Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS

INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG

Potentialanalyse für Batterie-Lkw

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

Julius Jöhrens, Michel Allekotte, Florian Heining, Hinrich Helms, Dominik Räder, Maybritt Schillinger, Maximilian Thienel | ifeu
Konrad Dürrbeck, Martin Schwemmer | Fraunhofer Arbeitsgruppe für Supply Chain Services
Nadine Köllermeier, Volker Waßmuth | PTV Transport Consult

Heidelberg / Nürnberg / Karlsruhe, Juli 2021

Gefördert durch:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Erneuerbar mobil

ifeu Wilckensstr. 3 - 69120 Heidelberg Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0 Telefax +49 (0)6 221. 47 67 - 19 E-Mail ifeu@ifeu.de www.ifeu.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **1**

Zusammenfassung **3**

Executive Summary (English) **8**

Abbildungsverzeichnis **13**

Tabellenverzeichnis **17**

Abkürzungsverzeichnis **19**

1 Zielstellung und Einordnung in das Gesamtprojekt **21**

2 Status quo beim Lkw-Verkehr **22**

2.1 Analyse des Transportmarkts (Nachfrageseite) 22

2.1.1. KEP-Logistik 23

2.1.2. Stückgutverkehre 24

2.1.3. Ladungsverkehre 25

2.1.4. Kontraktlogistik 26

2.1.5. Zusammenfassung 27

2.2 Analyse des Fahrzeugmarkts (Angebotsseite) 28

3 Vorgehen bei der Eignungsanalyse für Elektroantriebe **32**

3.1 Grundlegende Herangehensweise 32

3.2 Aktivitätsdaten der Fahrzeuge 33

3.2.1. Modellgrundlage Straßengüterverkehr 33

3.2.2. Räumliche Beschränkung auf innerdeutsche Relationen 35

3.2.3. Kenngrößen der modellbasierten Ergebnisse für den Straßengüterverkehr 36

3.2.4. Aufbereitung der Modellergebnisse 40

3.3 Kosten pro Antrieb und Fahrzeug 41

3.3.1. Fahrzeug 43

3.3.2. Energiekosten 47

3.3.3. Weitere antriebsabhängige Kostenpunkte 50

3.3.4. Antriebsunabhängige Kostenpunkte 53

3.3.5. Zeitkosten 54

3.4 Bewertung der Eignung für einzelne Relationen 55

3.4.1. Überblick 55

3.4.2. Ableitung der Jahres- und Tagesfahrleistung sowie Anzahl täglicher Stopps 56

3.4.3. Ableitung der verfügbaren Ladezeiten 61

3.4.4. Ableitung der Zeitkosten 63

3.5 Nicht-monetäre Eignungskriterien 67

4 Potentiale für den Einsatz von Batterie-Lkw 70
4.1 Eingangsgrößen und Annahmen 70
4.2 Wirtschaftliches Potential von E-Lkw in der Markteinführungsphase (2025) 73
4.3 Wirtschaftliches Potential von E-Lkw in einem künftigen Massenmarkt (2030) 80
4.3.1. Fall A: Aufladung ausschließlich im Depot 80
4.3.2. Fall B: Berücksichtigung von Zwischenladen während des Betriebstages 82
4.4 Auswirkungen zentraler Einflussgrößen auf das wirtschaftliche Potential (2030) 89
4.4.1. Energiepolitische Unsicherheiten: Energie- und CO_2-Preis 89
4.4.2. Techno-ökonomische Unsicherheiten: Fahrzeugpreise und Batteriepreis 93
4.4.3. Betriebliche Einflussfaktoren: Ladeleistung und Zeitkosten 97
4.5 Potentiale in verschiedenen Gütergruppen 99
4.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 105

Literaturverzeichnis 110

Anhang 116
A1 Modellbeschreibung PTV Validate 116
A2 Dokumentation von Eingangsgrößen und Annahmen 117
A2a Energiepreise 117
A2b Spezifischer Energieverbrauch 120
A2c Fahrzeugpreise 123
A2d Wertverlust 130
A2e Finanzierungskosten 132
A2f Alterung der Traktionsbatterie 132
A2g Antriebsunabhängige Kosten 134
A3 Technologiepotential nach Tagesfahrweite 135
Szenario 2025 136
Szenario 2030 – Fall A (nur Depotladen) 137
Szenario 2030 – Fall B (mit Zwischenladen) 138
A4 Teilmärkte der Logistik 139
KEP-Logistik 139
Stückgutverkehre 141
Ladungsverkehre 143
Kontraktlogistik 145
Ausschluss nicht betrachteter Segmente 147

Zusammenfassung

Der Einsatz batterieelektrischer Lkw (BEV-Lkw) wird mittlerweile für sämtliche Bereiche des Straßengüterverkehrs diskutiert[1]. Dazu beigetragen haben unter anderem eine äußerst dynamische Marktentwicklung bei Batterie-Pkw und damit massive Kostendegressionen bei Traktionsbatterien in den vergangenen Jahren. Gleichzeitig sieht die CO_2-Regulierung auf europäischer Ebene eine Minderung der Auspuffemissionen von neu zugelassenen schweren Nutzfahrzeugen bis zum Jahr 2030 um 30 % (ggü. 2019/2020) vor, was einen Anteil von etwa 20 % Nullemissionsfahrzeugen bei neuen Lkw in diesem Jahr notwendig machen könnte[2]. Es stellt sich somit die Frage, welches Marktpotential Batterie-Lkw bis zu diesem Zeitpunkt erreichen können und in welchem Umfang sie (möglicherweise im Zusammenspiel mit anderen Technologien) zur Einhaltung der regulatorischen Anforderungen beitragen können.

Der Markt für Batterie-Lkw entwickelt sich gegenwärtig dynamisch. Aktuell liegt der Fokus des Angebots überwiegend auf den Gewichtsklassen mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 26 t bei Reichweiten bis etwa 300 km. War das Angebot bisher von Umrüstungen konventioneller Fahrzeuge dominiert, so bringen nun zunehmend auch die marktführenden Fahrzeughersteller batterieelektrische Modelle auf den Markt. Um Lkw-Betreiber beim Umstieg auf Elektro-Lkw zu beraten, wird in diesem Forschungsvorhaben ein Online-Tool entwickelt[3].

In der vorliegenden Studie leiten wir wirtschaftliche Einsatzpotentiale von Batterie-Lkw sämtlicher Größenklassen im innerdeutschen Güterverkehr für unterschiedliche elektrische Reichweiten ab; wir prüfen demnach, ob ein Batteriefahrzeug mit einer bestimmten Reichweite für ein bestimmtes Einsatzprofil in einem gegebenen Stichjahr einen Kostenvorteil für den Betreiber gegenüber einem entsprechenden Dieselfahrzeug aufweist. Wir führen hingegen keine Markthochlaufmodellierung durch, berücksichtigen daher nicht die Anzahl der jährlichen Neuzulassungen. Ebenso bleiben internationale Quell-Ziel-Verkehre sowie Transitverkehre unberücksichtigt. Datenbasis ist das deutschlandweite Verkehrsmodell PTV Validate, die Berechnung der Kostenbilanz der verschiedenen Antriebstypen erfolgt auf dieser Basis für sämtliche Transportrelationen mit einem eigenständigen Kostenmodell. Wir betrachten also keinen Durchschnittsfall, sondern bestimmen und kumulieren die Beiträge einzelner Relationen zum Gesamtpotential. Des Weiteren berücksichtigen wir Besonderheiten einzelner Güterarten hinsichtlich der Eignung des Transports für Batterie-Lkw.

Insbesondere im deutschen Lkw-Verkehr spielen Lastzüge eine bedeutende Rolle, also Kombinationen aus einem Lkw und einem Anhänger. Bezogen auf innerdeutsche Transporte erbringen sie etwa 36 % der Fahrleistung. In der genutzten Verkehrsdatengrundlage sind Lkw mit und ohne Anhänger allerdings nicht differenziert. Dies bringt methodische Probleme mit sich, da Verbrauch und Reichweite stark davon abhängen, ob mit oder ohne Anhänger gefahren wird. Im Sinne einer konservativen Abschätzung des Potentials bleiben Lastzüge daher in der vorliegenden Untersuchung zunächst unberücksichtigt.

[1] Vgl. z.B. BMVI (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge.
[2] Im Zuge der Verschärfung des EU-Klimaziels könnte es auch zu einer entsprechenden Verschärfung der Regulierung für SNF kommen.
[3] www.my-eroads.de

Wir betrachten die Jahre 2025 (Markteinführungsphase) und 2030 (Massenmarkt). Für 2025 untersuchen wir den Einfluss der aktuell geplanten Förderinstrumente auf das Marktpotential. Für das Jahr 2030 betrachten wir hingegen den Markt ohne Förderinstrumente, jedoch mit der zusätzlichen Möglichkeit, dass Lkw an öffentlichen Hochleistungsladestationen zwischenladen können. Ein weiteres Augenmerk gilt der Frage, inwiefern Zeitbedarf durch zusätzliche Ladepausen wirtschaftlich akzeptiert werden könnte. Für 2025 und 2030 definieren wir jeweils ein Basisszenario aus technischen und wirtschaftlichen Parametern, die wir für 2030 im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse variieren.

Die Ergebnisse der **Potentialanalyse für das Jahr 2025** lassen sich wie folgt zusammenfassen:

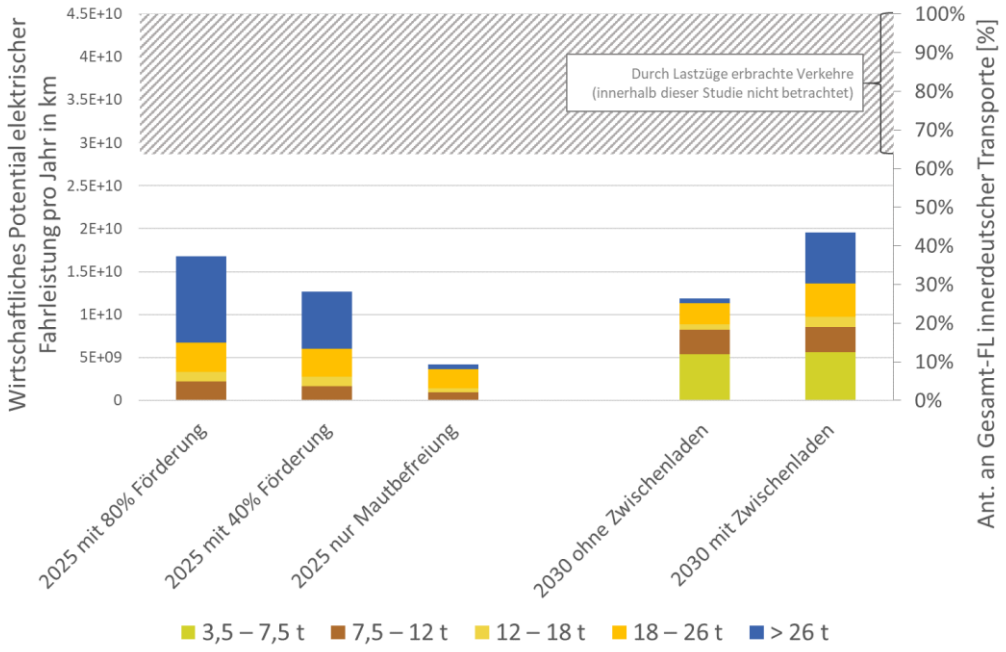
- Im Jahr 2025 sind Batterie-Lkw noch auf staatliche Förderung angewiesen. Mit den derzeit geplanten Instrumenten (Kaufprämie + Mautbefreiung[1]) ergibt sich für 37 % der gesamten Fahrleistung auf innerdeutschen Relationen ein Kostenvorteil von mehr als 1 % beim Betrieb mit Batterie-Lkw.
- Die geplanten Förderinstrumente machen so gut wie ausschließlich mautpflichtige Fahrzeuge (> 7,5 t zGG) wirtschaftlich. Bei einer Kaufprämie von 80 % der Mehrkosten erreichen alle mautpflichtigen Fahrzeugsegmente ein wirtschaftliches Fahrleistungspotential zwischen 70 % und 90 %. Eine geringere Kaufprämie senkt das wirtschaftliche Potential in allen Fahrzeugsegmenten, besonders stark aber bei Sattelzügen > 26 t. Wird lediglich eine Mautbefreiung gewährt, aber keine Kaufprämie, so liegt das wirtschaftliche Potential im Bereich 7,5 – 26 t zGG zwischen 30 % und 50 %, während Sattelzüge nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich als Batterie-Lkw zu betreiben sind.
- Bei nicht mautpflichtigen Lkw (3,5 t – 7,5 t zGG) ist die Mautbefreiung hingegen wirkungslos, somit ergeben sich hier trotz Förderung unter den getroffenen Annahmen kaum wirtschaftliche Anwendungsfälle. Durch die relativ geringen Jahresfahrleistungen in dieser Größenklasse ergibt sich zwar eine hohe betriebliche Eignung für BEV-Lkw, die hohen Anschaffungskosten fallen hier jedoch gegenüber dem Energiekostenvorteil stärker ins Gewicht. Nichtsdestotrotz könnten lokale Maßnahmen zur Luftreinhaltung hier eine Marktentwicklung begünstigen.

Für das Jahr 2030 ist von einem Massenmarkt für Batterie-Lkw ohne direkte Fördermaßnahmen auszugehen. Hierzu konnten aus der Modellierung des Basisszenarios folgende wesentliche Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Bei Aufladung ausschließlich über Nacht (ohne öffentliches Zwischenladen) ist eine Elektrifizierung für große Teile der Fahrleistung bei den Größenklassen < 12 t zGG wirtschaftlich, bei größeren Lkw zwischen 12 t und 26 t zGG trifft dies zumindest auf die Hälfte der Verkehre zu. Bei Sattelzügen ist das wirtschaftliche Potential für Batterie-Lkw in diesem Fall hingegen gering.
- Ermöglicht eine leistungsfähige öffentliche bzw. betriebliche Ladeinfrastruktur zusätzlich eine bedarfsabhängige Zwischenladung während des Betriebstages, so sind Batterie-Lkw fast für die gesamte Fahrleistung aller Lkw < 26 t zGG wirtschaftlich. Bei Sattelzügen zeigt sich dann zumindest für knapp die Hälfte der gesamten Fahrleistung ein wirtschaftlicher Vorteil für Batterie-Lkw.

[1] Im Zuge der Novelle der Eurovigniettenrichtlinie könnte es hier noch Änderungen bei der Instrumentierung geben.

Nachfolgende Graphik fasst die Ergebnisse der Potentialanalyse für die Jahre 2025 und 2030 zusammen, wobei für 2025 die verschiedenen Förderszenarien abgebildet sind. Das errechnete wirtschaftliche Potential für Batterie-Lkw deckt bereits in 2025 unter Maßgabe der geplanten 80-prozentigen Förderung der Mehrkosten mehr als ein Drittel der Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge im innerdeutschen Betrieb ab. Die Anzahl der Neuzulassungen hängt jedoch zusätzlich von der Anzahl neu anzuschaffender Lkw, der Fahrzeugverfügbarkeit und weiteren Faktoren ab, wird also wahrscheinlich unterhalb des wirtschaftlichen Potentials liegen.



Berechnetes wirtschaftliches Fahrleistungspotential für Batterie-Lkw auf innerdeutschen Relationen absolut (linke Achse) sowie als Anteil der Gesamtfahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge im innerdeutschen Verkehr (rechte Achse) für die Jahre 2025 und 2030.

Die genauere Betrachtung **zentraler technischer und wirtschaftlicher Parameter** (Sensitivitätsanalysen) für das Jahr 2030 brachte zusätzlich folgende Erkenntnisse:

- Den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw haben die angenommenen Energiepreise. Sowohl der stark durch Abgaben und Umlagen bestimmte Strompreis als auch die CO_2-Komponente des Dieselpreises hängen vor allem von der zukünftigen Energiepolitik des Bundes ab. Es zeigt sich (unter Annahme des Szenarios ohne Zwischenladen als Basisfall):
  - Basisannahme für das Depotladen in 2030 ist ein Strompreis von 20,4 ct/kWh. Eine Senkung auf 15 ct/kWh macht Batterie-Lkw für fast alle Anwendungsfälle wirtschaftlich, eine Erhöhung auf 25 ct/kWh senkt das Potential hingegen auf nahe null.
  - Ein CO_2-Preis unterhalb von 100 €/t (Referenzwert) senkt unmittelbar das wirtschaftliche elektrische Fahrleistungspotential über alle Fahrzeugklassen hinweg. Eine Erhöhung auf 180 €/t (Schadenskosten laut UBA[1]) würde hingegen auch bei schweren

[1] https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/hohe-kosten-durch-unterlassenen-umweltschutz

Lkw > 26 t bereits ohne Zwischenladen etwa 70 % der Fahrleistung für Batterie-Lkw wirtschaftlich machen.

- Batterie-Lkw mit Reichweiten von über 300 km mögen zwar betriebliche Vorteile haben, spielen aus wirtschaftlicher Perspektive im Basisszenario (unabhängig von der Verfügbarkeit öffentlicher Schnellladeinfrastruktur) jedoch nur eine Nischenrolle. Dies ändert sich erst bei Batteriepreisen deutlich unterhalb von 80 €/kWh. Insbesondere Sattelzugmaschinen mit einer Reichweite von über 500 km erreichen erst bei sehr niedrigen Batteriepreisen unter 50 €/kWh einen Kostenvorteil.
- Die im Basisfall für Zwischenladung angesetzte Ladeleistung von 500 kW ist für hinreichende Energieaufnahme während der verfügbaren Pausenzeiten bei den als wirtschaftlich identifizierten Fahrzeugtypen ausreichend. Aus den Berechnungen lässt sich zumindest für typische Anwendungsfälle keine Notwendigkeit für Ladeleistungen im Megawattbereich ableiten, da bei Lkw die Lenkzeitpausen auch bei niedrigeren Ladeleistungen ausreichend sein dürften.
- Unsere Berechnungen zeigen, dass zusätzlicher Zeitbedarf zum Zwischenladen während des Betriebstages in einer Kostenbetrachtung nur bei Annahme sehr niedriger Zeitkosten wirtschaftlich ist. Zeitverzögerungen würden unter den getroffenen Annahmen voraussichtlich nur für einen sehr geringen Anteil von unter 2 % der Einsatzprofile toleriert.
- Bei den Lkw < 12 t zGG werden lediglich etwa 10 % der Fahrleistung in Einsatzprofilen mit einer mittleren Tagesfahrweite von mehr als 200 km erbracht. Daher ist nach derzeitigem Stand auch mittelfristig nur von einem begrenzten Markt für Batterie-Lkw mit einer Reichweite von mehr als 200 km in diesen Segmenten auszugehen.
- Die Analyse verschiedener Gütergruppen hinsichtlich ihrer Eignung für Transporte mit Batterie-Lkw ergab, dass je nach Gütergruppe sehr unterschiedliche Hürden adressiert werden müssen. Ein insgesamt hohes absolutes Fahrleistungspotential und eine überdurchschnittliche Eignung ergab sich insbesondere für Holz- und Papierprodukte (GA 6) sowie Metallerzeugnisse (GA 10). Das absolut gesehen höchste Potential wurde in der Lebensmittellogistik identifiziert, hier ist die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur zur Zwischenladung aber von hoher Bedeutung.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen geben eine Reihe von **Hinweisen für die weitere Ausgestaltung des politischen Rahmens**:

- Der Strompreis (genauer gesagt: das Verhältnis zwischen Strom- und CO_2-Preis) ist der wirkmächtigste Hebel, den die Politik zur Gestaltung des Markthochlaufs von Batterie-Lkw in der Hand hält. Hier sind verlässliche Rahmenbedingungen für Lkw-Betreiber mindestens über einen Investitionszyklus erforderlich. In der Markteinführungsphase könnte dies beispielsweise mittels Differenzkontrakten (Contracts for Difference (CfD)) oder vergleichbarer Instrumente geschehen.
- Unsere Berechnungen zeigen, dass die Vollkosten für Batterie-Lkw bei Verfügbarkeit von Infrastruktur zum Zwischenladen im Mittel deutlich niedriger liegen als ohne eine solche Infrastruktur, da dann kleinere Batterien ausreichend sind. Der Aufbau solcher Infrastruktur kann daher schon allein aus Kostensicht (ungeachtet der betrieblichen Vorteile) das Marktpotential von Batterie-Lkw erheblich ausweiten. Hierfür ist zunächst lediglich entscheidend, dass die Fahrzeuge während des Betriebstages nachladen können; ob dafür Hochleistungs-Schnelllader oder ein Nachladen während der Fahrt über eine Oberleitung sinnvoller ist, wird voraussichtlich vom Anwendungsfall abhängen und ist Gegenstand weiterer Untersuchungen in diesem Vorhaben.

- Bei der geplanten Förderung von 80 % der Mehrkosten ergeben sich für die wirtschaftlich attraktiven Batterie-Lkw im Jahr 2025 TCO-Vorteile von durchschnittlich ca. 7 %. Für eine typische Sattelzugmaschine ergibt sich dadurch ein Kostenvorteil von ca. 38.000 € über die gesamte Haltedauer. Dies bedingt voraussichtlich Mitnahmeeffekte. Zudem überschreiten die anfallenden Fördersummen das dafür vorgesehene Budget erheblich, sobald größere Teile des wirtschaftlichen Potentials ausgeschöpft werden (das eingeplante Budget bis 2024 beträgt mit 1,6 Mrd. € etwa 12 % der Summe, die bei Realisierung der berechneten Potentiale nachgefragt würde). Es empfiehlt sich daher, die Förderung von vorne herein degressiv anzulegen und die Wirtschaftlichkeit der Elektro-Lkw in zunehmendem Maße über die Energiepreise zu sichern.
- In einem Marktumfeld, das von hoher staatlicher Förderung geprägt ist, unterliegt der Wiederverkaufswert großen Unsicherheiten, ist aber für die Kostenrechnung der Betreiber von Bedeutung. Die Erwartung eines Fortbestands von Kaufprämien für Neufahrzeuge über die Haltedauer des Fahrzeugs hinaus macht Neufahrzeuge im Vergleich attraktiver und senkt den mutmaßlichen Restwert gebrauchter Fahrzeuge. Die Wirtschaftlichkeit geförderter Fahrzeuge kann damit sinken, wie im Pkw-Markt bereits beobachtet wird. Neben dem politischen Rahmen (z. B. Fortbestand von Förderinstrumenten, gezielte Stützung des Zweitmarktes) sind hierbei auch die gewählten Finanzierungsmodelle für die auf den Markt kommenden Elektro-Lkw (Leasing, Restwertgarantie, …) entscheidend. Zudem kann eine planbare Degression der Förderhöhe die Abschätzbarkeit des Restwerts für die Lkw-Betreiber erhöhen.
- Wenn Skaleneffekte nicht im erhofften Umfang eintreten, besteht das Risiko höherer Fahrzeugkosten, die das Marktpotential in unseren Berechnungen empfindlich senken. Die Politik sollte daher darauf hinwirken, die Skaleneffekte durch stabile Rahmenbedingungen zu sichern, nicht zuletzt durch einen verlässlichen Infrastrukturausbau.
- Die unterschiedlichen Treiber und Hemmnisse für den Einsatz von Batterie-Lkw je nach Logistiksegment bzw. Güterklasse sollten beim Aufsetzen von Pilotprojekten sowie bei der Strategieentwicklung für den Aufbau von Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden.

Auf Basis der in dieser Untersuchung abgeleiteten wirtschaftlichen Einsatzpotentiale von Batterie-Lkw werden wir im weiteren Verlauf des Vorhabens „My eRoads“ Ausbaupfade für die Infrastruktur zum Zwischenladen von Batteriefahrzeugen (Hochleistungsschnellladen oder Oberleitung) ableiten. Auch zum wirtschaftlichen Anwendungspotential von Brennstoffzellen-Lkw ist eine vergleichende Untersuchung geplant.

Executive Summary (English)

The use of battery electric trucks (BEV trucks) is currently being discussed for all areas of road freight transport[1]. Among other things, this has been driven by extremely dynamic market development for battery-powered passenger cars and thus massive cost reductions for traction batteries in recent years. At the same time, CO_2 regulation at the European level requires a 30 % reduction in tailpipe emissions from newly registered heavy-duty vehicles by 2030 (compared with 2019/2020), which could necessitate a share of around 20 % zero-emission vehicles in truck new registrations[2]. This raises the question of what market potential battery trucks can achieve by that time and to what extent they can contribute (possibly in combination with other technologies) to meeting regulatory requirements.

The market for battery trucks is currently developing dynamically. Currently, supply focuses on the weight classes with a gross vehicle weight of less than 26 t and ranges of up to around 300 km. Whereas the market was previously dominated by conversions of conventional vehicles, the market-leading vehicle manufacturers are now also increasingly launching battery-electric models. As part of this research project, an online tool is being developed to help truck operators switch to electric trucks[3].

In the present study, we derive economic deployment potentials of battery trucks of all size classes in domestic German freight transport for different electric ranges. We thus examine whether a battery vehicle with a specific range for a specific deployment profile in a given reference year has a cost advantage for the operator compared to a corresponding diesel vehicle. However, no market ramp-up modelling is performed, so we do not consider the number of new registrations per year. Also, international source-destination traffic and transit traffic are not taken into account. The data basis is the Germany-wide transport model PTV Validate; the calculation of the cost balance of the various drive types is carried out on this basis separately for all transport relations (origin-destination pairs) using a cost model. This means that we do not consider an average case, but rather determine and cumulate the contributions of individual transport relations to the total application potential. Furthermore, we take into account special features of individual types of goods with regard to the suitability of transport by battery trucks.

Truck-trailer combinations (i.e. rigid trucks pulling a trailer) play an important role in German truck traffic. In terms of domestic transport, they account for around 36 % of the mileage. In the underlying traffic data, however, trucks with and without trailers are not differentiated. This poses methodological problems, since consumption and range depend heavily on whether the vehicle is driven with or without a trailer. In the sense of a conservative estimation of the application potential, truck-trailer combinations are therefore not considered in this study.

We consider the years 2025 (assumed as market introduction phase) and 2030 (assumed for a mass market). For 2025, we examine the influence of the currently planned governmental subsidies for zero-emission trucks in Germany on the market potential. For 2030, on the

[1] cf. BMVI (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge.
[2] The recent increase in ambition of EU climate policy ("Green New Deal") might cause a tightening of the CO_2 regulation for heavy-duty vehicles.
[3] www.my-eroads.de

other hand, we consider the market without such subsidies, but with the additional possibility of trucks being able to recharge at public high-power charging stations. Another focus is on the question to what extent time requirements due to additional charging breaks could be economically accepted by truck operators. For 2025 and 2030, we define a baseline scenario consisting of technical and economic parameters, which we vary for 2030 in a sensitivity analysis.

The results for **the economic application potential of battery trucks in 2025** can be summarized as follows:

- In 2025, battery trucks are still dependent on government subsidies. With the currently planned instruments (purchase premium + toll exemption[1]), a cost advantage of more than 1 % for operation with battery-powered trucks can be expected for 37 % of the total mileage on domestic German routes.
- The planned subsidy instruments almost exclusively make toll vehicles (> 7.5 t GVW) economical. With a purchase premium of 80 % of the additional costs, all toll vehicle segments achieve an economic potential of between 70 % and 90 % of total truck kilometres. A lower purchase premium reduces the economic potential in all vehicle segments, but particularly strongly for semitrailer trucks > 26 t. If only a toll exemption is granted, but no purchase premium, the economic BEV potential for 7.5 - 26 t trucks is between 30 % and 50 %, while semitrailer trucks can only be operated economically as battery trucks in exceptional cases.
- For trucks not subject to tolls (3.5 t - 7.5 t GVW), on the other hand, the exemption from tolls has no effect, so that there are hardly any economic applications here in spite of the assumed purchase premium. Due to the relatively low annual mileage in this size category, BEV trucks are highly suitable from an operational point of view, but the high acquisition costs are more important than the energy cost advantage. Nevertheless, local air pollution control measures could promote market development in this segment.

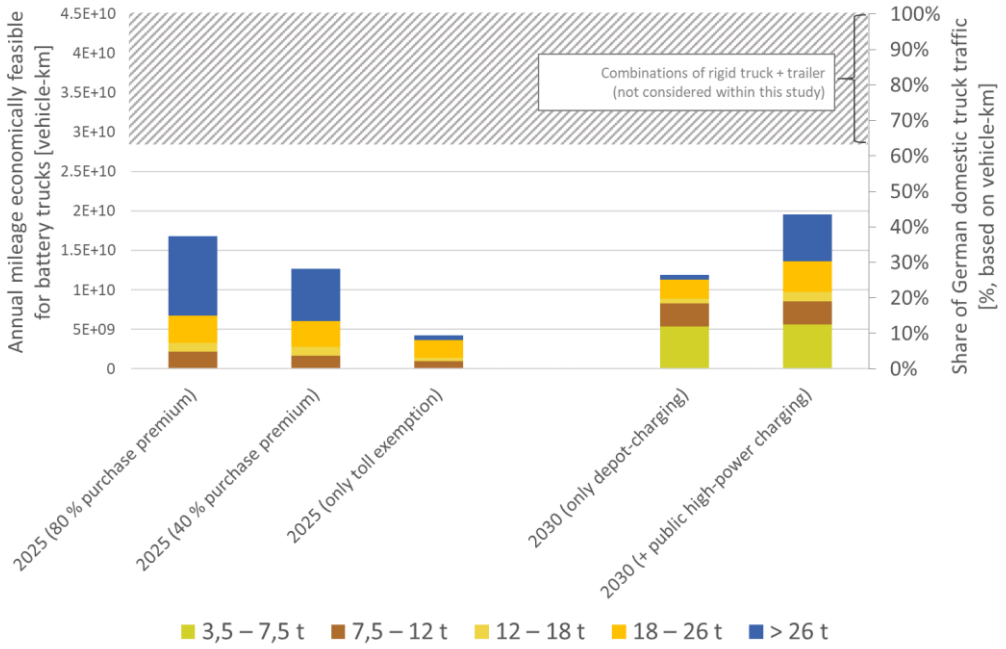
For the year 2030, a mass market for battery-powered trucks without current subsidy measures can be assumed. The calculation of the base scenario yields the following key findings:

- If only overnight depot charging is assumed (no intermediate public charging), electrification is economically viable for large parts of the mileage in the size classes < 12 t GVW, and for larger trucks between 12 t and 26 t GVW, this applies to at least half of the traffic. In the case of semitrailer trucks, however, the economic potential for battery trucks in this case is low.
- If an efficient public or company charging infrastructure also enables intermediate charging as needed during the operating day, battery trucks are economical for almost the entire mileage of all trucks < 26 t GVW. In the case of semitrailer trucks, BEV technology has an economic advantage for at least half of the total truck kilometres.

The following diagram summarizes the results for the economic potential of BEV trucks in years 2025 and 2030, with different subsidy schemes shown for 2025. The calculated economic potential for battery-powered trucks already covers more than one third of the driving performance of heavy commercial vehicles in domestic operation in 2025, assuming the planned 80 % subsidy of the additional costs. However, the number of new registrations

[1] The directive about road tolls in Europe is currently under revision, which may affect the feasibility of national toll exemptions for certain vehicle types.

also depends on the fleet turnover rate, vehicle availability and other factors, so it will probably be below the economic potential shown here.



Calculated economic potential for battery-powered trucks on domestic German routes in absolute terms (left axis) and as a percentage of total truck mileage in domestic German traffic (right axis) for the years 2025 and 2030.

A closer look at **key technical and economic parameters** (sensitivity analyses) for the year 2030 yielded the following additional findings:

- Among all influencing factors, assumed energy prices have the greatest influence on the economic viability of battery trucks. Both the electricity price, which is strongly determined by levies and surcharges, and the CO_2 component of the diesel price depend primarily on the future energy policy of the German federal government. It shows (assuming the scenario without intermediate charging as the base case):
  - Base assumption for depot charging in 2030 is an electricity price of 20.4 ct/kWh. A reduction to 15 ct/kWh makes battery trucks economically viable for almost all use cases, while an increase to 25 ct/kWh reduces the potential to near zero.
  - A CO_2 price below 100 €/t (reference value) directly lowers the economic electric mileage potential across all vehicle classes. An increase to 180 €/t (CO_2 damage costs according to German Federal Environmental Agency UBA), on the other hand, would make about 70 % of the mileage for battery trucks economical even for heavy trucks > 26 t without intermediate charging.
- Battery trucks with ranges of over 300 km may have operational advantages, but from an economic perspective they only play a small role in the baseline scenario (regardless of the availability of public fast-charging infrastructure). This only changes at battery prices significantly below € 80/kWh. In particular, tractor-trailers with a range of over 500 km only achieve a cost advantage at very low battery prices below € 50/kWh.
- The 500 kW charging power used in the base case for intermediate charging is sufficient for adequate energy provision during the available break times for the vehicle types identified as economically viable. The calculations do not indicate a need for charging power

in the megawatt range, at least for typical applications, since the driving time breaks for trucks are likely to be sufficient even with lower charging power.

- Our calculations show that an additional time requirement for intermediate charging during the operating day is only economically viable if very low time costs are assumed. Under the assumptions made, time delays would probably only be tolerated for a very small proportion of less than 2 % of the operating profiles.
- In the case of trucks with a gross vehicle weight of < 12 t, only about 10 % of the mileage is performed in operational profiles with an average daily driving distance of more than 200 km. Therefore, as things stand at present, only a limited market for battery-powered trucks with a range of more than 200 km can be assumed in these segments from an economic point of view, even in the medium term.
- The analysis of different freight groups with regard to their suitability for transports with battery trucks showed that very different hurdles have to be addressed depending on the freight group. An overall high absolute mileage potential and above-average suitability was found in particular for wood and paper products (GA 6) and metal products (GA 10). The highest potential in absolute terms was identified in food logistics, but here the availability of charging infrastructure for intermediate charging is of high importance.

The results of the calculations provide a number of **conclusions for the future design of the policy framework for zero-emission trucks**:

- The electricity price (more precisely: the relationship between electricity price and CO_2 price) is the most powerful lever for policymakers to shape the market ramp-up of battery trucks. Reliable framework conditions for truck operators are required here, at least over one entire investment cycle. In the market introduction phase, for example, this could be achieved by means of contracts for difference (CfD) or comparable instruments.
- Our calculations show that the full costs for battery trucks are significantly lower on average when infrastructure for intermediate charging is available than without such infrastructure, since infrastructure reduces the required battery capacity. The development of public high-power charging infrastructure can therefore significantly expand the market potential of battery trucks from a cost perspective alone (regardless of operational aspects). The only decisive factor here is that the vehicles can be recharged during the operating day; whether high-capacity fast chargers or recharging during the journey via an electric roads system (e.g. overhead contact lines) makes more sense for this purpose will probably depend on the application and is subject of further investigations in this project.
- With the planned purchase premium of 80 % of the additional costs compared to a diesel truck, economically viable battery trucks will have TCO advantages of approx. 7 % on average in 2025. For a typical semitrailer tractor, this results in a cost advantage of about €38,000 over the entire holding period of the vehicle. This is likely to result in deadweight losses. In addition, the funding amounts involved considerably exceed the budget earmarked for this purpose as soon as larger parts of the economic electrification potential are exploited (at €1.6 billion, the budget planned up to 2024 is around 12 % of the sum that would be demanded if the calculated potential were realized). It is therefore advisable to decrease the purchase premium in a predictable way over time and to ensure the economic viability of electric trucks to an increasing extent via energy prices.
- In a market environment characterized by high government subsidies, the resale value is subject to significant uncertainty, but it is important for operators' cost accounting. The expectation of a continuation of purchase premiums for new vehicles beyond the vehicle's holding period makes new vehicles more attractive in comparison and lowers the

presumed residual value of used vehicles. The economic viability of subsidized vehicles can thus decline, as is already being observed in the passenger car market. In addition to the political framework (e.g. future of subsidy instruments, targeted support of the secondary market), the financing models available for electric trucks (leasing, residual value guarantee, etc.) are also decisive. In addition, a predictable degression of the subsidy level can increase the predictability of the residual value for truck operators.

- If economies of scale in the vehicle production are lower than expected, there is a risk of higher vehicle costs, which significantly reduces the market potential in our calculations. Policymakers should therefore work to secure economies of scale through stable framework conditions, not least through reliable infrastructure expansion.
- Particular drivers and barriers for the use of battery trucks depending on the logistics segment or goods class should be taken into account when setting up pilot projects and developing strategies for the development of charging infrastructure.

Based on the economic application potentials of battery trucks derived in this study, we will derive expansion paths for the infrastructure for intermediate charging of battery vehicles (high-performance fast charging or overhead line) in the further course of the "My eRoads" project. A comparative study of the economic application potential of fuel cell trucks is also in progress.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht aller Logistiksegmente (Quelle: Fraunhofer SCS) 22

Abbildung 2: Gesamtwirtschaftliche Daten der Logistiksegmente (Quelle: Fraunhofer SCS Schätzungen) 23

Abbildung 3: Ablaufprozess der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 24

Abbildung 4 Ablaufprozess der Stückgutverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 25

Abbildung 5: Ablaufprozess der Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 26

Abbildung 6: Ein typischer Transportprozess der Kontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 26

Abbildung 7: Marktverfügbarkeit von Elektro-Lkw nach Größenklasse und Art der Hersteller (Quelle: Lkw-Datenbank des ifeu) 29

Abbildung 8: Aufteilung am Markt verfügbarer und angekündigter Elektro-Lkw nach Gewichtsklasse und elektrischer Reichweite (Quelle: Lkw-Datenbank des ifeu) 30

Abbildung 9: Typische erforderliche Ladeleistung in Abhängigkeit von der Größenklasse und der Ladedauer 31

Abbildung 10: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der wirtschaftlichen Potentialberechnung (Eigene Darstellung) 32

Abbildung 11: Leerfahrtenanteile gemäß (KBA, 2011) 34

Abbildung 12: Veränderungen im Straßengüterverkehr 2010-2030 nach (BVU et al., 2014) und (KBA, 2019) 36

Abbildung 13: Fahrtweitenverteilung verschiedener Lkw-Größenklassen und Lkw gesamt, bezogen auf die Anzahl der Fahrten (Quelle: PTV Validate) 37

Abbildung 14: Fahrleistungsverteilung auf verschiedenen Straßenkategorien (Quelle: PTV Validate) 38

Abbildung 15: Fahrleistungsverteilung auf verschiedener Lkw-Größenklassen in Abhängigkeit der Straßenkategorie (Quelle: PTV Validate) 38

Abbildung 16: Fahrtweitenverteilung verschiedener Güterabteilungen der Lkw Größenklasse >12t zGG (Quelle: PTV Validate) 39

Abbildung 17: Aufteilung der Gesamtnachfrage (Lkw-Fahrten) auf die Fahrzeugklassen für alle betrachteten Güterabteilungen (Quelle: PTV Validate) 40

Abbildung 18: Entwicklung der Preise der Traktionsbatterie 45

Abbildung 19: Restwertentwicklung der Fahrzeuge (exkl. Traktionsbatterie) für definierte Jahresfahrleistungen 46

Abbildung 20: Energiepreisentwicklung 2025-2030 49

Abbildung 21: Eignungsparameter und die sie jeweils bestimmenden Einflussgrößen 56

Abbildung 22: Jahresfahrleistung als Funktion der Distanzklasse/Relationslänge 58

Abbildung 23: Verteilung der Fahrleistung über Tagesfahrweite je Größenklasse 59

Abbildung 24: Anzahl Verladestopps (Fahrten) pro Tag pro Lkw in Abhängigkeit der Relationslänge 61

Abbildung 25: Schematische Darstellung des Zeitablaufs für Relation Frankfurt-München 64

Abbildung 26: Schematische Darstellung des Zeitablaufs für Relation Köln-Frankfurt 64

Abbildung 27: Auftretende Verzögerungszeiten auf Basis der Relationsdaten im Jahr 2030 (Auswahl) 66

Abbildung 28: Differenzkosten (Einsparungen) von BEV und ICEV im Jahr 2025 mit und ohne Förderung 76

Abbildung 29: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2025 (mit Förderung, 50 % Anrechnung der Fördersumme auf den Restwert) 77

Abbildung 30: Elektrische Fahr- und Transportleistung pro Jahr nach Größenklasse im Jahr 2025 (mit Förderung) 78

Abbildung 31: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2025, unter Annahme reduzierter Förderung (links: Kaufprämie max. 40 % der Mehrkosten + Mautbefreiung; rechts: nur Mautbefreiung) 79

Abbildung 33: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen, keine Förderung) 81

Abbildung 33: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung pro Jahr nach Größenklasse im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen, keine Förderung) 82

Abbildung 35: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2030 (Zwischenladen nur ohne auftretende Verzögerung) 83

Abbildung 35: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung pro Jahr nach Größenklasse im Jahr 2030 (Mit Zwischenladen ohne Auftreten zeitlicher Verzögerung) 84

Abbildung 37: Kostendifferenz der einzelnen Einsatzprofile in Abhängigkeit der Tagesfahrweite für Größenklassen ab 12 t zGG für das Jahr 2030 (mit Zwischenladen, ohne Zulassen zeitlicher Verzögerung) 85

Abbildung 38: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2030 (Mit Zwischenladen und Zulassen zeitlicher Verzögerung) 86

Abbildung 39: Akzeptierte Verzögerungszeiten der wirtschaftlich vorteilhaften BEV im Jahr 2030 (Mit Zwischenladen) 87

Abbildung 40: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit des Diesel- bzw. CO2-Preises im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen) 89

Abbildung 41: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie abhängig des Dieselpreises im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen) 91

Abbildung 42: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit des Strompreises im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen) 92

Abbildung 43: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie abhängig des Strompreises für Depotladen im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen) 93

Abbildung 44: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit des Batteriepreises im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen) 94

Abbildung 45: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie in Abhängigkeit des Batteriepreises im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen) 95

Abbildung 46: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit der Fahrzeugpreise im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen) 96

Abbildung 47: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie in Abhängigkeit der Fahrzeugpreise im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen) 97

Abbildung 48: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit der Ladeleistung für öffentliches Laden im Jahr 2030 (mit Zwischenladen) 98

Abbildung 49: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit der Verzögerungskosten im Jahr 2030 (mit Zwischenladen) 99

Abbildung 50: Fahrleistungsanteile der einzelnen Technologien nach Gütergruppe im Jahr 2030; links: ohne Zwischenladen, rechts: mit Zwischenladen. 100

Abbildung 51: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung nach Gütergruppen im Jahr 2030 ohne Zwischenladen 101

Abbildung 52: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung nach Gütergruppen im Jahr 2030 mit Zwischenladen 101

Abbildung 53: Wirtschaftliches Fahrleistungspotential für Batterie-Lkw (Modellergebnisse) 106

Abbildung 54: Wirtschaftliches Transportleistungspotential für Batterie-Lkw (Modellergebnisse) 107

Abbildung 55: Rohölpreisentwicklung 117

Abbildung 56: Produktbeschaffungskosten zzgl. Deckungsbeitrag (exkl. MwSt.) als Funktion des Rohölpreises 118

Abbildung 57: Dieselpreisentwicklung 119

Abbildung 58: Strompreisentwicklung für unterschiedliche Bezugsorte 2020-2030 120

