entsprechende Vorgaben.



Fahrzeugpreise gegenüber Diesel-Lkw konkurrenzfähig und können einen Teil der anspruchsvollen Einsatzprofile wirtschaftlicher bedienen, die aufgrund eingeschränkter Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw nicht möglich sind. Vor allem bei den Sattelzugmaschinen mit häufig sehr hohen Tagesfahrweiten und vergleichsweise hohem öffentlichem Ladebedarf kommen dann verstärkt BZ-Lkw in die Flotte. In diesem Segment können sie die infrastrukturellen Einschränkungen bei Batterie-Lkw bis zum Ende des Betrachtungszeitraums weitgehend kompensieren. Auf die gesamte Flotte betrachtet kann die Lücke aber nur zum Teil geschlossen werden, da die höheren Fahrzeug- und Energiekosten von BZ-Lkw zu geringeren Neuzulassungsanteilen führen.

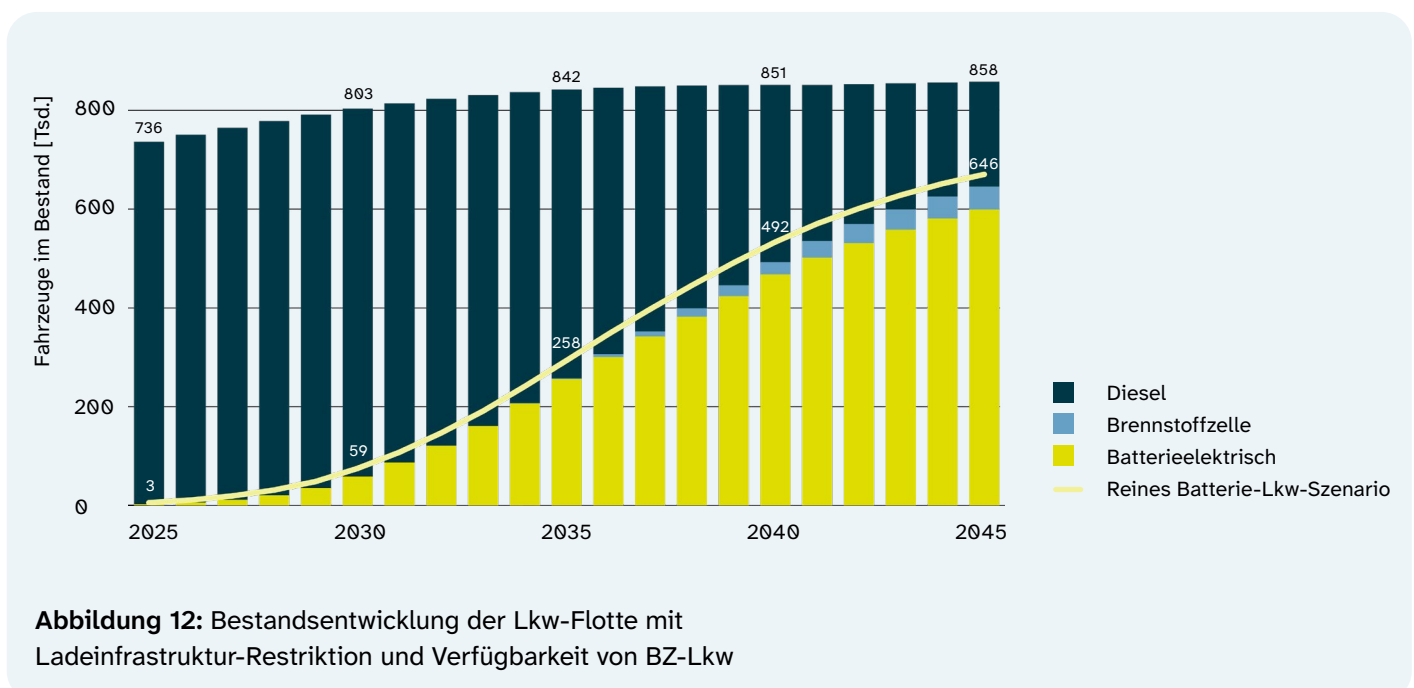
### Brennstoffzellen-Lkw können sich nur bei harten Restriktionen für Batterie-Lkw durchsetzen

Die Bedeutung von BZ-Lkw wird meist mit ihrer hohen Reichweite begründet. Die voraussichtlichen Mehrkosten von BZ-Lkw gegenüber Batterie-Lkw aus Betreibersicht sind jedoch erheblich (bei Sattelzügen 27 % in 2035, 22 % in 2040). Es stellt sich somit die Frage, ob BZ-Lkw trotzdem dort in die Flotte kommen, wo Batterie-Lkw nur mit verlängerten Ladepausen fahren können (siehe Seite 6). Die Flottenmodellierung (ohne Ladeinfrastruktur-Restriktion) zeigt hier aber, dass die Zeitkosten durch die Verzögerung geringer sind als die Mehrkosten von BZ-Lkw. Diese kommen also trotz höherer Reichweite

nur dann in die Flotte, wenn es bei der Anpassung harte Begrenzungen gibt (d.h. ungewöhnlich hohe Zeitkosten für Verzögerungen). Solche harten operationellen Begrenzungen haben dann eine ähnliche Wirkung wie Restriktionen bei der Ladeinfrastruktur.