Abbildung 59: Produktionskosten der BEV-Komponente 126

Abbildung 60: Angenommener Markthochlauf zur Ermittlung der Fertigungskosten von BEV 127

Abbildung 61: Fertigungskosten von BEV (ohne Komponente) 128

Abbildung 62: Herleitung der Batteriepreise für den Zeitraum 2020-2030 129

Abbildung 63: Anteil der wirtschaftlichsten Antriebsarten für verschiedene Tagesfahrweiten je Größenklasse im Jahr 2025 (Modellrechnung) 136

Abbildung 64: Anteil der wirtschaftlichsten Antriebsarten für verschiedene Tagesfahrweiten je Größenklasse im Jahr 2030 ohne Zwischenladen (Modellrechnung) 137

Abbildung 65: Anteil der wirtschaftlichsten Antriebsarten für verschiedene Tagesfahrweiten je Größenklasse im Jahr 2030 mit Zwischenladen (Modellrechnung) 138

Abbildung 66: Umsatzanteile der Logistiksegmente, Angaben in Mrd. € (Quelle: Fraunhofer SCS) 139

Abbildung 67: Kennzahlen der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 140

Abbildung 68: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 140

Abbildung 69: Nachfragebranchen der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 141

Abbildung 70: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der allgemeinen Stückgutverkehre (Quelle Fraunhofer SCS) 142

Abbildung 71: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der speziellen Stückgutverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 142

Abbildung 72: Nachfragebranchen der Stückgutverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 143

Abbildung 73: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der allgemeinen Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 144

Abbildung 74: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der speziellen Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 145

Abbildung 75: Nachfragebranchen der allgemeinen Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 145

Abbildung 76: Kennzahlen der Kontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 146

Abbildung 77: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der Kontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 146

Abbildung 78: Nachfragebranchen der Industriekontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 147

Abbildung 79: Nachfragebranchen der Handelskontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS) 147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Logistiksegmente 28
Tabelle 2: Betrachtete relevante Güterabteilungen 34
Tabelle 3: Definition der BEV-Lkw 42
Tabelle 4: Netto Neufahrzeugpreise für die definierten Größenklassen im Jahr 2025 44
Tabelle 5: Angenommene Verbräuche von BEV (exkl. Batteriegewicht) und ICEV in den Jahren 2025 und 2030 48
Tabelle 6: Strompreise in den Jahren 2025 und 2030 50
Tabelle 7: Mautsätze in ct2020/km 50
Tabelle 8: Jährliche Kosten für HU, AU und SP 51
Tabelle 9: Jährliche Kosten für die Kfz-Steuer und die Kfz- und Kaskoversicherung 51
Tabelle 10: Fixkosten für Wartung und Pflege sowie (variable) Reifenkosten 52
Tabelle 11: Durchschnittliche variable Instandhaltungskosten über die Nutzungsdauer in ct2020/km 52
Tabelle 12: Antriebsunabhängige Kosten 53
Tabelle 13: Variable Betriebskosten (ohne Verladekosten) im Jahr 2019 54
Tabelle 14: Verladekosten im Jahr 2019 55
Tabelle 15: Jahresfahrleistung pro Größenklasse nach Distanzklasse (Relationslänge) 57
Tabelle 16: Errechnete Jahresfahrleistungen pro Distanzklasse und insgesamt sowie Koeffizienten der Jahresfahrleistungsfunktionen 58
Tabelle 17: Fahrleistung, Bestand und Anzahl Fahrten pro Distanzklasse 60
Tabelle 18: Lademöglichkeit und Verladedauer nach Gütergruppe 62
Tabelle 19: Relevante Parameter für zeitliche Verzögerungsrechnung 63
Tabelle 20: Überblick kostenrelevanter Annahmen für 2025 und 2030 72
Tabelle 21: Annahmen für das Szenario mit Zwischenladung, Bezugsjahr 2030 73
Tabelle 22: Betrachtete Güterabteilungen 99
Tabelle 23: Indexbasierte Eignungsbewertung für den Betrieb mit Batterie-Lkw nach Gütergruppe 103
Tabelle 24: Eignungsbewertung der Güterabteilungen hinsichtlich qualitativer Kriterien 104
Tabelle 25: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse 108
Tabelle 26: Ableitung des Strompreises an öffentlichen Ladepunkten 119
Tabelle 27: Verbräuche von batterieelektrischen Neufahrzeugen (exkl. Batteriegewicht) in den Jahren 2025 und 2030 121
Tabelle 28: Verbräuche von Diesel-Neufahrzeugen in den Jahren 2025 und 2030 121

Tabelle 29: Gewichtseinfluss auf den Verbrauch 122

Tabelle 30: Energiebedarf der Zusatzaggregate 123

Tabelle 31: Betrachtete Fahrzeugkomponenten zur Ableitung der BEV-Fahrzeugpreise („A“ = antriebsabhängige Komponenten) 124

Tabelle 32: Produktionskosten von ICEV und BEV differenziert nach Komponenten (bei geringen Stückzahlen) 125

Tabelle 33: Fahrzeugpreise von ICEV und BEV (exkl. Batterie) für die Jahre 2025 und 2030 130

Tabelle 34: Lebensdauer und Tachostand bei Verkauf 131

Tabelle 35: Parameter und Einheiten für Batteriealterung 133

Tabelle 36: Kosten für Fuhrparkverwaltung und Unterstellung in €/a 135

Tabelle 37: Umsatzanteil der Stückgutverkehre (LTL = Less than Truck Load) (Quelle: Fraunhofer SCS) 141

Tabelle 38: Umsatzanteil der Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS) 143

Abkürzungsverzeichnis

AU	Abgasuntersuchung
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batterie-Management-System
CCS	Combined Charging System
DC	direct current (dt. Gleichstrom)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FL	Fahrleistung
Fzg	Fahrzeug
GA	Güterabteilung
GK 0	Größenklasse 0 (Lkw mit 3,5 t – 7,5 t zGG)
GK 1	Größenklasse 1 (Lkw mit 7,5 t – 12 t zGG)
GK 2	Größenklasse 2 (Lkw mit 12 t – 18 t zGG)
GK 3	Größenklasse 3 (Lkw mit 18 t – 26 t zGG)
GK 4	Größenklasse 4 (Lkw mit 26 t – 40 t zGG)
HU	Hauptuntersuchung
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
JFL	Jahresfahrleistung
KEP	Kurier,- Express- und Paketdienst
Kfz	Kraftfahrzeug
LIS	Ladeinfrastruktur
Lkw	Lastkraftwagen
MwSt	Mehrwertsteuer
OEM	Original Equipment Manufacturer

O-Lkw	Oberleitungs-Lkw (O-BEV oder O-HEV)
OH-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw (ein als O-HEV ausgelegter Lkw)
Pkw	Personenkraftwagen
PtL	Power-to-Liquid
RPEF	Retail Price Equivalent Factors
SCR	Selective Catalytic Reduction
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SOC	State of Charge (Ladezustand von 0 bis 100%)
SP	Sicherheitsprüfung
TCO	Total Cost of Ownership
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

1 Zielstellung und Einordnung in das Gesamtprojekt

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

Erster Schritt für die Entwicklung der Roadmap ist eine flächendeckende Analyse voraussichtlicher bevorzugter Einsatzgebiete von elektrisch betriebenen Lkw. Für Oberleitungs-Lkw wurde dieser Schritt im Rahmen des Vorhabens „Roadmap OH-Lkw“ bereits durchgeführt (Jöhrens et al., 2018). Der dort entwickelte methodische Ansatz zur Identifizierung von Oberleitungsstrecken wird in dieser Studie auf die Analyse potentieller Anwendungsfelder für Batterie-Lkw (ohne Stromabnehmer) erweitert.

Die Studie gliedert sich in drei Teile: Im ersten Teil (Kap. 2) wird eine Marktanalyse durchgeführt, die sowohl die Nachfrageseite (d. h. die Transportmärkte) als auch die Angebotsseite (d. h. den Fahrzeugmarkt) umfasst. Ziel ist es hierbei, wesentliche Treiber und Hemmnisse für den Einsatz von Elektrofahrzeugen zu identifizieren und die auftretende Bandbreite der Einsatzprofile grob zu charakterisieren.

Im zweiten Teil (Kap. 3) werden die Verkehrsmengen aus einem deutschlandweiten Verkehrsmodell hinsichtlich ausgewählter Eignungsparameter aufbereitet. Anhand der vorangegangenen Marktanalyse werden plausible Annahmen zu den auftretenden Einsatzprofilen getroffen und die Verkehrsströme im Verkehrsmodell entsprechend kategorisiert. Auf dieser Basis können die Einsatzprofile hinsichtlich ihrer Vollkosten mit Dieselantrieb sowie mit verschiedenen elektrischen Antriebskonfigurationen bewertet werden. Hierbei wird ein ganzheitlicher Kostenansatz gewählt, der beispielsweise auch Kosten für notwendige betriebliche Ladeinfrastruktur sowie Zeitkosten einbezieht. Aus dem Vergleich der Vollkosten zwischen den Antrieben ergibt sich die wirtschaftliche Rationalität für einen Antriebswechsel aus Betreibersicht. Ergänzt wird diese Betrachtung durch Auswertung einiger qualitativer Parameter, die weitere Treiber bzw. Hemmnisse der Umstellung auf Elektroantriebe abbilden.

Auf dieser Grundlage werden schließlich die untersuchten Verkehrsmengen nach ihrem betriebswirtschaftlichen Potential für den Einsatz elektrischer Nutzfahrzeuge klassifiziert (Kap. 4). Die Berechnung wird dabei sowohl für erwartete techno-ökonomische Parameter der Markteinführungsphase (Referenzjahr 2025) als auch für ein Massenmarktszenario 2030 durchgeführt. Dabei wird sowohl nach Fahrzeugklasse als auch nach technischer Auslegung der Batterie-Lkw (Reichweite) differenziert und die Rolle Infrastruktur zum Zwischenladen auf das wirtschaftliche Potential explizit untersucht. Das Ergebnis stellt zusammen mit der bereits durchgeführten Potentialanalyse für O-Lkw eine wichtige Grundlage dar, um im weiteren Verlauf des Vorhabens den sich ergebenden Bedarf an öffentlicher Lade- und Oberleitungsinfrastruktur abzuleiten.

2 Status quo beim Lkw-Verkehr

2.1 Analyse des Transportmarkts (Nachfrageseite)

Die Potentiale der Absatzmärkte für Batterie-Lkw fußen auf dem Transportmarkt als Teil der Logistik. Die Logistik wird für die folgenden Betrachtungen definiert als die Gesamtheit der Aktivitäten des Transportierens, Lagerns, Umschlagens sowie unterstützender planerischer und administrativer Aktivitäten.[1] Die Logistik ist sehr vielschichtig aufgebaut; für den Einsatz von Batterie-Lkw ist die Transportsicht, insbesondere der Blick auf die Rolle der Lkw-Transporte, entscheidend. Grundsätzlich lässt sich die Gesamtlogistik in folgende Logistiksegmente aufteilen:

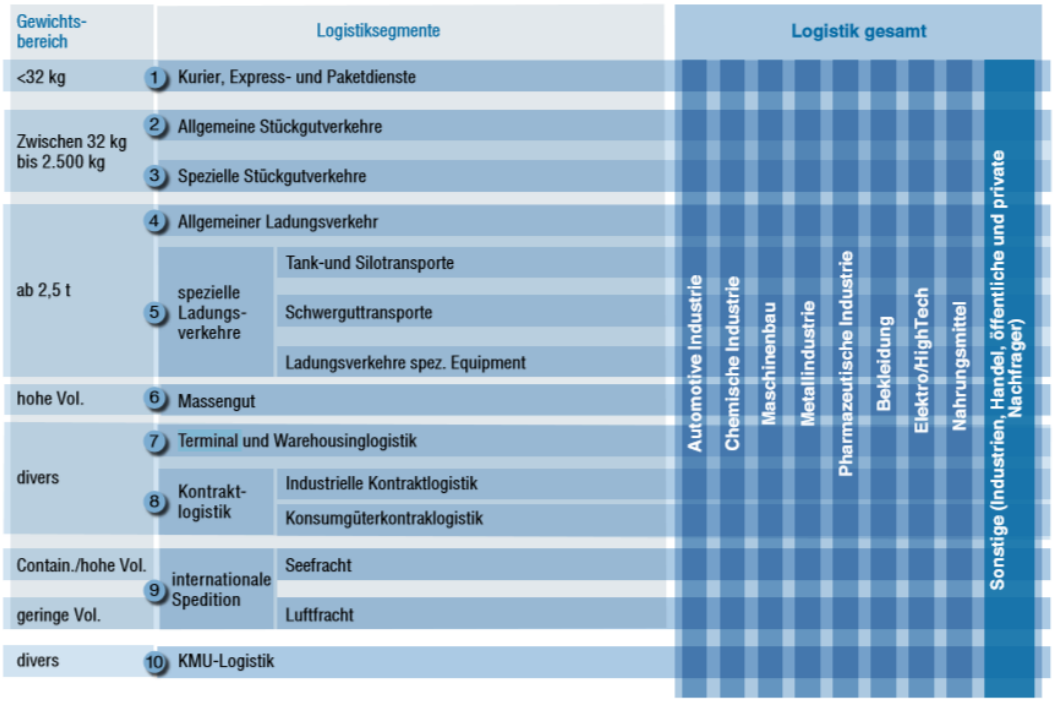


Abbildung 1: Übersicht aller Logistiksegmente (Quelle: Fraunhofer SCS)

Jedes Logistiksegment bedient andere Gewichts- bzw. Volumenbereiche und weist eine unterschiedlich starke Involvierung von Lkw-Transporten auf. Diese Lkw-Transporte unterliegen zusätzlich Nutzungsprofilen, welche unterschiedlich für den Einsatz von Batterie-Lkw geeignet sind. Ein Nutzungsprofil umfasst Merkmale wie Transportweite, die Anzahl von Stopps für Be- und Entladevorgänge sowie typische Sendungsgewichte. Betrachtet werden hier nur Logistikprozesse, bei denen Lkw in nennenswertem Umfang als Transportmittel für den Gütertransport zum Einsatz kommen. Somit werden in dieser Ausarbeitung Transporte mit alternativen Transportmitteln (Bahn, Schiff, Flugzeug) nicht näher untersucht. Zur besseren Einordnung der oben genannten Logistiksegemente sind im

[1] Analog zur Abgrenzung der TOP100 der Logistik – Studienreihe (Verweis nachfolgende als Quelle: Fraunhofer SCS).

folgenden Diagramm (Abbildung 2) die jeweilige Anzahl der Beschäftigten und der Fahrzeuge abgebildet.

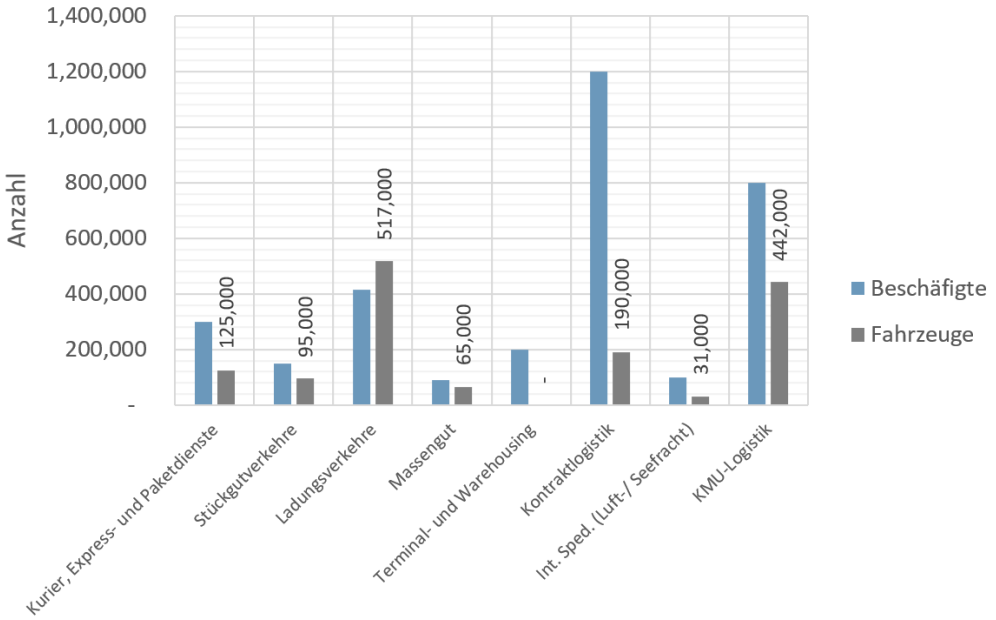


Abbildung 2: Gesamtwirtschaftliche Daten der Logistiksegmente (Quelle: Fraunhofer SCS Schätzungen)

Aufgrund eines geringen Involvierungsgrades von Lkw-Transporten bzw. einer geringen Relevanz für die Potentialbestimmung von Batterie-Lkw werden die Logistiksegmente Massengut, Terminal- und Warehousing, internationale Spedition und KMU-Logistik in diesem Abschnitt nicht näher betrachtet. Eine genauere Begründung für den Ausschluss dieser Segmente ist in Anhang A4 zu finden. Die als relevant erachteten Segmente werden im Folgenden kurz beschrieben und hinsichtlich ihrer Voraussetzungen für den Einsatz von Batterie-Lkw eingeordnet. Im Anhang A4 erfolgt eine detailliertere Beschreibung inkl. der Auflistung der wichtigsten Akteure/Flottenbetreiber.

2.1.1. KEP-Logistik

Die KEP-Logistik umfasst Kurier-, Express- und Paketdienste mit einem regulären Sendungsgewicht von weniger als 32 kg. Ca. 300 Tsd. Beschäftigte (Vollzeitbasis) sind in diesem Teilmarkt aktiv und rund 125 Tsd. Zustellfahrzeuge im Einsatz.

Der typische Ablaufprozess in der KEP-Logistik (Abbildung 3) besteht aus Langstrecken zwischen Depots und einem oder mehreren zwischengeschalteten Umschlags-Hubs, und Kurzstrecken von den Depots zu den Kunden und umgekehrt (Ausliefer- und Abholfahrten). Die beschriebenen Langstrecken werden auf Grund einer großen Transportmenge überwiegend mit Sattelzugtransporten abgewickelt. Die Kurzstrecken werden überwiegend mit Klein-Lkw bzw. Lieferwagen abgewickelt; vor allem diese Abhol- bzw. Auslieferfahrten (Paketzustellung) bieten ein großes Potential für den Einsatz von Batterie-Lkw (geringe Fahrweiten sowie zunehmende Restriktionen für den Einsatz von Verbrennungsmotoren im städtischen Bereich).

Abbildung 3: Ablaufprozess der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Der Umsatz der KEP-Logistik nimmt einen Anteil von ca. 8 % am Gesamtvolumen der Logistik in Deutschland ein. Dieses Segment profitiert vom wachsenden Internethandel. Generell ist von einem zukünftigen Wachstum der KEP-Logistik auszugehen.[1]

2.1.2. Stückgutverkehre

Stückgutverkehre sind i. d. R. Sammeltransporte von individuell etikettierten Trocken- und Stapelgütern ohne besondere Behandlungsanforderungen im Gewichtsbereich oberhalb von ca. 31 kg bis zu ca. 2.500 kg, welche auf dem Landweg transportiert werden. Vom Standard abweichende Stückgüter erfordern eine spezialisierte Behandlung in Form von einem speziellen Stückgutverkehr, wie beispielsweise der Hängetransport von Kleidung. Zwar wird der Großteil an Kleidung kartoniert bzw. palletiert transportiert, aber zu einem kleinen Anteil wird Kleidung auch auf Bügeln und an Gestängen hängend transportiert, insbesondere hochwertige und empfindliche Ware. Darüber hinaus haben sich spezielle Stückgutnetze etabliert für den Transport von High-Tech-Gütern, Geldtransporten und das Zwei-Mann-Handling im Bereich der Auslieferung von Stückgütern an private Haushalte. In diesen teils sehr kleinen Nischen sind meist nur wenige deutschlandweit relevante Anbieter zu finden. Insgesamt zählt das Segment des Stückgutverkehrs ca. 148 Tsd. Beschäftigte (Vollzeit) und rund 95 Tsd. Fahrzeuge im Einsatz, wovon ca. 46 Tsd. als Verteiler-Lkw eingesetzt werden. Der Umsatzanteil des gesamten Stückgutverkehrs am Gesamtlogistikumsatz liegt bei 7,7 %.

Der Ablaufprozess (Abbildung 4) teilt sich in Lang- und Kurzstrecken auf. Die Langstrecken haben große Transportweiten, große Transportmengen und werden mit schweren Lkw durchgeführt, mit entsprechenden Hürden für den Einsatz von Batterie-Lkw. Großes Potential für den Einsatz von Batterie-Lkw bieten hingegen die Kurzstrecken, welche in Form von Abhol- bzw. Ausliefertouren mit vielen Be- und Entladestopps auftreten und überwiegend mit Klein-Lkw durchgeführt werden.

[1] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK), KEP-Studie 2020

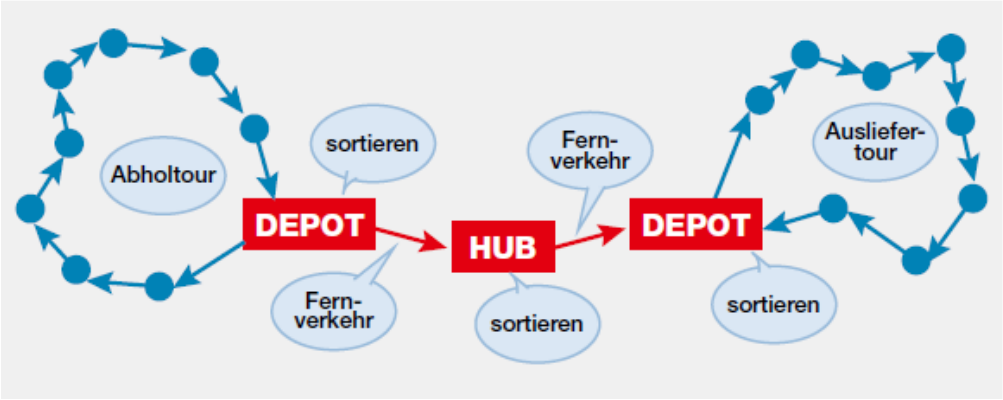


Abbildung 4 Ablaufprozess der Stückgutverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Die Zukunftsperspektiven des allgemeinen Stückgutverkehrs werden als relativ stabil eingeschätzt. Es kann ein Wachstum im Gleichschritt mit der Gesamtentwicklung der Logistik zwischen + 2-4 % pro Jahr angenommen werden[1], ausgenommen von dieser Wachstumsaussicht ist der Zeitraum der aktuellen Corona-Krise. Tendenziell kann zukünftig von einer weiteren Spezialisierung des Marktes ausgegangen werden. Im Segment der speziellen Stückgutverkehre ist von einem künftigen weiteren Wachstum auszugehen, da dieses Segment in Teilen ebenfalls vom wachsenden Internethandel profitiert.

2.1.3. Ladungsverkehre

Ladungsverkehre bilden den Transport von Komplettladungen von Rampe zu Rampe ab. Die Sendungsgewichte sind i. d. R. schwerer als 2,5 t. Vom Standard abweichende Ladungsgüter erfordern eine spezialisierte Behandlung in Form eines speziellen Ladungsverkehrs. Spezielle Ladungsverkehre werden mit speziell ausgerüsteten Fahrzeugen durchgeführt, beispielsweise Tankaufbauten für flüssige Güter, für Fertigautomobiltransporte oder sperrige sog. Jumbo-Transporte. Zum Segment der Ladungsverkehre (allgemeine zuzüglich spezielle Ladungsverkehre) zählen ca. 415 Tsd. Beschäftigte (Vollzeitbasis) und rund 517 Tsd. Fahrzeuge, davon sind ca. 75 Tsd. schwere Lkw. Der Umsatzanteil dieses Segments am Gesamtvolumen der Logistik in Deutschland liegt bei 20 %.

Im Gegensatz zu den Stückgutverkehren werden die Ladungsverkehre aufgrund ihrer Komplettladungen i. d. R. direkt von den verladenden Unternehmen zu den Empfängern transportiert (Abbildung 5). Dabei werden die Güter sowohl über kurze als auch über lange Distanzen befördert. Kurze Transportdistanzen eignen sich in Abhängigkeit vom transportierten Gut eher für den Einsatz von Batterie-Lkw. Gleichzeitig bietet der Be- und Entladeprozess eines größeren Lkws mit einem gut ausgenutzten Ladevolumen i. d. R. ein großes Zeitfenster an einer bestehenden Infrastruktur (Rampe), welches gute Voraussetzungen bietet um Elektroladeinfrastruktur zu nutzen, wenn vorhanden. Prinzipiell könnte dann ein Laden der Batterie während des Be- und Entladens der Transportgüter möglich werden.

[1] Auf Basis der TOP100 der Logistik – Marktstudien (Fraunhofer SCS).

Abbildung 5: Ablaufprozess der Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Grundsätzlich nimmt das Segment der Ladungsverkehre innerhalb der Logistik eine wichtige Rolle ein und wird in der gesamten Wirtschaft nachgefragt. Die Marktentwicklung der Ladungsverkehre wird daher von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung bestimmt. Auch hier ist ein Wachstum im Gleischschritt mit der Entwicklung der Logistik zwischen + 2-4 % je Jahr anzunehmen[1], ausgenommen von dieser Wachstumsaussicht ist wiederum der Zeitraum der aktuellen Corona-Krise.

2.1.4. Kontraktlogistik

Die Kontraktlogistik umfasst sämtliche fest vertraglich vereinbarte langfristige Logistikdienstleistungen, wie etwa die Produktions-, und Ersatzteilversorgung in der Industrie oder der Distributionslogistik im Handel. Energetisch relevante Aufbauten (insb. Kühlung) sind hier häufig im Einsatz. Dieses Logistiksegment besteht aus ca. 1.200 Tsd. Beschäftigten (Vollzeitbasis) und rund 190 Tsd. Fahrzeugen. Der Umsatzanteil am Gesamtvolumen der Logistik in Deutschland beträgt 28 %.

Logistikdienstleistungen der Kontraktlogistik werden wie oben erwähnt durch individuelle langfristige Einzelverträge (typischerweise mit einer Dauer von 1 bis 5 Jahren) geregelt, was in vielen Fällen z. B. im Vergleich zu Ladungsverkehren die Planbarkeit für die Betreiber erhöhen und dadurch die Einführung neuer Technologien erleichtern könnte. Die Ausgestaltung der Verträge und entsprechenden Logistikprozesse ist sehr unterschiedlich, daher kann nicht von einem Standardprozess ausgegangen werden. Ein Teil der Dienstleistungen kann allerdings durch direkte Transporte einer Komplettladung zwischen einem Zentrallager und einem Bestimmungsort abgebildet werden (sog. Shuttleverkehre). Diese Transporte eignen sich besonders für den Einsatz von Batterie-Lkw. Vom Transportprozess her (Abbildung 6) sind diese zum Großteil identisch mit den Ladungsverkehren, allerdings sind sie fest mit vertraglich vereinbarten Zusatzdienstleistungen verbunden.

Abbildung 6: Ein typischer Transportprozess der Kontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Ein typisches Beispiel dieses weit verbreiteten Transportprozesses stellt die Lebensmittelbranche dar, bei welcher Lebensmittel vom Zentrallager in die Supermärkte befördert werden. Auf der einen Seite ergeben sich dadurch lange Standzeiten an bekannten Orten, welche zum Laden der Batterie genutzt werden können. Auf der anderen Seite wirken sich bei diesen Transporten oft eingesetzte Zusatzverbraucher (z. B. Kühlung) eher negativ auf den

[1] Auf Basis der TOP100 der Logistik – Marktstudien (Fraunhofer SCS).

Einsatz von Batterie-Lkw aus, da diese Zusatzverbraucher ebenfalls durch die Batterie mit Energie versorgt werden müssen.

Das Wachstum dieses Segments orientiert sich stark am Wachstum der Gesamtlogistik und des Bruttoinlandsprodukts des Bundesrepublik Deutschland. Aufgrund der aktuellen Corona-Krise lässt sich keine valide Zukunftsprognose zur Entwicklung geben.

2.1.5. Zusammenfassung

Tabelle 1 vermittelt einen zusammenfassenden Überblick der beschriebenen Logistiksegmente, deren Umsatzgrößen, deren Marktkonzentrationen, deren Fahrzeugcharakteristika sowie eine kurze Eignungseinschätzung für den Einsatz batteriebetriebener Lkw. Insgesamt lassen sich die Erkenntnisse aus der Analyse der Logistiksegmente wie folgt zusammenfassen:

- Bei Stückgutverkehren und KEP-Logistik ist zwischen Inter-Hub-Verkehren und Ausliefer-/Abholfahrten zu differenzieren. Erstere beinhalten z. T. lange Distanzen und damit technische und wirtschaftliche Herausforderungen für den Einsatz von Batterie-Lkw. Letztere weisen aus verschiedenen Gründen eine prinzipiell gute Eignung auf.
- Ladungsverkehre bieten grundsätzlich gute Voraussetzungen für die Energieaufnahme von Batterie-Lkw während des Verladeprozesses. Eine Herausforderung stellen die oftmals großen Distanzen dar. Zu den nachfragestärksten Güterabteilungen im Bereich der Ladungsverkehre gehören Metallerzeugnisse und Holzwaren, die auch in der Eignungsanalyse der Güterabteilungen (Kap. 4.5) relativ hohe Eignungswerte aufweisen.
- Die Kontraktlogistik ist grundsätzlich geeignet, aber unterliegt einigen Hürden. Die wichtigsten Nachfragerbranchen Lebensmittel und Automobil verdeutlichen dies sehr gut (siehe Kap. 4.5). Im Bereich der Lebensmittellogistik stellen vor allem die oftmals erheblichen Zusatzverbraucher (Kühlung) eine Herausforderung dar.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Logistiksegmente

Logistik-segment	Anteil an Gesamtlogistikumsatz	Markt-konzentration	Eignung für Batteriebetrieb	Fahrzeugarten mit Anzahl zusammenfassen
KEP-Logistik	Anteil an Gesamtlogistik: ca. 8% Entwicklung: Wachstum stark überdurchschnittlich	stark konzentriert Anteil der 10 wichtigsten Akteure: ca. 75%	Sehr gut geeignet: Ausliefer-/ Abholfahrten mit kurzen Entfernungen und kleinen Fahrzeugen Bedingt geeignet: Depot-Hub-Verbindungen mittels Fernverkehr mit hohem Transportvolumen	• Zustellfahrzeuge, Klein-Lkw (3,5t oder leichter) • Sattelzüge, Wechselbrücken im Fernverkehr Anzahl: 125.000 Zustellfahrzeuge
Stückgutverkehre	Anteil an Gesamtlogistik: ca. 7,7% Entwicklung: Wachstum durchschnittlich	Konzentriert Anteil der 10 wichtigsten Akteure: ca. 35%	Gut geeignet: Kurzstrecken mit vielen Be- und Entladestopps bei Ausliefer-/Abholtouren Bedingt geeignet: Hub-Verbindungen mittels Fernverkehr mit hohem Transportvolumen	• Klein-Lkw mit Hebebühne (oftmals 7,5t oder schwerer) und Koffer- bzw. Spezialaufbauten • Sattelzüge und schwere Lkw im Fernverkehr (Netzwerk) Anzahl: 49.000 Fahrzeuge 46.000 Verteilerfahrzeuge
Ladungsverkehre	Anteil an Gesamtlogistik: ca. 20% Entwicklung: Wachstum durchschnittlich	Verteilt Anteil der 10 wichtigsten Akteure: ca.10 %	Geeignet: Lange Standzeiten an Rampeneinrichtungen, welche nach Installation von Ladeinfrastruktur zum Laden der Batterie genutzt werden können. Grundsätzlich wird die Eignung durch Gütergewicht und Länge der Transportstrecke maßgeblich beeinflusst.	• i.d.R. schwere Lkw/ Sattelzüge • Standardaufbauten, Koffer-Lkw • Sonderaufbauten für spezielle Güter Anzahl: 442.000 Fahrzeuge 75.000 schwere Lkw im speziellen Ladungsverkehr
Kontraktlogistik	Anteil an Gesamtlogistik: ca. 28% Entwicklung: Wachstum leicht unterdurchschnittlich	Verteilt Anteil der 10 wichtigsten Akteure: ca. 9 %	Geeignet: Lange Standzeiten an bekannten Orten Langfristige Vertragsbindungen ermöglichen eher die Einführung neuer Technologien. Bedingt geeignet: Sonderaufbauten mit Zusatzverbraucher wie Kühl-Lkw	• i.d.R. schwere Lkw/ Sattelzüge • Standardaufbauten • Sonderaufbauten (z.B. Kühl-Lkw) Anzahl: 190.000 Fahrzeuge

2.2 Analyse des Fahrzeugmarkts (Angebotsseite)

Gegenwärtig ist der Nutzfahrzeugmarkt nahezu vollständig durch den Diesel-Verbrennungsmotor geprägt. Die mit der hohen Energiedichte des Kraftstoffs verbundenen hohen erzielbaren Reichweiten und kurzen Tankvorgänge ermöglichen einen sehr flexiblen Fahrzeugeinsatz. Während die Elektromobilität bei den Pkw mittlerweile den Sprung in den Massenmarkt vollzogen hat, ist im Lkw-Segment mit dieser Entwicklung hingegen erst in den kommenden Jahren zu rechnen[1]. Gleichzeitig steigt der Handlungsdruck auf die Lkw-Hersteller, den CO_2-Ausstoß Ihrer Fahrzeugflotten zu reduzieren. Bis zum Jahr 2025 soll der CO_2-Aus-

[1] (Vgl. Jordbakke et al., 2018)

stoß gemäß der EU-Verordnung zur Festlegung von CO_2-Emisssionen für neue schwere Nutzfahrzeuge[1] im Vergleich zu 2019 um 15 % sinken, bis 2030 um 30 %. Hersteller, die den vorgeschriebenen Flottengrenzwert nicht einhalten, müssen Strafzahlungen leisten[2]. Damit nimmt die Bedeutung von elektrisch angetriebenen Lkw künftig zu.

In Deutschland lag der Anteil von elektrischen Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 t bei nur etwa 0,1 % des Fahrzeugbestandes im Jahr 2019[3]. Das Fahrzeugangebot ist jedoch auch noch sehr beschränkt. Gegenwärtig existieren auf dem Markt hauptsächlich Lkw mit Elektromotor von kleineren Unternehmen, die konventionelle Lkw zu Elektro-Lkw umrüsten. Ihre Stückzahlen belaufen sich auf nur wenige Einheiten pro Jahr und die Fahrzeuge werden größtenteils kundenindividuell produziert[4]. Daneben drängen neue Hersteller rein elektrischer Lkw wie Nikola oder Hyzon auf den europäischen Markt. Am Markt verfügbar sind die Fahrzeuge der genannten Hersteller jedoch noch nicht[5][6][7]. Auch die klassischen Fahrzeughersteller, die den Markt mit Diesel-Lkw aktuell dominieren, steigen nun verstärkt in die Entwicklung emissionsfreier Lkw ein. Aktuell werden erste Fahrzeuge entwickelt und in Praxistests in Kooperation mit Firmen erprobt. Darüber hinaus haben die ersten Modelle namhafter Hersteller die Marktreife erreicht und sind in kleinen Stückzahlen am Markt verfügbar. Die Serienproduktion einzelner Modelle in höheren Stückzahlen sowie die Einführung weiterer Fahrzeugmodelle werden bei nahezu allen OEM für die kommenden Jahre erwartet[8][9]. Außerdem haben die größten europäischen Lkw-Hersteller angekündigt, ab dem Jahr 2040 nur noch Lkw herzustellen, die mit Strom, Wasserstoff oder Biokraftstoffen fahren[10].

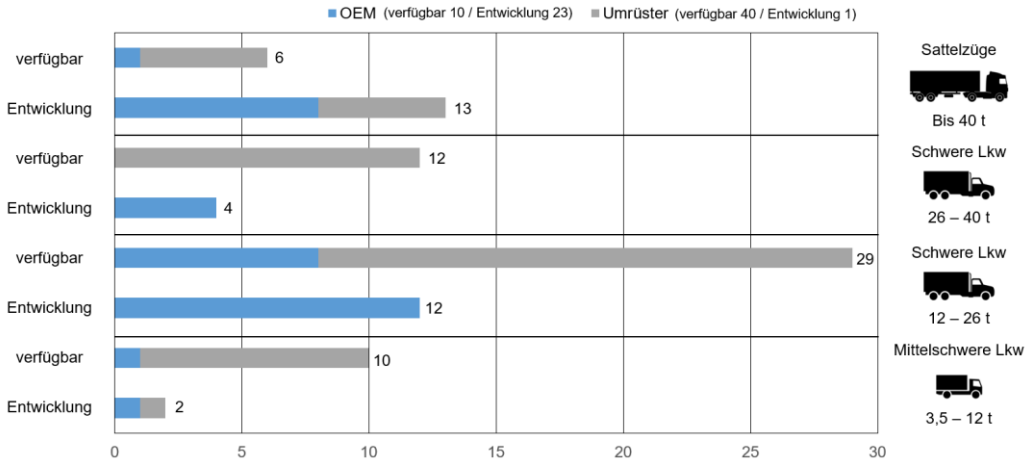


Abbildung 7: Marktverfügbarkeit von Elektro-Lkw nach Größenklasse und Art der Hersteller (Quelle: Lkw-Datenbank des ifeu)

[1] (Vgl. Europäische Union, 2019)
[2] https://blog.ostwestfalen.ihk.de/umwelt-energie/eu-gesetzgeber-einigen-sich-auf-co2-flottengrenzwerte-fuer-lkw/
[3] (Vgl. ACEA, 2021)
[4] https://www.nzz.ch/zuerich/entsorgung-elektrische-kehrichtlastwagen-kommen-bald-nach-zuerich-ld.1539815
[5] https://ecomento.de/2020/07/24/hyzon-motors-eroeffnet-europa-zentrale-fuer-wasserstoff-lastwagen/
[6] https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/nikola-e-truck-rollt-in-ulm-vom-band/
[7] https://www.electrive.net/2020/05/05/byd-plant-europa-start-noch-2020/
[8] https://www.electrive.net/2020/09/15/scania-startet-verkauf-von-bev-und-phev-lkw/
[9] https://www.electrive.net/2020/11/09/man-und-daimler-weiten-e-lkw-praxistests-aus/
[10] (Vgl. ACEA, 2020)

Aktuell liegt der Fokus des verfügbaren Marktangebotes überwiegend auf den Gewichtsklassen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 26 t (siehe Abbildung 7). Die überwiegende Anzahl dieser Lkw besitzt nach aktuellen Hersteller-Spezifikationen Batteriekapazitäten von bis zu 350 kWh. Damit können nach den Herstellerangaben teilweise maximale Reichweiten von bis zu 300 km ohne Zwischenladen erreicht werden. Der Einsatzbereich der bisherigen Elektro-Lkw beschränkt sich aus diesem Grund bisher vorrangig auf den städtischen Verteilverkehr bzw. Regionalverkehr. Fahrzeuge mit erzielbaren Reichweiten über 500 km ohne Zwischenladen sind im bisherigen Marktangebot nicht verfügbar. Der Fernverkehr kann deshalb mit dem bisherigen Fahrzeugportfolio ohne Stopp für das Zwischenladen bisher in der Regel noch nicht abgedeckt werden. Eine weitere Alternative für den Fernverkehr sehen einige Hersteller deshalb in Brennstoffzellen-Fahrzeugen und haben bereits vereinzelte Fahrzeugmodelle angekündigt[12].

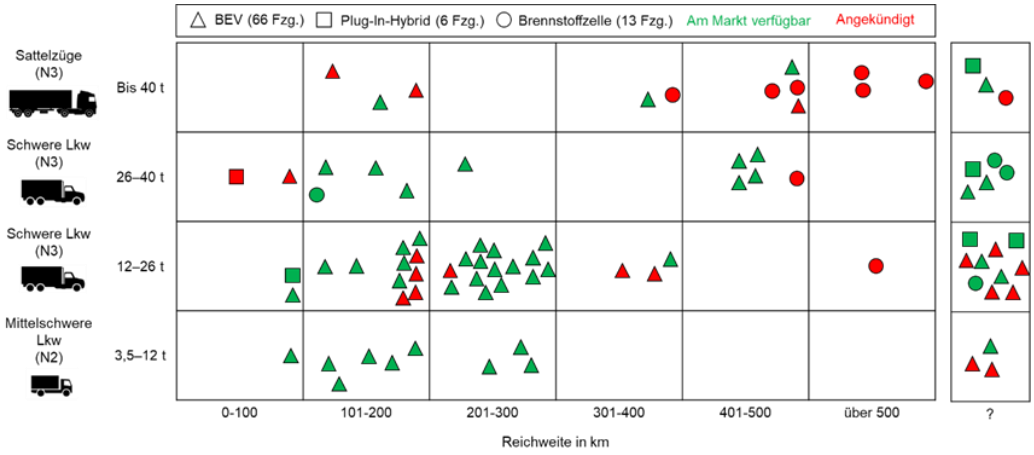


Abbildung 8: Aufteilung am Markt verfügbarer und angekündigter Elektro-Lkw nach Gewichtsklasse und elektrischer Reichweite (Quelle: Lkw-Datenbank des ifeu)

Wie aus der vorangegangene Abbildung 8 zu erkennen ist, unterscheiden sich die typischen erzielbaren elektrischen Reichweiten der Nutzfahrzeuge zwischen den Größenklassen und somit auch Einsatzgebieten. Während für den Verteilverkehr häufig Reichweiten bis zu 200 km ohne Zwischenladen ausreichen, sind für den Fernverkehr meist deutlich höhere Reichweiten erforderlich.

Für das Nachladen der Batterie stehen den Elektro-Lkw prinzipiell zwei Ladekonzepte zur Verfügung. Typischerweise kann dabei zwischen dem Langsam-Laden (z. B. über Nacht im Depot) und dem Schnell-Laden (z. B. während Pausenzeiten an Raststätten) unterschieden werden. Die beiden Konzepte können je nach Anwendungsfall aber auch kombiniert werden. Insbesondere abhängig von der benötigten nachzuladenden Energiemenge und der zur Verfügung stehenden Zeit für den Ladevorgang unterscheiden sich auch die Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Ladeleistung und damit eng verknüpft auch die Kosten für die Bereitstellung der jeweiligen Ladeinfrastruktur. Abbildung 9 gibt einen Überblick über typische erforderliche Ladeleistungen in Abhängigkeit von der Ladedauer eines angenommenen Ladevorgangs von 20 % bis 80 %.

[1] https://www.automobil-industrie.vogel.de/hyundai-liefert-erste-brennstoffzellen-lkw-in-europa-aus-a-947638/ abgerufen am 24.11.2020

[2] https://www.electrive.net/2020/09/16/daimler-plant-bz-lkw-mit-1-000-kilometern-reichweite/ abgerufen am 24.11.2020

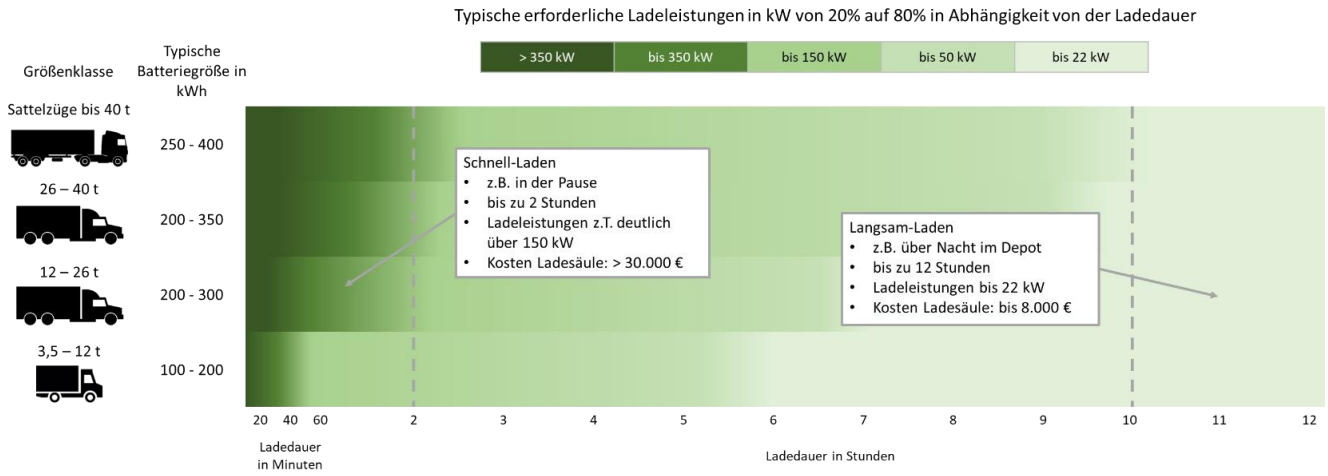


Abbildung 9: Typische erforderliche Ladeleistung in Abhängigkeit von der Größenklasse und der Ladedauer

Es ist zu erkennen, dass gerade im Bereich des Schnell-Ladens (linker Abschnitt) meist Ladeleistungen von mehr als 300 kW erforderlich sind, um den Energiespeicher innerhalb von 1-2 Stunden von 20 % auf 80 % nachladen. Dagegen ist beim mehrstündigen Langsam-Laden (rechter Abschnitt) in vielen Fällen bereits eine Ladeleistung von 22 kW ausreichend. Die Kosten für die Errichtung und Instandhaltung der Ladestationen sind dabei insbesondere von der Ladeleistung abhängig. Bei den angegebenen typischen Kosten in Abbildung 9, ist jedoch zu beachten, dass zusätzlich zu den Kosten der Ladestationen weitere Kosten (z. B. Anschluss- und Tiefbauarbeiten) für die Inbetriebnahme der Ladeinfrastruktur hinzukommen können.

Aufgrund der geringen Stückzahlen an Elektro-Lkw gibt es für das Laden von Nutzfahrzeugen aktuell keine dedizierte Lkw-Ladeinfrastruktur. Aktuelle Ladestationen für Lkw orientieren sich daher stark an den Normen (z. B. Stecker, Kommunikation) und den erzielbaren Ladeleistungen aus dem Pkw-Bereich. Das bedeutet, dass im Bereich des Schnell-Ladens aktuell eine Ladeleistung von maximal 350 kW erreicht werden kann. Der Strom wird dabei mittels handelsüblicher CCS-Stecker übertragen. Für das Zwischenladen ohne nennenswerten Zeitverlust z. B. an Rasthöfen im Fernverkehr ist dies insbesondere mit den voraussichtlich noch höheren Akkukapazitäten künftiger Lkw-Modelle jedoch nicht immer ausreichend. Dies hat auch die Automobilindustrie erkannt und strebt deshalb für künftige Ladesäulen Ladeleistungen von bis zu 4,5 MW an[1].

[1] https://www.charin.global/technology/mcs/

3 Vorgehen bei der Eignungsanalyse für Elektroantriebe

3.1 Grundlegende Herangehensweise

In diesem Kapitel wird die Methodik für die Bestimmung der wirtschaftlichen Potentiale für BEV-Lkw beschrieben. Die Kernfrage ist dabei stets, welche Einsatzprofile starke Treiber bzw. geringe Hürden für die Umstellung auf BEV-Betrieb aufweisen. Das grundlegende Vorgehen ist in Abbildung 10 dargestellt.

Die Analyse basiert auf dem Verkehrsmodell „PTV Validate“, das auf Basis von statistisch erfassten Güterströmen die Anzahl täglicher Lkw-Fahrten für einzelne Quell-Ziel-Beziehungen (Relationen) angibt. Diese Modellgrundlage wird in Abschnitt 3.2 beschrieben. Zweite Säule der Untersuchung ist ein Modell zur Berechnung der Vollkosten aus Betreibersicht (Total Cost of Ownership, kurz: TCO). Die betrachteten Kostenkomponenten und ihre Herleitung werden in Abschnitt 0 erläutert. Zusätzlich werden nicht-monetäre Eignungskriterien in der Analyse berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.5).

Um die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Antriebsvarianten (und auch verschiedener Batteriegrößen) für die Fahrzeugbetreiber auf den einzelnen Relationen vergleichen zu können, werden den modellbasierten Verkehrsströmen heuristisch typische Einsatzprofile zugeordnet (siehe Abschnitt 3.4). Für diese Einsatzprofile werden anschließend die TCO berechnet sowie auf nicht-monetäre Eignungskriterien untersucht.

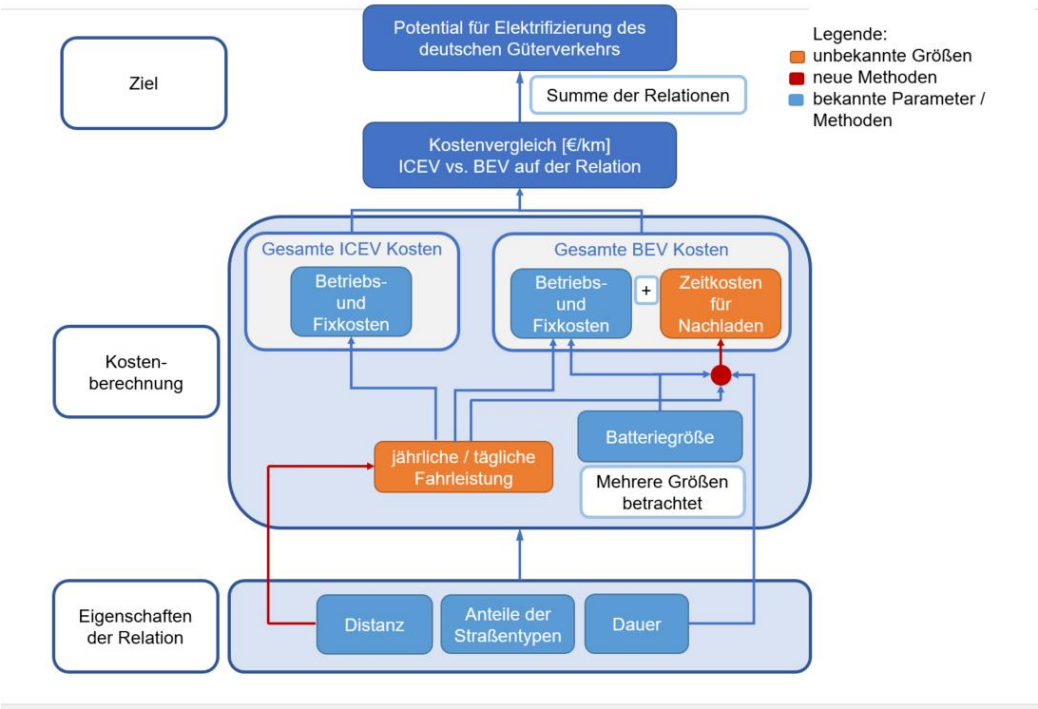


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der wirtschaftlichen Potentialberechnung (Eigene Darstellung)

3.2 Aktivitätsdaten der Fahrzeuge

Verkehrsströme lassen sich in einem Verkehrsmodell berechnen und darstellen, in dem die Verkehrsnachfrage durch entsprechende Berechnungsverfahren in Routen auf ein hinterlegtes Streckennetz umgelegt wird. Hierfür sind Informationen zu Quellen und Zielen von Fahrten notwendig. Je detaillierter die Eingangsdaten und Nachfrage aufbereitet sind, um so feiner ist die Granularität der Ergebnisse. Für die Potentialabschätzung verschiedener Antriebsarten ist es notwendig, dass die Daten zum einen in verschiedenen Fahrzeuggrößenklassen als auch getrennt nach Güterabteilungen vorliegen.

3.2.1. Modellgrundlage Straßengüterverkehr

PTV Validate ist ein deutschlandweites Verkehrsmodell, welches die Verkehrsnachfrage für den privaten Pkw-Verkehr und den Lkw-Wirtschaftsverkehr in mehr als 10.000 Verkehrsbezirken abbildet. Im Durchschnitt enthalten die Bezirke ca. 8.000 Einwohner, wobei in städtischen Gebieten die Verkehrszellen kleiner als in ländlichen Gebieten sind. Zum Lkw-Verkehr zählen alle Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) größer 3,5 t. Die Lkw-Matrix wurde im Rahmen der Modellerstellung erzeugt. Für die Erstellung der Gesamt-Lkw-Matrix wurden die 10 NST/R-Güterbereiche ebenso berücksichtigt, wie verschiedene Fahrzeuggrößen in Abhängigkeit des Transportgutes. Das Streckennetz umfasst mehr als 4,3 Mio. Streckenabschnitte und besteht aus allen Strecken mit Verbindungsfunktion, dem sogenannten Hauptstraßennetz. Damit das Modell umfassend die Verkehre in Deutschland abbildet, ist das europäische Ausland ebenfalls in das Modell integriert und enthält alle für Deutschland relevanten Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehre.

Im Vorläuferprojekt „Roadmap OH-Lkw“ (Jöhrens et al., 2020) wurde ein Verfahren zur Aufteilung und Differenzierung der Lkw-Matrix entwickelt, welches für dieses Projekt übernommen wurde. Die Gesamt-Lkw-Matrix des Verkehrsmodells PTV Validate wurde anhand der Güterverkehrsmatrizen der transportierten Tonnen der Bundesverflechtungsprognose (BVU et al., 2014) aufgeteilt. Diese sind in 20 Güterabteilungen (GA) gemäß NST-2007 differenziert (vgl. Tabelle 2). Im Rahmen des Projekts Roadmap OH-Lkw wurden die einzelnen Güterabteilungen einer Analyse unterzogen, die die Affinität bzgl. der Oberleitungstechnologie geprüft hat. Hierbei wurden verschiedene Kriterien wie verwendete Lkw-Größen und -Arten, Entfernungsverteilung bzw. Reichweite sowie logistische Einsatzplanung berücksichtigt. Güterabteilungen mit einem besonders niedrigen Affinitätsindex (GA 1-3, namentlich Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Energieträger sowie Bergbauerzeugnisse) sowie nicht näher spezifizierte Güterabteilungen (GA 19/20) wurden für die weitere Betrachtung außen vorgelassen. Die indexbasierte Analyse bzgl. der Eignung für Transporte mit Batterie-Lkw in der vorliegenden Studie (siehe Kap. 4.5) bestätigte diese Auswahl im Wesentlichen auch für die hier untersuchte Fragestellung, sodass der gleiche Datensatz des Verkehrsmodells verwendet werden konnte. Separiert davon bestehen eigenständige Matrizen des kombinierten Verkehrs. Im verfeinerten Modell wird hinsichtlich der Fahrzeuggrößen die Einteilung des Kraftfahrtbundesamts (KBA) verwendet (3,5-12 t zGG; 12-26 t zGG; Sattelzüge).

Tabelle 2: Betrachtete relevante Güterabteilungen

Güterabteilung	Beschreibung
GA 4	Nahrungs- und Genussmittel
GA 5	Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren
GA 6	Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse
GA 7	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse
GA 8	Chemische Erzeugnisse
GA 9	Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips etc.)
GA 10	Metalle und Metallerzeugnisse
GA 11	Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.
GA 12	Fahrzeuge
GA 13	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.
GA 14	Sekundärrohstoffe, Abfälle
GA 15	Post, Pakete
GA 16	Geräte und Material für die Güterbeförderung
GA 17	Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter
GA 18	Sammelgut

In einem separaten Schritt werden die transportierten Tonnen auf Lkw-Fahrten umgerechnet. In Abhängigkeit der Fahrtenlänge erfolgt zudem die Anpassung der Matrizen aufgrund von Leerfahrten (vgl. Abbildung 11).

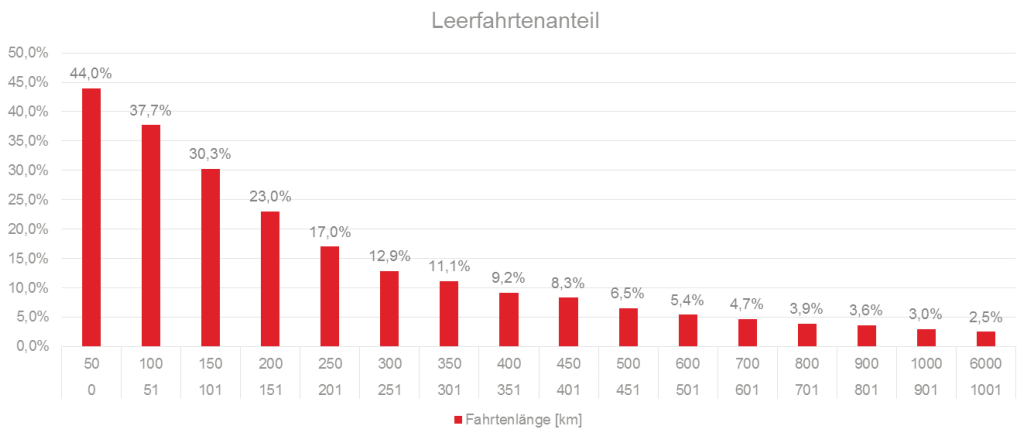


Abbildung 11: Leerfahrtenanteile gemäß (KBA, 2011)

Die Lkw-Matrizen der Verflechtungsprognose 2030 stellen die Grundlage zur Ermittlung der Prognosefaktoren dar. Auch für die Prognose 2030 stehen Fahrtenmatrizen auf Validate-Bezirksebene unterteilt nach Güterabteilungen und Fahrzeugtypen zur Verfügung. Daraus kann die Verkehrsentwicklung bis zum Jahr 2030 abgeleitet werden. Dieses stellt das Referenzjahr für alle in dieser Studie verwendeten Verkehrsdaten dar.

Im Ergebnis liegt mit PTV Validate ein Verkehrsmodell vor, das für Analyse und Prognose Verkehrsstärken pro Streckenabschnitt und Relationen in der genannten Differenzierung enthält. Kalibriert ist das Modell anhand vorliegender Dauerzähldaten. Durch die Verwendung von PTV Validate können unter anderem folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie viele und welche Art von Fahrzeugen und Güterabteilungen nutzen welche Streckenabschnitte?
- Was sind Start und Ziel einzelner Fahrten?
- Welche Streckenabschnitte werden bei diesen Fahrten genutzt (Routenverfolgung)?
- Welche Länge haben die Relationen und wie hoch ist der Zeitbedarf?

Die Grenzen des Modells liegen in der Darstellung von modalen Wirkungen im Güterverkehr und einer Quantifizierung im Schienennetz. Des Weiteren gilt es zu beachten, dass bei einer zu kleinräumigen Differenzierung, insbesondere in Kombination mit einer Aufteilung in verschiedene Gütergruppen die Aussagekraft abnimmt.

3.2.2. Räumliche Beschränkung auf innerdeutsche Relationen

Fast die Hälfte der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs auf deutschen Strecken wird 2030 durch grenzüberschreitende Verkehre erbracht (BVU et al., 2014). Laut BVWP-Prognose nimmt zwischen 2010 und 2030 der grenzüberschreitende Güterverkehr um 42% und der Transitverkehr sogar um 52% zu. Für den Einsatz von sowohl Batterie-Lkw sind hier jedoch besondere Hemmnisse zu beachten. Dazu gehören neben der offenen Frage des Infrastrukturausbaus im Ausland auch Fragen der Standardisierung und Interoperabilität. Die internationale Koordination zu diesen Fragen benötigt voraussichtlich einigen zeitlichen Vorlauf. Im Sinne der hier angestrebten konservativen Potentialbewertung und des auf den Zeitraum bis 2030 beschränkten Zeitrahmens wird dieses Potential daher zunächst außer Acht gelassen. Die Einbeziehung von internationalen Relationen ist daneben auch modelltechnisch mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden. Die benötigten Daten liegen in der erforderlichen Qualität, Auflösung und Symmetrie nur für innerdeutsche Relationen vor.

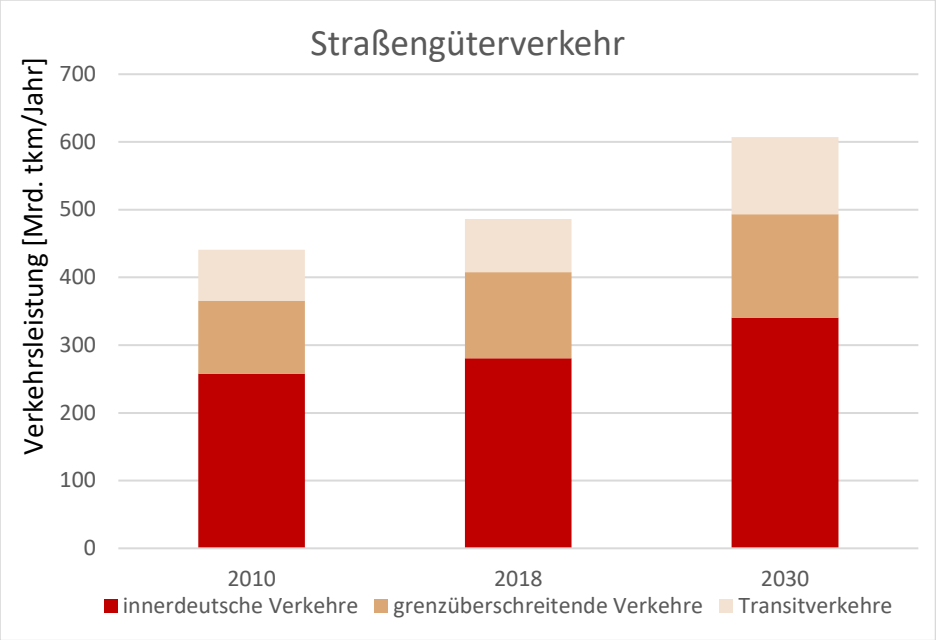


Abbildung 12: Veränderungen im Straßengüterverkehr 2010-2030 nach (BVU et al., 2014) und (KBA, 2019)

Abbildung 12 zeigt die prognostizierte Entwicklung der Verkehrsleistung von 2010 ausgehend bis zum Jahr 2030. Es ist deutlich zu erkennen, dass bis 2030 von einer weiteren Zunahme der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr auszugehen ist. Mit zunehmender Marktdurchdringung von Batterie-Lkw steigt auch der Einfluss der angenommenen Verkehrsmengen auf das berechnete Potential. Um eine realistische Abschätzung der Potenziale für Batterie-Lkw vor allem im Hinblick auf einen möglichen Massenmarkt um das Jahr 2030 herum vorzunehmen, werden alle Berechnungen mit den Prognosedaten 2030 vorgenommen.

3.2.3. Kenngrößen der modellbasierten Ergebnisse für den Straßengüterverkehr

Die Entfernungsverteilung von Fahrten im innerdeutschen Verkehr („Relationslänge“) zeigt insbesondere im Entfernungsbereich bis 50 km Unterschiede in den Anteilen bei den verschiedenen Lkw-Größenklassen. Während bei den schweren Lkw-Größenklassen über 12t zGG jeweils ein Anteil von weniger als 60% auf Fahrten mit einer Länge kleiner 50 km entfällt, entfällt über 80 % der Fahrleistung von Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht kleiner 12 t auf Fahrten innerhalb dieses Distanzbereichs. Demgegenüber geht der Anteil langer Fahrten über 100 km Länge bei den leichten Lkw deutlicher zurück als bei den schweren. Abbildung 13 zeigt die Entfernungsverteilungen für die verschiedenen Lkw-Größenklassen sowie gemittelt über die Größenklassen.

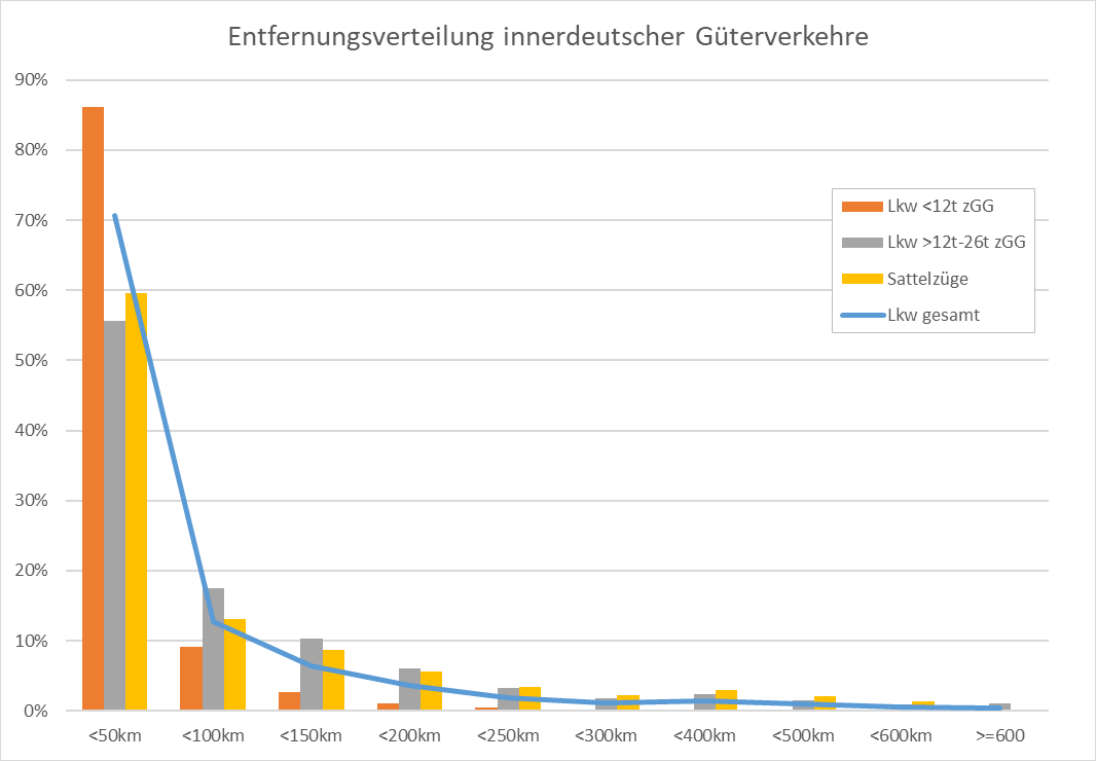


Abbildung 13: Fahrtweitenverteilung verschiedener Lkw-Größenklassen und Lkw gesamt, bezogen auf die Anzahl der Fahrten (Quelle: PTV Validate)

Die Verläufe zeigen, dass ein Großteil der Einzelfahrten nur kurze Distanzen abwickeln, die Fahrleistung wird aber durch die langen Fahrten dominiert. Insbesondere Lkw mit einem zul. Gesamtgewicht über 12 t erbringen einen überwiegenden Teil der Fahrleistung auf Bundesautobahnen, wie die nachfolgenden Abbildungen zeigen. Der Anteil der kleinen Lkw mit einem zul. Gesamtgewicht kleiner 12 t ist auf Bundesautobahnen mit ca. 11 % eher gering (Abbildung 14 und Abbildung 15). Neben der Verteilung der Fahrleistung auf die Straßenkategorien ist auf der sekundären Achse ergänzend dargestellt, welchen Anteil die einzelnen Fahrzeugarten an der gesamten Lkw-Fahrleistung haben.

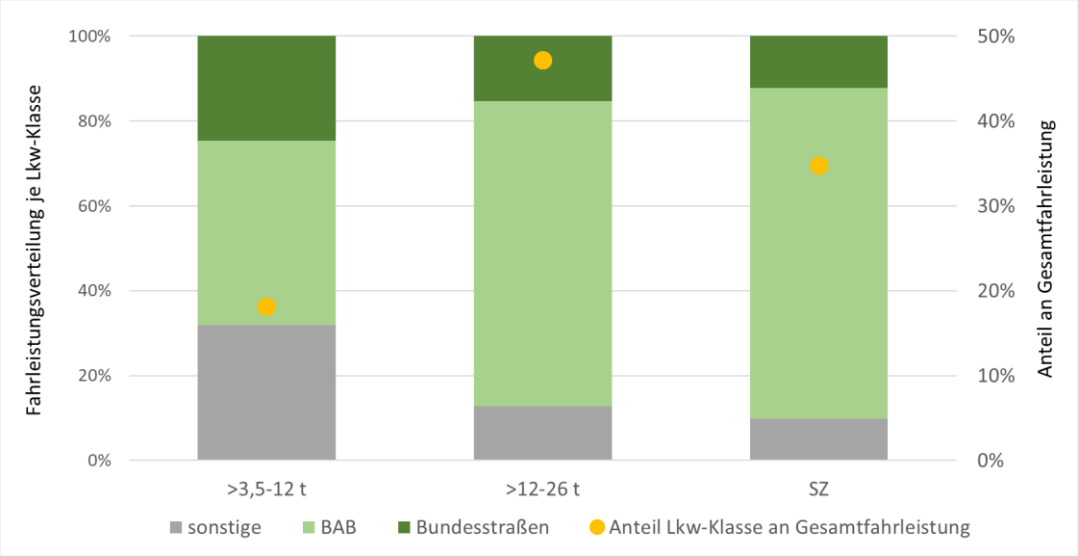


Abbildung 14: Fahrleistungsverteilung auf verschiedenen Straßenkategorien (Quelle: PTV Validate)

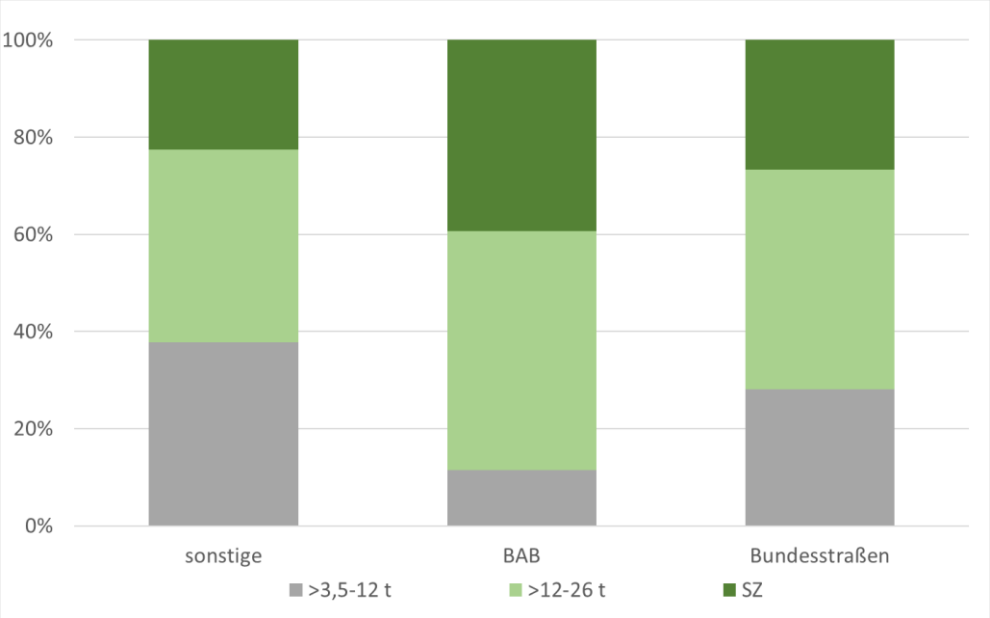


Abbildung 15: Fahrleistungsverteilung auf verschiedener Lkw-Größenklassen in Abhängigkeit der Straßenkategorie (Quelle: PTV Validate)

Wird die Fahrweitenverteilung getrennt nach den Güterabteilungen ausgewertet (vgl. Abbildung 16), so lässt sich erkennen, dass insbesondere die Anteile im Nahbereich (Fahrtlängen unter 50 km) je Güterabteilung um mehr als 25 % zwischen 42 % für die Güterabteilung 18 („Sammelgut“) und 71% für die Güterabteilung 14 („Sekundärstoffe, Abfälle“) differieren. Auch im Fahrtweitenraum zwischen 50 km und 150 km weichen die einzelnen Güterabteilungsanteile noch mit mehr als 10 % untereinander ab. Die mittleren Fahrweiten unterscheiden sich also zwischen den Güterabteilungen erheblich.

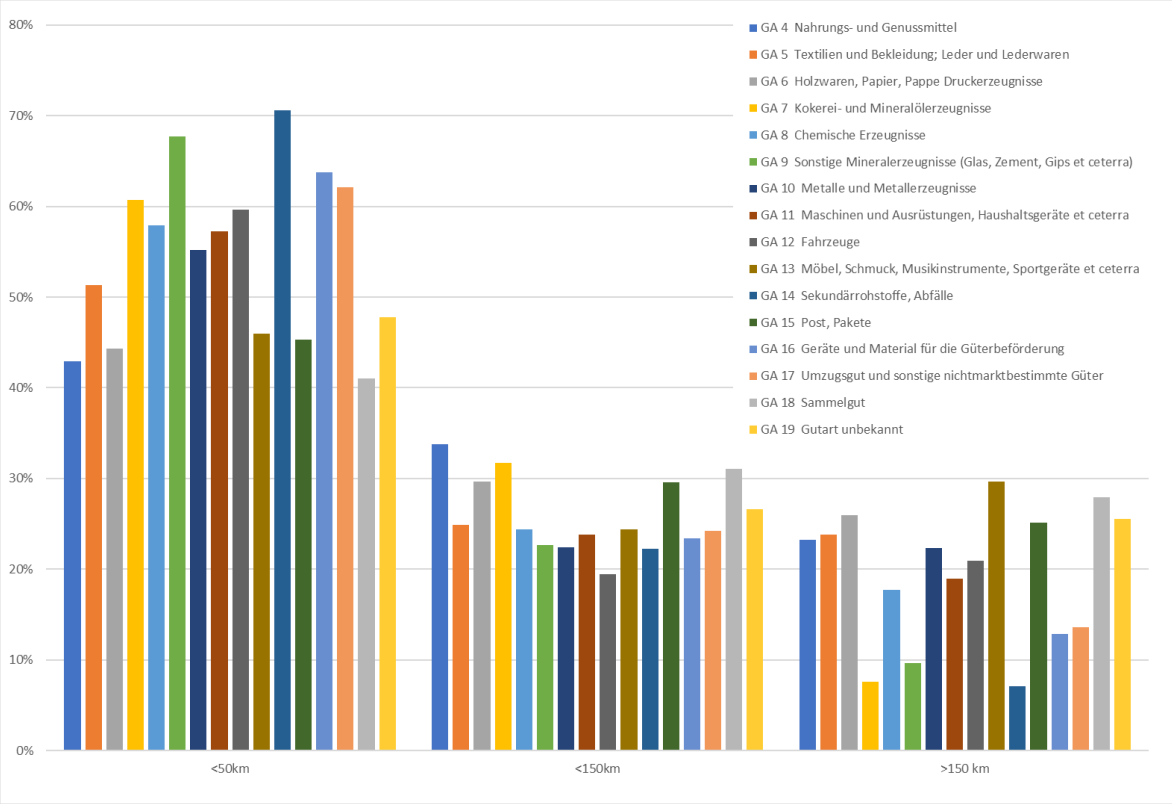


Abbildung 16: Fahrtweitenverteilung verschiedener Güterabteilungen der Lkw Größenklasse >12t zGG (Quelle: PTV Validate)

Für Lkw > 12 t liegt jeweils eine Nachfragematrix je Güterabteilung vor. Für die Aufteilung auf die beiden Lkw-Größenklassen 12-26 t zGG und Sattelzüge wurde ein deterministisches Wahlmodell unter Verwendung der EVA2-Funktion (vgl. (Lohse / Schnabel, 2011)) genutzt.

Es wurde für jeden Fahrzeugtyp und für jede Güterabteilung eine Bewertungsfunktion ermittelt. So können die Ergebnisse auf Güterabteilungsebene je Fahrzeuggrößenklasse und Fahrtweite ausgewertet werden. Darüber hinaus sind Auswertungen einzelner Streckenabschnitte möglich.

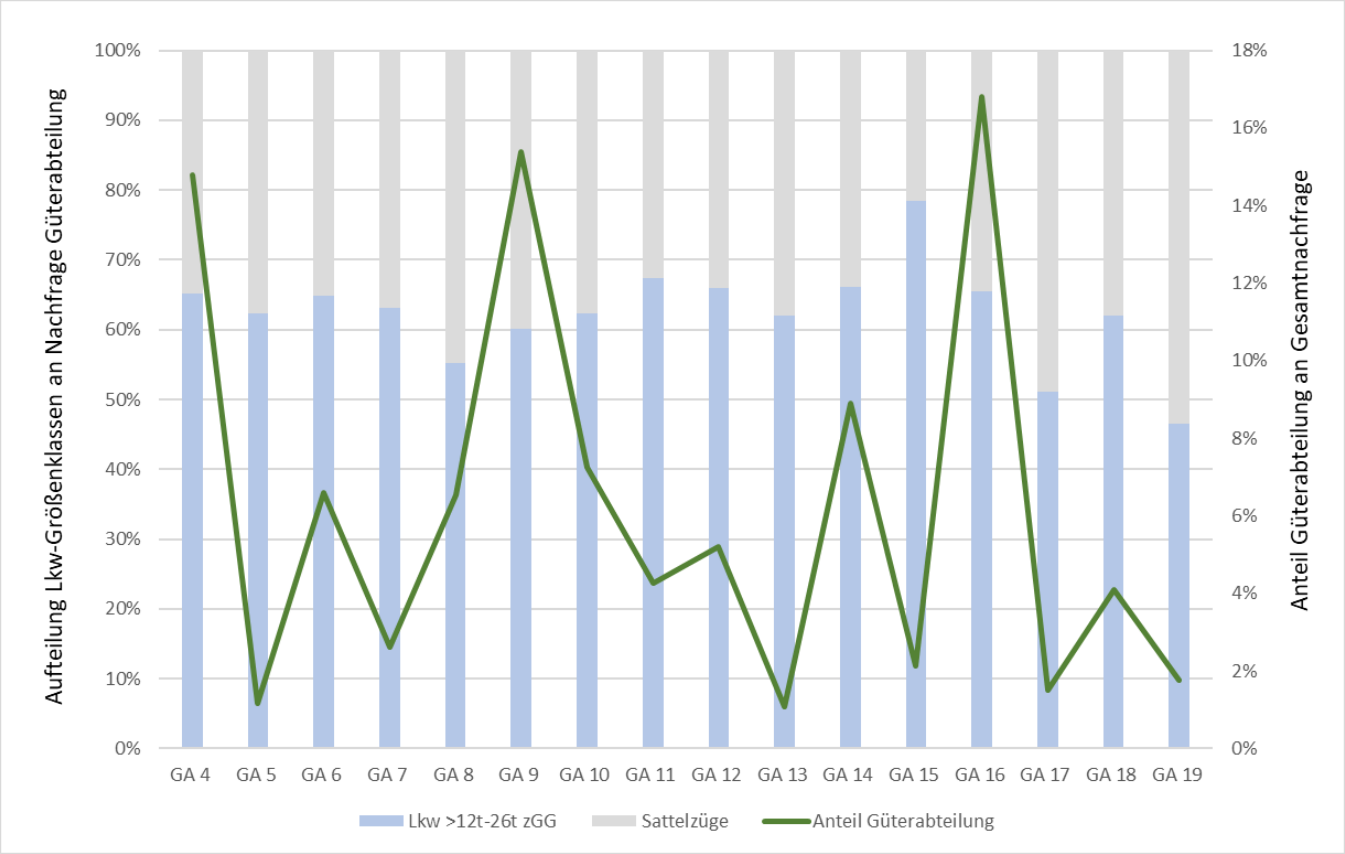


Abbildung 17: Aufteilung der Gesamtnachfrage (Lkw-Fahrten) auf die Fahrzeugklassen für alle betrachteten Güterabteilungen (Quelle: PTV Validate)

3.2.4. Aufbereitung der Modellergebnisse

PTV Validate ist ein deutschlandweites Verkehrsmodell, dessen Verkehrszelleneinteilung die administrativen Grenzen auf Gemeindeebene einhält. Dadurch lassen sich die Ergebnisse auf Kreisebene aggregieren und für die darauf aufbauenden Berechnungsschritte sinnvoll zusammenführen. Das Streckennetz wurde in verschiedene Straßenkategorien aufgeteilt, die für die weitere Betrachtung von Interesse sind:

1. Bundesautobahnen
2. Bundesstraßen mit 4 und mehr Fahrstreifen
3. Bundesstraßen mit 2 Fahrstreifen
4. Sonstige Außerortsstraßen
5. Sonstige Innerortsstraßen

Der Binnenverkehr innerhalb eines Kreises ist durch die sehr feine Verkehrszellenstruktur von PTV Validate weitestgehend enthalten. Lediglich die Binnenverkehre innerhalb der Validate-Feinzellen fehlen. Diese sind mit einem Fahrtenanteil von ca. 3% vernachlässigbar, da der Zellbinnenverkehr aufgrund der kleinräumigen Zellgröße keine Fahrleistungsrelevanz hat.

Die Übergabematrix des Verkehrsmodells für die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Analysen zur Potentialbewertung von Batterie-Lkw enthält für insgesamt etwa 1,25 Mio. Quell-Ziel-Beziehungen (Relationen) die folgenden Angaben:

- Quell-Landkreis
- Ziel-Landkreis
- Belastung je Route
- Routenlänge
- Zeitbedarf
- Anteil Länge je Straßenkategorie und Route
- Anteil Güterabteilung je Quelle-Ziel-Relation und Fahrzeuggrößenklasse

3.3 Kosten pro Antrieb und Fahrzeug

Um die Wirtschaftlichkeit verschiedener Antriebsoptionen für ein auf einer bestimmten Relation verkehrendes Fahrzeug vergleichen zu können, werden in dieser Studie die Vollkosten der Fahrzeuge für die Betreiber ermittelt (Total Cost of Ownership, TCO). Der Fokus liegt hierbei auf Kostenbestandteilen, die sich zwischen verschiedenen Antriebsoptionen signifikant unterscheiden. Die übrigen Kostenbestandteile werden bei den Berechnungen allerdings dennoch berücksichtigt, um die Signifikanz der ermittelten Differenzkosten einordnen zu können.

Die Kosten werden dabei jeweils für ein Dieselfahrzeug (Referenz) und für Batteriefahrzeuge mit einer Reichweite von ca. 100, 200, 300, 400, 500 und 600 km berechnet, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Definition der BEV-Lkw

Reichweite*	Batteriekapazität [kWh]				
	Lkw 3,5-7,5t	Lkw 7,5-12t	Lkw 12-18t	Lkw 18-26t	SNF ≥26t
100 km	91,0	96,8	108,3	123,2	149,5
200 km	186,2	198,4	222,3	253,0	305,7
300 km	285,9	305,2	342,4	390,0	469,0
400 km	390,5	417,5	469,2	534,9	639,9
500 km	500,2	535,8	603,2	688,2	818,9
600 km	615,5	660,5	745,1	850,9	1.006,6

Anmerkung: **die tatsächliche Reichweite hängt von einer Vielzahl von Faktoren (Beladung, Steigung, Temperatur etc.) ab. Die definierten (Brutto-)Batteriekapazitäten gelten für einen Standardfall im Jahr 2030.*

Hinsichtlich der Fahrzeugklassen weist die Verkehrsdatengrundlage eine Differenzierung zwischen den drei Größenklassen Lkw <12t, Lkw 12-26t und Lkw >26t + Sattelzüge auf, für die Kostenberechnung ist jedoch eine feinere Differenzierung sinnvoll. Zum einen unterscheiden sich die Fahrzeugpreise und Verbräuche innerhalb dieser Größenklassen und zum anderen sind unterschiedliche Mautsätze zu entrichten. Demnach werden die Verkehrsdaten zusätzlich unterteilt. Diese Unterteilung erfolgt anhand der Jahresfahrleistungen der jeweiligen Unterfahrzeugklassen nach dem Trendszenario aus TREMOD 6.1 (ifeu, 2021) für das Jahr 2030. Die Größenklasse Lkw <12t teilt sich zu 69 % auf Lkw <7,5t (GK 0) und zu 31 % auf Lkw 7,5-12t (GK 1) auf. Bei der Größenklasse Lkw 12-26t gibt es eine Aufteilung der Relationsdaten von 24 % auf Lkw 12-18t (GK 2) und 76 % Lkw 18-26t (GK 3)[1]. Diese vereinfachte Herangehensweise berücksichtigt keine Abhängigkeit von den Einsatzradien und somit der Relationslänge. Die Aufteilung wird daher auf alle gegebenen Relationen gleichmäßig angewendet. Die TCO-Werte pro Fahrzeug werden in €/km berechnet, wobei alle während der Haltedauer des Fahrzeugs anfallenden Kosten (fixe und variable Kosten) auf die in dieser Zeit erbrachte Fahrleistung umgelegt werden.

Die vorgenannte Einteilung der Lkw in Größenklassen basiert auf dem zulässigen Gesamtgewicht der Gespanne und ist für die Ableitung der Leistungsparameter und Kosten relevant. In der Verkehrsdatengrundlage (Kap. 3.2) sind Lastzüge hingegen entsprechend der jeweiligen Zugfahrzeuge eingeordnet. Ein Lastzug aus zweiachsigem Zugfahrzeug und zweiachsigem Anhänger mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 36 t wird somit in den Verkehrsdaten in der Größenklasse 12 t – 26 t geführt. Um daraus resultierende Inkonsistenzen zu vermeiden, werden Lastzüge aus der Potentialberechnung in dieser Untersuchung ausgenommen. Für weitere Erläuterungen siehe Abschnitt 4.1.

[1] Die Größenklasse der Lkw >26t + Sattelzüge werden aus der Datengrundlage so übernommen und im Folgenden als GK 4 bezeichnet.

Die Kosten werden für jedes Lkw-Einsatzprofil separat ermittelt. Ein Einsatzprofil ist dabei jeweils einer bestimmten Relation zugeordnet, und zwar entsprechend des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorgehens. In der Praxis ist es in vielen Fällen nicht möglich, einzelne Fahrzeuge einer bestimmten Relation zuzuordnen, da sich die Einsatzprofile je nach Logistiktyp von Tag zu Tag ändern können oder auch mehrere Relationen regelmäßig durch ein bestimmtes Fahrzeug bedient werden können. Für das hier verfolgte Ziel, die wirtschaftlichen Potentiale für ein großes Ensemble von Fahrzeugen zu bestimmen, ist diese Vereinfachung aber zulässig, da wesentliche Kenngrößen der auf einer Relation verkehrenden Fahrzeuge (v. a. die typische Jahres- und Tagesfahrleistung) dennoch abgeschätzt werden können (siehe Abschnitt 3.4.2).