Aus einer systemischen Perspektive sind die Mehrkosten für einen geringen Anteil an BZ-Lkw in der Flotte aber überschaubar (ca. 1 Mrd. € in 2035, 1,5 Mrd. € in 2040 im Vergleich zum reinen Batterie-Lkw-Szenario). Allerdings ist durch BZ-Lkw angesichts unklarer künftiger Bezugsmöglichkeiten für grünen Wasserstoff auch kein eindeutiger Vorteil in der Klimabilanz gegenüber Diesel-Lkw garantiert. Sollten BZ-Lkw weiterhin überwiegend mit H<sub>2</sub> aus Erdgasdampfpreformierung betrieben werden, so haben sie über den Lebensweg nur eine vergleichbare Klimabilanz wie Diesel-Lkw [13].

**Fazit:** Verglichen mit den anderen betrachteten Ergänzungstechnologien sind bei BZ-Lkw bereits heute viele Voraussetzungen für ihren Einsatz jenseits einer Testumgebung gegeben (Fahrzeugverfügbarkeit, initiale Infrastruktur). Gleichzeitig zeigt die Modellierung, dass BZ-Lkw aus wirtschaftlicher Sicht auf absehbare Zeit klare Nachteile gegenüber Batterie-Lkw haben werden (sofern sich aus der THG-Quote nicht erhebliche Verzerrungen ergeben), weshalb sie voraussichtlich nur im Falle harter operationeller und infrastruktureller Restriktionen für Batterie-Lkw in größerem Maßstab zum Einsatz kommen werden.



# Wie passt das alles zum Energiesystem?

---

## Die Defossilisierung des Schwerlastverkehrs wirkt sich auf das Energiesystem aus

Alle diskutierten Optionen für die Antriebswende bei Lkw wirken sich auf das Energiesystem aus. Dies geht über die oben bereits diskutierte Netzanschluss-thematik hinaus. Insbesondere muss die zusätzliche Stromnachfrage der Lkw gedeckt werden. Dies erfordert einen entsprechenden Zubau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten sowie die Nutzung verschiedener Flexibilitätsoptionen, um die zeitlichen Profile der fluktuierenden Stromerzeugung und der Lkw-Stromnachfrage in Einklang zu bringen. Der konkrete Bedarf für neue Wind- und Solaranlagen sowie ggf. zusätzliche Energiespeicher hängt dabei nicht nur von der Technologiewahl, sondern unter anderem auch von der gewählten Lade-strategie ab.

## Die Modellanalyse für 2030 zeigt Vorteil direkt-elektrischer Antriebe

Mit einem kostenminimierenden Kraftwerkseinsatz- und Investitionsmodell (DIETER) (siehe Seite 27) wurden die Energiesystemwirkungen verschiedener Optionen für den deutschen Schwerlastverkehr in hypothetischen Szenarien für das Jahr 2030 untersucht [27]. Demnach sind die gesamten Systemkosten der direkt-elektrischen Batterie-Lkw mit stationärem oder dynamischem Laden deutlich geringer, als wenn Wasserstoff-Brennstoffzellen oder auf Wasserstoff basierende E-Fuels genutzt werden (Abbildung 13). Wasserstoff und E-Fuels können im Vergleich zu elektrischem Strom zwar relativ günstig gespeichert werden, was aus Systemsicht vorteilhaft ist; dieser Vorteil wird jedoch deutlich überwogen durch ihre Nachteile bei der Energieeffizienz.

Innerhalb der direkt-elektrischen Alternativen gibt es keine großen Kostenunterschiede zwischen stationärem

und dynamischem Laden. Einen größeren Unterschied macht die Lade-strategie: Flexibel geladene Batterie-Lkw können deutlich günstiger in das Stromsystem integriert werden als solche mit einer weitgehend unflexiblen Lade-strategie. Dies liegt daran, dass flexibles Laden zu einer deutlich günstigeren Systemintegration der fluktuierenden Solar- und Windenergie führt. Noch günstiger würde es, wenn die im Depot stehenden Batterie-Lkw auch noch in das Stromnetz zurückspeisen könnten (Vehicle-to-Grid, V2G). Allerdings führen Batterie-Lkw selbst bei einer relativ unflexiblen Lade-strategie noch zu deutlich geringeren Energiesystemkosten als die Nutzung von Wasserstoff. Eine wesentliche Annahme dabei ist, dass der Wasserstoff aus heimischer Elektrolyse erzeugt und nicht günstig aus dem Ausland importiert werden kann.

Zusätzliche Modellrechnungen zeigen, dass Batterie-wechselsysteme keine wesentlich anderen Energiesystem-effekte haben als stationär oder dynamisch geladene Lkw. Aus einzelwirtschaftlicher Sicht könnte zudem eine teilweise PV-Eigenerzeugung des im Depot geladenen Stroms die Betriebskosten senken. Auf die Energiesystemkosten dürfte dies jedoch keinen großen Effekt haben.

## Langfristig eher kleine Rolle des elektrifizierten Straßengüterverkehrs im Energiesystem

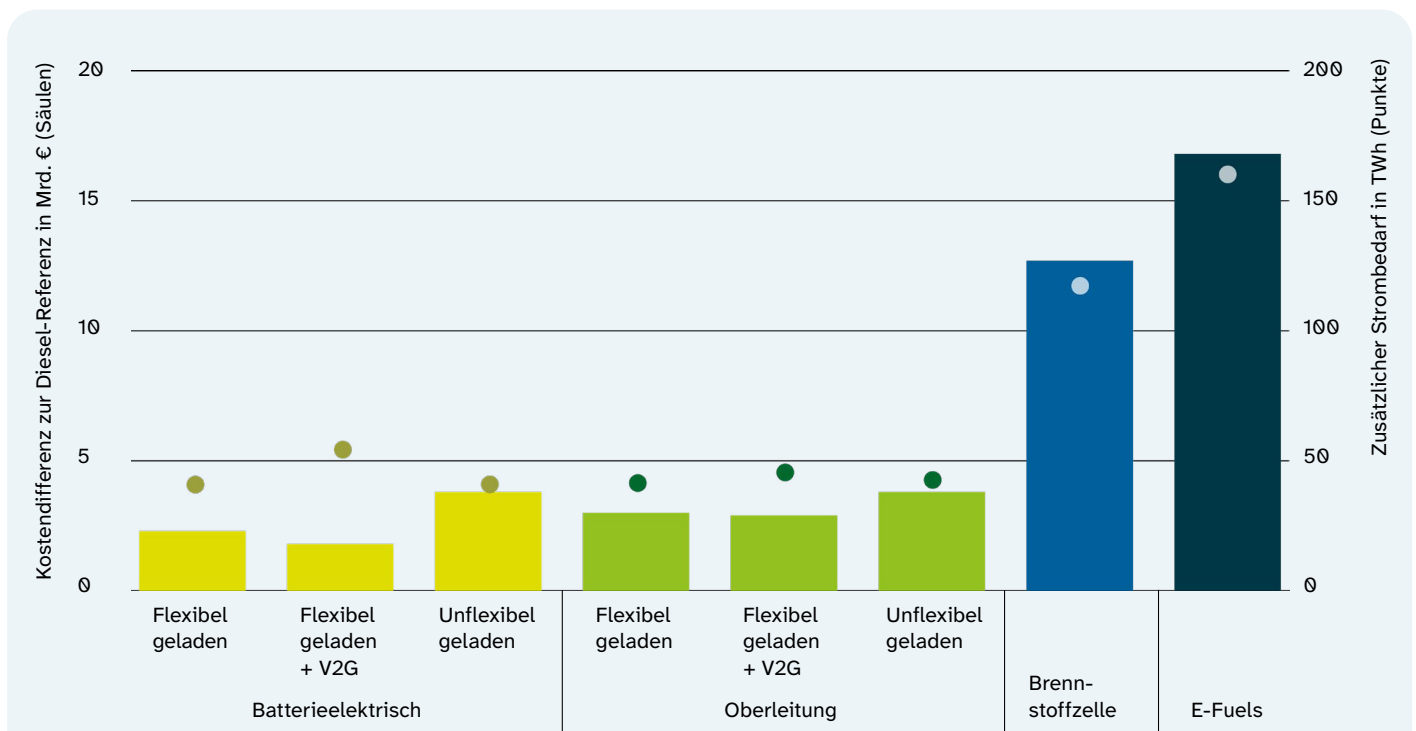
Um das deutsche Energiesystem klimaneutral zu machen, sollen die Wind- und Solarenergie weiterhin stark ausgebaut und die Nutzung von erneuerbarem Strom in allen Sektoren deutlich vorangetrieben werden. Entsprechend steigen sowohl die erneuerbare Stromerzeugung als auch die gesamte Stromnachfrage langfristig gegenüber dem modellierten 2030-Szenario noch einmal deutlich an. Zur Integration dieser sehr großen erneuerbaren Strommengen muss die Flexibilität im Gesamtsystem

generell deutlich steigen, sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite sowie durch zusätzliche Energiespeicher. In einem langfristigen, klimaneutralen Energiesystem dürfte die Rolle des elektrifizierten Straßengüterverkehrs daher deutlich kleiner sein als für das 2030-Szenario modelliert.

Beispielsweise würde der gesamte Straßengüterverkehr, inklusive des Transitverkehrs, im Fall einer vollständigen Batterie-Elektrifizierung im Jahr 2045 nur rund sechs Prozent der Stromnachfrage ausmachen, die im Elektrifizierungs-Szenario der Langfristszenarien des Bundeswirtschaftsministeriums angenommen werden [28]. Damit würde er deutlich unter dem angenommenen Stromverbrauch von Elektro-Pkw sowie von Wärmepumpen liegen. Auch für die Erzeugung von grünem Wasserstoff wird in den Langfristszenarien deutlich mehr Strom benötigt. Gleichzeitig müssen diese anderen Verbraucher sowie Energiespeicher und Stromnetze ohnehin so viel Flexibilität für das Energiesystem bereitstellen, dass die Integration des Straßengüterverkehrs keine besondere Herausforderung mehr darstellen sollte.