Folgende Kostenkomponenten werden in der TCO-Berechnung berücksichtigt:

- Fahrzeug
  - Wertverlust (abhängig vom Fahrzeugpreis, der Jahresfahrleistung und Haltedauer)
  - Finanzierungskosten (abhängig vom Fahrzeugpreis, der Anzahlung, dem Zinssatz und der Kreditdauer)
- Betriebsmittel
  - Energie (abhängig vom Verbrauch und den Energiepreisen)
  - Harnstoff (abhängig vom Dieselverbrauch)
  - Schmierstoffe (abhängig vom Dieselverbrauch und von der Fahrleistung)
- Maut
- Fahrzeuguntersuchung, Steuer und Versicherung
  - Haupt- und Abgasuntersuchung sowie Sicherheitsprüfung
  - Kfz-Steuer
  - Kfz- und Kaskoversicherung
- Instandhaltung und Verschleiß
  - Wartung, Instandhaltung und Pflege
  - Reifen
- Sonstiges (antriebsunabhängig)
  - Fahrer/Fahrerin (Personalkosten)
  - Anhänger/Auflieger
  - Fuhrparkverwaltung, Unterstellung und sonstige Transaktionskosten (hier nicht berücksichtigt)

Neben den Betriebskosten werden in der TCO-Berechnung auch Zeitkosten, die die Kosten für ggf. auftretende zeitliche Verzögerungen aufgrund der Ladung der Traktionsbatterien bei BEV darstellen, berücksichtigt. Im Folgenden wird die Ableitung der einzelnen Kostenbestandteile beschrieben.

3.3.1. Fahrzeug

Fahrzeugpreise

Ein Großteil der TCO-Differenz zwischen konventionellen und Batteriefahrzeugen entfällt auf die Anschaffungskosten bzw. die Abschreibung des Fahrzeugs (Wertverlust). Gleichzeitig bestehen hier gegenwärtig die größten Unsicherheiten, vor allem bei der Alterung der Komponenten unter Praxisbedingungen (insbesondere der Traktionsbatterie), der Wertentwicklung von BEV auf dem Gebrauchtwagenmarkt sowie bei den tatsächlichen Kosten für derzeitige Nutzer (da für Lkw in Kleinserie von den Herstellern selten Listenpreise genannt werden und bisher nur wenige Batteriefahrzeuge am Markt verfügbar sind).

Für diese Studie wurde ein komponentenbasiertes Berechnungsmodell für den Fahrzeugpreis entwickelt, das in Anhang A2c im Detail beschrieben ist. Es enthält sowohl eine überschlägige Kostenschätzung für diejenigen Komponenten, die für alle Antriebsvarianten identisch sind, als auch detaillierte Betrachtungen für die antriebsspezifischen Komponenten. Wesentliche Parameter des Modells sind die Fahrzeuggröße, die Antriebsleistung und die Batteriegröße. Grundsätzlich werden im Modell Produktionskosten abgeleitet, die mithilfe eines „Retail Price Equivalent Factors“ (der hier mit 1,59[1] angenommen wird) in Preise umgerechnet werden. Das Modell verwendet eine generische Funktion für die Kostendegression in Abhängigkeit des Produktionsvolumens mit einer für die Automobilindustrie typischen Parametrierung. Die angenommene Funktion wurde hinsichtlich des Produktionsvolumens an aktuellen Produktionszahlen sowie kommunizierten Zielen einiger Hersteller kalibriert und mit aktuell beobachteten Preisen abgeglichen.

In Tabelle 4 sind die sich ergebenden netto Anschaffungspreise für Lkw verschiedener Klassen und exemplarischen Auslegungen für das Jahr 2025 angegeben. Für dieses Jahr wird angenommen, dass im Bereich kleiner Lkw (< 7,5 t) bereits ein Massenmarkt für Elektro-Lkw besteht, während die größeren Lkw-Klassen dann gerade auf der Schwelle in die Volumenproduktion stehen. Dies deckt sich in etwa mit den aus der CO_2-Flottengesetzgebung resultierenden Anforderungen, wie in (Öko-Institut / Hochschule Heilbronn, 2020) beschrieben.

Tabelle 4: Netto Neufahrzeugpreise für die definierten Größenklassen im Jahr 2025

Größenklasse	ICEV	BEV (exkl. Batterie)	BEV (inkl. Batterie)*
Lkw 3,5-7,5t	41.300 €	36.900 €	56.800 € (46.600-67.400)
Lkw 7,5-12t	56.000 €	58.500 €	79.700 € (68.800-91.000)
Lkw 12-18t	66.300 €	80.400 €	116.900 € (104.100-130.400)
Lkw 18-26t	89.500 €	104.800 €	161.800 € (146.400-177.300)
SNF ≥26t	103.000 €	126.900 €	195.100 € (176.900-213.400)

Anmerkung für die Batterieauslegung: **3,5-7,5t und 7,5-12t: BEV200 (BEV100-300); 12-18t: BEV300 (BEV200-400); 18-26t und ≥26t: BEV400 (BEV300-500); Batteriepreis=107€/kWh.*

Abbildung 18 zeigt die angenommenen Batteriepreise für schwere Nutzfahrzeuge und Pkw. Es wird angenommen, dass die Preisdegression im SNF-Bereich mit rund drei Jahren Verzö-

[1] Mittelwert aus 1,53 (den Boer et al., 2013), 1,681 (Kerler et al., 2017) und 1,554 (Fries et al., 2017)

gerung an den Kunden weitergegeben werden. Hintergrund für diese Annahme ist die geringere Marktdurchdringung und somit auch ein geringerer Skaleneffekt bei den SNF. Die detaillierte Herleitung und Quellenangaben der Batteriepreise sind im Anhang A2c gegeben.

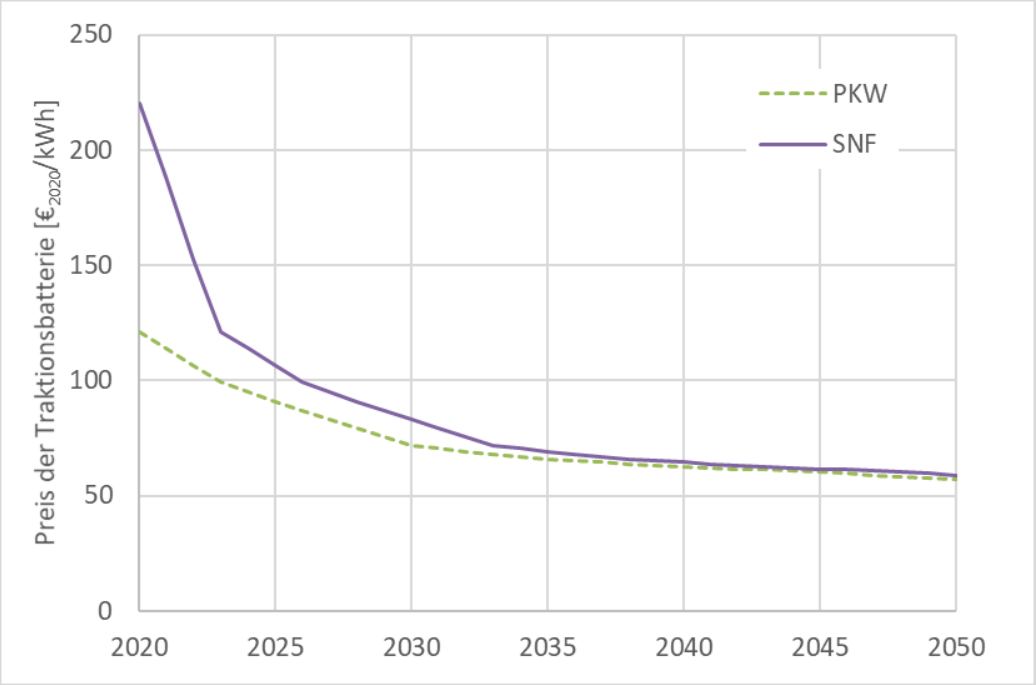


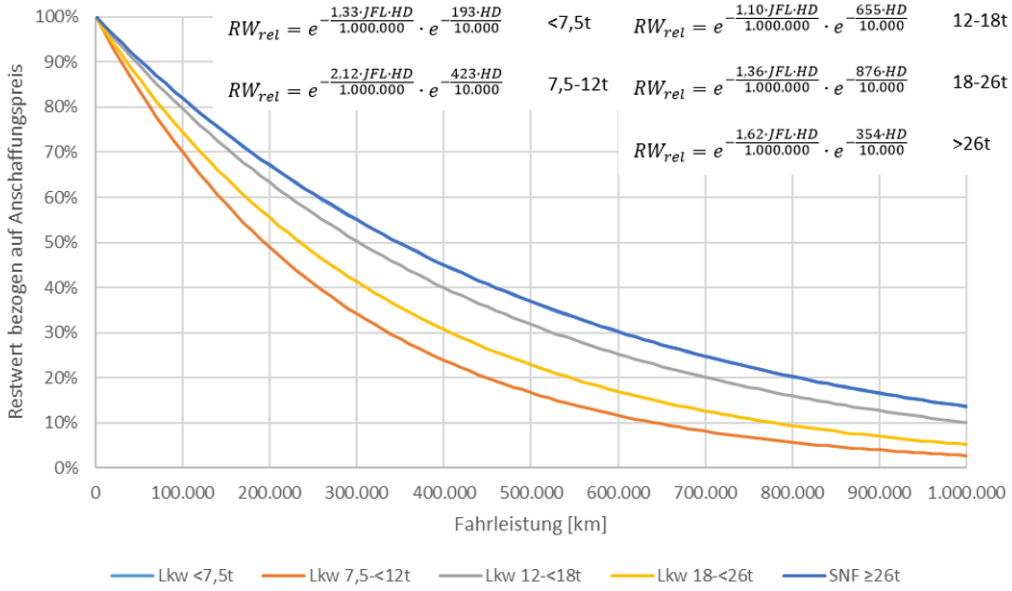
Abbildung 18: Entwicklung der Preise der Traktionsbatterie

Um die bedingt durch die Fahrzeugpreise höheren TCO von BEV ggü. ICEV zu senken, kann der Staat unterschiedliche Fördermaßnahmen ergreifen. Aktuell werden bereits Förderungen gewährt. Zum einen erhalten BEV zurzeit eine komplette Mautbefreiung (BMVI, 2020), die derzeit bis 2023 befristet ist[1]. Darüber hinaus sind elektrisch betriebene Lkw von der Kfz-Steuer befreit (Zoll.de, 2020). Die letztgenannte Förderung hat auf die TCO jedoch eine geringe Wirkung. Des Weiteren wurde eine Sonderabschreibung für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge eingeführt, die einen Anteil von 50 % im Neuzulassungsjahr gewährt (Bundesregierung, 2019). Die Sonderabschreibung wird jedoch in den weiteren Berechnungen nicht miteinbezogen, da ihre Wirkung stark von den Eigenschaften der Bilanz des Betreiberunternehmens abhängt. Neben direkten Förderungen des Fahrzeugs gibt es auch Maßnahmen, die auf die Ladeinfrastruktur abzielen. Zu nennen ist hier der Zuschuss auf die Installation einer Ladesäule (Deutscher Bundestag, 2019).

Derzeit wird vom Bund für Elektro-Lkw eine Kaufprämie von 40 % der Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren Dieselfahrzeug gewährt, maximal 40.000 €. Die Bundesregierung hat beschlossen, diese Förderung aufzustocken, so dass 80 % der Mehrkosten für die Anschaffung eines BEV ggü. eines ICEV vom Staat übernommen werden. Dieses Vorhaben wird derzeit (Stand April 2021) durch die EU-Kommission beihilferechtlich geprüft. Es ist noch nicht bekannt, auf welchen Betrag die Förderhöhe pro Fahrzeug dabei gedeckelt werden soll; denkbar wäre hier z. B. ein Maximalbetrag von 100.000 € pro Fahrzeug in Anlehnung an entsprechende Regeln bei Landesförderprogrammen (Deutscher Bundestag, 2019).

[1] Mittelfristig ist davon auszugehen, dass Elektro-Lkw im Zuge einer CO-basierten Mautspreizung bei der Lkw-Maut entlastet werden. Dazu ist derzeit eine Revision der Eurovigniettenrichtlinie in Abstimmung.

In der TCO-Berechnung wird davon ausgegangen, dass der Nutzer das Fahrzeug erwirbt und nach einer definierten Haltedauer verkauft. Der Fahrzeugrestwert wird als Prozentsatz des Kaufpreises berechnet und hängt sowohl von der Haltedauer als auch von der jährlichen Fahrleistung ab. Abbildung 19 zeigt die Restwertentwicklung in Abhängigkeit der Fahrleistung für typische Jahresfahrleistungen.



Anmerkung: *Werte gelten nur für folgende Jahresfahrleistungen: *3,5-7,5t und 7,5-12t: 29.000 km/a; 12-18t und 18-26t: 55.000 km/a, ≥26t: 95.000 km/a. Es ergeben sich andere Kurven, sofern die Jahresfahrleistungen abweichen (vgl. Anhang A2d). RW_{rel}: relativer Restwert, HD: Haltedauer [a], JFL: Jahresfahrleistung [km/a].*

Abbildung 19: Restwertentwicklung der Fahrzeuge (exkl. Traktionsbatterie) für definierte Jahresfahrleistungen

Zum einen ist der Wertverlust von BEV aufgrund eines derzeit noch nicht existenten Gebrauchtwagenmarkts für E-Lkw unbekannt und zum anderen ist der Einfluss des künftigen Markthochlaufs auf den Restwert der ICEV nicht abschätzbar. Darüber hinaus gibt es weitere Unsicherheitsfaktoren beim Restwert von Batterie-Lkw: Schnelle Innovationszyklen könnten den Restwert von Bestandsfahrzeugen überproportional mindern. Andererseits wird bei elektrischen Antrieben technisch bedingt auch eine längere Lebensdauer angenommen, da z. B. das aufwändige Schaltgetriebe entfällt und durch einfache ein- oder zweistufige Getriebe ersetzt werden. Da der Einfluss sämtlicher genannten Faktoren unbekannt ist, wird der aktuelle Wertverlust von ICEV anteilig auch für künftige SNF (unabhängig von der Technologie) übernommen.

Bei den BEV wird der Wertverlust der Traktionsbatterie separat mit Hilfe des Kapazitätsverlustes durch Batteriealterung ermittelt. Falls die Restkapazität auf weniger als 80 % des Anfangswertes fällt, wird von einem Batterietausch ausgegangen. Details zum Vorgehen finden sich in den Anhängen A2d und A2f.

Sofern eine Förderung in Gestalt einer Kaufprämie angenommen wird, hängt der Restwert stark davon ab, ob die Kaufprämie zum Zeitpunkt des Übergangs des Fahrzeugs in den Zweitmarkt immer noch besteht. Ist dies der Fall, so müsste die Förderung anteilig auch vom Restwert des Fahrzeugs abgezogen werden. Dadurch würden die Kosten für den Wertverlust

erheblich gesteigert gegenüber einer Situation, in der der Zweitmarkt nicht durch eine Neufahrzeugförderung unter Druck gerät. Aus dem Pkw-Markt zeigt sich der Effekt, dass eine Kaufprämie die Präferenz der Verbraucher in Richtung Neuwagen verschiebt. Die durch die Förderung gesenkte Preisdifferenz zwischen Neuwagen und Gebrauchtwagen führt zu einer Senkung der Preise auf dem Gebrauchtwagenmarkt (Autobild, 2021). Auf der anderen Seite befinden sich die Zweitmärkte für derzeitige Lkw größtenteils im Ausland (v. a. Osteuropa), wo zum einen andere Fördersysteme gelten und zum anderen ohnehin noch nicht klar ist, inwieweit die Rahmenbedingungen (v. a. Infrastruktur) zum fraglichen Zeitpunkt die Entstehung eines Zweitmarkts für Batterie-Lkw zulassen. Auch sind zu einem späteren Zeitpunkt staatliche Eingriffe zur Stützung des Zweitmarkts denkbar[1].

Um den Effekt der Förderung auf die Gebrauchtwagenmarktpreise zu berücksichtigen, wird der Wertverlust von Fahrzeugen mit Förderung durch Kaufprämie (Bezugsjahr 2025) erhöht bzw. der Restwert reduziert. Der Ansatz ist, dass die o. g. prozentualen Restwertkurven verwendet werden, aber als Ausgangspunkt nicht der Kaufpreis des Fahrzeugs gewählt wird, sondern der Kaufpreis abzüglich 50 % der staatlichen Prämie. Kostet ein Fahrzeug bspw. 200.000 € und es werden 50.000 € Prämie seitens des Staats gewährt, dann wird die Restwertformel auf den Ausgangswert 175.000 € (=200.000 € - 50 % * 50.000 €) angewendet. Aufgrund des niedrigeren Ausgangswerts ist auch der Restwert bei Verkauf geringer und somit der Wertverlust bzw. die Fahrzeugkosten höher. Weiterhin haben die Finanzierungskonditionen einen gewissen Einfluss auf die TCO, für die diesbezüglichen Annahmen siehe Anhang A2e. Als Finanzierungskosten werden hier die Kosten für die Tilgung der Zinsen verstanden. Der Zinssatz ist abhängig von der Laufzeit und der Kredithöhe:

$$Z = 4{,}8\% \cdot (1{,}1295 \cdot L^{-0{,}209}) \cdot (4{,}4956 \cdot K^{-0{,}139})$$

mit Z – Zinssatz [%]
K – Kredithöhe [$€_{2020}$]
L – Laufzeit [a]

Die Kredithöhe wird mit 81 % des Kaufpreises abzgl. einer möglichen Kaufprämie angesetzt. Die angenommene Laufzeit wird mit der Haltedauer gleichgesetzt (jedoch max. 7 Jahre) und hängt somit von der Jahresfahrleistung und der Größenklasse ab.

3.3.2. Energiekosten

Auch die spezifischen Energiekosten werden pro Einsatzprofil differenziert ermittelt. Grundlage hierfür sind generische Verbrauchsannahmen, die zum einen vom Antrieb und den jeweils genutzten Straßentypen (entsprechend der Verkehrsmodelldaten) abhängen. Zum anderen haben auch die transportierten Güter einen Einfluss auf den Verbrauch durch ihr spezifisches Gewicht sowie nötige Zusatzverbraucher (Hebebühne, Kühlaufbau etc.). Tabelle 5 zeigt die Verbräuche von BEV und ICEV für die Jahre 2025 und 2030. Die Verbräuche in der Tabelle spiegeln Fahrzeuge mit einer mittleren Beladung von 50 % wider. Unberücksichtigt sind hier das Zusatzgewicht der Batterien beim BEV sowie die Nebenverbraucher. Nähere Informationen hierzu befinden sich im Anhang A2b.

[1] Im Pkw-Bereich wird z. B. derzeit auch für gebrauchte Elektrofahrzeuge unter bestimmten Bedingungen eine Kaufprämie gewährt.

Tabelle 5: Angenommene Verbräuche von BEV (exkl. Batteriegewicht) und ICEV in den Jahren 2025 und 2030

GK	Straßentyp	BEV [kWh/100km]		ICEV [l/100km]	
		2025	2030	2025	2030
3,5-7,5t	AB	72	70	16,4	15,1
	AO	69	67	14,2	13,1
	IO	77	74	14,2	13,0
7,5-12t	AB	81	79	18,2	16,6
	AO	75	73	16,2	14,8
	IO	88	86	18,1	16,5
12-18t	AB	92	89	20,6	18,9
	AO	81	79	19,6	17,9
	IO	99	97	25,6	23,5
18-26t	AB	105	102	23,6	21,6
	AO	92	90	23,0	21,1
	IO	116	113	30,8	27,0
SNF ≥26t	AB	128	125	28,5	25,8
	AO	123	120	28,5	25,6
	IO	187	184	40,8	36,7

Für Strom- und Dieselpreise werden eigene Annahmen für die Entwicklungen bis 2030 abgeleitet. Die Aufteilung der elektrischen Energieaufnahme auf betriebliche und öffentliche Ladeinfrastruktur wird im Modell anhand der Eigenschaften der jeweiligen Relation bestimmt. Finanzielle Aufwendungen für die betriebseigene Ladeinfrastruktur gehen dabei indirekt über den Strompreis in die Kostenberechnung ein.

Der betriebliche Strompreis beträgt im Jahr 2025 22,8 ct_{2020}/kWh und hat einen degressiven Verlauf aufgrund der sinkenden Stromerzeugungskosten und dem Absinken der EEG-Umlage. An öffentlichen Ladesäulen ist ein Wert von 29,8 ct_{2020}/kWh im Jahr 2025 angesetzt. Der Preis für das Laden an fremden Rampen liegt mit 26,3 ct_{2020}/kWh zwischen beiden Werten. Der Dieselpreis wird im Jahr 2025 mit 1,19 $€_{2020}$/l angenommen und steigt in den Folgejahren kontinuierlich u. a. wegen der geplanten Steigerung der CO_2-Steuer an. Abbildung 20 zeigt die angenommene realen Energiepreisentwicklung (detaillierte Bestimmung der Preise und Datengrundlagen für ihre Ableitung siehe Anhang A2a).

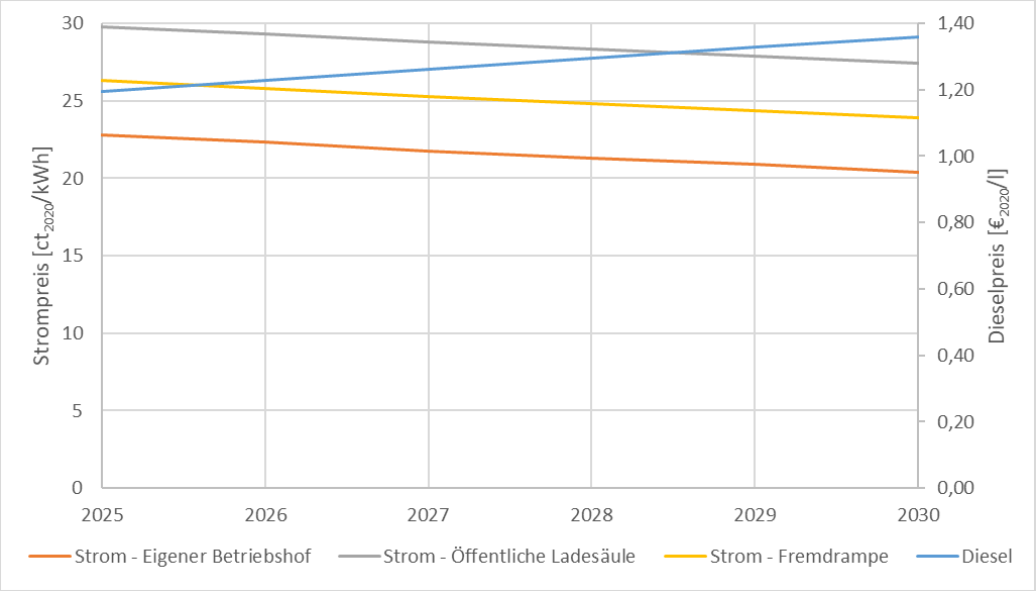


Abbildung 20: Energiepreisentwicklung 2025-2030

In den gegebenen Preisen sind nicht nur die Gestehungs-/Produktionskosten enthalten, sondern auch die Abschreibung der Infrastruktur. Für Diesel wird angenommen, dass im Durchschnitt die Dieselpreise an öffentlichen Tankstellen und an eigenen Tankstellen auf dem Betriebshof sich nur geringfügig unterscheiden. Zwar werden bei einer hohen Abnahme von Kraftstoffen Mengenrabatte gewährt, aber berücksichtigt man die Kosten für die Betriebstankstelle bei einem durchschnittlichen Fuhrpark und durchschnittlichem Verbrauch und Jahresfahrleistung erhält man Zusatzkosten, die in etwa dem Mengenrabatt entsprechen (Rechnung siehe Anhang A2a). Demnach kann der o. g. Tankstellenpreis in Näherungen für alle Fahrzeuge übernommen werden, auch wenn bspw. große Speditionen oder Unternehmen durchaus von Betriebstankstellen profitieren können.

Bei der Berücksichtigung der Kosten der Ladeinfrastruktur (LIS) für BEV wird ähnlich vorgegangen. Hier werden die Kosten für die Abschreibung sowie Wartung und Instandhaltung einer Ladesäule auf den Energieverbrauch, der durch die Ladesäule versorgten Fahrzeuge, bezogen. Hierdurch resultieren Zusatzkosten für Depot-Ladeinfrastruktur in Höhe von 3,76 ct/kWh (Rechnung siehe Anhang A2a). Bei einem Gewerbestrompreis von 21,19 ct/kWh (Strom-Report, 2020) entstehen aktuell (2020) somit Kosten in Höhe von 24,95 ct/kWh. Für das öffentliche Laden werden die aktuellen Strompreise (exkl. MwSt) für Pkw an DC-Ladesäulen angesetzt (ADAC, 2020c). Im Mittel ergibt sich ein Strompreis an öffentlichen Ladesäulen im Jahr 2020 von 31,96 ct/kWh (exkl. MwSt). Für das Laden an fremden Rampen wird vereinfacht der Mittelwert beider Preise angenommen (28,45 ct/kWh). Nach der Strompreisentwicklung aus **(Jöhrens et al., 2018)** werden die Strompreise im Jahr 2025 um 2,2 ct/kWh und im Jahr 2030 um 4,6 ct/kWh geringer angesetzt werden, sodass hieraus die Gesamtstrompreise aus Tabelle 6 resultieren.

Tabelle 6: Strompreise in den Jahren 2025 und 2030

Ort	2025	2030
Eigener Betriebshof*	22,8 ct/kWh	20,4 ct/kWh
Öffentliche Ladesäule	29,8 ct/kWh	27,4 ct/kWh
Fremdrampe	26,3 ct/kWh	23,9 ct/kWh

*Anmerkung: *inkl. Kosten für Infrastruktur*

3.3.3. Weitere antriebsabhängige Kostenpunkte

Maut

Seit der Einführung der Lkw-Maut im Jahre 2005 auf Autobahnen stellt dieser Kostenpunkt einen großen Anteil an den gesamten TCO dar (ca. 10-15 % bei SNF ≥26 t). Mitte 2018 wurde die Maut auf die Bundesstraßen ausgeweitet. Aktuell sind BEV von der Maut befreit, allerdings wird als Standardannahme festgelegt, dass im Jahr 2030 auch Betreiber von BEV Maut in gleicher Höhe wie Dieselfahrzeuge zu entrichten haben[1]. Pro Größenklasse gelten unterschiedliche Sätze, wobei die Maut in drei Anteile (Infrastruktur, Lärm und Luft) eingeteilt ist. Für BEV wird angenommen, dass der Anteil für Luft nicht zu entrichten ist. Die folgende Tabelle zeigt die Annahmen nach (Toll Collect, 2020):

Tabelle 7: Mautsätze in ct_{2020}/km

Größenklasse	Infrastruktur	Lärm	Luft	ICEV	BEV
SNF <7,5 t	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SNF 7,5-<12 t	8,0	0,2	1,1	9,3	8,2
SNF 12-<18 t	11,5	0,2	1,1	12,8	11,7
SNF 18-<26 t*	16,0	0,2	1,1	17,3	16,2
SNF ≥26 t**	17,4	0,2	1,1	18,7	17,6

Quellen: (Toll Collect, 2020). *Anmerkungen: Werte für EURO VI Fahrzeuge, *Mautsatz für ">18 t bis 3 Achsen", **Mautsatz für ">18 t bis 4 Achsen"*

[1] Die Bundesregierung strebt im Zuge der Reform der Eurovigniettenrichtlinie eine Differenzierung der Lkw-Maut nach dem direkten CO_2-Ausstoß der Lkw an, was einer Fortführung der Mautbefreiung gleichkommen würde. Allerdings sollen gleichzeitig Instrumente geschaffen werden, „mit denen eine Doppelbelastung des Güterkraftgewerbes durch die Mehrausgaben für Kraftstoffe aus dem Emissionshandel gemäß Brennstoffemissionshandelsgesetz vermieden werden kann“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020). Angesichts der Unsicherheit über die Ausgestaltung dieser Instrumente wird für die Betrachtungen in dieser Studie einerseits eine Fortschreibung der Lkw-Maut nach bisherigem Modell angenommen, die in 2030 auch durch Elektro-Lkw zu entrichten ist, andererseits aber auch eine Belastung von Diesel entsprechend des Brennstoffemissionshandelsgesetzes.

Fahrzeuguntersuchung, Steuer und Versicherung

Der finanzielle Aufwand für Fahrzeuguntersuchung, Steuer und Versicherung wird als Fixkostenpunkt angenommen. Bei der Fahrzeuguntersuchung handelt es sich um die gesetzlich vorgeschriebenen Haupt- und Abgasuntersuchungen (HU & AU) sowie Sicherheitsprüfung (SP). Die Preise aus (TÜV Süd, 2020) werden auf ein Jahr bezogen, wobei über die gesamte Nutzungsdauer berücksichtigt wird, dass die SP erst nach 42 Monaten (≤12 t) nach Erstzulassung bzw. nach 30 Monaten (>12t) zu erfolgen hat (Bussgeldkatalog.net, 2021a). Die folgende Tabelle zeigt die jährlichen Kosten für HU, AU und SP. Für BEV entfallen die Kosten für die AU, ansonsten gelten hier dieselben Kosten. Die Kosten für Auflieger und Anhänger sind in der Tabelle nicht aufgeführt (siehe Abschnitt 3.3.4).

Tabelle 8: Jährliche Kosten für HU, AU und SP

Größenklasse	HU	AU*	SP
SNF <7,5 t	65 €	69 €	45 €
SNF 7,5-<12 t	81 €	73 €	50 €
SNF 12-<18 t	89 €	75 €	58 €
SNF 18-<26 t	97 €	75 €	60 €
SNF ≥26 t	113 €	75 €	72 €

Quelle: Eigene Ermittlung anhand (TÜV Süd, 2020) *und* (Bussgeldkatalog.net, 2021a)*; Anmerkung: Kosten fallen nicht für BEV an*

Die Kfz-Steuer ist differenziert nach Größenklasse über (Bundesfinanzministerium, 2020) gegeben. Die angenommenen Steuern beziehen sich auf die neuste Emissionsklasse und werden sowohl für ICEV als auch für BEV angenommen. Aktuell sind BEV zwar von der Kfz-Steuer befreit (Zoll.de, 2020), jedoch wird zunächst für das Jahr 2030 eine Gleichbehandlung bzgl. der Kfz-Steuer ausgegangen.

Die Kfz- und Kaskoversicherung wird aus (Wittenbrink, 2014), (Braun et al., 2015) und (Lastauto Omnibus, 2014) entnommen. Zwar unterscheiden sich Werksverkehr und gewerblicher Güterkraftverkehr, jedoch ist bei den im Modell verwendeten Verkehrsdaten keine Unterscheidung bzgl. der Verkehrsarten gegeben. Demnach wird ein Mittelwert für beide Verkehrsarten verwendet. Aufgrund der höheren Fahrzeugpreise bei BEV werden die Beiträge der Kaskoversicherung um 10 % erhöht. Die Kosten für Steuer und Versicherung sind in der folgenden Tabelle gegeben. Die Kosten für Auflieger und Anhänger sind hier nicht aufgeführt (siehe Abschnitt 3.3.4).

Tabelle 9: Jährliche Kosten für die Kfz-Steuer und die Kfz- und Kaskoversicherung

Größenklasse	Kfz-Steuer	Versicherung	
	ICEV & BEV	ICEV	BEV
SNF <7,5 t	285 €	3.707 €	3.760 €
SNF 7,5-<12 t	534 €	4.074 €	4.139 €
SNF 12-<18 t	556 €	4.643 €	4.720 €
SNF 18-<26 t	556 €	5.140 €	5.244 €
SNF ≥26 t	556 €	5.755 €	5.874 €

Quellen: Kfz-Steuer: (Bundesfinanzministerium, 2020)*; Versicherung:* (Wittenbrink, 2014), (Braun et al., 2015) *und* (Lastauto Omnibus, 2014)

Instandhaltung und Verschleiß

Die Kosten für Wartung, Instandhaltung und Pflege des Fahrzeugs werden in jährliche Kosten und fahrleistungsabhängige Kosten unterteilt. Für den Fixkostenanteil wird angenommen, dass dieser in Höhe der HU, AU und SP liegt (bei BEV ohne AU) zuzüglich Reinigungskosten in Höhe von 420-970 €/a (je nach Größenklasse). Die fahrleistungsabhängigen Kosten werden aus (Wittenbrink, 2014), (Lastauto Omnibus, 2014) und (Braun et al., 2015) abgeleitet. Hierbei gilt: Je höher die Fahrleistung und somit die Abnutzung des Fahrzeugs ist, desto höher sind die Kosten für die Instandhaltung. Aus denselben Quellen werden die Kosten für die Reifen je Größenklasse (ICEV) abgeleitet. Bei BEV wird angenommen, dass aufgrund des höheren Gewichts der Reifenverschleiß um 2 % höher ausfällt als bei ICEV (Pauschalwert für alle BEV). Die folgenden Tabellen geben die Kosten für Wartung und Pflege, Instandhaltung und Reifen.

Tabelle 10: Fixkosten für Wartung und Pflege sowie (variable) Reifenkosten

Größenklasse	Wartung und Pflege		Reifen	
	ICEV	BEV	ICEV	BEV
SNF <7,5 t	612 €/a	543 €/a	2,9 ct/km	2,9 ct/km
SNF 7,5-<12 t	757 €/a	684 €/a	3,7 ct/km	3,8 ct/km
SNF 12-<18 t	901 €/a	826 €/a	3,3 ct/km	3,4 ct/km
SNF 18-<26 t	1.059 €/a	984 €/a	2,9 ct/km	3,0 ct/km
SNF ≥26 t	1.245 €/a	1.171 €/a	2,5 ct/km	2,6 ct/km

Quellen: (Wittenbrink, 2014), (Braun et al., 2015) *und* (Lastauto Omnibus, 2014)

Tabelle 11: Durchschnittliche variable Instandhaltungskosten über die Nutzungsdauer in ct_{2020}/km

Größenklasse	ICEV	BEV
SNF <7,5 t	$0{,}37 \cdot e^{\frac{4{,}8 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$	$0{,}33 \cdot e^{\frac{4{,}8 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$
SNF 7,5-<12 t	$0{,}44 \cdot e^{\frac{4{,}5 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$	$0{,}40 \cdot e^{\frac{4{,}5 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$
SNF 12-<18 t	$0{,}56 \cdot e^{\frac{3{,}8 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$	$0{,}52 \cdot e^{\frac{3{,}8 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$
SNF 18-<26 t	$0{,}62 \cdot e^{\frac{3{,}7 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$	$0{,}60 \cdot e^{\frac{3{,}7 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$
SNF ≥26 t	$0{,}63 \cdot e^{\frac{3{,}7 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$	$0{,}74 \cdot e^{\frac{3{,}2 \cdot JFL \cdot a}{1.000.000 km}}$

Quellen: (Wittenbrink, 2014), (Braun et al., 2015) *und* (Lastauto Omnibus, 2014). *Anmerkung: die Funktionen sind auf Maximalwerte begrenzt; diese betragen 9,8 ct/km (<7,5t), 10,3 ct/km (7,5-12t), 11,1 ct/km (12-18t), 11,9 ct/km (18-26t) und 12,6 ct/km (≥26t). Abkürzungen: JFL=Jahresfahrleistung in km, a=Haltedauer in Jahren*

Harnstoff

Harnstoffe (auch bekannt unter dem Markennamen AdBlue) werden für die Abgasnachbehandlung mittels selektiver katalytischer Reduktion (SCR) bei Dieselmotoren eingesetzt. Der AdBlue-Verbrauch wird in der Literatur üblicherweise bezogen auf den Dieselpreis angegeben. In (Braun et al., 2015), (Wittenbrink, 2014) und in Kfz-Foren sind die Verbräuche auf einen Bereich von 0,03-0,052 l/l_{Diesel} eingegrenzt. In den Modellrechnungen wird ein mittlerer AdBlue-Verbrauch i. H. v. 0,047 l/l_{Diesel} angenommen. Der AdBlue-Preis ist mit 60 ct_{2020}/l gegeben, wobei dieser Wert sich auf große Abnahmemengen bezieht (ADAC, 2020a) (auto

motor sport, 2020). Über alle Größenklassen werden somit Harnstoffkosten von 2,8 ct_{2020}/l_{Diesel} angenommen.

Schmierstoffe

Schmierstoffe dienen bei Kfz insbesondere der Kühlung des Motorraums sowie der Verringerung der Reibung und Verschleiß. Da BEV keinen Verbrennungsmotor haben, ist hier der Schmierstoffbedarf um ein Vielfaches geringer als beim ICEV. Nichtsdestoweniger werden auch hier geringe Mengen benötigt, wie bspw. für das Differential oder (falls vorhanden) für das Fahrzeuggetriebe. In (Wittenbrink, 2014), (Braun et al., 2015) und (Lastauto Omnibus, 2014) sind Schmierstoffkosten pro Liter Diesel angegeben. Diese werden anhand eigener Annahmen auf den Dieselverbrauch (nur ICEV) und die Fahrleistung (ICEV und BEV) aufgeteilt. Die Schmierstoffkosten belaufen sich somit auf 2,5 ct_{2020}/l_{Diesel} (nur ICEV) zuzüglich 6,5 ct_{2020}/1.000 km (ICEV und BEV).

3.3.4. Antriebsunabhängige Kostenpunkte

Neben den genannten Kosten sind antriebsunabhängig der Fahrerlohn, die Kosten für Auflieger und Anhänger sowie die Fuhrparkverwaltung und sonstige Transaktionskosten zu nennen. Zwar hat der Fahrerlohn einen großen Anteil an den gesamten TCO, jedoch unterscheidet sich dieser bei beiden Technologien nicht, sodass sich der Fahrerlohn bei einer Differenzkostenbetrachtung nicht von Relevanz ist. Das gleiche gilt für die Auflieger- und Anhängerkosten. Beide Kostenpunkte werden jedoch für die Zeitkostenberechnung (siehe Abschnitt 3.3.5) benötigt. Die Kosten für Unterstellung/Garage unterscheiden sich bzgl. der Antriebstechnologien nicht, sodass hier sehr vereinfachte Annahmen getroffen werden. Bei den Fuhrparkverwaltungs- und sonstigen Transaktionskosten können durchaus Unterschiede zwischen den Technologien vorliegen, da die neue Technologie mit zusätzlichem Schulungs- und Planungsaufwand aufgrund des begrenzten Einsatzbereichs verbunden sein könnte. Allerdings sind die Unterschiede nur schwer zu beziffern, sodass diese Kosten hier ebenfalls nur vereinfacht dargestellt werden. Im Anhang A2g werden die genannten Kostenpunkte erläutert. Die folgende Tabelle fasst die Kosten zusammen.

Tabelle 12: Antriebsunabhängige Kosten

Fuhrparkverwaltung	SNF <7,5t	7.286 €/a
	SNF ≥7,5t	8.272 €/a
Unterstellung	SNF <7,5t	874 €/a
	SNF ≥7,5t	1.118 €/a
Fahrer/Fahrerin	innerorts	42,5 ct/km
	außerorts	28,3 ct/km
	Autobahn	21,3 ct/km
Anhänger/ Auflieger	Fixkosten	1.142 €/a
	Variable Kosten	3,7 ct/km

3.3.5. Zeitkosten

Für die Berechnung der Betriebskosten der batterieelektrischen Lkw wird im Fall ohne mögliche Zwischenladung auf der Tour die Annahme getroffen, dass die Batterie ausschließlich während der (meist nächtlichen) Betriebspause im Depot nachgeladen werden kann (Abschnitt 4.2). Eine Batterieladung muss hierbei also einen gesamten Betriebstag abdecken. Dem wird der Fall gegenübergestellt, dass auch während eines Betriebstages zusätzliche Energie an öffentlicher Ladeinfrastruktur oder beim Be-/Entladevorgang des Guts an Fremdrampen aufgenommen werden kann, wodurch die für ein Einsatzprofil notwendige Batteriekapazität im Allgemeinen kleiner dimensioniert werden kann. Geschieht dies außerhalb der ohnehin anfallenden Fahrtpausen (Be-/Entladung des Guts und gesetzliche Fahrzeitunterbrechung), so führt dies zu zeitlichen Verzögerungen und damit zu Zeitkosten (Opportunitätskosten), für die nachfolgend Annahmen getroffen werden. Diese Kosten resultieren zum einen aus realen Kosten. Zu nennen sind hier bspw. die Lohnkosten, die während der Dauer einer zusätzlichen Nachladung entstehen. Zum anderen können aufgrund der zeitlichen Verzögerung weniger Aufträge abgewickelt werden, wodurch ein entgangener Umsatz entsteht.

Zur Ableitung der spezifischen Zeitkosten wird der Deckungsbeitrag pro Stunde in der Speditionsbranche herangezogen. Der Deckungsbeitrag ermittelt sich aus dem Umsatz abzüglich der variablen Betriebskosten (= variable Fahrzeugkosten zzgl. Fahrerlohn) während einer typischen Betriebsstunde. Der gesamte Umsatz der Logistikbranche wird für Deutschland im Jahr 2019 auf ca. 113 Mrd. € geschätzt (DSLV, 2020). TREMOD 6.1 liefert die Gesamtfahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen von rund. 62,8 Mrd. Fzg-km für 2019. Zwar werden in TREMOD die Fahrleistungen nach dem Inlandsprinzip abgebildet, jedoch wird als Näherung angenommen, dass die Fahrleistung deutscher Unternehmen im Ausland in etwa dem Wert entspricht, den ausländische Lkw in Deutschland zurücklegen, sodass die Werte aus TREMOD verwendet werden können. Der hieraus resultierende spezifische Umsatz in Höhe von 1,80 €/km deckt sich gut mit Angaben aus (BME, 2018). Hier wird ein Preis für Kontraktverkehr national für das Jahr 2017 in Höhe von 1,74 €/km genannt. Für das Jahr 2019 werden für jede Größenklasse die variablen Betriebskosten von ICEV-Lkw mittels der in diesem Kapitel beschriebenen TCO-Berechnung berechnet. Zusammen mit dem Arbeitslohn des Fahrers oder der Fahrerin und den Kosten für Anhänger und Auflieger ergeben sich hieraus die variablen Fahrtkosten. Die folgende Tabelle zeigt die Betriebskosten (ohne Verladedauer).