Auch in Hinblick auf den Umgang mit sehr seltenen, aber potenziell schwerwiegenden »Dunkelflauten« dürfte der elektrifizierte Straßengüterverkehr kein wesentlicher Faktor in einem klimaneutralen, erneuerbaren, europäischen Energiesystem sein. Einer aktuellen Analyse zufolge würde in einem vollständig erneuerbaren europäischen Stromverbund für die komplette Überbrückung der größten in über dreißig Wetterjahren auftretenden Dunkelflaute eine Langfrist-Stromspeicherkapazität in Höhe von knapp acht Prozent der Jahresstromnachfrage benötigt [29]. Für Deutschland entspricht dies rund 100 TWh. An diesem Speicherbedarf hätte der Schwerlastverkehr wiederum nur den seiner Stromnachfrage entsprechenden Anteil von rund sechs Prozent.

**Fazit:** Sowohl die erforderlichen Strommengen als auch der Flexibilitätsbedarf eines komplett Batterie-elektrifizierten Straßengüterverkehrs erscheinen im künftigen erneuerbaren Energiesystem gut darstellbar.



**Abbildung 13:** Energiesystemkosten und Strombedarf verschiedener Optionen (eigene Darstellung nach [27])

# Und wie kann es nun weitergehen?



Batterie-Lkw werden sehr wahrscheinlich die zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung des Lkw-Verkehrs spielen. Durch die gegenüber Dieselfahrzeugen verringerte Reichweite von Batterie-Lkw sind nur wenige Einschränkungen zu erwarten, die wirtschaftlich (Zeitkosten) kaum ins Gewicht fallen und mit weiter zunehmenden Reichweiten immer unbedeutender werden. Voraussetzung dafür ist jedoch eine hinreichend leistungsfähige Ladeinfrastruktur.

Selbst bei Restriktionen in der Ladeinfrastruktur (z.B. durch Verfügbarkeit von Netzanschlusskapazität und Flächenbedarf) werden Batterie-Lkw eine Schlüsselposition einnehmen. Solche Restriktionen können jedoch, ggf. in Kombination mit weiteren Herausforderungen, den Markthochlauf von Batterie-Lkw spürbar ausbremsen. Es besteht damit die Gefahr deutlich erhöhter THG-Emissionen und Betriebskosten auf dem Weg zur Klimaneutralität im Straßengüterverkehr.

Batteriewechselsysteme, dynamisches Laden und der H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenantrieb können jeweils einige Herausforderungen für Batterie-Lkw adressieren und bilden daher potenzielle Ergänzungstechnologien. Keine dieser Technologien kann jedoch alle potenziellen Restriktionen beim Hochlauf von Batterie-Lkw kurzfristig umgehen.

Die Unterschiede zwischen den potenziellen Ergänzungstechnologien in puncto Kosten und THG-Emissionen sind tendenziell gering. Bei H<sub>2</sub>-BZ-Lkw bestehen hier allerdings größere Unsicherheiten. Solange ein Großteil der Elektrifizierung mit Batterie-Lkw stattfindet, spielen die Ergänzungstechnologien bei Kosten und THG-Emissionen bezogen auf das Gesamtsystem Straßengüterverkehr nur eine untergeordnete Rolle.

Dies gilt weitgehend auch für die Energiesystemwirkungen aller betrachteter Technologien. Der Bedarf an erneuerbarem Strom ist für H<sub>2</sub>-BZ-Lkw pro km jedoch zwei- bis dreimal so hoch, was bei größerem Fahrzeugbestand zusätzliche Herausforderungen mit sich bringt. Langfristig ist aber der elektrifizierte Schwerlastverkehr insgesamt kein wesentlicher Faktor in einem erneuerbaren, sektorgekoppelten und klimaneutralen Energiesystem.

Entscheidend ist vor allem, inwiefern die Ergänzungstechnologien den Übergang zu einem defossilisierten Straßengüterverkehr tatsächlich beschleunigen bzw. absichern können. Hierzu sind je nach Technologie unterschiedliche Hürden zu adressieren.



## Batteriewechselsysteme (BWS)

- Ein BWS kann stationäres Laden von Batterie-Lkw punktuell ergänzen und hierbei leichte Verbesserungen bei einigen Schwachstellen des stationären Ladens bringen.
- Voraussetzung dafür ist entweder eine herstellerübergreifende Standardisierung von Wechselbatterien und der Schnittstelle Batteriesystem-Fahrzeug (aus heutiger Sicht unwahrscheinlich) oder der Aufbau eines BWS mit begleitendem Roll-out kompatibler Fahrzeuge durch einen starken Marktakteur. Hier kämen insbesondere Akteure aus China infrage, wo BWS bereits in größerem Maßstab in Betrieb sind.
- Die Politik könnte Rahmenbedingungen zur Standardisierung schaffen und ggf. punktuelle Marktaktivierung betreiben. Die Technologie könnte dann marktgetrieben in die Flotte kommen.



## Dynamisches Laden via Oberleitung

- Dynamisches Laden geht gegenüber stationärem Laden mit deutlich reduziertem Flächenbedarf einher und bringt zudem gewisse operationelle Vorteile (keine Standzeit fürs Laden). Die kleineren Traktionsbatterien der Fahrzeuge sparen Anschaffungskosten und Rohstoffe ein.
- Die Technologie entfaltet jedoch erst bei einer großen und europäischen Ausdehnung des Oberleitungsnetzes für die vordringlich zu adressierenden Anwendungsfälle hinreichenden Nutzen. Der Aufbau einer solchen Infrastruktur hat einen erheblichen zeitlichen Vorlauf, geht mit hohen Investitionsbedarfen einher und macht klare politische Entscheidungen notwendig (Top-Down-Technologie).
- Ein Rückgriff auf diese Technologie zur Lösung kurz- bis mittelfristiger Friktionen im Hochlauf eines Batterie-Lkw-Systems erscheint somit wenig plausibel. Sollten sich allerdings langfristig systematische Grenzen einer Batterie-Lkw-basierten Elektrifizierung abzeichnen, so könnte dynamisches Laden als eine Art „Reservetechnologie“ ins Spiel kommen.
- Um diese Option offen zu halten, könnte die Technologie z.B. durch Ausrüstung eines leistungsfähigen Korridors mit Punkt-zu-Punkt-Verkehren weiter qualifiziert werden.