Tabelle 13: Variable Betriebskosten (ohne Verladekosten) im Jahr 2019

Größenklasse	Variable Betriebskosten [€/km]
3,5-7,5t	0,57
7,5-12t	0,66
12-18t	0,83
18-26t	0,94
≥26t	1,02
SNF gesamt*	0,94

*Quelle: Kosten nach TCO-Rechnung bei Verbrauch nach TREMOD 6.1 und Dieselpreis von 1,07 €/l. *Gewichtet anhand der gesamten Fahrleistung nach TREMOD 6.1.*

Zusätzlich werden die Personalkosten für die Verladung der Güter ermittelt. Pro Fahrt wird ein Wert von 100 Minuten für die Verladung von Güter angenommen. Dieser Wert deckt

sich gut mit den Modellrechnungen (siehe Abschnitt 3.4.4). Für die Umlegung der Verladungskosten wird der Fahrerlohn pro Stunde mit der Verladedauer multipliziert. Unter Berücksichtigung der Gesamtzahl aller Fahrten in Deutschland nach (KBA, 2020a) errechnen sich die gesamten Verladekosten. Werden die Verladekosten schlussendlich durch die Fahrleistung in Deutschland dividiert resultieren hieraus die spezifischen Verladekosten, siehe Tabelle 14.

Tabelle 14: Verladekosten im Jahr 2019

Größenklasse	SNF gesamt
Fahrleistung [Mrd. km]	62,8
Anzahl Fahrten [Mio.]	264
Verladedauer pro Fahrt [min]	100
Verladedauer pro km [min]	0,42
Stundenlohn [€/h]	17
Verladekosten [€/km]	0,12

Quellen: Fahrleistung nach TREMOD 6.1. Anzahl Fahrten nach (KBA, 2020a). *Verladedauer nach eigener Annahme.*

Der Deckungsbeitrag ergibt sich aus dem Umsatz (1,80 €/km) abzüglich Betriebskosten (0,94 €/km) und Verladekosten (0,12 €/km), sodass man einen Wert von 0,74 €/km erhält. Die Arbeitszeit pro Kilometer in Höhe von 0,022 h/km ergibt sich aus der Fahrdauer für SNF von 0,89 min/km (Durchschnittsgeschwindigkeit=67 km/h) und der auf die Fahrleistung bezogene Verladedauer (0,42 min/km). Der Deckungsbeitrag und somit die Verzögerungskosten betragen 34 €/h (=0,74 €/km / 0,42 min/km).

3.4 Bewertung der Eignung für einzelne Relationen

3.4.1. Überblick

Im Verkehrsmodell Validate sind die aus den Verflechtungsmatrizen resultierenden Güterströme auf Fahrzeugbewegungen zwischen den einzelnen Quell- und Zielbezirken, d. h. auf einzelne **Relationen** umgelegt. Das Modell berechnet dabei pro Güterabteilung die Größenklasse der auf jeder Relation eingesetzten Lkw sowie deren Route[1]. Das Modell macht allerdings keine Aussage darüber, wie das Einsatzprofil eines gegebenen Fahrzeugs aussieht, welche Fahrten es also typischerweise an einem Tag absolviert. Da dies entscheidend für die Eignung der Fahrzeuge zur Umstellung auf Elektroantrieb ist, werden hierzu Annahmen getroffen, die nachfolgend beschrieben werden.

Es ist zu beachten, dass letztlich das Potential von E-Lkw **pro Relation** bewertet wird. Demzufolge ist es nicht notwendig, die konkreten Einsatzprofile einzelner Fahrzeuge zu rekonstruieren, was auf Basis des Modells auch nicht möglich wäre. Vielmehr reicht es aus, Rahmenbedingungen wie die Jahresfahrleistung, die Tagesfahrweite oder die Anzahl der Ladegelegenheiten während des Betriebszeitraums für Fahrzeuge abzuschätzen, die (unter anderem) auf der betrachteten Relation verkehren.

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

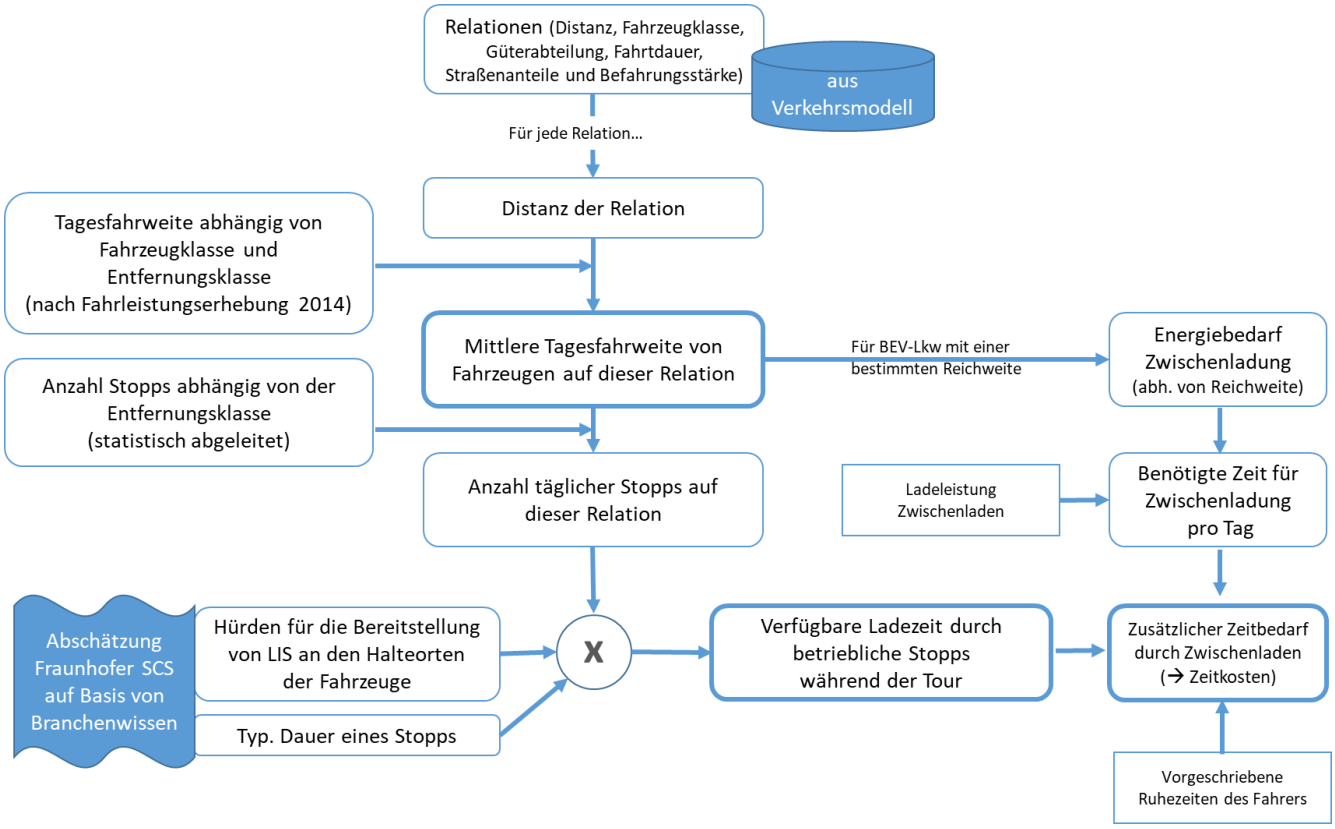


Abbildung 21: Eignungsparameter und die sie jeweils bestimmenden Einflussgrößen

In Abbildung 21 sind wesentliche Kenngrößen des Fahrzeugeinsatzes und ihre Auswirkungen auf zentrale Eignungsparameter dargestellt. Einige der Kenngrößen kommen als Eigenschaften der jeweiligen Relation direkt aus dem Verkehrsmodell. Einige weitere sind in Abhängigkeit der transportierten Güterabteilung auf Grundlage von Branchenwissen abschätzbar, wie beispielsweise die typische Dauer von Stopps zwischen verschiedenen Touren eines Tages.

3.4.2. Ableitung der Jahres- und Tagesfahrleistung sowie Anzahl täglicher Stopps

Eine zentrale Information für gleich mehrere Eignungsparameter stellt die jährliche Fahrleistung der Fahrzeuge dar. Die Eignung von BEV auf einer Relation wird anhand der TCO pro gefahrenem Kilometer auf dieser Relation ermittelt. Für die auf einer Relation gewählten Route können zwar die variablen Betriebskosten genau ermittelt werden, jedoch ist eine Umlegung der fixen Betriebskosten auf die gefahrenen Kilometer sowie die Bestimmung der Verzögerungskosten nur bei Kenntnis der gesamten täglichen bzw. jährlichen Fahrleistung möglich. Zudem ist für die Auslegung der Batteriekapazität (Reichweite) die Tagesfahrweite und nicht die Relationslänge maßgeblich.

Die tägliche Fahrleistung entspricht i. d. R. nicht der Relationslänge, denn ein Lkw fährt auch abseits der im Modell definierten Relationen. So fährt im Modell PTV Validate ein Lkw beispielsweise auf der Relation Heidelberg-Darmstadt, jedoch muss dieser wieder zurück nach Heidelberg oder er fährt ein weiteres Ziel jenseits von Darmstadt an. Diese Wege- bzw. Lieferketten sind nicht im Modell enthalten, sind jedoch für die Kostenkalkulation und Fahrzeugauslegung von hoher Relevanz.

Des Weiteren hat die erwähnte Wegekette auch Auswirkungen auf die Lademöglichkeiten der Batterie und ggf. durch das Laden der Batterie auftretende zeitliche Verzögerungen. Würde lediglich die Relation Heidelberg-Darmstadt isoliert betrachtet werden, so würde für einen Sattelzug i. d. R. bereits eine 100 kWh Batterie ausreichen. Wenn allerdings das Fahrzeug danach wieder zurückfahren oder ein weiteres Ziel ansteuern muss, dann wäre eine Nachladung fällig, die eine zeitliche Verzögerung verursachen würde. Alternativ müsste die Batterie größer dimensioniert werden. Dies hätte wiederum höhere Investitionskosten zur Folge.

Demnach muss bei der Kostenberechnung neben der Fahrleistung, die auf einer Relation stattfindet, auch eine zusätzliche Fahrweite (abseits der Relation aus PTV Validate) während eines Betriebstages miteinfließen. Diese Zusatzkilometer werden anhand der Relationslänge und der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung in Abhängigkeit der Distanzklasse hergeleitet. In der Fahrleistungserhebung 2014 (BASt, 2017) sind die durchschnittlichen jährlichen Fahrleistungen pro Größenklasse und pro Distanzklasse angegeben. Die Distanzklasse ist differenziert nach Nahbereich (bis 50 km), Regionalbereich (50-150 km) und Entfernungen über 150 km. Tabelle 15 fasst die Werte zusammen.

Tabelle 15: Jahresfahrleistung pro Größenklasse nach Distanzklasse (Relationslänge)

Distanzklasse/ Relationslänge	SNF <12t	SNF 12-26t	SNF >26t
Bis 50 km	16.957 km	27.125 km	45.684 km
51-150 km	38.031 km	53.732 km	78.190 km
>150 km	59.346 km	101.038 km	117.121 km
Gesamt	29.135 km	55.416 km	94.950 km

Quelle: (BASt, 2017)

Um nun die Jahresfahrleistung pro Distanz- und Größenklasse abzuleiten, wird im ersten Schritt die Relationslänge (aus PTV Validate) mit der Distanzklasse (aus der Fahrleistungserhebung 2014) gleichgesetzt. Im Anschluss wird für jede Relation eine Jahresfahrleistung ermittelt. Über alle Relationen (im PTV Modell) gemittelt sollen diese ermittelten Jahresfahrleistungen sowohl die Jahresfahrleistung pro Distanzklasse (≤50km, >50-150km, >150km) als auch die Gesamtfahrleistung (aus der Fahrleistungserhebung) möglichst genau abbilden. Zur Bestimmung der Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Relationslänge wird die folgende Funktion verwendet:

$$JFL = \max(T \cdot L; a \cdot L^b + c)$$

mit *JFL* – Jahresfahrleistung [km]
T – Arbeitstage pro Jahr (=250 Tage)
a, b, c – Koeffizienten
L – Relationslänge [km]

Die Koeffizienten (a, b, c) werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate so gewählt, dass für alle Relationen die Jahresfahrleistungen pro Größenklasse für die drei Distanzklassen und insgesamt den Werten aus der Fahrleistungserhebung entsprechen. Die Jahresfahrleistung ist nach unten hin begrenzt auf die Relationslänge multipliziert mit den Arbeitstagen (250 Tage). Dies betrifft langläufige Relationen. Da das System überbestimmt ist, ergeben sich zwar zwangsläufig Ungenauigkeiten, jedoch treffen die Funktionen gut die Angaben

aus der Fahrleistungserhebung. Die folgende Tabelle zeigt die ermittelten Jahresfahrleistungen sowie die Koeffizienten.

Tabelle 16: Errechnete Jahresfahrleistungen pro Distanzklasse und insgesamt sowie Koeffizienten der Jahresfahrleistungsfunktionen

Distanzklasse/ Relationslänge	SNF <12t	SNF 12-26t	SNF >26t
Bis 50 km	18.894 km	27.373 km	45.643 km
51-150 km	35.453 km	53.897 km	78.141 km
>150 km	62.290 km	101.186 km	116.994 km
Gesamt	28.572 km	54.855 km	95.167 km
a	6.877	1.643	10.281
b	0,3743	0,7068	0,4046
c	0	14.242	14.375

Quelle: eigene Berechnung

Um die gesamte Fahrleistung eines Tages zu erhalten, wird die Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Relationslänge verwendet. Die Jahresfahrleistung pro Relation wird durch die Arbeitstage pro Jahr geteilt (250 Tage werden dabei angenommen). Die Zusatzkilometer ergeben sich aus der hieraus resultierenden Tagesfahrweite abzüglich der Relationslänge. Abbildung 22 zeigt die Jahres- und Tagesfahrleistung in Abhängigkeit der Relationslänge.

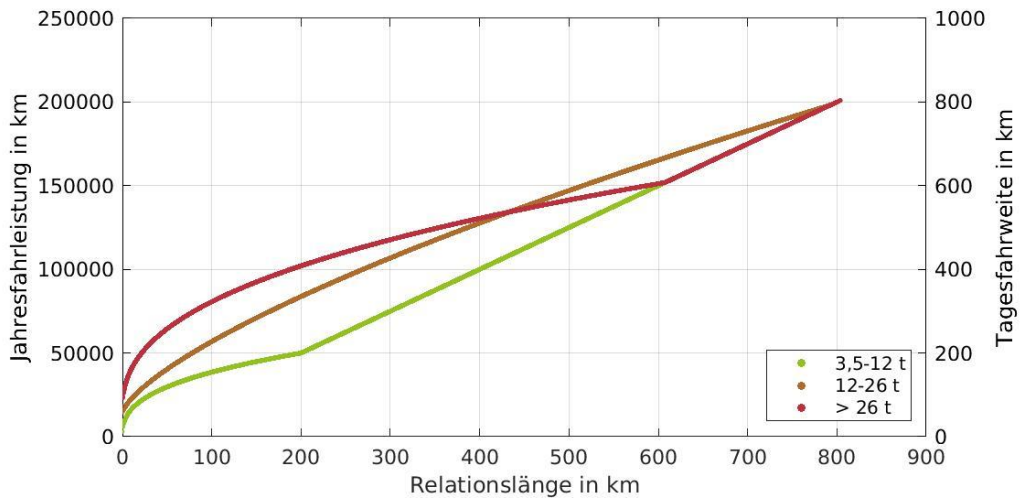


Abbildung 22: Jahresfahrleistung als Funktion der Distanzklasse/Relationslänge

Wendet man diese Funktionen, getrennt nach Lkw-Klassen, auf die im Verkehrsmodell enthaltenen Relationen an, so ergibt sich eine Verteilung der Tagesfahrweiten wie in Abbildung 23 gezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass die kleineren Lkw < 12 t zGG größtenteils weniger als 200 km Tagesfahrleistung erbringen, während die Verteilung bei den größeren Klassen deutlich breiter ist. Bei den schweren Lkw > 26 t zGG wird über die Hälfte der Fahrleistung von Fahrzeugen erbracht, die mehr als 400 km pro Tag fahren.

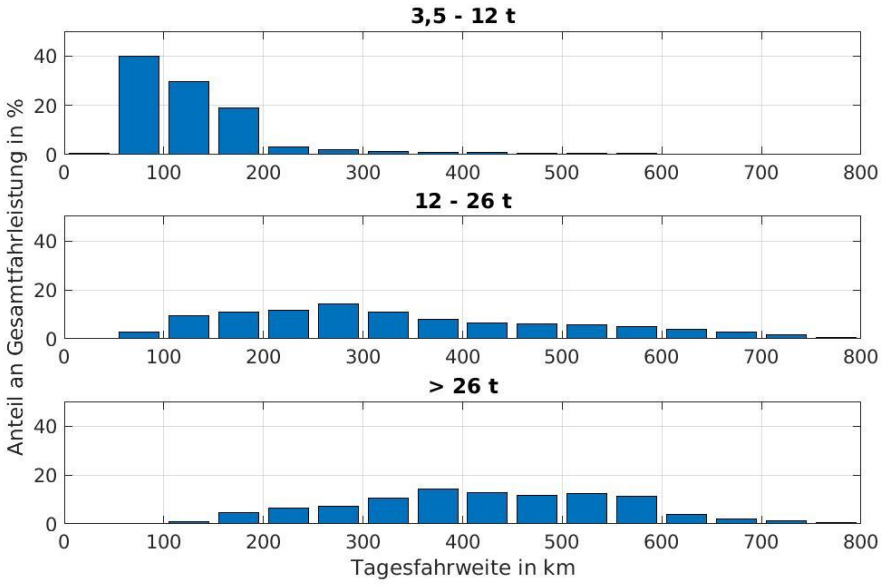


Abbildung 23: Verteilung der Fahrleistung über Tagesfahrweite je Größenklasse

Neben der modellhaften Abbildung der Tagesfahrweite als Funktion der Relationslänge werden die typischen Nutzungsprofile einer Relation zudem durch die Anzahl täglicher Fahrten der auf der Relation eingesetzten SNF ergänzt. So verkehren bspw. Lkw auf kurzen Werksverkehren mehrmals am Tag, wogegen langläufige Relationen oftmals nur eine Fahrt am Tag zurücklegen. Mit steigender Anzahl an Fahrten steigt einhergehend auch die Anzahl an Stopps, die das SNF einlegt, um die Fracht zu verladen. Diese Verladestopps können bei ausreichender zeitlicher Länge und bei einer gegebenen Ladeinfrastruktur am Verladeort zum Nachladen der Traktionsbatterie genutzt werden. Daher ist diese Information für einige Gütergruppen von Relevanz.

Die Anzahl der Tagesfahrten pro Lkw wird über die PTV-Daten und den oben abgeleiteten Tagesfahrweiten hergeleitet. Hierbei werden die PTV-Verkehrsdaten in 16 Entfernungsstufen (z. B. ≤50km, >50-100km etc.) eingeteilt und sowohl die Anzahl an Fahrten als auch die zurückgelegten Kilometer bestimmt. Um hieraus die Fahrten pro Lkw zu ermitteln, wird zusätzlich die Anzahl der eingesetzten Lkw pro Distanzklasse benötigt. Diese ergibt sich aus den oben ermittelten Jahresfahrleistungen pro Lkw. Hierfür wird die gesamte Jahresfahrleistung pro Distanzklasse dividiert durch die Jahresfahrleistung eines Lkw. Eine Differenzierung zwischen den Größenklassen wird nicht vorgenommen. Die folgende Tabelle fasst die verwendeten Größen zusammen.

Tabelle 17: Fahrleistung, Bestand und Anzahl Fahrten pro Distanzklasse

Distanzklasse/ Relationslänge	JFL aller SNF [Mio. km][1]	Anzahl SNF[2]	Fahrten pro Tag[1]	Tagesfahrten pro SNF[3]
≤50 km	8.537	263.479	1.922.418	7,3
>50-100 km	4.839	105.033	275.478	2,6
>100-150 km	5.033	71.350	163.396	2,3
>150-200 km	3.850	53.285	89.436	1,7
>200-250 km	2.658	32.415	47.730	1,5
>250-300 km	1.982	22.345	29.003	1,3
>300-350 km	1.678	17.461	20.711	1,2
>350-400 km	1.573	15.146	16.808	1,1
>400-450 km	1.466	13.367	13.831	1,0
>450-500 km	1.319	11.421	11.119	1,0
>500-600 km	1.978	16.219	14.518	0,9
>600-700 km	1.151	8.917	7.172	0,8
>700-800 km	492	3.813	2.651	0,7
>800-900 km	106	835	510	0,6
>900-1.000 km	6	46	25	0,6
>1.000 km	0	0	0	0,5

Quellen: [1]Werte ergeben sich aus Validate (nur innerdeutsche Relationen); [2]eigene Ermittlung anhand JFL aller SNF und JFL pro SNF; [3]ergibt sich aus den Fahrten pro Tag und der Anzahl SNF. Anmerkung: [3]Da die Werte auf Mittelwerten und Annahmen beruhen, können sich auch Tagesfahrten kleiner eins ergeben.

Die Tagesfahrten pro SNF und pro Distanzklasse werden verwendet, um eine Funktion herzuleiten, welche die Anzahl der Tagesfahrten (und somit der Verladestopps) in Abhängigkeit der Relationslänge abbildet. Der Zusammenhang wird in Abbildung 24 angezeigt. Die Funktion wird so angepasst, dass maximal acht Fahrten und minimal eine Fahrt pro Tag getätigt werden. Die Anzahl der Stopps wird für die Modellierung kaufmännisch auf ganze Zahlen gerundet. Diese Stopps repräsentieren lediglich die Verladestopps. Stopps, die aufgrund der gesetzlichen Lenkzeitpausen eingelegt werden müssen, sind hierin nicht enthalten und werden separat in der Modellrechnung berücksichtigt.

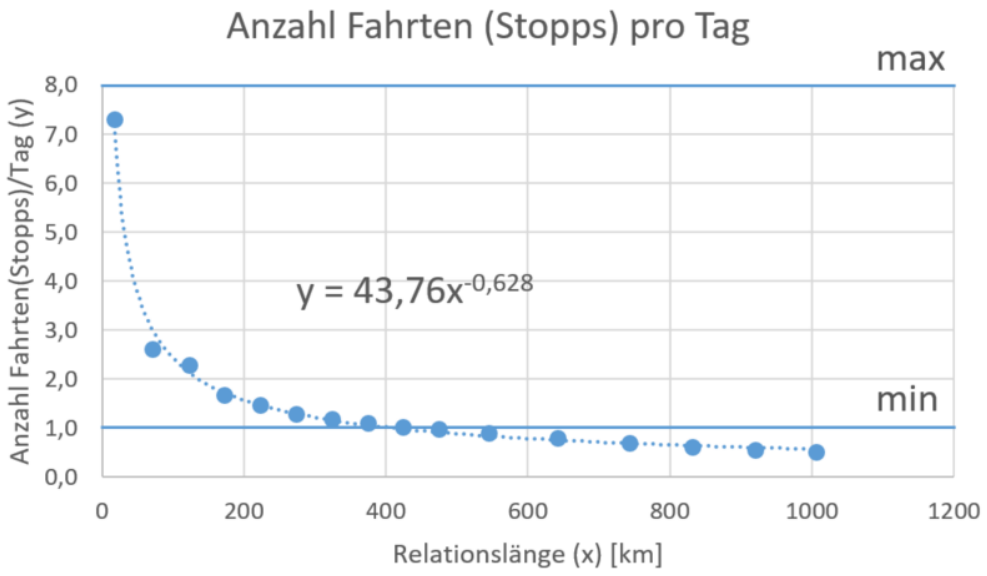


Abbildung 24: Anzahl Verladestopps (Fahrten) pro Tag pro Lkw in Abhängigkeit der Relationslänge

3.4.3. Ableitung der verfügbaren Ladezeiten

Der Transport jeder Güterklasse besitzt ein individuelles Einsatzprofil, welches auf die unterschiedlichen Transportanforderungen je Güterklasse zurückzuführen ist und sich in der Dominanz bestimmter Logistikarten (wie beispielsweise Ferntransporte oder Verteilerfahrten) äußert. Je nach Güterklasse unterscheiden sich aber auch die Begleitfaktoren des Transportes wie z. B. die Anzahl und die Dauer einzelner Be- und Entladestopps auf der Gesamttransportroute, die für den Transport erforderliche Fahrzeuggröße und örtliche Gegebenheiten der Start- und Zielorte. Um diese Aspekte für die Eignungsanalyse nutzbar zu machen, wurden eine Reihe von Kriterien je Güterklasse ermittelt und quantifiziert, wie nachfolgend beschrieben.

Die **Be- und Entladungsstoppdauer** variiert stark zwischen den Güterarten. Bei einem Schüttgut kann durch einen Schüttvorgang die Be-/ und Entladung innerhalb von wenigen Minuten erfolgen. Bei Stückgut auf Paletten kann es durch Rampenentladung mit Hubfahrzeug wesentlich länger dauern. In Abhängigkeit der Komplexität des Ladevorgangs und der eingesetzten Fahrzeuggröße wurden typische Be- und Entladungsstoppdauern ermittelt (Tabelle 18). Es gilt: Je länger die Stoppdauer bei gegebener Ladeinfrastruktur ist, desto größer wird die Reichweite des Fahrzeugs, da während des Be/Entladestopps die Batterie geladen werden kann und somit sich der Einsatzradius des Fahrzeugs erhöht. Daraus folgt, dass eine lange Be- und Entladungsstoppdauer auch eine mögliche Ladedauer der Batterie verlängert und somit den Einsatz batteriebetriebener Transporte begünstigt.

Die **Anzahl der Be- und Entladungstopps** pro Tag wird gemäß Abbildung 24 aus der Relationslänge ermittelt, wobei kaufmännisch auf ganze Zahlen gerundet wird. Die Anzahl der Stopps wird dabei nach oben hin begrenzt, sodass unter Berücksichtigung der Verladedauer (Tabelle 18) eine maximale Schichtlänge von 9,6 h[1] nicht überschritten werden kann.

[1] Diese tägliche Begrenzung wurde aus der gesetzlich festgelegten maximalen wöchentlichen Arbeitszeit von 48 Stunden abgeleitet. (bussgeldkatalog.org, 2021)

Der batteriebetriebene Transport erfordert eine vorhandene Ladeinfrastruktur idealerweise an Start- oder/ und Zielort eines Transportes. Je nach beteiligter Branche am Transport einer Güterklasse bestehen unterschiedliche örtliche Gegebenheiten, die sich je nach Ausprägung für den batteriebetriebenen Transport eignen (Tabelle 18). Essentiell ist die **Eignung eines Be- und Entladeortes hinsichtlich der Installationsmöglichkeit von Ladeinfrastruktur**. Dafür müssen entsprechende Schnittstellen zum Energienetz und ausreichend Platz zur Verfügung stehen. (Beispiel: eigener Betriebshof = hohe Eignung, Schüttvorgang im Bergbau = niedrige Eignung).

Bei einem Verladestopp kann sich die **zeitliche Flexibilität** zudem je nach transportierter Gütergruppe unterscheiden. Als besonders zeitkritisch wurden die Gütergruppen Nahrungs- und Genussmittel (GA4), Textilien und Bekleidung (GA5), Maschinen- und Ausrüstungen (GA11) und Fahrzeuge (GA12) identifiziert. Auch Möbel (GA13), Post und Pakete (GA15), Umzugsgut (GA17) und Sammelgut (GA 18) werden als eher zeitkritisch betrachtet. Diese Eigenschaft wird bei der Berechnung der Zeitkosten für Verzögerungen durch Nachladen der Batterie mit den Faktor 100 (besonders zeitkritisch) bzw. 10 (eher zeitkritisch) berücksichtigt. GA4 weist somit bspw. zeitliche Verzögerungskosten von 3.400 €/h auf und GA15 340 €/h.

Tabelle 18: Lademöglichkeit und Verladedauer nach Gütergruppe

GA	Lademöglichkeit	Verladedauer in h				
		3,5 – 7,5 t	7,5 – 12 t	12 – 18 t	18 – 26 t	> 26 t
4	Ja	0,33	0,33	0,67	0,67	1
5	Ja	0,33	0,33	0,67	0,67	1
6	Ja	0,33	0,33	1	1	2
7	Ja	0,33	0,33	1	1	2
8	Ja	0,33	0,33	1	1	2
9	Nein	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10	Ja	0,33	0,33	1	1	2
11	Ja	0,33	0,33	1	1	2
12	Ja	0,33	0,33	1	1	2
13	Ja	0,33	0,33	1	1	2
14	Nein	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
15	Ja	0,02	0,02	0,67	0,67	0,02
16	Ja	0,33	0,33	0,67	0,67	1
17	Nein	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
18	Ja	0,02	0,02	0,67	0,67	0,02
19	Nein	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

3.4.4. Ableitung der Zeitkosten

Es sind einige zusätzliche Schritte und Annahmen notwendig, um aus den für die Relationen vorliegenden Daten Rückschlüsse auf den jeweiligen Zeitverlust durch das Laden (und damit die zusätzlichen Zeitkosten) ziehen zu können, die beim Betrieb der Relation mit Batterieantrieb entstehen können. Die elektrische Reichweite sowie die verfügbare Ladeleistung sind dabei Schlüsselparameter der Berechnung, hinzu kommen einige weitere Rahmenbedingungen, die in Tabelle 19 dargestellt sind.

Tabelle 19: Relevante Parameter für zeitliche Verzögerungsrechnung

Parameter	Annahme
Batteriegröße	Verschiedene BEV-Konfigurationen zwischen 100 km und 600 km Reichweite werden betrachtet
Energieverbrauch	Berechnet abhängig von Batteriegröße, Größenklasse, Nutzlast, Nebenverbrauchern und Streckenprofil der Relation
Lademöglichkeit	Vollladen über Nacht möglich und öffentliche Lademöglichkeiten unterwegs gegeben. Lademöglichkeit während des Be- und Entladens abhängig von der Gütergruppe.
Ladeleistung	Max: 200 kW[1] (Depotladen und während Verladestopp, sofern Infrastruktur vorhanden) 500 kW an öffentlicher Ladeinfrastruktur Ladeverluste Schnellladen: 7 %
Maximale Lenkzeit ohne Unterbrechung	4:30 h (gesetzlich festgelegt)
Pausenzeit nach Lenkzeit	45 min (gesetzlich festgelegt)
Zusatzverzögerung pro Ladestopp, um auf Rasthof zu fahren, Ladevorgang zu starten etc.	10 min
Zeitkosten pro Stunde Verzögerung	34 €/h (entspricht dem Deckungsbeitrag, siehe Abschnitt 3.3.5)

[1] Die hier angegebenen Leistungen beziehen sich auf die maximalen Ladeleistungen. Für die effektive Ladeleistung, welche ausschlaggebend für die Ladedauer ist, werden 82,3 % der maximalen Leistung angenommen (Abschätzung auf Basis der Ladekurve eines Audi e-tron mit 150 kW (ADAC, 2020b)). Die maximale Ladeleistung wird mit Hilfe der C-Rate (siehe auch Anhang A2f) abhängig von der Batteriekapazität festgelegt: max. 0,5 C für Depotladen, max. 3 C für Zwischenladen.

Zur Berechnung des zusätzlichen Zeitbedarfs für Batterie-Lkw wird zunächst die typische Standzeit eines Diesel-Lkw während eines Tages durch Verladepausen und Lenkzeitpausen bestimmt. Die angenommene Tagesfahrleistung wird dabei aus der in Abschnitt 3.4.2 für verschiedene Lkw-Klassen und Relationslängen abgeleiteten typischen Jahresfahrleistung bestimmt, wobei 250 Betriebstage pro Jahr angenommen werden. Nach spätestens 4,5 h Fahrt muss eine Pause von insgesamt 45 min gemacht werden. Diese Pause kann auch aufgeteilt werden in einmal 15 min (z. B. bereits nach 2 h Lenken) und 30 min am Ende der 4,5 h. Die Zeit während der Verladestopps wird nicht als Lenkzeitpause gewertet, da auch eine rein überwachende Tätigkeit nicht als Ruhepause gilt und der Fahrer oder die Fahrerin für die Ladungssicherung des Lkw verantwortlich ist[1]. In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist diese Rechnung beispielhaft für einen Lebensmitteltransport (GA4) mit einem Lkw der Größenklasse 18-26 t für die Relationen Frankfurt-München und Köln-Frankfurt dargestellt.

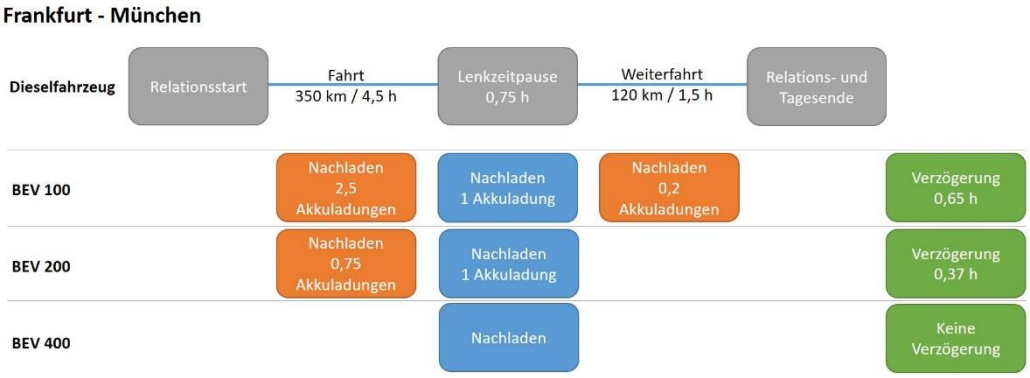


Abbildung 25: Schematische Darstellung des Zeitablaufs für Relation Frankfurt-München

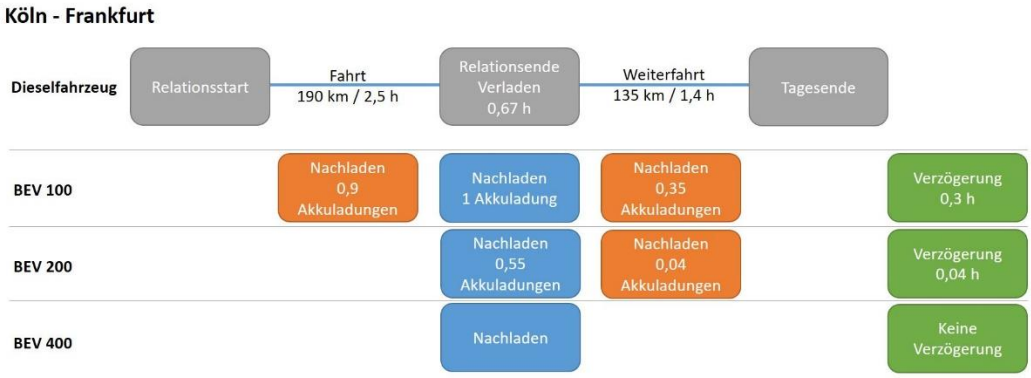


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Zeitablaufs für Relation Köln-Frankfurt

Bei den Batterie-Lkw muss die benötigte Standzeit während eines Tages für jede betrachtete Batteriekapazität separat bestimmt werden. Zunächst wird die Energiemenge bestimmt, die

[1] Die rechtlichen Regularien zu Arbeitszeit und Pausenregelung sind z. B. in (bussgeldkatalog.org, 2021) dargestellt.

während des Betriebstages unterwegs nachgeladen werden muss. Hierzu wird davon ausgegangen, dass Lkw grundsätzlich über Nacht im Depot vollgeladen werden können[1]. Es gilt also:

$$\text{Ladebedarf} = \text{Verbrauch} \cdot \text{Tagesfahrleistung} - \text{Akkukapazität (nutzbar)}$$

Die Ladedauer bestimmt sich dann über die verfügbare effektive Ladeleistung:

$$\text{Benötigte Ladedauer während des Tages} = \frac{\text{Ladebedarf}}{\text{Ladeleistung}_{\text{eff}} \cdot \text{Ladewirkungsgrad}}$$

Nun ist die Frage, wie oft und wie lange Batterie-Lkw dafür zusätzlich anhalten müssen bzw. welcher Teil davon in den Pausen oder während des Verladens erledigt werden kann. Hierzu werden vereinfachend folgende Annahmen getroffen:

- Die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitpausen stehen prinzipiell als Ladezeiten zur Verfügung. Zeitliche Verzögerung entsteht nur durch notwendige Ladepausen, die über diese ohnehin notwendigen Standzeiten hinausgehen.
- Ob bei Stopps zwischen zwei Touren am selben Tag während der Verladedauer eine Lademöglichkeit angenommen wird, hängt von der transportierten Gütergruppe ab (siehe Abschnitt 3.4.3). Bei sonstigen Lenkzeitpausen wird grundsätzlich eine (öffentliche) Lademöglichkeit angenommen.
- Es wird berücksichtigt, dass das Fahrzeug niemals mehr als eine Batterieladung auf einmal nachladen kann. Ein möglicher Kapazitätsverlust der Batterie im Laufe des Fahrzeuglebens wird für die Berechnung der Reichweite und des Ladebedarfs nicht berücksichtigt, da dieser durch die Hersteller voraussichtlich zumindest teilweise durch Freigabe einer Kapazitätsreserve ausgeglichen wird[2].
- Da das Fahrzeug pro zusätzlichem Stopp einige Minuten für Abbremsen, ggf. kleine Umwege zur Ladesäule und erneutem Beschleunigen verliert, wird eine pauschale Zusatzverzögerung addiert. Zur Bestimmung dieser wird mithilfe des Verbrauchs und der Akkukapazität heuristisch berechnet, wie viele reine Nachlade-Stopps der BEV im Laufe des Tages in etwa brauchen wird und pro Stopp eine pauschale Zusatzverzögerung addiert.

[1] Relationen mit Fahrtdauern von über 9 h wurden hier nicht berücksichtigt, da sie Sonderfälle bezüglich des Nachtladens und der Lenkzeitpausen darstellen und nur weniger als 1 % der Gesamtfahrleistung ausmachen.

[2] Für die Betreiberkosten wird die Batteriealterung allerdings im Wertverlust des Fahrzeuges bzw. ggf. bei einem Batterietausch berücksichtigt (siehe auch Anhänge A2d und A2f).

Die Verzögerung berechnet sich damit folgendermaßen:

Verzögerung
= Ladedauer
– Anzahl Verladestopps · min(Verladedauer, Zeit für eine Batterieladung)
– Anzahl Lenkzeitpausen des Dieselfahrzeugs[1]
· min(Pausenzeit, Zeit für eine Batterieladung)
+ pauschale Zusatzverzögerung für zusätzliche Ladestopps

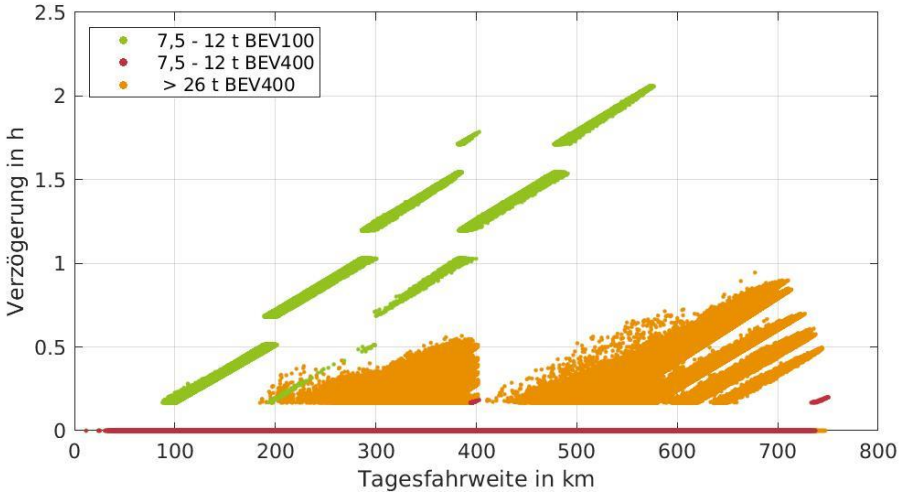


Abbildung 27: Auftretende Verzögerungszeiten auf Basis der Relationsdaten im Jahr 2030 (Auswahl)

In Abbildung 27 sind die resultierenden Verzögerungszeiten für ein größeres Set von Relationsdaten aus dem Verkehrsmodell dargestellt, wobei einige Untergruppen zur Veranschaulichung der resultierenden Effekte beispielhaft herausgegriffen wurden:

- Bei BEV-Lkw mit 7,5-12 t und 100 km Reichweite treten in etwa linear ansteigende Verzögerungen auf, wenn eine Tagesfahrweite von 100 km überschritten wird. Der stufenartige Verlauf entsteht durch den zusätzlichen Zeitaufwand bei jeder Verladepause, z. B. durch Parken oder Bedienung der Ladestation. In dieser Fahrzeugklasse wird allgemein davon ausgegangen, dass die Batterie bei Verladepausen in der Regel nicht nachgeladen werden kann. Bei Überschreitung der maximalen Lenkzeit des Fahrers oder der Fahrerin nach 4,5 h (je nach Geschwindigkeit nach 200-400 km) ist allerdings ein Nachladen während der verpflichtenden Pausenzeit möglich, was wiederum die Verzögerungszeit reduziert. Hierdurch entstehen die beiden parallelen Verläufe, wobei der obere den Relationen ohne Lenkzeitpause entspricht. Wichtig ist, dass die Lenkzeitpause nicht erst nach 4,5 h getätigt werden muss, sondern je nach Ladebedarf auch nach vorne verschoben werden kann (die Verfügbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur wird hier vorausgesetzt).

[1] Für diese Berechnung wird die Annahme getroffen, dass die Lenkzeitpause stets „am Stück“ genommen wird, also nach 4,5 h anfällt und 45 min dauert. Dies stellt im Hinblick auf die Lademöglichkeiten für Batterie-Lkw tendenziell eine konservative Annahme dar, da eine Aufteilung der Pause ggf. zwei kürzere Nachladungen ermöglichen könnte und damit die Eignung von Fahrzeugen mit geringerer Reichweite erhöhen könnte.

- Bei BEV-Lkw mit 7,5-12 t und 400 km Reichweite treten unter den getroffenen Annahmen nur selten Verzögerungen auf. Die gesetzliche Lenkzeitpause kann hier gut zum Nachladen genutzt werden, wodurch eine zusätzliche Verzögerung vermieden werden kann.
- Bei BEV-Lkw ≥26t mit 400 km nomineller Reichweite können abhängig von der typischen Nutzlast (und damit des Verbrauchs) und den verfügbaren Ladezeiten bei Verladestopps bereits ab etwa 200 km Tagesfahrweite Verzögerungszeiten entstehen. Da die Fahrten von Lkw dieser Größenklasse im Verkehrsmodell nach Güterabteilungen differenziert sind und sich somit die Beladung und die Möglichkeiten zur Zwischenladung zwischen den Güterabteilungen unterscheiden, ist die Streuung der Verzögerungszeiten hier deutlich größer als bei den kleineren Lkw. Die verschiedenen Anstiege der Fahrzeugklassen sind durch den Unterschied in der Ladeleistung zu erklären (siehe Tabelle 21).

3.5 Nicht-monetäre Eignungskriterien

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ein Vorgehen zur Quantifizierung technischer und wirtschaftlicher Faktoren beschrieben, die dem Einsatz von batteriebetriebenen Lkw aus derzeitiger Sicht entgegenstehen. Dies sind im Wesentlichen

- eine begrenzte zur Verfügung stehende Batteriekapazität und die daraus resultierende begrenzte Transportreichweite,
- die für den Aufladungsprozess erforderliche Standzeit sowie
- relativ hohe Investitionskosten, die mit zunehmender Reichweite weiter steigen.