## H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle

- Bei dieser Technologie sind, im Gegensatz zu den anderen potenziellen Ergänzungstechnologien, in Deutschland bereits erste Fahrzeuge und Infrastruktur verfügbar.
- Andererseits bestehen hier bei der Wirtschaftlichkeit auch langfristig die größten Fragezeichen (hauptsächlich bedingt durch die geringe Energieeffizienz).
- Bezüglich der hauptsächlichlichen Motivation für die Antriebswende (Klimaschutz) ist die Technologie zudem kein Selbstläufer: Ist keine hinreichende Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs sichergestellt, so sind sowohl wirtschaftlicher als auch klimapolitischer Nutzen gegenüber dem herkömmlichen Dieselantrieb fraglich.
- Die Neudefinition von BZ-Lkw als potenzielle Ergänzungstechnologie für Batterie-Lkw in bestimmten Anwendungsfällen (und nicht als Alternative dazu) könnte Klarheit für Anwender schaffen und den Boden für sinnvolle, konditionierte Förderregime bereiten.

Jenseits der vorgenannten Ergänzungstechnologien sind weitere in Entwicklung, beispielsweise E-Trailer und Antriebe mit H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor. Diese sollten ebenfalls hinsichtlich ihres Potenzials im Blick behalten werden.

Der Vorsprung von Batterie-Lkw gegenüber allen Ergänzungstechnologien (auch BZ-Lkw) ist inzwischen sehr deutlich. Die Gefahr ineffizienter Pfadabhängigkeiten ist somit auch dann gering, wenn sich die Politik entscheidet, Ergänzungstechnologien punktuell zu fördern. Gleichzeitig ist damit klar, dass der realistische Beitrag von Ergänzungstechnologien zur Antriebswende absehbar begrenzt bleibt.

---

Vor diesem Hintergrund sollten Batterie-Lkw und der Aufbau entsprechender Ladeinfrastruktur (öffentlich und betrieblich) als klarer Fokus und Priorität für den Klimaschutz im Straßengüterverkehr definiert werden. Mit Blick auf den Ladeinfrastruktur-Ausbau als hauptsächliche Restriktion im Hochlauf eines Batterie-Lkw-Systems ist dabei vor allem Folgendes zu tun:

- Kurz- bis mittelfristig sind die Dauer von Planungsprozessen und Baumaßnahmen hauptsächliche Risikofaktoren für einen hinreichend schnellen Ladeinfrastruktur-Aufbau. Hier sind insbesondere die aktuell langwierigen Netzanschlussprozesse zu beschleunigen. Bundesweit einheitliche, digitalisierte Verfahren und transparente Kapazitätsinformationen können Anschlussverfahren verkürzen. Bis diese etabliert sind, helfen gebündelte, fachlich klar spezifizierte und durch Sicherheiten unterlegte Netzanschlussbegehren.
- Langfristig können Restriktionen vermieden werden, indem die Dimensionierung der Netzanschlüsse entlang der Autobahnen von Beginn an auf den absehbaren Zielzustand der Elektrifizierung (mit zentraler Rolle von Batterie-Lkw) ausgerichtet wird. Dies erspart zudem kosten- und zeitintensive Zwischenlösungen beim Netzausbau.

**Fazit:** Priorität muss der beschleunigte Aufbau der Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw haben. Bei den potenziellen Ergänzungstechnologien sollten BWS als Ergänzung ermöglicht werden. ERS könnten dagegen als Backup in der Hinterhand gehalten und die Förderung von BZ-Lkw auf plausible Spezialanwendungen fokussiert werden.

# Annahmen und Modelle

## Annahmen für die InGRID-Modellierung

### Anschaffungspreis Sattelzüge in €<sub>2023</sub>

|  | 2025    | 2030    | 2040    | 2045    |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Diesel                                   | 113.300 | 113.300 | 113.300 | 113.300 |
| Batterie-Lkw (700 km) <sup>15</sup>      | 338.293 | 235.238 | 196.840 | 182.892 |
| BWS-Lkw inkl. Rückhaltebatterien         | 376.184 | 280.147 | 194.602 | 171.346 |
| O-Lkw (150 km) <sup>16</sup>             | 241.906 | 189.447 | 149.054 | 143.184 |
| BZ-Lkw                                   | 447.400 | 338.500 | 201.400 | 180.300 |
| Batterierpreis in € <sub>2023</sub> /kWh | 232     | 180     | 134     | 121     |

15 Es wurden Batterie-Lkw mit 300-700 km Reichweite betrachtet.

16 Es wurden O-Lkw mit einer Batteriereichweite von 50-300 km betrachtet.

### Verbrauch

|  | 2025        | 2030        | 2040        | 2045        |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Diesel in l/km                         | 0,285       | 0,254       | 0,246       | 0,241       |
| Batterie-Lkw (700 km) in kWh/km        | 1,42        | 1,32        | 1,23        | 1,20        |
| BWS-Lkw in kWh/km                      | 1,35        | 1,27        | 1,20        | 1,16        |
| O-Lkw (150 km) in kWh/km <sup>17</sup> | 1,36 (1,32) | 1,28 (1,25) | 1,22 (1,19) | 1,19 (1,16) |
| BZ-Lkw in kg/km                        | 0,066       | 0,061       | 0,058       | 0,057       |

17 In Klammern steht der Wert im Batteriebetrieb, also ohne ausgefahrenen Stromabnehmer.

## Energiepreise

|   | 2025  | 2030  | 2040  | 2045  |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Diesel in € <sub>2023</sub> /l                          | 1,31  | 1,37  | 1,51  | 1,54  |
| Strompreis Depot in € <sub>2023</sub> /kWh              | 15,93 | 14,07 | 11,93 | 11,95 |
| Strompreis öffentliches Laden in € <sub>2023</sub> /kWh | 39,99 | 35,23 | 29,88 | 29,92 |
| Strompreis Batteriewechsel in € <sub>2023</sub> /kWh    | 40,84 | 33,48 | 28,26 | 28,65 |
| Strompreis Oberleitung in € <sub>2023</sub> /kWh        | 15,93 | 14,07 | 11,93 | 11,95 |
| Wasserstoff in € <sub>2023</sub> /kg                    | 11,09 | 9,14  | 7,05  | 6,59  |

## Modelle



**InGRID:** Das Technologiewahlmodell ermöglicht die Modellierung von Flotten- und Infrastruktur-szenarien für den Straßengüterverkehr. Grundlage dafür bildet eine relationsfeine Berechnung der technischen Eignung (bspw. bedingt durch die Reichweite) und der Vollkosten für Lkw-Betreiber (TCO) für Fahrzeug, Energie, Infrastruktur und Betrieb. Berücksichtigt werden alle Fahrten in und durch Deutschland in vier verschiedenen Größenklassen und fünf Technologien. Die Neuzulassungen werden über eine Logit-Kaufentscheidung abgebildet, die den Anteil alternativer Technologien in Abhängigkeit des Kostenvorteils gegenüber Dieselfahrzeugen bestimmt. Infrastruktur (Ladeinfrastruktur, Oberleitungsnetz) kann orts aufgelöst abgebildet werden, um den nötigen Bedarf sowie Restriktionen darstellen zu können.



**InKo:** Der Infrastrukturkonfigurator dient der Simulation standortspezifischer Lkw-Ankünfte, Energiebedarfe und Ladeabläufe und ermöglicht damit eine fundierte Bewertung des erforderlichen Ladeinfrastrukturbedarfs. Hierfür verknüpft das Modell verkehrliche, infrastrukturelle, technische und logistische Datenquellen und berücksichtigt sowohl operative Einflüsse als auch Netzrestriktionen. InKo erzeugt Kennzahlen zu Abfertigungsraten, Ladebedarfsdeckung, Auslastung und zeitlichen Lastprofilen und zeigt auf, wo Engpässe bei verfügbaren Ladepunkten oder Netzanschlussleistungen auftreten können. Durch die Kopplung mit InGRID lassen sich zudem unterschiedliche Batterie-Lkw-Anteile und Fahrzeugmixe abbilden und deren Auswirkungen auf die notwendige Ladeinfrastruktur analysieren.