Im Folgenden wird nun untersucht, welche Kenngrößen von Logistikprozessen entscheidend dafür sind, in welchem Maße die oben genannten Hemmnisse tatsächlich zu Buche schlagen. Die identifizierten Kenngrößen sind nachfolgend beschrieben und stellen ein Raster dar, mit dem zusätzlich zu den modellbasierten Analysen die Eignung für batterieelektrische Lkw-Transporte in Abhängigkeit des transportierten Guts bestimmt werden kann. Im Abschnitt 0 werden die Kenngrößen für die einzelnen Gütergruppen ausgewertet und dargestellt.

- **Transportweite**: Güterklassen, die über lange Strecken transportiert werden müssen, sind aufgrund der beschränkten Reichweite von Batterie-Lkw tendenziell weniger für den batterieelektrischen Transport geeignet – vor allem dann, wenn sie auch nur wenige Be- und Entladungsstopps aufweisen, die zum Zwischenladen verwendet werden könnten. Die mittlere Transportweite in einer Gütergruppe wird mittels Division der zurückgelegten Entfernung nach Güterklasse pro Jahr durch die Anzahl der Transporte nach Güterklasse pro Jahr berechnet (KBA, 2020b).
- **Mehrschichtbetrieb:** Bei Güterklassen, welche in Fahrzeugen transportiert werden, die in mehreren aufeinanderfolgenden Schichten eingesetzt werden, eignet sich der batteriebetriebene Transport weniger, da die lange (Nacht-)Ladepause dadurch ggf. wegfällt bzw. deutlich verkürzt wird. Jede Güterklasse wurde anhand ihrer Branchenzugehörigkeit in Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit zu Mehrschichtbetrieb beurteilt. Dazu wurde sowohl die Anzahl der Lkw-Fahrer und Lkw-Fahrerinnen also auch die Anzahl gemeldeter Lkw einer Branche ermittelt und den zugehörigen Güterklassen zugewiesen.
- **Nebenverbraucher:** Der Transport von einigen Güterklassen stellt Anforderungen an spezielle Lkw-Aufbauten, die für den Betrieb zusätzliche Energie erfordern, welche eine Batterie zusätzlich belasten können und dadurch die Transportreichweite reduzieren kön-

nen. Diese Aufbauten können beispielsweise Kühl- oder Kippeinrichtungen sein. Die Anzahl und Art der relevanten Aufbauten wurde je Branche recherchiert (KBA, 2020b). Anschließend erfolgte eine Zuordnung der Branchen auf Güterklassen. Jede Güterklasse wurde hinsichtlich ihrer Erfordernis von Zusatzaufbauten mit hohem Energiebedarf bewertet und in Form eines Kriteriums erfasst. Ein Erfordernis von Zusatzaufbauten von Lkw mit einem hohen Energiebedarf erschwert den Einsatz eines batteriebetriebenen Lkw.

- **Nutzlast:** Geringe Sendungsgewichte schonen die Transportreichweite, im Gegensatz zu hohen Sendungsgewichten, welche durch einen höheren Energiebedarf die Transportreichweite reduzieren. Zur Ermittlung des mittleren Sendungsgewichts je Güterklasse wurde die gesamtbeförderte Gütermenge je Güterklasse pro Jahr durch die Anzahl an Transportfahrten je Güterklasse pro Jahr dividiert (KBA, 2020b).

Um für die oben genannten Größen jeweils einen Eignungsindex zu erhalten, wird der absolute Wert jeder Größe linear in einen Skalenwert (0,0 bis 1,0) überführt. Das bedeutet, dass der Maximalausprägung eines ermittelten Wertes der Wert 1,0 zugewiesen wird, alle anderen folgen analog im linearen Zusammenhang dazu.

Zusätzlich wurden einige qualitative Kriterien herangezogen, um die Eignung von Gütergruppen für den Transport mit Batterie-Lkw zu bewerten:

- **Preissensibilität:** Die Anschaffung batteriebetriebener Fahrzeuge und der dazu benötigten Ladeinfrastruktur dürfte in der Einführungsphase in einigen Fällen zu Mehrkosten bzw. Kostenrisiken führen, die durch staatliche Fördermaßnahmen nicht vollständig aufgefangen werden. Die Transportkosten werden daher in Relation zum Wert des transportierten Gutes gesetzt: Wenn die Transportkosten einen relativen hohen Anteil an den gesamten Kosten eines Gutes haben, kann unterstellt werden, dass die verladenden Unternehmen sensibel auf höhere Transportkosten reagieren. Bei einem geringen Anteil der Transportkosten kann hingegen antizipiert werden, dass eine Kostensteigerung aufgrund eines Batterie-Lkw-Transport zumindest in der Einführungsphase mit höherer Wahrscheinlichkeit akzeptiert wird.
- **Endkundenaffinität:** Eine hohe Endkundenaffinität bedeutet, dass privater Konsum in der Input-Output-Statistik bei dieser Güterklasse stark vertreten ist. Diese Güter und die zugehörigen Transporte unterliegen somit tendenziell einer stärkeren Wahrnehmung durch Endkunden. Da ein Transport mit Batterie-Lkw in der Regel als umweltfreundlicher angesehen werden dürfte, ermöglicht der Einsatz von Batterie-Lkw eine positive Außenwirkung der verladenden Unternehmen. Dieser Image-Effekt kann den Einsatz von Batterie-Lkw begünstigen.
- **Unternehmensgröße:** Abschließendes Kriterium ist der mittlere Umsatz eines Unternehmens, welches in den jeweiligen Güterklasse tätig ist. Da eine Umstellung des Antriebskonzepts zu höheren Investitionen führt, kann davon ausgegangen werden, dass größere Unternehmen diese Kosten leichter über Skaleneffekte tragen können. Die angenommene Wahrscheinlichkeit für den Einsatz von Batterie-Lkw steigt daher mit dem typischen Umsatz eines Unternehmens in einer Güterklasse.

Auch die qualitativen Kriterien erhalten einen Indexwert zwischen 0 und 1. Bei Endkundenaffinität und Preissensibilität sind die möglichen Ergebnisse:

- 0: Kriterium im relativen Vergleich nicht/gering erfüllt
- 0,5: Kriterium im relativen Vergleich teilweise erfüllt
- 1: Kriterium im relativen Vergleich stark/deutlich erfüllt

Bei dem mittleren Unternehmensumsatz erfolgt eine lineare Überführung des absoluten Wertes in die Skala von 0 bis 1. Der höchste Wert erhält die 1,0 und alle anderen linear dazu, analog zum Vorgehen bei den quantitativen Kriterien. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 0 zusammengefasst.

4 Potentiale für den Einsatz von Batterie-Lkw

4.1 Eingangsgrößen und Annahmen

Die Berechnung des wirtschaftlichen Potentials für den Einsatz von Batterie-Lkw basiert auf Daten für rund 1,25 Mio. innerdeutsche Quell-Zielbeziehungen aus dem Verkehrsmodell PTV Validate (siehe Abschnitt 3.2). Diese ergeben zusammen eine Fahrleistung von etwa 45 Mrd. Fzg.-km (ca. 71 % der Fahrleistung von SNF in Deutschland) und eine Transportleistung von 316 Mrd. tkm. Für jede Relation werden entsprechend des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorgehens Kenngrößen der Einsatzprofile bestimmt (Jahresfahrleistung, Tagesfahrweiten, Standzeiten), die für auf der entsprechenden Relation verkehrende Fahrzeuge typisch sind. Auf dieser Basis werden für jede Relation Vollkosten für Diesel-Lkw sowie Elektro-Lkw mit unterschiedlichen Reichweiten berechnet und verglichen.

Benötigte Leistungsparameter, Einsatzprofil und Kosten von Lkw hängen in erster Linie vom zulässigen Gesamtgewicht (zGG) des Fahrzeugs bzw. des Gespanns ab. Es wurde daher eine Einteilung nach zGG vorgenommen (siehe Abschnitt 3.3), die in der nachfolgenden Darstellung der Potentiale verwendet wird. In der Verkehrsdatengrundlage (Kap. 3.2) sind Lastzüge hingegen entsprechend der jeweiligen Zugfahrzeuge eingeordnet. Ein Lastzug aus zweiachsigem Zugfahrzeug und zweiachsigem Anhänger mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 36 t wird somit in den Verkehrsdaten in der Größenklasse 12 t – 26 t geführt. Um daraus resultierende Inkonsistenzen zu vermeiden, werden Lastzüge aus der Potentialberechnung in dieser Untersuchung ausgenommen. Der Fahrleistungsanteil der Zugfahrzeuge von Gespannen in der Größenklasse 12 – 26 t wurde auf Grundlage von TREMOD und der Mautstatistik mit 76 % abgeschätzt.[1] Die Verkehrsmengen aus PTV Validate in dieser Größenklasse werden daher um den vorgenannten Faktor reduziert. Etwa 36 % der Gesamtfahrleistung in Validate fallen somit aus der Betrachtung heraus.

Das Ergebnis ist eine konservative Abschätzung des Potentials für Batterie-Lkw in den Größenklassen > 12 t, und zwar aus zwei Gründen: Zum einen gehen Gespanne nicht in die Betrachtung ein; dadurch reduziert sich die Grundgesamtheit der Fahrleistung in der Größenklasse > 26 t um etwa 55 % (bezogen auf die Gesamtfahrleistung aller Lkw-Klassen um etwa 36 %). Zum anderen werden die Fahrleistungen bzw. Relationslängen für Lkw der Klasse 12 – 26 t tendenziell überschätzt, da Solo-Lkw normalerweise eher kürzere Strecken bedienen als Gespanne. In zukünftigen Arbeiten ist geplant, eine Differenzierung umzusetzen, die auch eine Potentialbetrachtung für Gespanne erlaubt[2].

[1] Die Inlandfahrleistung laut TREMOD von Fahrzeugen mit einem zGG von 12-26 t beträgt 5,7 Mrd. km und von SNF >26 t 47 Mrd. km. Anhand der Mautstatistik lässt sich daraus abschätzen (Fahrleistung der Inländer wird vereinfacht als innerdeutsche Fahrleistung angenommen), dass die Fahrleistung innerdeutscher Relationen 4,7 Mrd. km (12-26t) bzw. 26,6 Mrd. km (>26t) beträgt. Aus dem Vergleich dieser Größen mit den Ausgangsdaten aus PTV Validate ergibt sich, dass etwa 76 % der Fahrleistung der GK 12-26t auf Gespanne entfallen, deren zulässiges Gesamtgewicht > 26 t beträgt. Dies sind vornehmlich Lastzüge.

[2] Die momentanen Ankündigungen der Hersteller bezüglich alternativer Antriebe deuten zumindest für die Markteinführungsphase bei den Fern-Lkw auf eine Fokussierung auf Sattelzugmaschinen hin, die auch international eine weit höhere Verbreitung haben. Perspektivisch ist aber sowohl ein verstärkter Einsatz von Sattelzügen auch in Deutschland denkbar als auch die Konzeption von Lkw mit höherer Leistung und Batteriekapazität, um sie als Zugfahrzeuge einsetzen zu können und damit Lastzüge zu elektrifizieren.

Für die erste Phase des Markthochlaufs von Batterie-Lkw **bis etwa zum Jahr 2025** wird davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit von öffentlicher bzw. halböffentlicher Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw noch gering ist und die Fahrzeuge daher ihren Energiebedarf in der Regel während der nächtlichen Standzeit auf dem Betriebshof decken müssen (Depotladen). Dies entspricht auch den derzeitigen Erwartungen der NPM (Nationale Plattform Mobilität, 2021) und den mehrheitlichen Aussagen der Fahrzeughersteller. Die Batterie des BEV-Lkw wird also so dimensioniert, dass die komplette Tagesfahrweite abgedeckt werden kann. Eine Aufladung erfolgt lediglich in der Nacht, sodass der Betriebsablauf während des Tages nicht durch Zwischenladen beeinflusst wird.

Es wird zudem davon ausgegangen, dass in dieser ersten Phase in erheblichem Umfang staatliche Förderung (v. a. Kaufprämien und Mautbefreiung[1]) für Elektro-Lkw gewährt werden. Im Standardfall werden daher die aktuell geplanten Bestimmungen zur Förderung für das Jahr 2025 angenommen. Im Rahmen einer Sensitivitätsrechnung wird allerdings auch die Situation im Jahr 2025 ohne Annahme staatlicher Förderung untersucht. Folgende staatliche Förderinstrumente werden in der Kostenberechnung berücksichtigt:

- Befreiung von Elektro-Lkw von der Lkw-Maut (nur zutreffend für Lkw ≥ 7,5 t zGG)
- Kaufprämie für die Anschaffung von Elektro-Lkw in Höhe von 80 % der Differenzkosten zu einem vergleichbaren Dieselfahrzeug (max. 100.000 €) – siehe dazu Abschnitt 3.3.1

Für das Jahr 2030 wird ein Massenmarkt für Batterie-Lkw angenommen und daher keine staatliche Förderung mehr unterstellt. Für dieses Jahr erscheint es denkbar, dass in hinreichendem Umfang öffentliche Ladeinfrastruktur auch für Lkw zur Verfügung steht, insbesondere für das Zwischenladen mit hoher Leistung an Bundesfernstraßen. Neben dem auch für 2025 untersuchten Fall einer Nachladung ausschließlich im Depot wird daher für 2030 ein Fall betrachtet, in dem ein Nachladen der Batterie während einer Tour möglich ist („Zwischenladen“). Dies hat Auswirkungen auf die Dimensionierung der Batterie und damit auf deren Kosten sowie das Fahrzeuggewicht und damit auch den spezifischen Energieverbrauch. Im Standardfall wird angenommen, dass ausschließlich während ohnehin notwendiger Lenkzeitpausen bzw. Verladepausen zwischengeladen werden kann. Zusätzlich wird untersucht, wie sich das Ergebnis verändert, wenn zeitliche Verzögerungen durch das Nachladen (abhängig von den anfallenden Zeitkosten, siehe Abschnitt 3.4.4) in einem begrenzten Maß toleriert werden.

Tabelle 20 enthält eine Übersicht wesentlicher Eingangsgrößen mit (direkter oder indirekter) Auswirkung auf die Kostenberechnung für die Bezugsjahre 2025 und 2030. Speziell für den Betrachtungsfall mit Zwischenladung während des Betriebs sind weitere Annahmen zu treffen, die in Tabelle 21 dargestellt sind. Für die Verkehrsmengen aus dem Modell PTV Validate wird in allen Szenarien gleichermaßen die Verkehrsprognose 2030 herangezogen. Einerseits werden dadurch die absoluten Verkehrsmengen im Szenario für das Jahr 2025 tendenziell etwas überschätzt. Andererseits lässt sich dadurch die Rolle der anderen zeitlich veränderlichen Parameter transparenter herausarbeiten. Wesentliche Ergebnisaussagen (insbesondere relative Anteile verschiedener Technologien) hängen darüber hinaus nur in

[1] Die Bundesregierung strebt im Zuge der Reform der Eurovignettenrichtlinie eine Differenzierung der Lkw-Maut nach dem direkten CO_2-Ausstoß der Lkw an, was einer Fortführung der Mautbefreiung gleichkommen würde. Allerdings sollen gleichzeitig Instrumente geschaffen werden, „mit denen eine Doppelbelastung des Güterkraftgewerbes durch die Mehrausgaben für Kraftstoffe aus dem Emissionshandel gemäß Brennstoffemissionshandelsgesetz vermieden werden kann“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020). Angesichts der Unsicherheit über die Ausgestaltung dieser Instrumente wird für die Betrachtungen in dieser Studie einerseits eine Fortschreibung der Lkw-Maut nach bisherigem Modell angenommen, die in 2030 auch durch Elektro-Lkw zu entrichten ist, andererseits aber auch eine Belastung von Diesel entsprechend des Brennstoffemissionshandelsgesetzes.

geringem Maße vom absoluten Niveau der Verkehrsleistung ab, deren Prognose zudem erheblichen Unsicherheiten unterliegt.

Tabelle 20: Überblick kostenrelevanter Annahmen für 2025 und 2030

	2025	2030
Energiepreise		
Diesel	1,19 €/l	1,36 €/l
Strom - Betriebshof	22,8 ct/kWh	20,4 ct/kWh
Strom - öffentlich	29,8 ct/kWh	27,4 ct/kWh
Strom - Fremdrampe	26,3 ct/kWh	23,9 ct/kWh
CO_2-Preis[1]	17,0 ct/l	30,9 ct/l
Fahrzeugpreise		
ICEV	<7,5t: 45.300 € 7,5-12t: 59.300 € 12-<18t: 70.600 € 18-<26t: 101.000 € ≥26t: 102.100 €	
BEV (exkl. Batterie)	<7,5t: 36.900 € 7,5-12t: 58.500 € 12-<18t: 80.400 € 18-<26t: 104.800 € ≥26t: 126.900 €	<7,5t: 31.400 € 7,5-12t: 44.700 € 12-<18t: 59.300 € 18-<26t: 77.000 € ≥26t: 90.200 €
Batterieparameter		
Batteriepreis	107 €/kWh	83 €/kWh
Energiedichte der Batterie	209 Wh/kg	225 Wh/kg
Nutzbarer SOC-Hub	80 %	
Restwert der Batterie	Ausgetauschte Batterie: 25 % Bei Verkauf eingebaute Batterie: Wertverlust analog zum Fahrzeug mit Berücksichtigung der verbleibenden Kapazität.	

[1] 2025: 55 €/t_{CO2}, 2030: 100 €/t_{CO2}

Tabelle 21: Annahmen für das Szenario mit Zwischenladung, Bezugsjahr 2030

	Annahme	Bemerkung
Zeitkosten	34 €/h	Ableitung siehe Abschnitt 3.3.3
Ladeleistung Depot	200 kW DC, maximal 0,5 C	Abhängig von Batteriegröße, weitere Erläuterungen zur C-Rate in Anhang A2f
Ladeleistung Rampe	200 kW DC, maximal 3 C	
Ladeleistung öffentliches Zwischenladen	500 kW DC, maximal 3 C	
Ladeverluste	7 % in Fahrzeug / Batterie + 7 % in der Ladestation	(JRC, 2020)

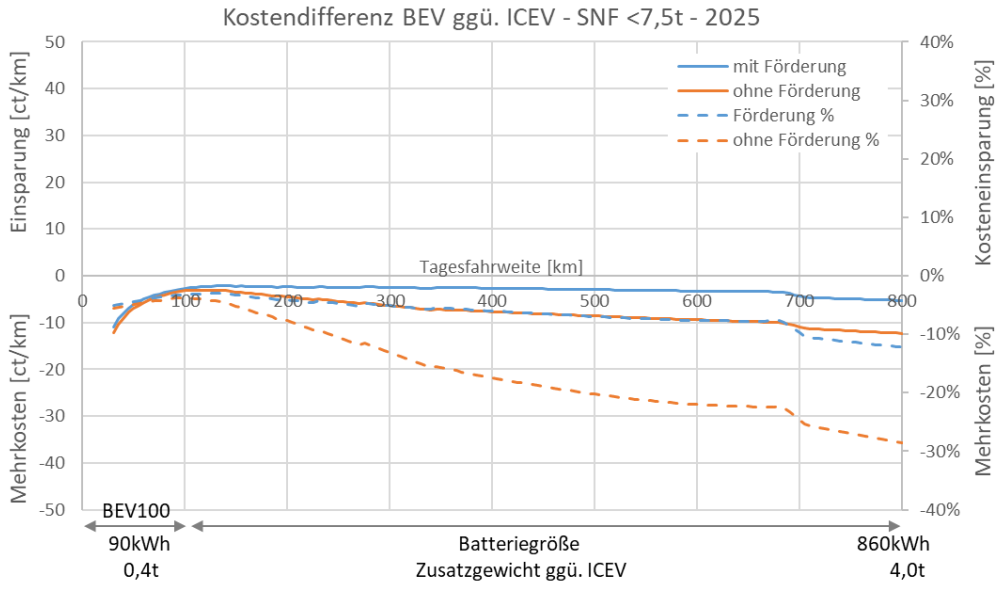
4.2 Wirtschaftliches Potential von E-Lkw in der Markteinführungsphase (2025)

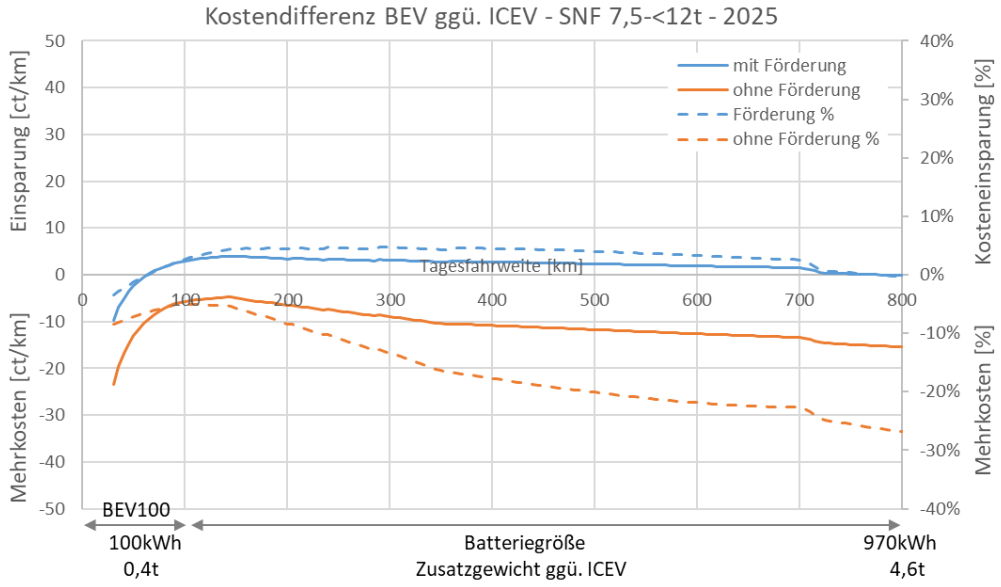
Im Folgenden wird zunächst die Wirtschaftlichkeit von E-Lkw im Bezugsjahr 2025 untersucht. Nach den derzeitigen Ankündigungen werden zu diesem Zeitpunkt so gut wie alle Lkw-Hersteller batterieelektrische Modelle in Serie anbieten, teilweise auch für schwere Lkw im Fernverkehr. Angesichts einer dann voraussichtlich noch begrenzten öffentlichen Ladeinfrastruktur für Lkw wird für 2025 aber ausschließlich der Fall betrachtet, dass die Lkw während der Betriebspausen (v. a. nachts) im Depot aufgeladen werden.

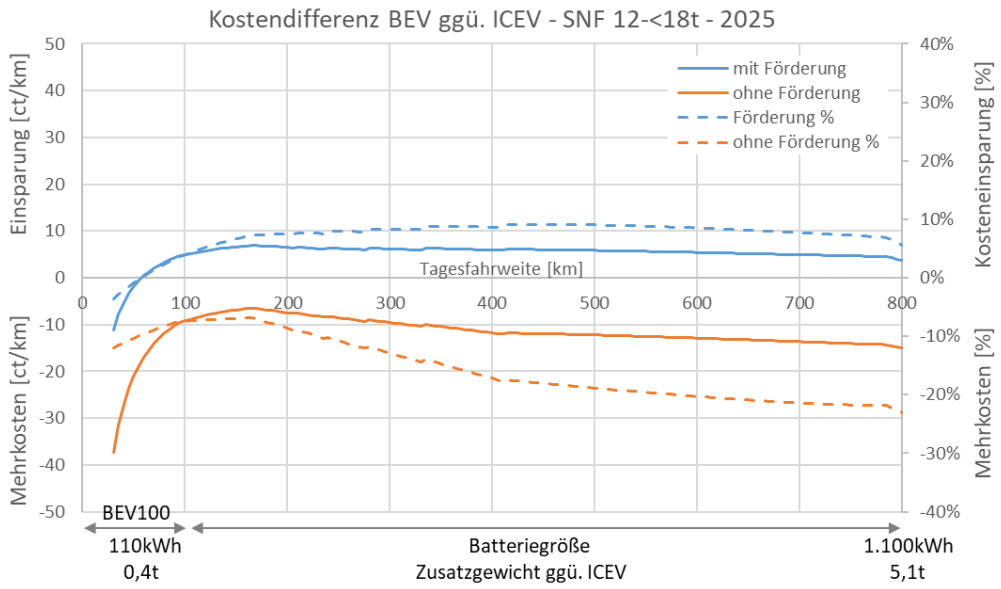
Wenn ein Lkw lediglich auf dem eigenen Betriebshof laden und ansonsten ohne Zwischenladung auskommen soll, dann ist die Traktionsbatterie in der Regel so zu dimensionieren, dass sie den Energiebedarf eines Tages abdecken kann. Für die folgende Rechnung wird angenommen, dass das Fahrzeug an 250 Arbeitstagen pro Jahr in Betrieb ist und an jedem Tag dieselbe Fahrleistung erbringt. Die Batterie wird entsprechend der benötigten Reichweite (= Tagesfahrleistung) dimensioniert, wobei angenommen wird, dass 80 % der Bruttokapazität nutzbar sind. Für die Temperatur werden jahresdurchschnittliche Bedingungen in Deutschland angenommen. Auch für Nutzlasten, Zusatzverbraucher und Straßentypanteile werden für die jeweilige Fahrzeugklasse typische Mittelwerte angenommen.

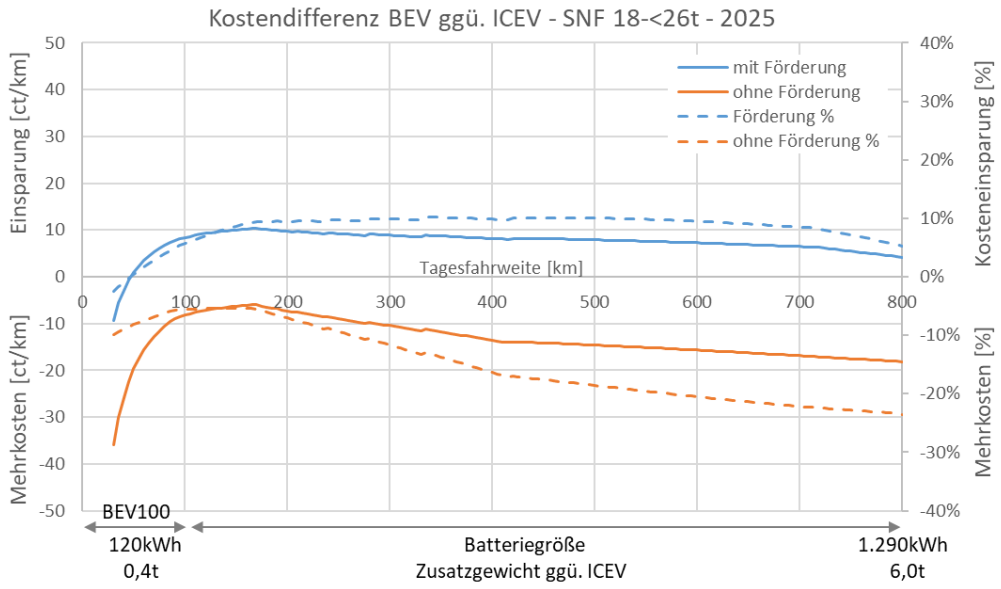
Die Berechnung der Vollkosten (TCO) erfolgt stets als Differenzkostenbetrachtung zum Diesel-Lkw. Es wird sowohl ein Fall ohne Förderung als auch ein Fall mit den aktuell geplanten Förderbedingungen angenommen, deren Fortbestand bis 2025 in diesem Fall unterstellt wird. Die Förderung besteht im Standardfall somit aus einer Befreiung von Lkw-Maut und Kfz-Steuer sowie einer Kaufpreisprämie in Höhe von 80 % der Mehrkosten eines BEV-Fahrzeugs ggü. einem vergleichbaren Diesel-Lkw; die Fördersumme pro Fahrzeug ist dabei auf 100.000 € gedeckelt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Kostendifferenzen zwischen Diesel-Lkw und Elektro-Lkw im Jahr 2025. Zum einen werden die absoluten Differenzen pro Größenklasse in ct/km angegeben und zum anderen werden die Einsparungen bzw. Mehrkosten von BEV ggü. ICEV bezogen auf die Vollkosten prozentual gegeben. Zusätzlich wird das Zusatzgewicht der BEV sowie die nötige Batteriekapazität an der Abszisse aufgeführt. Es werden lediglich BEV betrachtet, die minimal 100 km Reichweite aufweisen. Differenziert wird zwischen den Fällen mit und ohne Förderung. Die Kosten wurden analytisch für einen Standardfall (mittlere Beladung und durchschnittliche Straßenanteile) hergeleitet und weisen zunächst keinen Bezug auf die Relationsdaten auf. Für den Restwert der Fahrzeuge wird die Annahme getroffen, dass der Basiswert für die Restwertentwicklung gegenüber dem angenommenen Listenpreis um 50 % der Fördersumme reduziert wird (siehe Abschnitt 3.3.1).






Kostendifferenz BEV ggü. ICEV - SNF 12-<18t - 2025
Einsparung [ct/km]
Mehrkosten [ct/km]
Kosteneinsparung [%]
Mehrkosten [%]
mit Förderung
ohne Förderung
Förderung %
ohne Förderung %
Tagesfahrweite [km]
BEV100
110kWh
0,4t
Batteriegröße
Zusatzgewicht ggü. ICEV
1.100kWh
5,1t


Kostendifferenz BEV ggü. ICEV - SNF 18-<26t - 2025
Einsparung [ct/km]
Mehrkosten [ct/km]
Kosteneinsparung [%]
Mehrkosten [%]
mit Förderung
ohne Förderung
Förderung %
ohne Förderung %
Tagesfahrweite [km]
BEV100
120kWh
0,4t
Batteriegröße
Zusatzgewicht ggü. ICEV
1.290kWh
6,0t

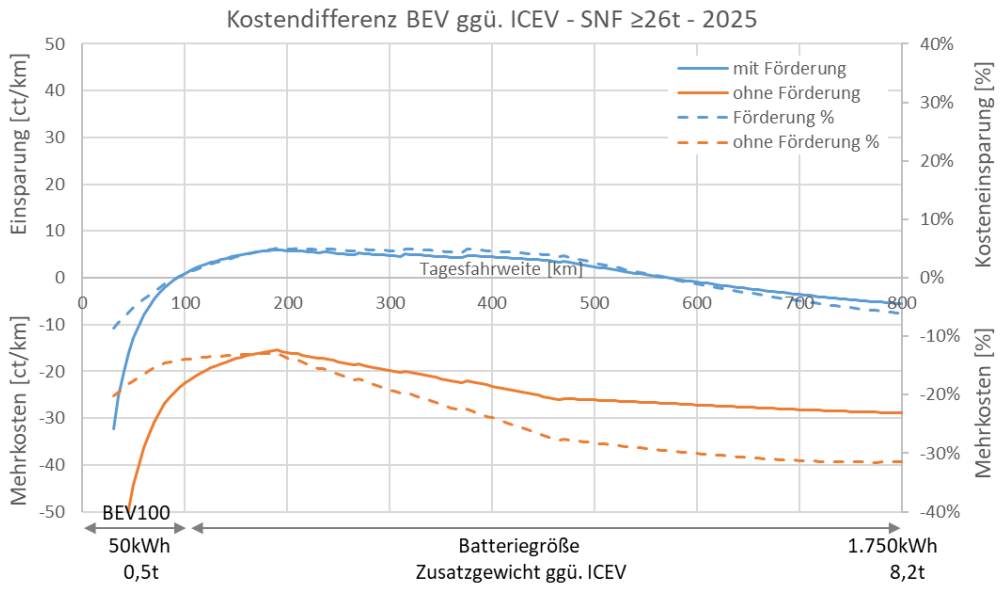


Abbildung 28: Differenzkosten (Einsparungen) von BEV und ICEV im Jahr 2025 mit und ohne Förderung

Aus den Ergebnissen in Abbildung 28 können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Unter Annahme der aktuell geplanten Förderung erreichen Batterie-Lkw in allen Größenklassen ≥ 7,5 t für viele Anwendungsfälle einen Kostenvorteil für die Betreiber. Bei Lkw ≥ 12 t liegt dieser Vorteil über weite Bereiche der Tagesfahrleistungen bei über 5 % der Gesamtkosten pro km und damit in einer relevanten Größenordnung.
- Lkw < 7,5 t erreichen trotz Förderung im Betrachtungsjahr keine Kostenparität, weil diese Fahrzeuge nach derzeitigem Stand nicht mautpflichtig sind und sich die Mautbefreiung daher nicht positiv auswirken kann. Die Mehrkosten bei Tagesfahrweiten <200 km liegen jedoch lediglich bei etwa 5 %.
- Der prozentuale Kostenvorteil pro km durch die Förderung ist bei Lkw ≥ 7,5 t im Bereich von etwa 200-500 km Tagesfahrweite am größten. Im Bereich geringerer Tagesfahrleistungen nimmt der Kostenvorteil ab und wird ab einem gewissen Punkt zu einem Kostennachteil, da die Struktur der Vollkosten pro km in diesem Bereich zunehmend durch die bei Batterie-Lkw höheren Fixkosten (v. a. den zeitabhängigen Teil des Wertverlusts) und den geringeren Einsparungen durch niedrigere Energiebezugskosten bestimmt wird. Im Bereich hoher Fahrleistungen nimmt der Kostenvorteil ebenfalls ab, da hier v. a. die durch die höhere Reichweite benötigte größere Batterie auf die Kosten durchschlägt.
- Ohne Förderung gibt es im Betrachtungsjahr noch keine wirtschaftlichen Anwendungsfälle für Batterie-Lkw. Die Lücke zur Kostenparität ist dabei im Bereich von knapp 100 km bis etwa 200 km Tagesfahrweite am geringsten, sie beträgt in diesem Bereich für kleine Lkw < 7,5 t knapp 5 % und steigt mit der Fahrzeuggröße; schwere Lkw ≥ 26 t haben eine TCO-Lücke von deutlich über 10 %.

Im nächsten Schritt wurden die dargestellten Kosten auf die Einsatzprofile der Lkw im innerdeutschen Verkehr angewendet, die auf Grundlage des Verkehrsmodells PTV Validate ermittelt wurden (siehe Abschnitte 3.2 und 3.4). Dazu wurden für jede Lkw-Größenklasse diskrete Auslegungsvarianten der Batterie-Lkw angenommen; ein BEV200 ist dabei ein Batterie-Lkw mit einer realen Reichweite von etwa 200 km.

Zunächst wird der Anteil der verschiedenen Auslegungsvarianten an der Fahrleistung in den einzelnen Lkw-Klassen bestimmt, unter der Annahme, dass die Kaufentscheidung rein TCO-basiert erfolgt. Um der Unsicherheit einer rein TCO-basierten Entscheidung Rechnung zu tragen, werden Einsatzprofile, deren TCO sich zwischen günstigstem Batterieantrieb und Dieselantrieb um weniger als 1 % unterscheiden, als „Kostenparität" dargestellt, also keiner Technologie zugeschlagen[1]. Wird wie zuvor eine Förderung entsprechend der aktuellen Beschlüsse[2] unterstellt und diese zur Hälfte auf den Restwert angerechnet, ergibt sich das in Abbildung 29 gezeigte Bild. Eine detailliertere Auswertung nach Tagesfahrleistungen findet sich in Anhang A3.

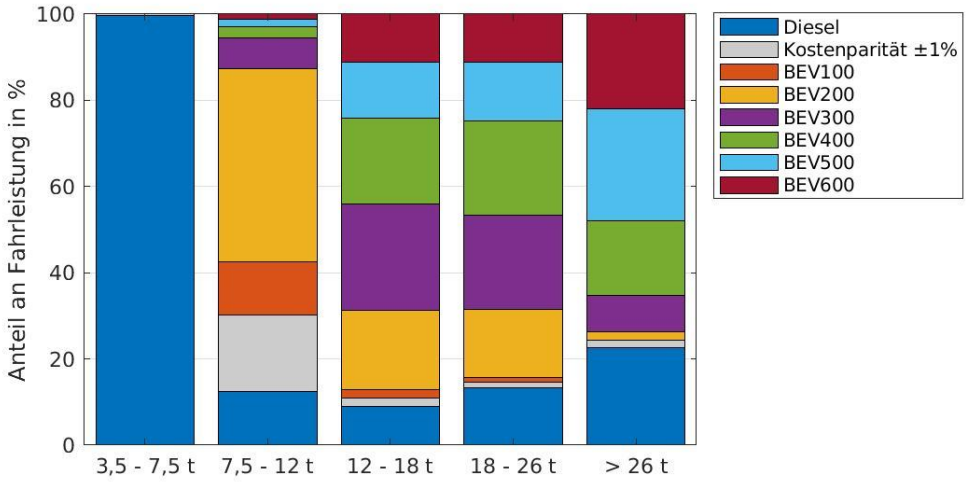


Abbildung 29: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2025 (mit Förderung, 50 % Anrechnung der Fördersumme auf den Restwert)

Bei den Lkw < 7,5 t (GK 0) ist der Dieselantrieb trotz Elektro-Förderung durchweg der wirtschaftlichste Antrieb. Bei der nächstgrößeren Lkw-Klasse < 12 t wirkt sich die Mautbefreiung aus, sodass für etwa 70 % der Fahrleistung der Einsatz von BEV-Lkw wirtschaftlich ist; der BEV200 allein stellt dabei für etwa 50 % der Gesamtfahrleistung dieser Größenklasse den wirtschaftlichsten Antrieb dar. Für Fahrprofile mit einer Tagesfahrweite von über 200 km kommen in begrenztem Maße auch BEV-Lkw mit höheren Reichweiten zum Zuge. Lediglich für 10 % der Fahrleistung in dieser Fahrzeugklasse ist der Dieselantrieb dann noch eindeutig am wirtschaftlichsten.

Bei den Lkw-Klassen > 12 t (GK 1) sind die mittleren Tagesfahrweiten deutlich höher (vgl. Abbildung 23). Dies zeigt sich in deutlich höheren elektrischen Reichweiten der im Modell gewählten Batterie-Lkw; etwa die Hälfte des elektrischen Fahrleistungspotentials geht auf Fahrzeuge mit einer Reichweite von mindestens 400 km zurück. Aufgrund der hohen angenommenen Förderung bietet jedoch auch die Anschaffung reichweitenstarker und damit teurer Batterie-Lkw in vielen Fällen einen Kostenvorteil. Es ergibt sich ein wirtschaftliches Potential für Batterie-Lkw von etwa 90 % (GK 2, 12-<18 t) bzw. 85 % (GK 3, 18-< 26 t) der elektrischen Fahrleistung. Bei den schweren Lkw ≥ 26 t (GK 4, hauptsächlich Sattelzugma-

[1] Der Bereich der Kostenparität umfasst also eine Breite von 2 % der Gesamtkosten pro km, was in der Größenordnung üblicher Margen im Logistikbereich liegt; bei (Gipfel der Logistikweisen, 2018) werden diese mit 2-6 % angegeben, bei (BVL, 2016) mit 1,4 % für Stückgutverkehre und 1,9 % für Ladungsverkehre.
[2] Förderung von 80 % der Mehrkosten, Deckelung der Fördersumme auf 100.000 € pro Fahrzeug

schinen) ist der Anteil der für BEV-Lkw nicht wirtschaftlichen Fahrleistung mit 23 % der Fahrleistung deutlich größer als bei den kleineren Lkw. Gleichzeitig ist aufgrund der hohen mittleren Tagesfahrleistungen in dieser Fahrzeugklasse der Anteil von Fahrzeugen mit hoher Reichweite nochmals merklich höher. Generell spielen bei dieser Fahrzeugklasse (ohne angenommene Zwischenlademöglichkeit) nur BEV mit einer Reichweite von 300 km oder mehr eine Rolle.

In Abbildung 30 sind die sich für die einzelnen Größenklassen jeweils absolut ergebenden elektrischen Fahrleistungen und Transportleistungen[1] dargestellt, die mit Batterie-Lkw im Jahr 2025 wirtschaftlich darstellbar wären. Es ist ersichtlich, dass die hohen elektrischen Anteile bei GK 1 (7,5-<12 t) nur einen vergleichsweise geringen Beitrag zur gesamten elektrischen Fahr- und insbesondere Transportleistung im Straßengüterverkehr leisten, da hier sowohl die Fahrleistung pro Fahrzeug als auch die Nutzlast vergleichsweise gering ist. Der absolut größte Beitrag ergibt sich hingegen bei den Sattelzugmaschinen. Insgesamt ergibt sich eine elektrische Fahrleistung von 16,8 Mrd. Fzg-km (etwa 37 % der Gesamtfahrleistung von SNF) bzw. eine elektrische Transportleistung von 148 Mrd. tkm (etwa 47 % der Gesamttransportleistung von SNF).

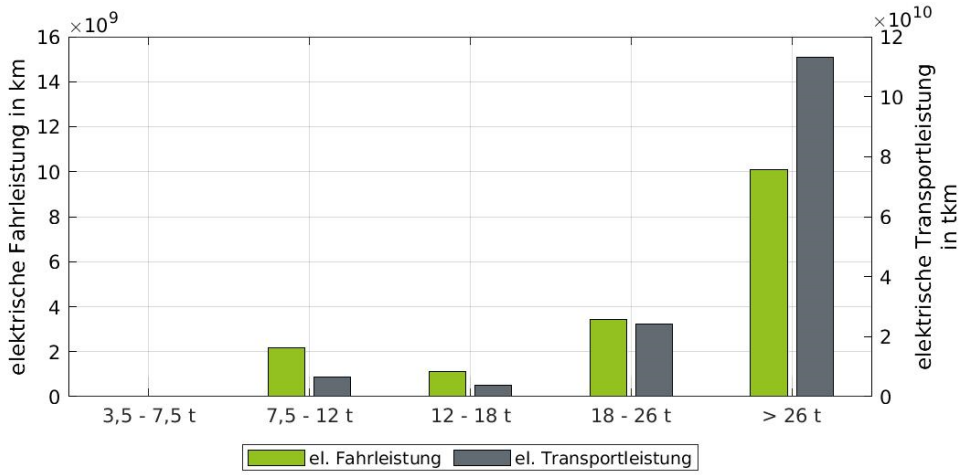


Abbildung 30: Elektrische Fahr- und Transportleistung pro Jahr nach Größenklasse im Jahr 2025 (mit Förderung)[2]

Würde das oben berechnete Fahrleistungspotential für Batterie-Lkw im Jahr 2025 vollständig realisiert, so würde sich für die dafür benötigten Fahrzeuge eine Fördersumme[3] von etwa 13 Mrd. € ergeben. Dem stehen 1,6 Mrd. € gegenüber, die durch das BMVI derzeit für die Förderung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben bis inklusive 2024 vorgesehen sind[4]. Auch wenn u.a. aus Gründen von Investitionszyklen, Fahrzeugverfügbarkeit, Nutzerakzeptanz und betrieblichen Herausforderungen eine Ausschöpfung des wirtschaftlichen Potentials kurzfristig als sehr unwahrscheinlich anzusehen ist, so zeigt dieser Vergleich doch,

[1] Auch wenn die CO_2-Emissionen in dieser Studie nicht explizit thematisiert werden, so kann die Transportleistung doch in allererster Näherung als ein Indikator für die erzielbaren CO_2-Minderungen betrachtet werden.
[2] Lastzüge sind im dargestellten Potential der Größenklasse > 26 t nicht enthalten, siehe hierzu die Erläuterungen in Abschnitt 4.1.
[3] nur Kaufprämie, ohne Berücksichtigung von Einnahmeausfällen durch die angenommene Mautbefreiung. Der angegebene Wert stellt eine grobe Schätzung dar.
[4] www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/Alternative-Kraftstoffe/foerderung-von-fahrzeugen.html

dass die Nachfrage nach Fördermitteln die verfügbaren Haushaltsmittel deutlich übersteigen könnte. Zudem ergibt sich aus den Berechnungen, dass der mittlere TCO-Vorteil[1] von Batterie-Lkw gegenüber Diesel-Lkw bei der angenommenen Förderung mit 7,3 % der TCO (etwa 8,4 ct/km für einen Lkw > 26 t) in einer beträchtlichen Größenordnung liegt, bei der größere Mitnahmeeffekte anzunehmen sind.

Um zu untersuchen, wie sich eine reduzierte Förderung (bzw. ein späteres Abschmelzen des Fördersatzes) auswirken würde, wurde das wirtschaftliche Potential zudem unter Annahme der bisherigen Kaufprämie für Nullemissions-Lkw (Förderung von 40 % der Mehrkosten, Deckelung auf 40.000 € pro Fahrzeug[2], siehe (BMVI, 2018)) sowie zusätzlich ohne Kaufprämie (nur Mautbefreiung) berechnet. Die Ergebnisse für das wirtschaftliche Potential zeigt Abbildung 31. Im Vergleich mit der geplanten Förderung (Abbildung 29) ergibt sich bei reduzierter Kaufprämie nur bei Lkw > 26 t eine deutliche Reduktion des wirtschaftlichen Potentials; hier fallen in erster Linie Fahrzeuge mit sehr hoher Reichweite von 500 bzw. 600 km weg. Der mittlere TCO-Vorteil der Batterie-Lkw sinkt auf 4,6 %, die Fördersumme bei Ausschöpfung des Potentials liegt bei 4,5 Mrd. €. Wird lediglich eine Mautbefreiung gewährt, so sind Fahrzeuge mit mehr als 400 km Reichweite nur noch in Ausnahmefällen wirtschaftlich, für Lkw > 26 t sinkt das wirtschaftliche Potential für BEV-Lkw damit auf nahe null. Der mittlere TCO-Vorteil der gewählten BEV-Lkw liegt bei 3,4 %, der Anteil der Fahrleistung im Bereich der TCO-Parität (ohne eindeutigen Kostenvorteil) steigt merklich.

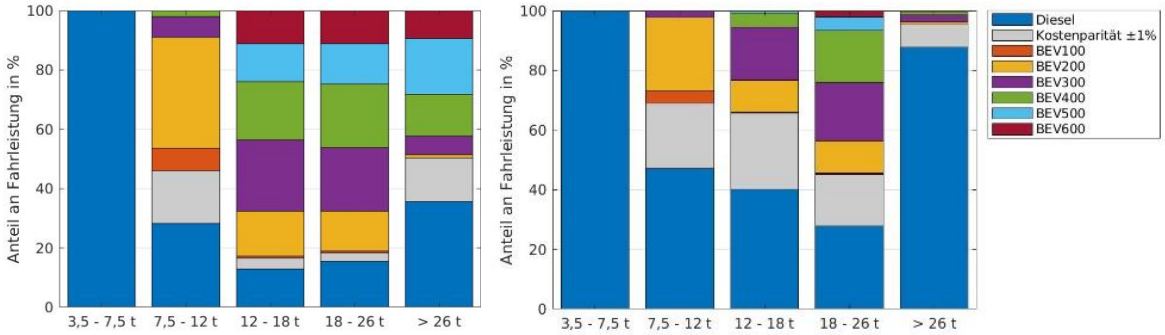


Abbildung 31: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2025, unter Annahme reduzierter Förderung (links: Kaufprämie max. 40 % der Mehrkosten + Mautbefreiung; rechts: nur Mautbefreiung)

In einem Umfeld mit hoher Förderung ergeben sich erhebliche Unsicherheiten für den Restwert der Fahrzeuge. In den bisher gezeigten Ergebnissen wurde die Annahme getroffen, dass der Basiswert für die Restwertentwicklung gegenüber dem angenommenen Listenpreis um 50 % der Fördersumme reduziert wird. Der Einfluss dieser Annahme wird nun durch Gegenüberstellung von zwei Extremfällen untersucht :

1. Die Förderung hat keinen Einfluss auf den Restwert. Die zeitabhängige Restwertkurve beginnt also zum Zeitpunkt der Anschaffung beim vollen angenommenen Listenpreis.
2. Der Anteil der Fördersumme am Restwert wird vollständig abgezogen, was impliziert, dass die Förderung zum Zeitpunkt des Wiederverkaufs zu einem Preisverfall am Zweitmarkt in der Größenordnung des ursprünglich geförderten Anteils führt.

[1] Der Durchschnitt ist hier auf alle Einsatzprofile bezogen, in denen Batterie-Lkw gegenüber dem Dieselantrieb wirtschaftlich sind.
[2] Zusätzlich war die Fördersumme in der bisherigen Richtlinie auf 500.000 € pro Unternehmen begrenzt, was hier nicht abgebildet ist.

Wie stark sich diese Annahmen auswirken, hängt von der Höhe der angenommenen Kaufprämie ab. Für die 80 %-Förderung der Mehrkosten macht der Unterschied zwischen den beiden obigen Annahmen etwa 2,3 % der TCO aus, während Batterie-Lkw hier einen mittleren TCO-Vorteil von 7,3 % aufweisen. Somit lohnen sich Batterie-Lkw in den meisten Fällen auch bei pessimistischen Annahmen noch und die zukünftige Prämiengestaltung verändert das wirtschaftliche Potential um 3,7 %. Bei einer nur 40-prozentigen Förderung bewirken die beiden Annahmen einen Unterschied von 0,8 % der TCO, während der mittlere TCO-Vorteil indes nur 4,6 % beträgt. Der Unterschied des resultierenden wirtschaftlichen Potentials zwischen beiden Annahmen liegt hier mit 9,5 % deutlich höher als im Falle der höheren Kaufprämie.

Im Ergebnis kann für das Jahr 2025 somit Folgendes festgehalten werden:

- Ohne Förderung ist ein wirtschaftlicher Einsatz von Batterie-Lkw voraussichtlich nicht gegeben.
- Mit der geplanten Förderung (Mautbefreiung und Kaufprämie i.H.v. 80 % der Mehrkosten) ist für 37 % der Fahrleistung und 47 % der Transportleistung schwerer Nutzfahrzeuge im innerdeutschen Verkehr ein wirtschaftlicher Einsatz von Batterie-Lkw möglich. Aufgrund der im Durchschnitt hohen TCO-Vorteile ist diese Förderung robust gegenüber Kostenunsicherheiten, aber lässt auch Mitnahmeeffekte in erheblicher Größenordnung erwarten (u.a. durch die Preisgestaltung der Hersteller).
- Die bisher praktizierte Förderquote von 40 % der Mehrkosten ermöglicht demgegenüber ein Potential von 28 % der Fahrleistung. Eine Reduktion der Förderung auf die Mautbefreiung geht mit einem elektrischen Fahrleistungspotential von 9 % einher. Die Fördereffizienz (€ pro elektrischem tkm) ist bei 40-prozentiger Förderung etwa doppelt so hoch wie bei 80-prozentiger Förderung.
- Die erwartete Wertentwicklung von E-Lkw auf den Zweitmärkten ist für die Kostenrechnung von Bedeutung und wird zum einen durch den politischen Rahmen (z. B. Fortbestand von Förderinstrumenten, gezielte Stützung des Zweitmarktes), zum anderen aber auch durch die gewählten Finanzierungsmodelle für die auf den Markt kommenden Elektro-Lkw (Leasing, Restwertgarantie, …) beeinflusst.

4.3 Wirtschaftliches Potential von E-Lkw in einem künftigen Massenmarkt (2030)

4.3.1. Fall A: Aufladung ausschließlich im Depot

Für das Jahr 2030 wird ein Massenmarkt betrachtet und daher davon ausgegangen, dass zuvor bestehende Förderinstrumente (Kaufprämie, Mautbefreiung[1]) ausgelaufen sind. Hinsichtlich der Infrastruktur wird zunächst weiterhin die (konservative) Annahme getroffen,

[1] Die Bundesregierung strebt im Zuge der Reform der Eurovignettenrichtlinie eine Differenzierung der Lkw-Maut nach dem direkten CO_2-Ausstoß der Lkw an, was einer Fortführung der Mautbefreiung gleichkommen würde. Allerdings sollen gleichzeitig Instrumente geschaffen werden, „mit denen eine Doppelbelastung des Güterkraftgewerbes durch die Mehrausgaben für Kraftstoffe aus dem Emissionshandel gemäß Brennstoffemissionshandelsgesetz vermieden werden kann“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020). Angesichts der Unsicherheit über die Ausgestaltung dieser Instrumente wird für die Betrachtungen in dieser Studie einerseits eine Fortschreibung der Lkw-Maut nach bisherigem Modell angenommen,

dass ausschließlich im Depot geladen werden kann. Die resultierende kostenbasierte Verteilung der Fahrleistung auf die Antriebstechnologien ist in Abbildung 32 gezeigt. Eine detailliertere Auswertung nach Tagesfahrleistungen findet sich in Anhang A3. Im nächsten Abschnitt wird dann das zusätzliche Potential von Zwischenladung untersucht.

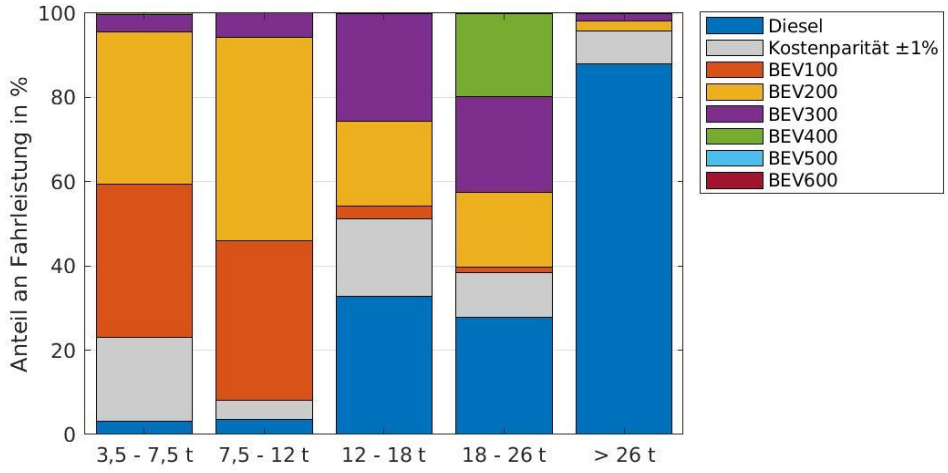


Abbildung 32: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen, keine Förderung)

Bei GK 0 und 1 kommen demnach großenteils BEV-Konzepte mit 100 km oder 200 km elektrischer Reichweite zum Einsatz. Nur ein geringer Teil der Fahrleistung benötigt Fahrzeuge mit höheren Reichweiten. Insgesamt ist der Batterieantrieb in einem ungeförderten Massenmarkt 2030 für etwa 80 % (GK 0) bzw. 90 % (GK 1) der Fahrleistung gegenüber dem Diesel wirtschaftlich. Die verbleibende Fahrleistung bewegt sich zum großen Teil zumindest im Bereich der Kostenparität. Der Dieselantrieb ist dann nur noch für Einsatzprofile mit weit überdurchschnittlicher Fahrleistung wirtschaftlich.

Für die Größenklassen zwischen 12 und 26 t liegt der für Batterie-Lkw wirtschaftliche Anteil der Fahrleistung bei etwa 50 % (GK 2) bzw. 60 % (GK 3). Hier kommen v. a. BEV200 und BEV300 zum Zuge, bei GK 3 auch BEV400. Hinzu kommen etwa 20 % bzw. 10 % der Fahrleistung im Bereich der TCO-Parität. Bei den schweren Lkw > 26 t spielen Batterie-Lkw bei reiner Depotladung aufgrund der hohen Tagesfahrweiten weiterhin nur eine sehr geringe Rolle – etwa 10 % der Fahrleistung ist hier für Batterieantrieb TCO-positiv oder im Bereich der Kostenparität.

Die sich ergebenden absoluten elektrischen Fahr- und Verkehrsleistungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die unteren Lkw-Segmente bis 12 t zGG den größten Teil des elektrischen Fahrleistungspotentials beisteuern. Bei der Transportleistung liefern Lkw der Größenklasse 18-26 t aufgrund ihrer höheren Nutzlast den größten absoluten Beitrag.

die in 2030 auch durch Elektro-Lkw zu entrichten ist, andererseits aber auch eine Belastung von Diesel entsprechend des Brennstoffemissionshandelsgesetzes.

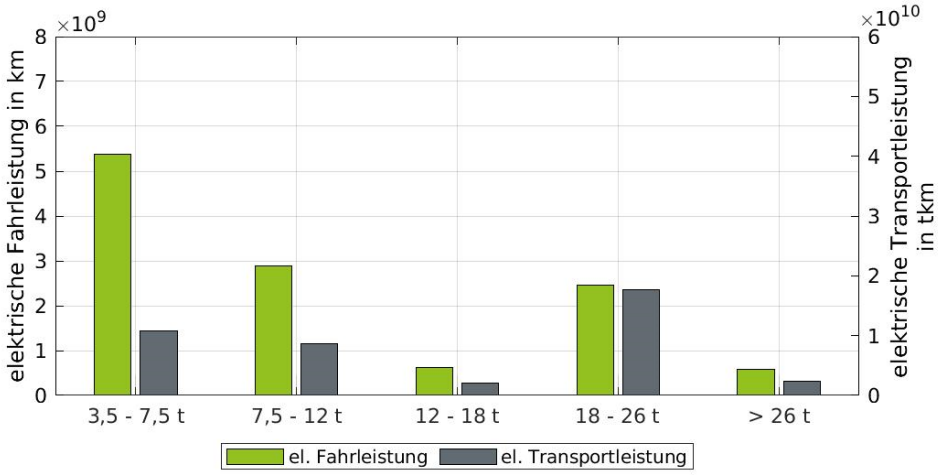


Abbildung 33: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung pro Jahr nach Größenklasse im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen, keine Förderung)[1]

4.3.2. Fall B: Berücksichtigung von Zwischenladen während des Betriebstages

Zwischenladen im Rahmen der Lenk- und Verladepausen

Für die Berechnung von Fall B wird nun unterstellt, dass flächendeckend Ladeinfrastruktur zum Zwischenladen der Batterie-Lkw während des Betriebstages verfügbar ist. Bei Ruhepausen des Fahrers oder der Fahrerin sowie eigens zur Zwischenladung eingelegten Stopps kann demnach immer auf Ladeinfrastruktur zurückgegriffen werden. Bei Stopps zum Be- und Entladen wurden gütergruppenspezifische Annahmen getroffen (siehe Abschnitt 3.4.3, Tabelle 18). Die Strombezugskosten werden dabei für das Zwischenladen höher angenommen als für das Depotladen. Ein über die ohnehin anfallende Pausenzeit hinausgehender zusätzlicher Zeitbedarf durch das Zwischenladen (längere Transportdauer ggü. Dieselfahrzeug) wird hier zunächst nicht vorgesehen.

[1] Lastzüge sind im dargestellten Potential der Größenklasse > 26 t nicht enthalten, siehe hierzu die Erläuterungen in Abschnitt 4.1.

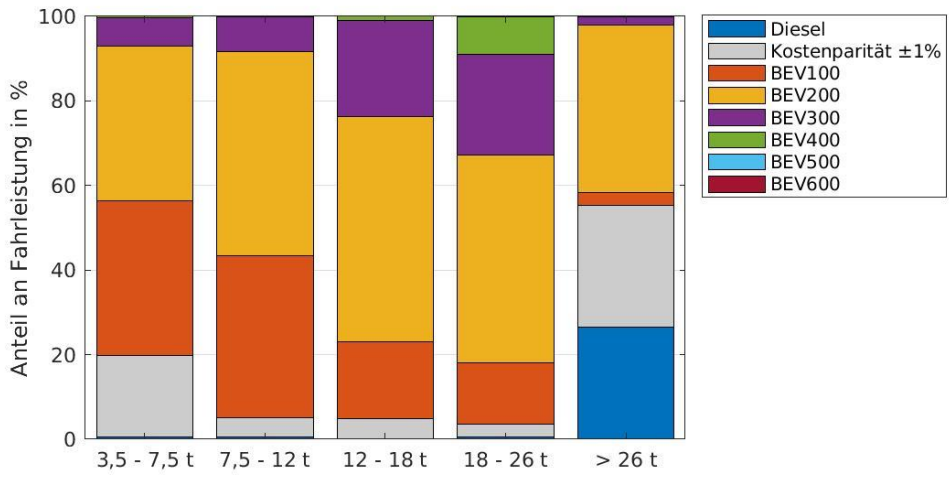


Abbildung 34: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2030 (Zwischenladen nur ohne auftretende Verzögerung)

Die Ergebnisse für den Anteil der Antriebskonzepte an der Fahrleistung der einzelnen Lkw-Klassen zeigt Abbildung 34. Eine detailliertere Auswertung nach Tagesfahrleistungen findet sich in Anhang A3. Im Vergleich zu Abbildung 32 (Fall A ohne Zwischenladen) sind vor allem bei den größeren Lkw > 12 t deutliche Verschiebungen zu erkennen:

- Die Größenklassen 2 und 3 erreichen nun ein elektrisches Fahrleistungspotential von annähernd 100 %. Der überwiegende Anteil davon entfällt auf Batteriefahrzeuge mit etwa 200 km elektrischer Reichweite. Insbesondere bei GK 3 treten jedoch auch Reichweiten von bis zu 400 km auf.
- Bei der Größenklasse 4 (> 26 t) zeigt sich ein elektrisches Fahrleistungspotential von etwa 40 %, der Großteil davon entfällt auch hier wiederum auf Fahrzeuge mit etwa 200 km Reichweite. Hinzu kommt ein Anteil von etwa 30 % der Fahrleistung, der im Bereich der Kostenparität liegt.

Lediglich bei den Größenklassen 0 und 1 (< 12 t) ändert sich wenig, was daran liegt, dass bei den dort vorherrschenden geringen Tagesfahrweiten der Energiebedarf von BEV100 und BEV200 in der Regel bereits gut durch das Depotladen gedeckt werden kann.

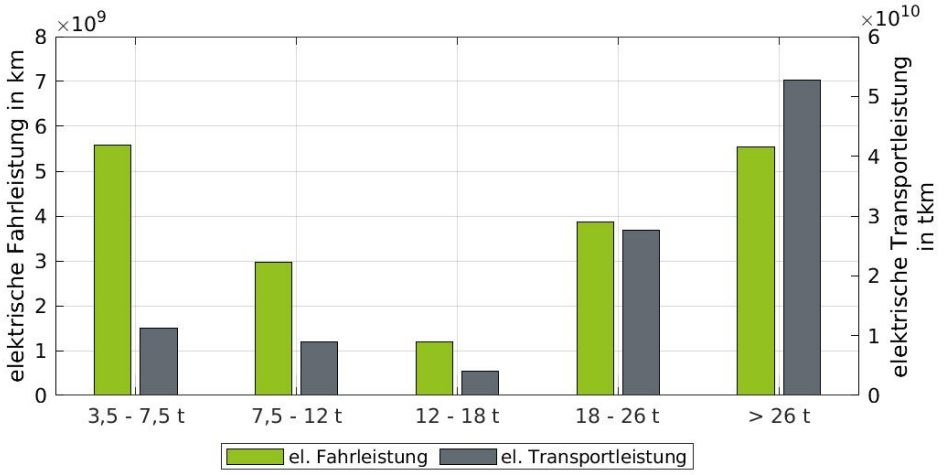


Abbildung 35: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung pro Jahr nach Größenklasse im Jahr 2030 (Mit Zwischenladen ohne Auftreten zeitlicher Verzögerung)[1]

Vor allem für Sattelzüge ergeben sich durch die Möglichkeit von Zwischenladung also hohe zusätzliche Potentiale elektrischer Fahrleistung (Abbildung 35), aber auch bei den anderen Segmenten oberhalb von 12 t zGG ist ein beträchtlicher Zuwachs zu verzeichnen. Das gesamte elektrische Fahrleistungspotential kann durch die Zwischenlademöglichkeit um etwa zwei Drittel erhöht werden, die elektrische Transportleistung (die in etwa proportional zur Minderung der CO_2-Emissionen ist) steigt um den Faktor 2,6. Zu beachten ist allerdings, dass in dieser Betrachtung der Fokus auf der Kostenperspektive liegt und betriebliche Aspekte nur relativ grob abgebildet werden. Insbesondere wird die Annahme getroffen, dass die Lenkzeitpause stets „am Stück“ genommen wird, also bei Fahrten über 4,5 h anfällt und 45 min dauert. Dies stellt im Hinblick auf die Lademöglichkeiten für Batterie-Lkw tendenziell eine konservative Annahme dar, da eine Aufteilung der Pause ggf. zwei kürzere Nachladungen ermöglichen könnte und damit die Eignung von Fahrzeugen mit geringerer Reichweite erhöhen könnte.

Abbildung 36 zeigt die Kostendifferenz zwischen dem günstigsten Batterie-Antrieb und dem Diesel-Antrieb für die einzelnen Einsatzprofile. Eine positive Kostendifferenz bedeutet, dass im Modell der entsprechende Batterieantrieb gewählt wird, eine negative Kostendifferenz (blauer Bereich) bedeutet, dass der Dieselantrieb am wirtschaftlichsten ist. Es ist gut zu sehen, dass Batterieantriebe mit vergleichsweise geringer Reichweite bei den Einsatzprofilen, für die sie technisch in Frage kommen, in der Regel einen größeren Kostenvorteil erzielen. Vor allem BEV200 weisen über einen weiten Bereich von Tagesfahrweiten einen stabilen wirtschaftlichen Vorteil auf. Das hier modellierte Potential setzt allerdings eine zuverlässige Verfügbarkeit von sowohl öffentlicher Ladeinfrastruktur als auch betrieblicher Ladeinfrastruktur an den üblichen Halteorten der Fahrzeuge voraus.

[1] Lastzüge sind im dargestellten Potential der Größenklasse > 26 t nicht enthalten, siehe hierzu die Erläuterungen in Abschnitt 4.1.

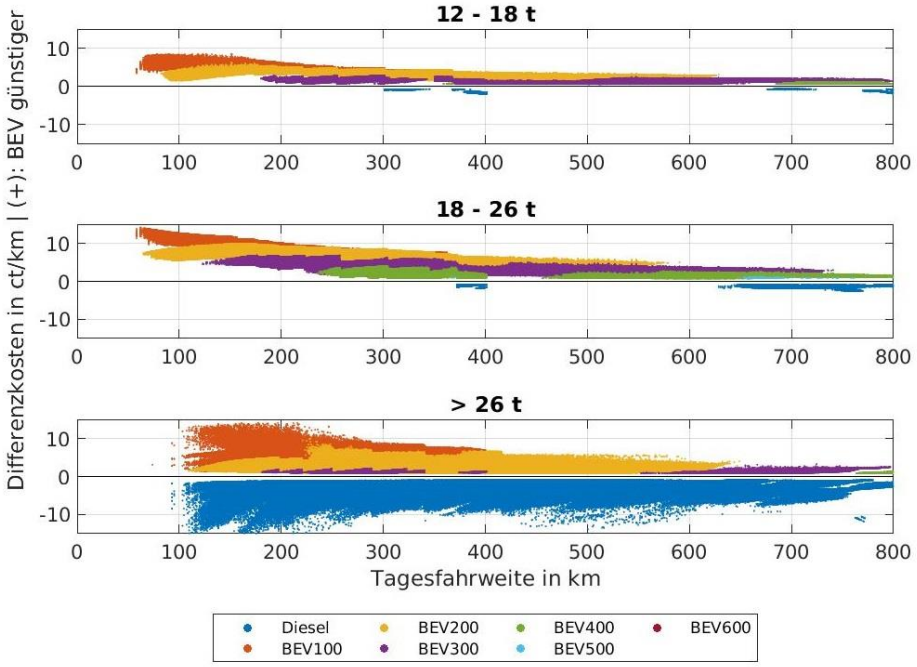


Abbildung 36: Kostendifferenz der einzelnen Einsatzprofile in Abhängigkeit der Tagesfahrweite für Größenklassen ab 12 t zGG für das Jahr 2030 (mit Zwischenladen, ohne Zulassen zeitlicher Verzögerung)

Zwischenladen über die Lenk- und Verladepausen hinaus

In den obigen Berechnungen wurden für das Zwischenladen nur die ohnehin anfallende Pausenzeit (Lenkzeitpause und Verladestopps) genutzt, es wurden also keine betrieblichen Nachteile unterstellt. Im Folgenden wird untersucht, wie sich das Ergebnis ändert, wenn für das Zwischenladen zusätzliche Stopps in Kauf genommen werden. Die betrieblichen Nachteile werden dabei jedoch mit entsprechenden Zeitkosten bewertet. Das Vorgehen zur Berechnung der zeitlichen Verzögerung ist in Abschnitt 3.4.4 beschrieben. Zusätzlich zur Ladezeit wird für jeden Ladestopp auch ein pauschaler Zeitbedarf von 10 Minuten angenommen (Umweg zur Ladesäule, Parken, Einstecken etc.).

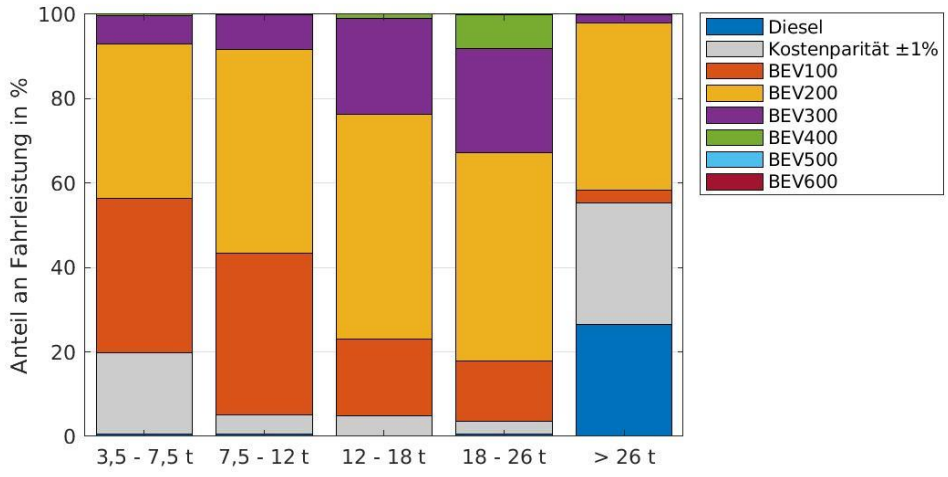


Abbildung 37: Fahrleistungsanteile der günstigsten Technologie auf Basis der Relationsdaten nach Größenklasse im Jahr 2030 (Mit Zwischenladen und Zulassen zeitlicher Verzögerung)

Der resultierende Technologiemix ist in Abbildung 37 gezeigt. Im Vergleich zum Fall ohne die Möglichkeit zeitliche Verzögerungen in Kauf zu nehmen sind im Gesamtbild kaum Unterschiede zu erkennen. Unter den getroffenen Annahmen zur Zeitkostenbewertung wird nur in sehr wenigen Fällen (weniger als 2 % der Einsatzprofile) eine zeitliche Verzögerung toleriert. Unter Berücksichtigung der auftretenden Zeitkosten entsteht also in der Regel kein Kostenvorteil, die Wahrung der betrieblichen Abläufe ist damit unter wirtschaftlichen Aspekten vorteilhaft. Wie Abbildung 38 zeigt, wird nur bei Größenklasse 3 (18-26 t) von der Möglichkeit zusätzlicher Ladestopps Gebrauch gemacht. Hier werden v. a. im Bereich unter 400 km Tagesfahrweite (wo also keine lange Lenkzeitpause zum Laden zur Verfügung steht) Einsatzprofile für BEV200, BEV300 und BEV400 durch das Zwischenladen „ermöglicht“. Die akzeptierte Verzögerung pro Betriebstag liegt hier bei bis zu einer Viertelstunde. Für kleine Lkw < 12 t werden im Modell keine Verzögerungen akzeptiert, was auf die vergleichsweise größere Bedeutung der Personalkosten bei den kleineren Fahrzeugen und auch die geringen Tagesfahrweiten zurückgeht.

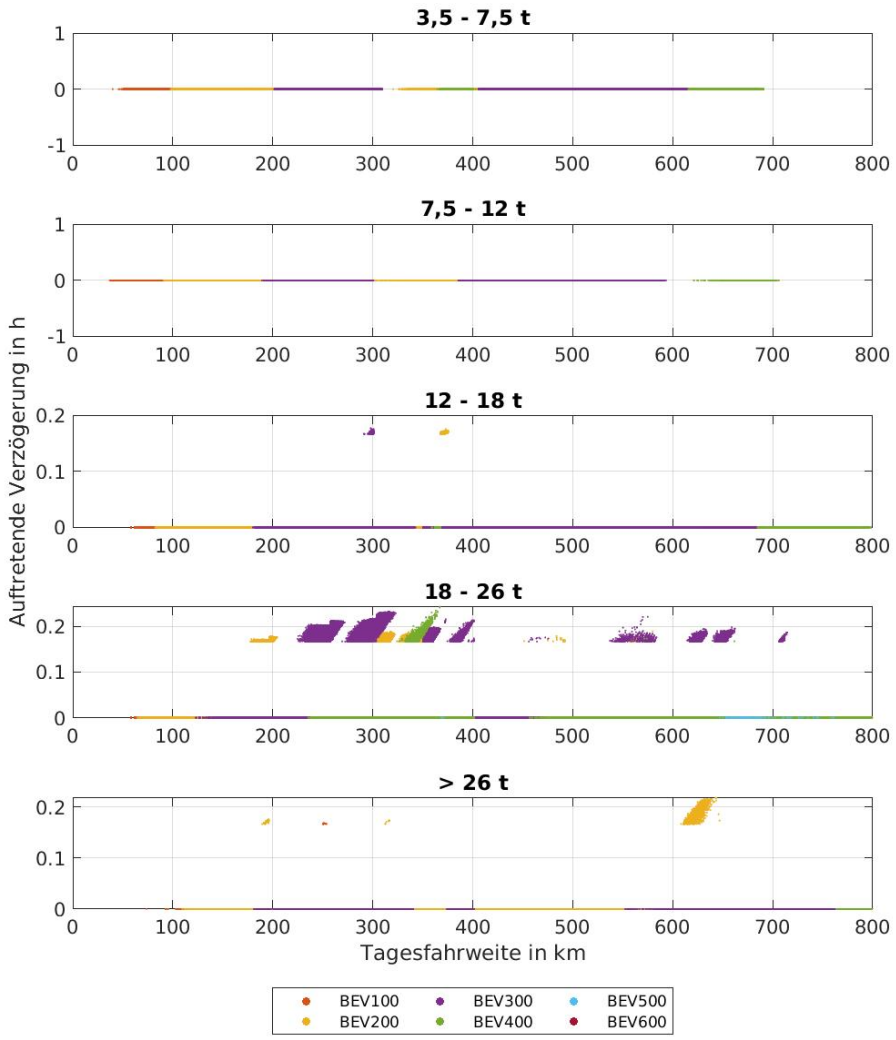


Abbildung 38: Akzeptierte Verzögerungszeiten der wirtschaftlich vorteilhaften BEV im Jahr 2030 (Mit Zwischenladen)

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz auf Betreiberseite ist die Batteriealterung. Die Modellierung (Details hierzu in Anhang A2f) ergab, dass bei allen TCO-positiven BEV-Lkw kein Batterietausch nötig ist. Besonders bei BEV100 im Bereich zwischen 100 und 300 km Tagesfahrweite für Lkw > 26 t kam es unter den getroffenen Annahmen zum Unterschreiten einer Restkapazität von 80 % und damit zum Austausch der Batterie. Zumindest bei den BEV mit Kostenvorteil ggü. den Dieselfahrzeugen reicht die erste Batterie demnach für die angenommenen Fahrleistungen von etwa 300.000 bis 500.000 km innerhalb der Haltedauer aus (Tabelle 34 und Anhang A2d). Die Batteriealterung hängt stark von der Ladestrategie (Depot vs. Schnellladen) und der Batteriegröße ab und ist besonders bei kleinen Batterien und häufigem Schnellladen ein wichtiger Faktor für die Fahrzeugkosten. Diese Ergebnisse können jedoch nur als ein erster Anhaltspunkt für die Auswirkungen der Alterung der Traktionsbatterie gesehen werden, da die Alterung einer Reihe von Einflussfaktoren unterliegt, die im hier verwendeten Modell nicht abgebildet sind (z.B. Wahl der Batterietechnologie und Umgebungstemperatur)

Für einen Massenmarkt in 2030 können somit folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei Aufladung ausschließlich im Depot ist für Lkw < 12 t (GK 0 und 1) ein sicheres wirtschaftliches Potential von etwa 80-90 % der Gesamtfahrleistung zu erwarten. Dies steht vor allem für die kleinste Größenklasse (< 7,5 t) in starkem Kontrast zu den Ergebnissen für 2025. Bei den größeren Lkw-Klassen liegt das Potential mit etwa 50-60 %, deutlich niedriger und bei den Sattelzugmaschinen bei lediglich etwa 5 % der Fahrleistung (zusätzliche 10 % liegen im Bereich der TCO-Parität).
- Die Ermöglichung von Zwischenladung während des Betriebstages erhöht vor allem die Konkurrenzfähigkeit des elektrischen Betriebs von Lkw in den Gewichtsklassen über 12 t (GK 2-4). Bei GK 2 und 3 ist der Elektrobetrieb dann fast durchgehend wirtschaftlich, bei Sattelzügen erreicht damit immerhin etwa die Hälfte der Einsatzprofile einen wirtschaftlichen Vorteil im Elektrobetrieb, während weitere 30 % TCO-Parität erreichen. Der Auf- bzw. Ausbau entsprechender Ladeinfrastruktur zum Zwischenladen kann sich somit eindeutig positiv auf die Erschließung weiterer wirtschaftlicher Potentiale für den Betrieb von Batterie-Lkw auswirken.
- Bei den für Elektro-Lkw wirtschaftlichen Einsatzprofilen kommen im Bereich kleiner Lkw (GK 0 und 1) aufgrund der geringen Tagesfahrweiten überwiegend BEV100 und BEV200 zum Einsatz. Die Möglichkeit der Zwischenladung hat hier folgerichtig nur einen geringen Einfluss auf den kostenoptimalen Technologiemix. Anders verhält es sich bei GK 2 und 3: Hier wird durch die Zwischenlademöglichkeit das Einsatzpotential insbesondere von BEV200 erheblich erweitert. Im Ergebnis ergibt sich hier mit Zwischenladung ein wirtschaftlicher Vorteil für Elektroantriebe bei fast allen Einsatzprofilen. Bei den Lkw der GK 4 werden unter Annahme von Zwischenladung vor allem BEV200 wirtschaftlich, die unter diesen Annahmen auch langstreckentauglich sind.
- Bemerkenswert ist, dass in allen bisher betrachteten Szenarien für 2030 Lkw mit Reichweiten von mehr als 300 km nur in geringem Umfang gewählt werden. Trotz der Annahme stark gegenüber dem heutigen Stand gesunkener Batteriepreise wird der Einsatz solcher Lkw wirtschaftlich nicht sinnvoll. Gleichwohl mögen betriebliche Gründe für den Einsatz solcher Fahrzeuge sprechen.
- Es ist zu erwarten, dass Ladepausen über die betrieblich notwendigen Lenk- und Verladepausen hinaus bei Berücksichtigung entsprechender Zeitkosten nur für einen sehr geringen Anteil der Einsatzprofile (< 2 %) wirtschaftlich sind[1]. In diesen Fällen treten Verzögerungen von bis zu 15 Minuten auf.
- Bei den Lkw der Größenklassen 0 und 1 erreichen 90 % der Einsatzprofile eine mittlere Tagesfahrweite von nicht mehr als 200 km. Zwar werden solche Fahrzeuge in speziellen Einsatzkontexten mitunter auch auf längeren Fernstrecken eingesetzt, dies betrifft allerdings nur einen sehr kleinen Teil der Flotte mit sehr hohen Flexibilitätsanforderungen und somit Hemmnissen für batterieelektrischen Antrieb. Daher ist nach derzeitigem Stand mittelfristig nicht von einem Massenmarkt für Batterie-Lkw mit einer Reichweite von mehr als 200 km in diesen Segmenten auszugehen.

[1] Bei einigen Güterarten ist aus betrieblichen Gründen generell nicht mit einer Akzeptanz zusätzlichen Zeitbedarfs zu rechnen, siehe Abschnitt 3.4.3

4.4 Auswirkungen zentraler Einflussgrößen auf das wirtschaftliche Potential (2030)

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ein aus heutiger Sicht realistisch erscheinendes Basisszenario für den Lkw-Markt im Referenzjahr 2030 untersucht. Im Folgenden werden nun zentrale Einflussgrößen variiert, die größeren Unsicherheiten unterliegen, und deren Einfluss auf die Ergebnisse untersucht. Dabei werden drei verschiedene Kategorien von Unsicherheiten betrachtet:

- Energiepolitische Unsicherheiten (Abschnitt 4.4.1)
- Techno-ökonomische Unsicherheiten (Abschnitt 4.4.2)
- Betriebliche Einflussfaktoren (Abschnitt 4.4.3)

Für die beiden erstgenannten Sensitivitätsanalysen wird Fall A (Aufladung ausschließlich im Depot, siehe Abschnitt 4.3.1) als Bezugsfall herangezogen, da dieser das konservativere und damit robustere Szenario darstellt. Die letztgenannte Sensitivitätsanalyse bezieht sich explizit auf Parameter, die das Zwischenladen betreffen, und setzt daher auf dem Bezugsfall B (mit Zwischenladen, siehe Abschnitt 4.3.2) auf.

4.4.1. Energiepolitische Unsicherheiten: Energie- und CO_2-Preis

Im Referenzfall ist ein CO_2-Preis von 100 €/t im Jahr 2030 angenommen. Dies bewegt sich im mittleren Preiskorridor, der vom Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) und Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) empfohlen wird (Edenhofer et al., 2019). Bisher ist nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) lediglich für das Jahr 2026 eine feste Bandbreite möglicher Preise festgesetzt (55-65 €/t) (Bundesregierung, 2020). Für die Jahre danach macht das BEHG derzeit noch keinerlei Vorgaben.

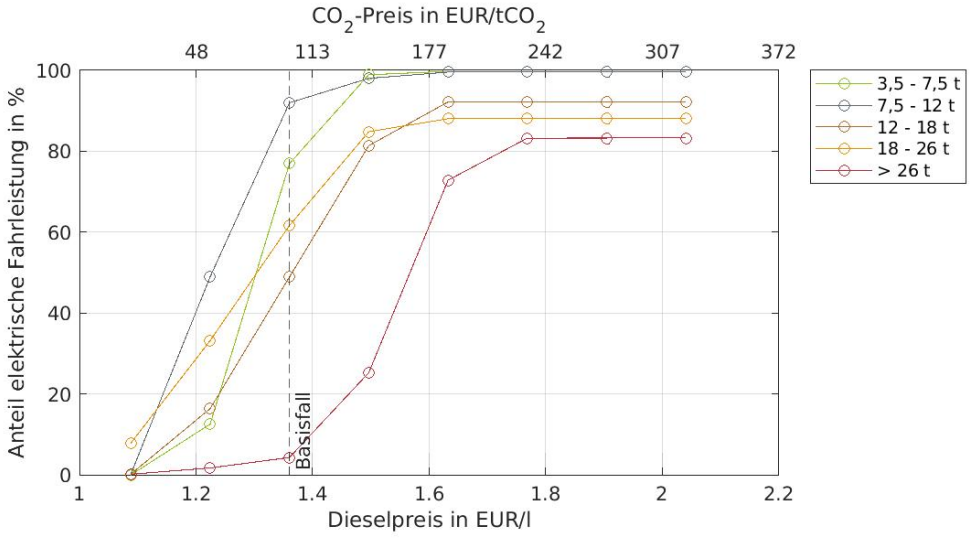


Abbildung 39: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit des Diesel- bzw. CO_2-Preises im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen)

Im Basisfall zeigt sich (unter Annahme von Aufladung ausschließlich im Depot) eine weitgehende Wirtschaftlichkeit von Batteriefahrzeugen in den unteren Größenklassen 0 und 1 sowie eine etwa hälftige Wirtschaftlichkeit bei den Größenklassen 2 und 3. Ausgehend davon wurde der CO_2-Preis in der Spannbreite von 0 bis 400 € variiert. Die Ergebnisse für den Anteil elektrischer Fahrleistung pro Größenklasse sind in Abbildung 39 gezeigt, eine Aufschlüsselung nach gewählten Reichweiten in Abbildung 40. Es zeigt sich:

- Eine Erhöhung des CO_2-Preises auf 145 €/t würde in allen Größenklassen bis auf GK 4 den Elektroantrieb für über 80 % der Fahrleistung wirtschaftlich machen, sodass dort dann hauptsächlich elektrisch gefahren würde.
- Bei Fahrzeugen der GK 4 würde sich bei 145 €/t ceteris paribus das elektrische Fahrleistungspotential auf etwa 25 % erhöhen. Erst bei sehr ambitionierten CO_2-Preisen um 200 €/t würde das technische Elektrifizierungspotential[1] bei dieser Größenklasse annähernd ausgeschöpft. Die Bereitstellung von Zwischenlademöglichkeiten, wie in Fall B (Abschnitt 4.3.2) berechnet, stellt damit einen effektiveren Hebel zum Ausgleich hoher Batteriekosten dar.
- CO_2-Preise deutlich unterhalb des Referenzwertes gefährden unmittelbar auch die Wirtschaftlichkeit des Batterieantriebs in den kleineren Segmenten. Bei einem CO_2-Preis von 60 € würde sich das wirtschaftliche Potential für Batterieantriebe dort gegenüber dem Referenzfall in etwa halbieren.
- Bei kleinen Lkw der GK 0 und 1 ergibt sich im Bereich niedriger CO_2-Preise ein relativ breiter Bereich der Kostenparität. Da Fahrzeugpreise und Personalkosten hier in der Kostenstruktur einen größeren Anteil ausmachen, wirken sich Veränderungen der Energiekosten weniger unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit aus.

[1] Ohne Annahmen von Zwischenladung ist das technische Elektrifizierungspotential durch die maximale elektrische Reichweite begrenzt, die hier mit etwa 600 km angenommen wurde (BEV600).