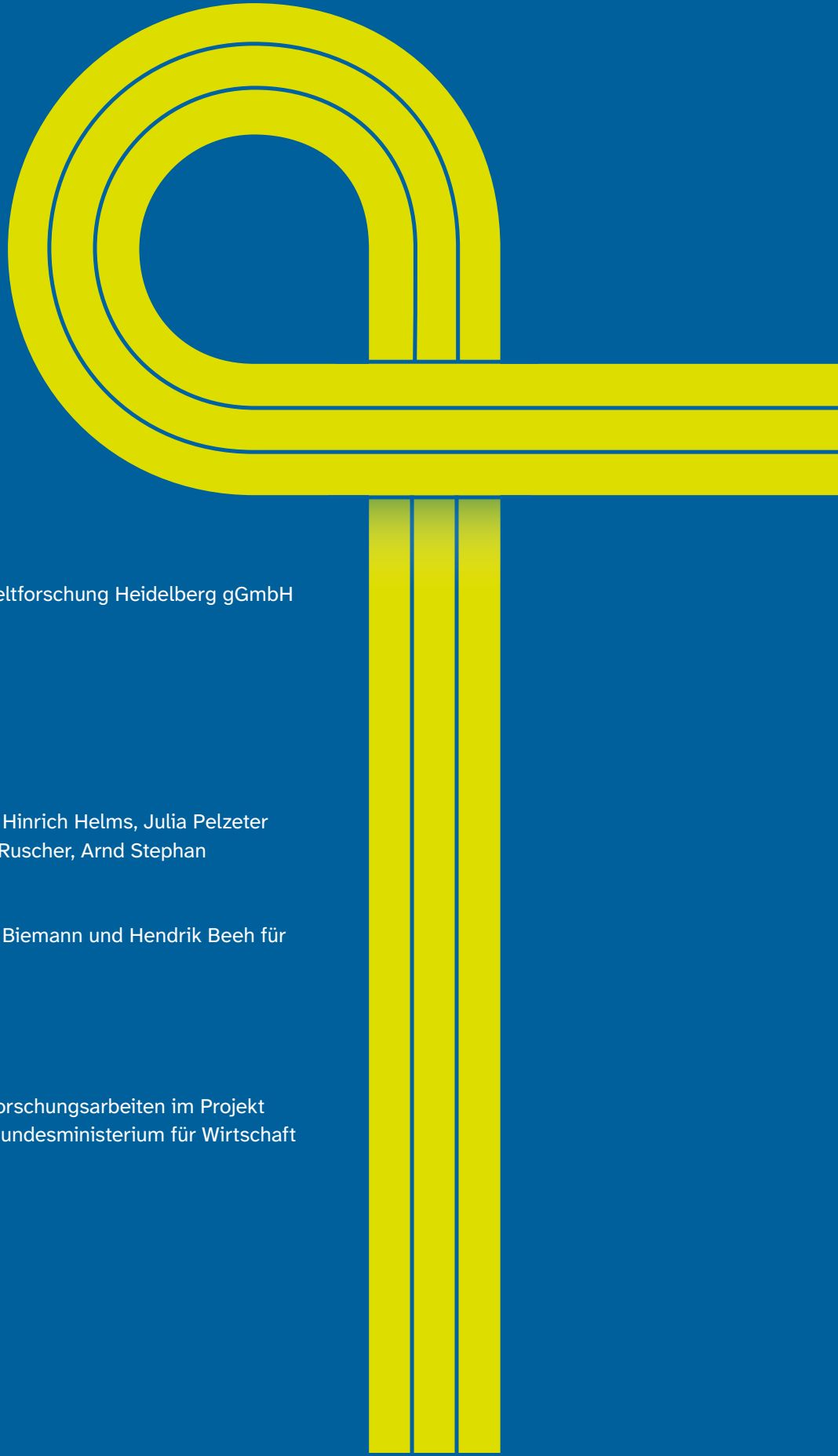
**DIETER:** DIETER (Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables) ist ein quelloffenes, kostenminimierendes Stromsektormodell, das die optimalen Kraftwerkseinsatz- und teils auch Investitionsentscheidungen für eine Vielzahl von Technologien ermittelt. Dazu gehören konventionelle und erneuerbare Stromerzeuger, unterschiedliche Arten von Energiespeichern sowie verschiedene Optionen der Sektorenkopplung wie elektrische Fahrzeuge, Wärmepumpen und Elektrolyseure. Es wird in der Regel in stündlicher Auflösung für alle zusammenhängenden Stunden eines vollen Jahres gelöst, um die Fluktuationen von Wind- und Solar-energie sowie der Nachfrage detailliert abzubilden. Wesentliche Modellinputs sind spezifische Investitions- und Betriebskosten der Technologien sowie stündliche Nachfragezeitreihen. Die Modellergebnisse können als Resultat eines vollkommenen Markts mit perfekter Voraussicht und vollständiger Information aller Akteure interpretiert werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] M. Allekotte, K. Biemann, M. Colson, C. Heidt, J. Kräck, und W. Knörr, „Aktualisierung TREMOD 2024“, Umweltbundesamt, 2025.
- [2] UBA, „Treibhausgas-Emissionen in Deutschland“, Umweltbundesamt. Zugriffen: 17. November 2025. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. 2025.
- [3] BMV, „Verkehrsprognose 2040“, Bundesministerium für Verkehr. Zugriffen: 18. November 2025. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsprognose-2040.html>. 2025.
- [4] Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, „Frühjahrgutachten 2024 - Güterverkehr zwischen Infrastrukturanforderungen und Dekarbonisierung“, 2024.
- [5] Europäischer Rechnungshof, „Sonderbericht 29/2023: EU-Förderung für nachhaltige Biokraftstoffe im Verkehrssektor – Der künftige Weg ist ungewiss“, 2023.
- [6] NOW GmbH, „Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr - Auswertung der Cleanroom-Gespräche mit Nutzfahrzeugherstellern 2024“, 2024.
- [7] J. Jöhrens, M. Allekotte, F. Heining, H. Helms, J. Klimke, J. Pelzeter und D. Räder, „My eRoads - Der Weg zu einem klimaneutralen Lkw-Verkehr“. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2023.
- [8] W.-P. Schill, J. Jöhrens, und F. Spathelf, „Antriebswende im Schwerlastverkehr: Treibhausgasquote benachteiligt batterieelektrische Lkw“, DIW Wochenbericht, Bd. 92, S. 723-732, 2025, doi: 10.18723/DIW\_WB:2025-46-1. 2025.
- [9] NOW GmbH, „Nutzfahrzeug-Monitor“, NOW GmbH. Zugriffen: 17. November 2025. <https://www.now-gmbh.de/datenfinder/neuzulassungen-bestand-leichter-mittlerer-und-schwerer-nutzfahrzeuge/>. 2025.
- [10] W.-P. Schill, N. Aichner, L. Felder, und A. Roth, „Elektromobilität - Nutzfahrzeuge“, Open Energy Tracker. Zugriffen: 17. November 2025. <https://openenergy-tracker.org/docs/germany/emobility/#nutzfahrzeuge>. 2025.
- [11] W.-P. Schill, J. Jöhrens, D. Räder, H. Beeh, J. Klingl, und M. Werner, „Klimaschutz im Straßengüterverkehr: Die Zukunft ist batterieelektrisch“, DIW Wochenbericht, Bd. 47, S. 743-753, 2024, doi: 10.18723/DIW\_WB:2024-47-4. 2024.
- [12] H. Beeh, D. Räder, J. Jöhrens, und H. Helms, „Lkw mit alternativen Antrieben – aktuelle Marktsituation bei Fahrzeugen und Infrastruktur: enERSyn Schwerpunkt-papier #4“. 2025.
- [13] K. Biemann, H. Helms, D. Münter, A. Liebich, J. Pelzeter, und C. Kämper, „Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr“, Umweltbundesamt (UBA), ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2024.
- [14] NOW GmbH, „Ausschreibung für Lkw-Schnellladeinfrastruktur gestartet“. Zugriffen: 13. November 2025. <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/ausschreibung-fuer-lkw-schnellladeinfrastruktur-gestartet/>. 2024.
- [15] BDEW, „Die Energieversorgung 2024 - Jahresbericht“. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2025.

- [16] S. Kippelt, F. Probst, und M. Greve, „Einfach laden an Rastanlagen – Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs“, Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NOW), 2022.
- [17] M. Irzik, „Lkw-Parksituation im Umfeld der BAB 2018 - Bundesweite Erhebung der Lkw-Parksituation an und auf BAB in Deutschland in den Nachtstunden“. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2019.
- [18] BGL, „35.000 bis 40.000 Lkw-Stellplätze fehlen an deutschen Autobahnen“, Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. Zugegriffen: 27. August 2024. <https://www.bgl-ev.de/35-000-bis-40-000-lkw-stellplaetze-fehlen-an-deutschen-autobahnen/>. 2019.
- [19] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Parkplatzdetektionssysteme mit flächenhafter Erfassung: Funktionale Kriterien“, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2021.
- [20] D. Gerstein, M. Sorayaei, und P. L. Wagner, „Hintergrundpapier - Status quo und Anforderungen an den Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur für klimafreundliche Nutzfahrzeuge in Deutschland“, dena, Hintergrundpapier, 2023.
- [21] F. Hacker, T. Gnann, J. Le Corguillé, A. Stephan, L. Kappler, M. Mottschall und P. Plötz, „Truck depot charging“. Study commissioned by Transport & Environment. Karlsruhe, Berlin: Fraunhofer ISI, Öko-Institut., 2025.
- [22] J. Pelzeter, M. Ruscher, W.-P. Schill, J. Jöhrens, H. Helms, und M. Werner, „Bewertung von Technologiekonfigurationen für den Straßengüterverkehr“. ifeu, TU Dresden, DIW Berlin, 2024.
- [23] eHaul, „eHaul - Elektrischer LKW-Fernverkehr“. Zugegriffen: 17. November 2025. <https://www.ehaul.eu>. 2021.
- [24] J. Jöhrens, M. Allekotte, M. Werner, M. Ruscher, und W.-P. Schill, „Nothing but Fast Charging? – Battery Swapping as a Complementary Option of Energy Supply for Electric Trucking“, Proceedings of the 45th International Vienna Motor Symposium 24 - 26 April 2024, 2024.
- [25] S. Mao, Z. Qu, und F. Rodriguez, „Zero-emission medium- and heavy-duty vehicle market in China, H1 2025“, ICCT, 2025.
- [26] T. Gnann u. a., „BOLD - Accompanying research for overhead line trucks in Germany - Final report.“, Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI, 2023.
- [27] C. Gaete-Morales, J. Jöhrens, F. Heining, und W.-P. Schill, „Power sector effects of alternative options for de-fossilizing heavy-duty vehicles—Go electric, and charge smartly“, Cell Reports Sustainability, Bd. 1, Nr. 6, S. 100-123, doi: 10.1016/j.crsus.2024.100123. 2024.
- [28] Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, TU Berlin, „Langfristszenarien | Langfristszenarien 3“. Zugegriffen: 17. November 2025. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>. 2025.
- [29] M. Kittel, A. Roth, und W.-P. Schill, „Coping with the Dunkelflaute: Power system implications of variable renewable energy droughts in Europe“, arXiv. doi: 10.48550/ARXIV.2411.17683. 2024.

# Impressum



## **Herausgeber**

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH  
Wilckensstr. 3  
69120 Heidelberg  
Tel.: +49 6221-47 67-0  
ifeu@ifeu.de  
www.ifeu.de

## **Autor\*innen**

ifeu: Julius Jöhrens, Florian Heining, Hinrich Helms, Julia Pelzeter  
TU Dresden: Markus Werner, Martin Ruscher, Arnd Stephan  
DIW Berlin: Wolf-Peter Schill

Wir danken Michel Allekotte, Kirsten Biemann und Hendrik Beeh für ihre Mitwirkung im ifeu-Team.

## **Stand**

November 2025

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten im Projekt „enERSyn“. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

## **Gestaltung**

Kai ter Horst – Studio Rund

## **Bildquellen**

Eigene Grafiken und Bilder