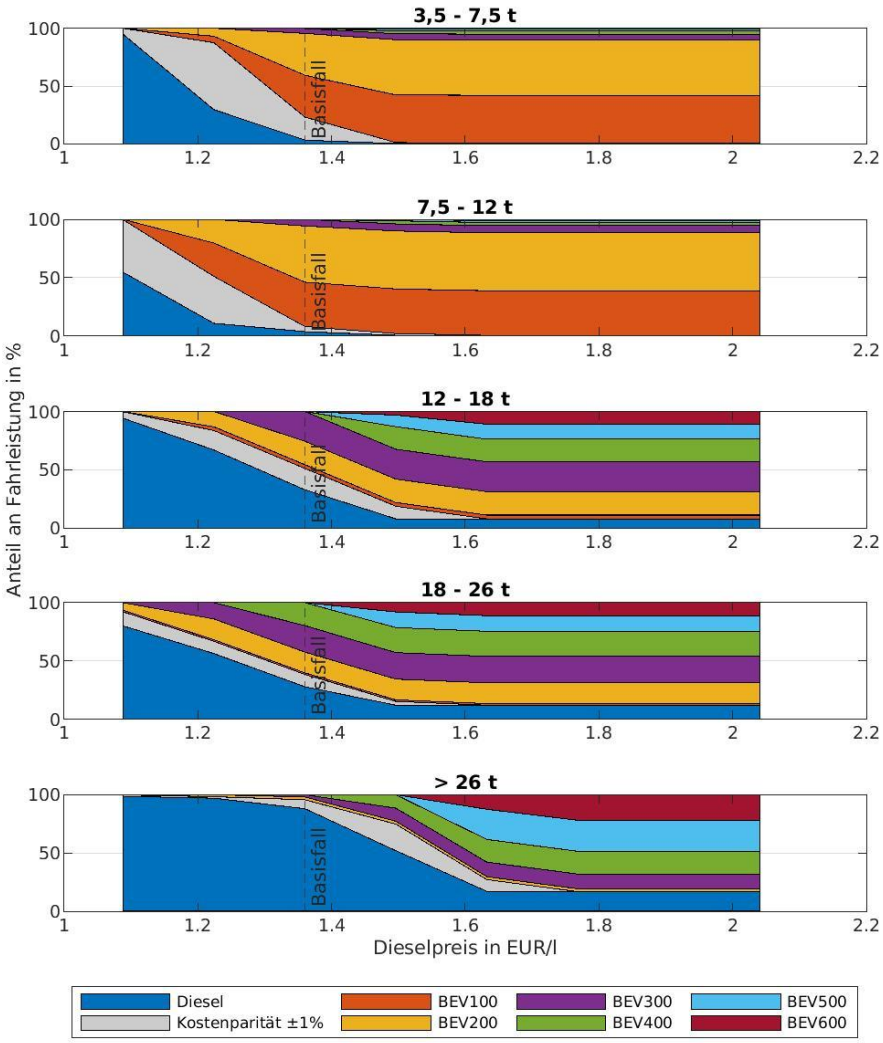


Abbildung 40: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie abhängig des Dieselpreises im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen)

Die Variation des Strompreises zeigt einen komplementären Wirkmechanismus zum CO_2-Preis (siehe Abbildung 41 und Abbildung 42). Eine Steigerung des Strompreises um nur etwa 2 ct/kWh gegenüber dem Referenzfall würde im Mittel über alle Größenklassen das wirtschaftliche Potential für Batterie-Lkw in etwa halbieren. Eine Senkung des Strompreises um etwa 5 ct/kWh (zum Vergleich: heutige EEG-Umlage ca. 6,5 ct) würde hingegen dazu führen, dass das technische Potential für Batterie-Lkw in sämtlichen Größenklassen (bis auf einen kleinen Rest in GK 4) ausgeschöpft würde – selbst wenn nur im Depot geladen werden kann. Der Strompreis ist somit der wirkmächtigste Hebel, den die Politik zur Gestaltung des Markthochlaufs in der Hand hält.

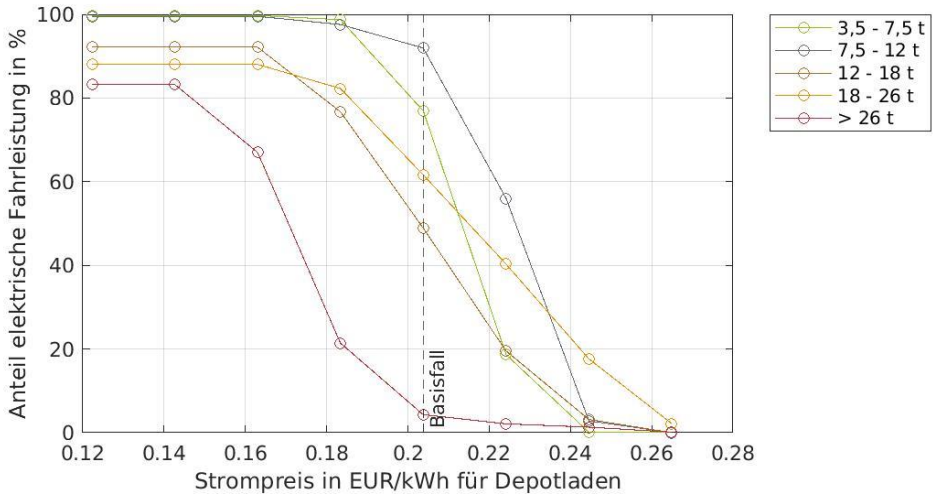


Abbildung 41: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit des Strompreises im Jahr 2030 (ohne Zwischenladen)

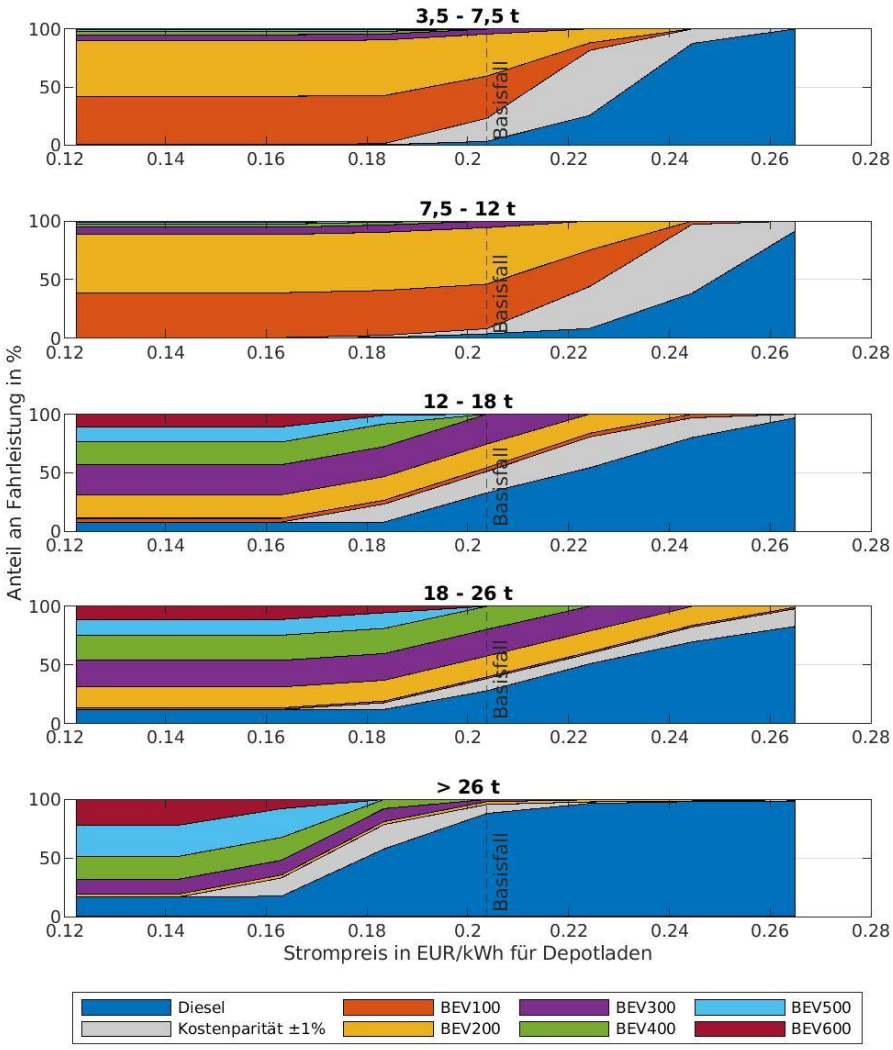


Abbildung 42: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie abhängig des Strompreises für Depotladen im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen)

4.4.2. Techno-ökonomische Unsicherheiten: Fahrzeugpreise und Batteriepreis

In diesem Abschnitt werden die Anschaffungskosten von Batterie-Lkw variiert. Dabei werden Fahrzeugkosten ohne Batterie sowie die Batteriekosten differenziert. Grund ist, dass diese Komponenten zum Teil unterschiedlichen Einflüssen unterliegen: Die zukünftigen Fahrzeugkosten werden primär durch die Realisierung von Skaleneffekten bestimmt. Bei den Batteriekosten spielen daneben zukünftige technologische Entwicklungen und Rohstoffpreise eine wichtige Rolle, des Weiteren auch Spill-Over-Effekte aus dem Pkw-Bereich und dem Energiesektor.

Der Batteriepreis im Jahr 2030 wurde ausgehend vom Basisfall (83 €/kWh) zwischen 30 €/kWh und 150 €/kWh variiert, wobei hier Preise auf Ebene des Batteriesystems gemeint sind. Die Ergebnisse sind als für Batterie-Lkw wirtschaftliche Fahrleistungsanteile in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt. Folgendes ist zu beobachten:

- Der Batteriepreis wirkt sich im Bereich von etwa 50 bis 150 €/kWh weitgehend linear auf das Marktpotential von Batterie-Lkw in den Größenklassen 0 bis 3 aus. Ein um 20 €/kWh niedrigerer Batteriepreis führt dabei grob zu etwa 20 % zusätzlicher elektrischer Fahrleistung.
- Lkw der Größenklasse 4 kommen im Basisfall (nur Depotladen) lediglich auf wenige Prozent elektrisches Fahrleistungspotential; hier rechnet sich lediglich der Einsatz von BEV200 und BEV300 in einigen Fällen niedriger Tagesfahrleistung. Sinkt der Batteriepreis jedoch gegenüber der Referenz, so werden auch reichweitenstärkere Fahrzeuge kostenseitig attraktiv. Es kommt demzufolge zu einem Anstieg des Marktpotentials, der mit abnehmendem Batteriepreis weiter an Dynamik gewinnt.
- Fahrzeuge mit sehr hoher elektrischer Reichweite (BEV500 und BEV600) spielen erst ab einem Batteriepreis von unter 50 €/kWh eine Rolle. Dies verdeutlicht, dass in diesem Segment auch starke Batteriekostendegressionen nicht automatisch zur Wirtschaftlichkeit elektrischer Antriebe auf breiter Front führen. Auch andere Parameter (wie schnelle Zwischenlademöglichkeiten oder niedrige Strompreise) müssen dafür gegeben sein. Auch nicht-monetäre Faktoren dürften eine Rolle spielen, da sich gerade im Segment der Sattelzüge unterhalb eines gewissen Batteriepreises viele Einsatzprofile im Bereich der TCO-Parität befinden, aber noch keinen klaren Kostenvorteil aufweisen (siehe Abbildung 44).

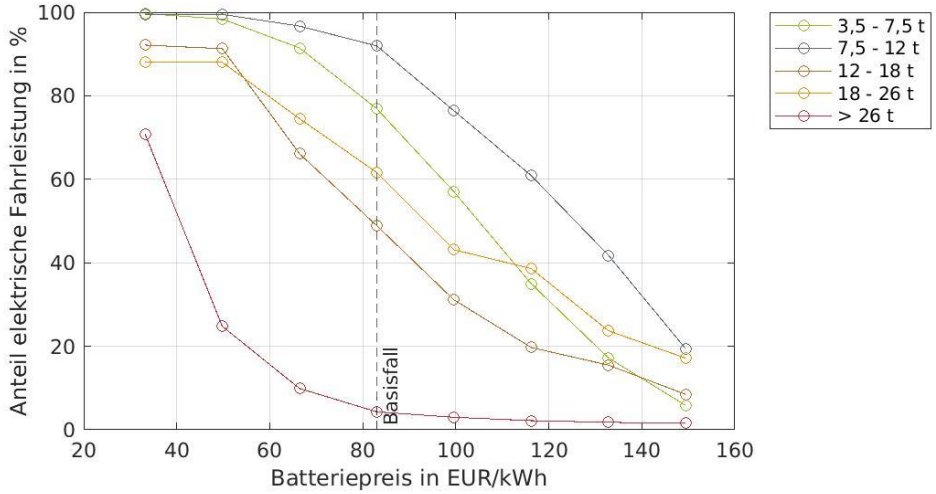


Abbildung 43: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit des Batteriepreises im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen)

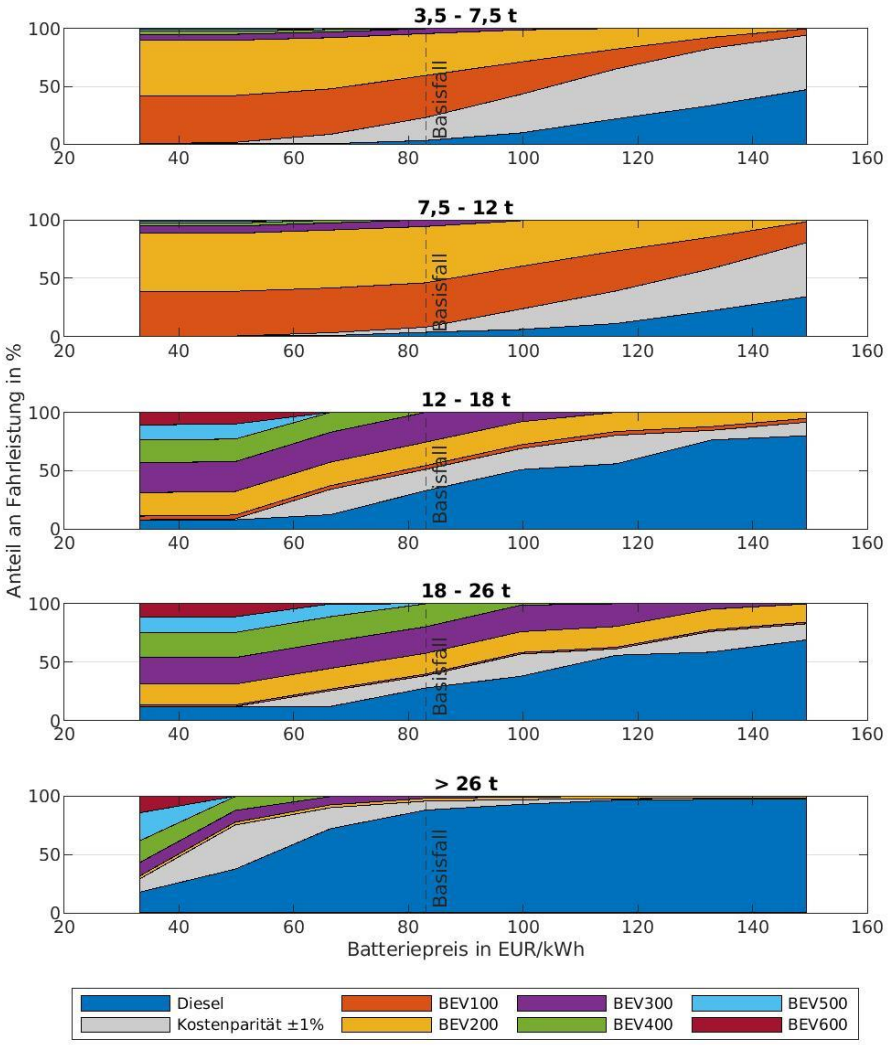


Abbildung 44: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie in Abhängigkeit des Batteriepreises im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen)

Desweiteren wurden die Preise der Elektro-Lkw (ohne Batterie) variiert. Der Fahrzeugpreis und seine Degression über Zeit und Stückzahlen stellt einen der unsichersten Parameter in der Kostenrechnung dar. Zu berücksichtigen ist hier, dass die Preisgestaltung der Hersteller für Elektro-Lkw neben den Produktionskosten weiteren Einflussfaktoren unterliegt. Beispielsweise können Entwicklungskosten in unterschiedlicher Weise umgelegt werden und auch regulatorische Anforderungen (v. a. die CO_2-Flottenzielwerte für Nutzfahrzeuge ab den Jahren 2025 und 2030) spielen eine Rolle.

Die Fahrzeugpreise hängen von der Fahrzeugklasse ab und werden in dieser Sensitivität daher prozentual in einem Bereich von -40 % bis +100 % gegenüber dem Basisfall variiert (Abbildung 45 und Abbildung 46). Es zeigt sich, dass eine Abweichung der Preise nach oben gegenüber dem Referenzfall eine drastische Verminderung des Marktpotentials für Batterie-Lkw zur Folge hat. Eine Erhöhung um 20 % senkt das Fahrleistungspotential beispielsweise um etwa zwei Drittel. Gegenüber dem Referenzfall günstigere Preise wirken sich am stärksten im Bereich der Größenklasse 4 aus, die im Basisfall über ein sehr geringes wirtschaftliches Potential verfügt.

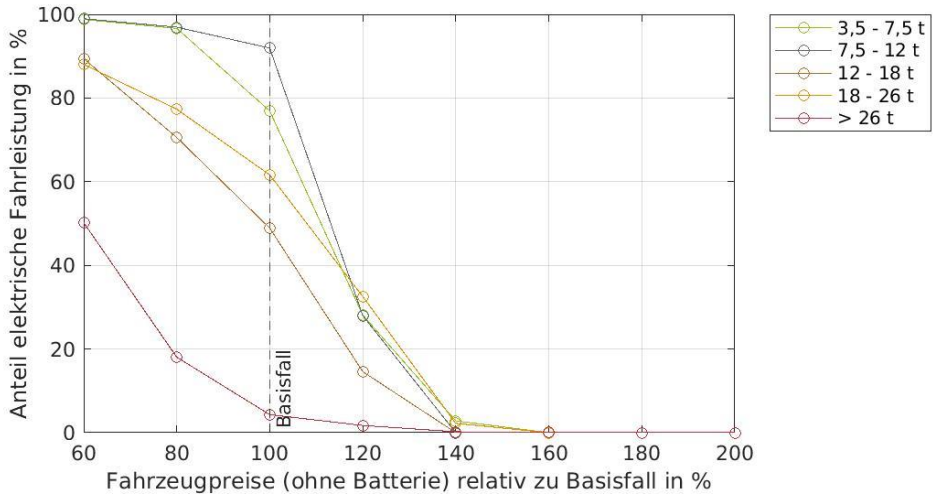


Abbildung 45: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit der Fahrzeugpreise im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen)

Die Fahrzeugkosten stellen daher ein Risiko für den Markthochlauf dar, wenn Skaleneffekte nicht im erhofften Umfang eintreten. Dies könnte beispielsweise aufgrund von technologischer Diversifizierung geschehen (parallele Entwicklung mehrerer Technologien) oder auch aufgrund von Unsicherheiten im Marktpotential, die sich durch zögerlichen Infrastrukturausbau ergeben.

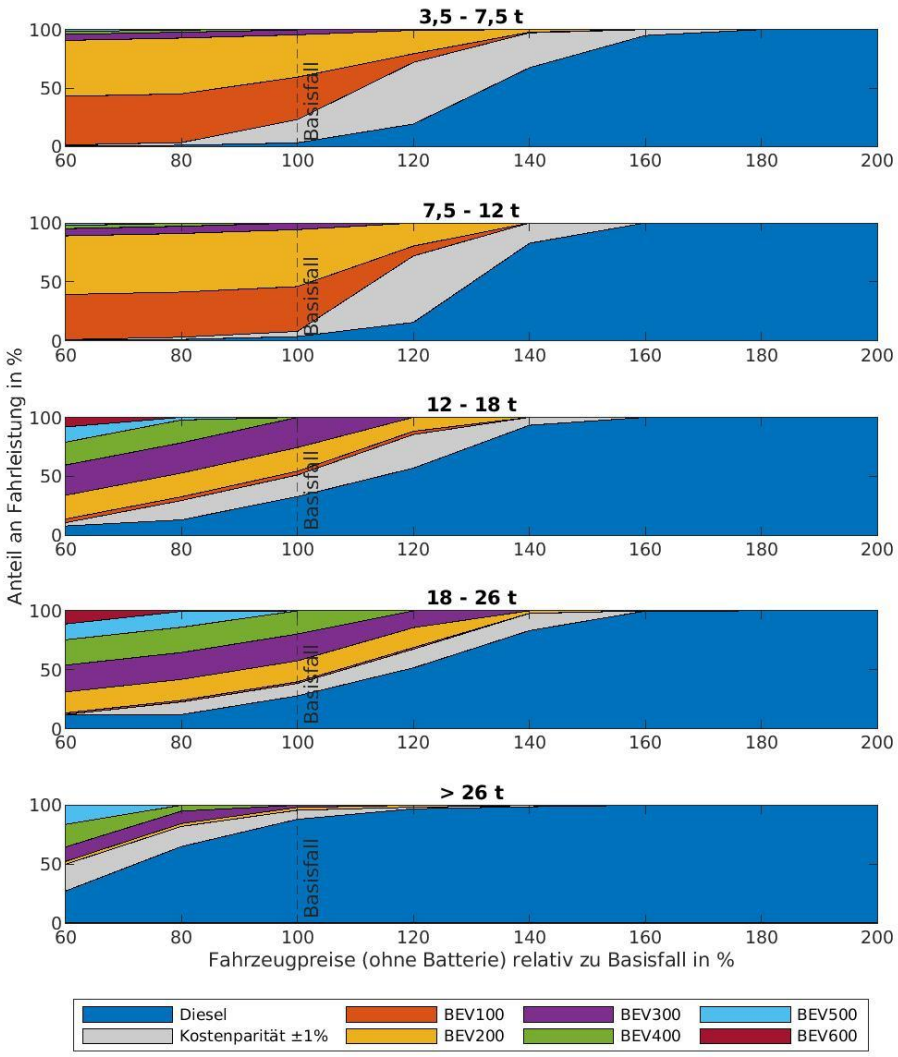


Abbildung 46: Fahrleistungsanteil der günstigsten Technologie in Abhängigkeit der Fahrzeugpreise im Jahr 2030 (Ohne Zwischenladen)

4.4.3. Betriebliche Einflussfaktoren: Ladeleistung und Zeitkosten

Abschließend werden in der Sensitivitätsanalyse betriebliche Einflussfaktoren betrachtet, die sich auf das Zwischenladen der Lkw während eines Betriebstages auswirken. Basisfall ist demzufolge (im Gegensatz zu den vorangegangenen Sensitivitätsanalysen) der Fall B für das Jahr 2030, dessen Ergebnisse in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wurden. Zunächst wird die für das Zwischenladen an öffentlicher Ladeinfrastruktur verfügbare Ladeleistung variiert. Im Basisfall liegt diese bei 500 kW, der Variationsbereich zwischen 200 kW und 1,5 MW pro Fahrzeug. Die C-Rate[1] ist dabei zur Vermeidung übermäßigen Batterieverschleißes grundsätzlich auf 3C beschränkt (unabhängig von der Variation der verfügbaren Ladeleistung).

[1] Die C-Rate (oder Laderate) gibt das Verhältnis zwischen Ladeleistung und Batteriegröße an. Eine C-Rate von 1C entspricht einer Ladeleistung, mit der die Batterie innerhalb einer Stunde vollgeladen werden kann.

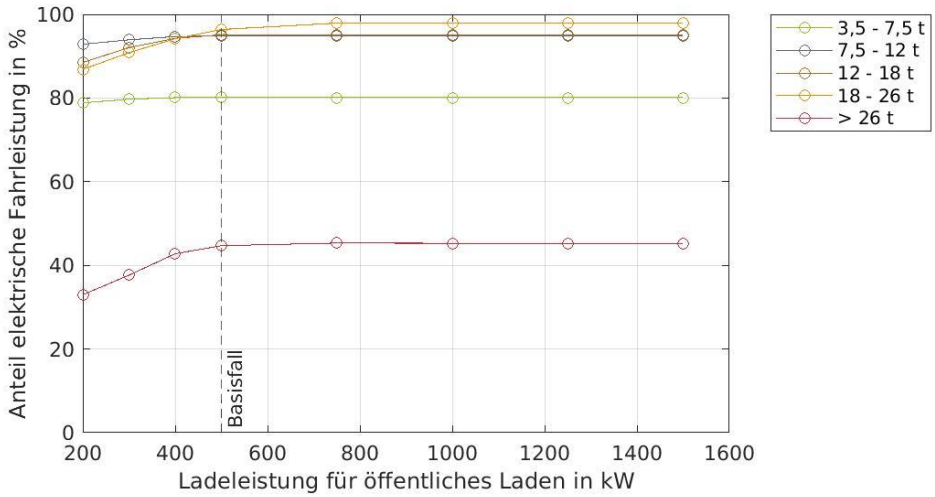


Abbildung 47: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit der Ladeleistung für öffentliches Laden im Jahr 2030 (mit Zwischenladen)

Die Ergebnisse in Abbildung 47 zeigen, dass die Ladeleistung des Basisfalls bei den Lkw-Klassen > 12 t zGG durchaus ausgenutzt wird. Eine Reduktion der maximalen Ladeleistung auf 200 kW verringert den für Batterie-Lkw wirtschaftlichen Fahrleistungsanteil in den Größenklassen 3 und 4 um etwa 10 Prozentpunkte. Grund ist, dass in der für das Zwischenladen zur Verfügung stehende Pausenzeit dann bei einigen Einsatzprofilen nicht mehr ausreichend Energie für die Weiterfahrt aufgenommen werden kann. In diesen Fällen müssten dann Fahrzeuge mit höheren Reichweiten eingesetzt oder zeitliche Verzögerungen in Kauf genommen werden, wodurch höheren Kosten entstehen. Bei Lkw < 12 t zGG spielt das Zwischenladen hingegen generell eine untergeordnete Rolle.

Eine Erhöhung der verfügbaren Ladeleistung gegenüber dem Basisfall hat hingegen kaum Auswirkungen auf das wirtschaftliche Einsatzpotential. Die im Basisfall für Zwischenladung angesetzte Ladeleistung von 500 kW ist für die notwendige Energieaufnahme während der verfügbaren Pausenzeiten bei den als wirtschaftlich identifizierten Fahrzeugtypen also ausreichend. Aus den Berechnungen lässt sich somit zumindest für typische Anwendungsfälle keine Notwendigkeit für Ladeleistungen im Megawattbereich ableiten, sofern die Lkw-Betreiber wirtschaftlich rationale Kauf- und Betriebsentscheidungen treffen.

Zuletzt wird der Einfluss der spezifischen Zeitkosten untersucht. Im Basisfall werden nur bei einem sehr geringen Anteil der Einsatzprofile Mehrkosten durch Zeitbedarf für zusätzliche Ladepausen wirtschaftlich akzeptiert (siehe Abschnitt 4.3.2). Die spezifischen Zeitkosten wurden hier mit 34 €/h angenommen (Ableitung siehe Abschnitt 3.3.5). Als untere Grenze für die Variation wird nun die Annahme getroffen, dass als Zeitkosten lediglich die Lohnkosten des Fahrers oder der Fahrerin anzusetzen sind (hier etwa 17 €/h). Im oberen Grenzfall wird der entgangene Umsatz angesetzt (82,50 €/h).

Die Ergebnisse in Abbildung 48 zeigen, dass sich lediglich am unteren Ende des Variationsbereichs sichtbare, wenn auch sehr geringe Veränderungen beim elektrischen Fahrleistungspotential ergeben. Bei sehr geringen Zeitkosten werden hier für einen geringen Anteil der Einsatzprofile zusätzliche Ladestopps wirtschaftlich sinnvoll. Vor allem bei den GK 2 und 3 kann dadurch ein kleiner Anteil von BEV300 und BEV400 zugunsten von BEV200 eingespart werden. Diese Verschiebungen liegen allerdings im Bereich weniger Prozent. Die Annahme nur der Fahrerkosten als spezifische Zeitkosten erscheint mit Blick auf die Praxis zudem eher

unrealistisch. Die Ergebnisse lassen daher darauf schließen, dass die Inkaufnahme zusätzlicher Ladestopps unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Ausnahme bleiben dürfte.

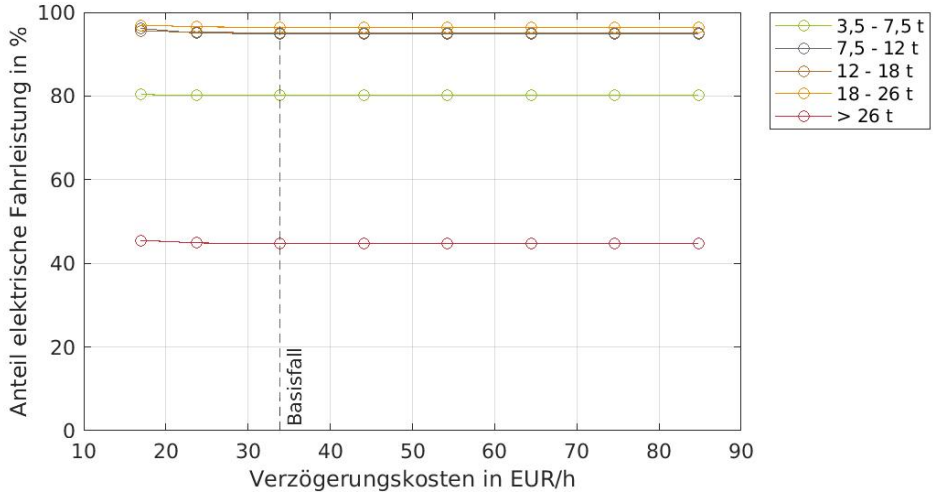


Abbildung 48: Anteil der elektrischen Fahrleistung in Abhängigkeit der Verzögerungskosten im Jahr 2030 (mit Zwischenladen)

4.5 Potentiale in verschiedenen Gütergruppen

Die der Potentialanalyse zugrundeliegenden Verkehrsdaten liegen nach Güterabteilungen differenziert vor (siehe Tabelle 22). Im Folgenden werden güterspezifische Unterschiede im Elektrifizierungspotential untersucht. Neben einer kostenbasierten Potentialbewertung auf Grundlage der Relationsdaten (in Analogie zu den vorangegangenen Abschnitten) werden spezifische Treiber und Hemmnisse für elektrische Transporte in einzelnen Güterabteilungen zudem mithilfe einer semi-quantitativen Bewertungsmatrix untersucht. Ziel ist es Hinweise zu erhalten, für welche Bereiche Fahrzeugmodelle, Ladeinfrastruktur und politische Randbedingungen (z. B. Förderprogramme) besonders zugeschnitten werden sollten. Referenzjahr bei allen nachfolgenden Betrachtungen ist das Jahr 2030.

Tabelle 22: Betrachtete Güterabteilungen

Güterabteilung	Beschreibung
GA 4	Nahrungs- und Genussmittel
GA 5	Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren
GA 6	Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse
GA 7	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse
GA 8	Chemische Erzeugnisse
GA 9	Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips etc.)
GA 10	Metalle und Metallerzeugnisse
GA 11	Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.

GA 12	Fahrzeuge
GA 13	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.
GA 14	Sekundärrohstoffe, Abfälle
GA 15	Post, Pakete
GA 16	Geräte und Material für die Güterbeförderung
GA 17	Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter
GA 18	Sammelgut

Die Ergebnisse für das wirtschaftliche Fahrleistungspotential von Batterie-Lkw in den einzelnen Gütergruppen zeigt Abbildung 49. Es zeigt sich, dass die sich aus den Gütergruppen ergebenden Unterschiede bei den Einsatzprofilen einen deutlichen Einfluss auf das wirtschaftliche Potential elektrischer Antriebe haben. Das Potential der geeignetsten Gütergruppen ist dabei etwa doppelt so hoch wie das der ungeeignetsten. Wird lediglich Aufladung im Depot zugelassen, so ist die typische Tagesfahrweite für das Potential ausschlaggebend (Abbildung 49 links). Hier weisen Transporte von Mineralöl (GA 7), Abfällen (GA 14) und Leercontainern/-paletten (GA 16) die geringsten Tagesfahrweiten und somit das höchste Potential auf. Wird zusätzlich Zwischenladung während des Betriebstags zugelassen, so wirken sich die für die jeweilige Güterabteilung typische Verladedauer, die Wahrscheinlichkeit der Existenz von Ladeinfrastruktur am Verladeort sowie die voraussichtliche Toleranz für zeitliche Verzögerungen ebenfalls aus (Abbildung 49 rechts). Dies führt zu gewissen Verschiebungen in der Eignung der Gütergruppen untereinander. Bei Transporten von Mineralöl und Abfällen ist eine Nutzung von Ladeinfrastruktur während der Verladepausen beispielsweise unwahrscheinlich. Das bedeutet, dass diese Gütergruppen lediglich von Zwischenlademöglichkeiten während der Lenkzeitpausen profitieren. Bei Lebensmitteltransporten hingegen könnten die Verladepausen grundsätzlich gut zum Zwischenladen verwendet werden, entsprechende Ladeinfrastruktur vorausgesetzt. Hier steigt das Potential durch die Zwischenlademöglichkeit entsprechend deutlich an.

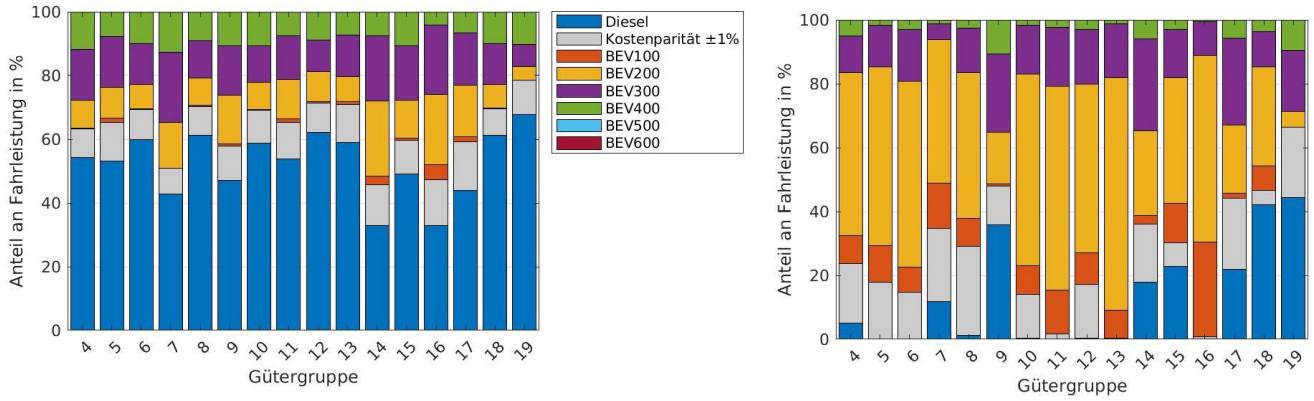


Abbildung 49: Fahrleistungsanteile der einzelnen Technologien nach Gütergruppe im Jahr 2030; links: ohne Zwischenladen, rechts: mit Zwischenladen.

Ein Blick auf die absoluten elektrischen Fahrleistungspotentiale (Abbildung 50 und Abbildung 51) zeigt die hohe Relevanz von Lebensmitteltransporten (GA 4) innerhalb des Gesamtpotentials. Auch Transporte von Leercontainern und –paletten (GA 16) weisen einen hohen Anteil auf, hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass solche Transporte in der Regel

von Fahrzeugen erbracht werden, die ansonsten andere Güterabteilungen transportieren. Somit kann diese Güterabteilung im Hinblick auf Einsatzprofile nicht isoliert bewertet werden. Weitere Güterabteilungen mit überdurchschnittlichem absoluten Potential sind Holz- und Papiertransporte (GA 6) und Metallerzeugnisse (GA 10).

In der Praxis können Einsatzprofile auch innerhalb einer Güterabteilung freilich sehr heterogen sein. Zudem kann es vorkommen, dass ein Fahrzeug für Transporte unterschiedlicher Güterabteilungen eingesetzt wird. Für die Entscheidung über die Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit eines elektrischen Antriebs ist daher letztlich stets das konkrete Einsatzprofil maßgeblich. Nichtsdestotrotz können mit dem hier angewandten Verfahren wesentliche Tendenzen und Unterschiede zwischen den Güterabteilungen auf einer makroskopischen Ebene zuverlässig abgebildet werden.

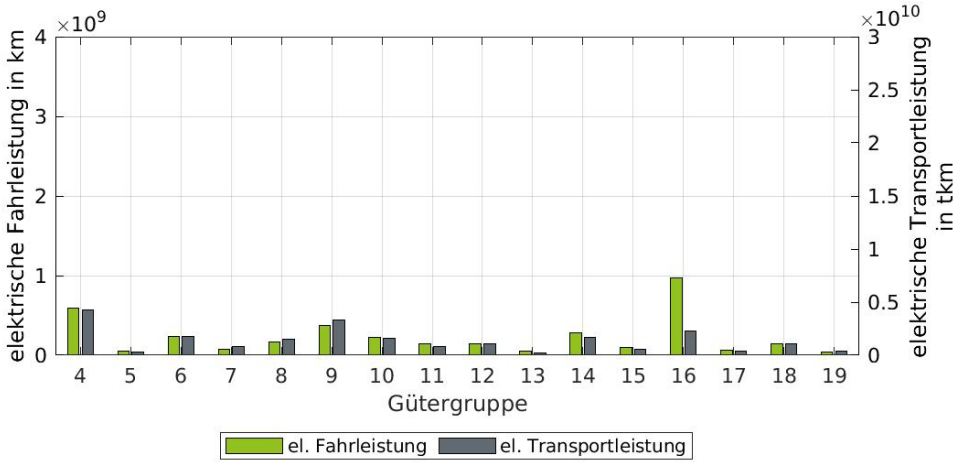


Abbildung 50: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung nach Gütergruppen im Jahr 2030 ohne Zwischenladen

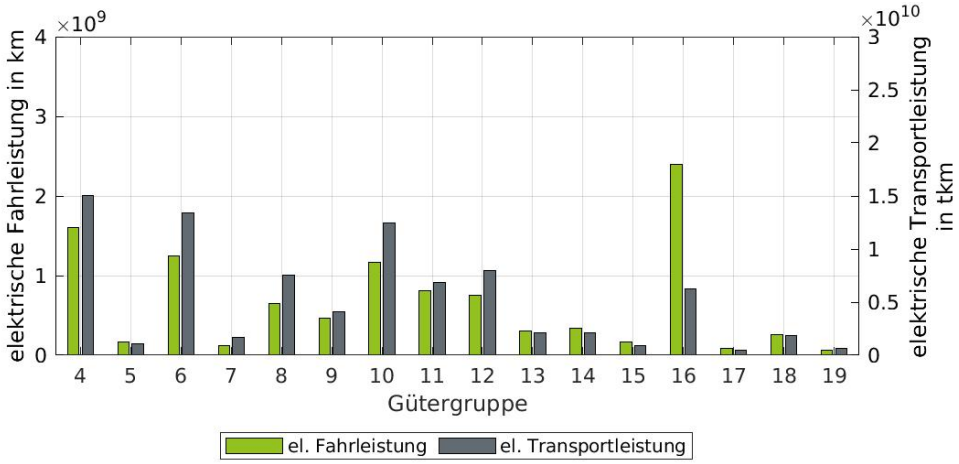


Abbildung 51: Elektrische Fahr- und Verkehrsleistung nach Gütergruppen im Jahr 2030 mit Zwischenladen

Die Eignung der verschiedenen Güterabteilungen wurde zudem mithilfe eines multikriteriellen, indexbasierten Bewertungssystems analysiert (für eine Beschreibung der Methodik siehe Abschnitt 3.5). Wesentliche Ergebnisse der Bewertung für die einzelnen Güterklassen sind in Tabelle 23 dargestellt. Der Indexwert (für die einzelnen Kriterien jeweils zwischen 0 und 1) wurde dabei stets so definiert, dass ein hoher Wert einer positiven Voraussetzung für den Einsatz von Batterie-Lkw entspricht. Bei der Transportweite haben beispielsweise die Gütergruppen mit der niedrigsten mittleren Transportweite den höchsten Indexwert. Der Wert für die Gesamteignung (rechts in der Tabelle) ergibt sich als gewichteter Mittelwert der einzelnen Indizes und wird als Prozentsatz dargestellt. Die Gewichtung der Kriterien wurde anhand von Experteneinschätzungen innerhalb des Projektbegleitkreises ermittelt. Zu beachten ist, dass die berechneten Prozentwerte keine absolute Aussage über die Eignung der einzelnen Güterabteilungen für Batterie-Lkw-Betrieb zulassen, sondern vielmehr dem Vergleich der Eignung untereinander dienen.

Der höchste Eignungswert ergibt sich für die Güterabteilung 16 (Geräte und Material für die Güterbeförderung; das bedeutet im Wesentlichen der Transport von Leercontainern und leeren Paletten). Wie oben bereits ausgeführt kann diese Güterabteilung im Sinne einer Eignungsanalyse nicht isoliert betrachtet werden, da sie in der Regel lediglich einen Teil eines Fahrzeugeinsatzprofils darstellt. Der hohe Eignungswert erlaubt dennoch die Schlussfolgerung, dass ein hoher Anteil solcher Transporte in Lkw-Einsatzprofilen die Eignung für den Batteriebetrieb tendenziell begünstigt.

Eine Reihe weiterer Güterabteilungen weist ebenfalls relativ hohe Eignungswerte im Bereich von 62 % bis 67 % auf; dies sind Holzwaren (GA 6), Mineralölerzeugnisse (GA 7), Mineralerzeugnisse (GA 9), Metallerzeugnisse (GA 10), Post und Pakete (GA 15) und Umzugsgut (GA 17). Bei den Güterabteilungen 6, 9 und 10 wurden bereits bei der relationsbasierten Eignungsanalyse vergleichsweise hohe quantitative Potentiale identifiziert (siehe weiter oben). Der Transport von Massengut/Schüttgut (GA 1-3) weist für den Einsatz von Batterie-Lkw insgesamt relativ hohe Hürden auf.

Es fällt auf, dass die Güterklassen in den einzelnen Kategorien mitunter sehr verschiedene Eignung für den Betrieb mit E-Lkw aufweisen. **Je nach Güterklasse sind also unterschiedliche Hürden bei der Einführung von E-Lkw zu adressieren.** Bei der insgesamt gut abschneidenden Güterabteilung „Umzugsgut“ ist beispielsweise eine Zwischenladung der Fahrzeuge während des täglichen Betriebs äußerst unwahrscheinlich, sodass hier nur dann Batteriefahrzeuge zum Einsatz kommen dürften, wenn ein Betriebstag sicher mit einer Batterieladung absolviert werden kann. Weiterhin ist vor allem in der Einführungsphase von Batterie-Lkw bei noch begrenzter Infrastrukturverfügbarkeit ein sehr regelmäßiges Einsatzprofil vorteilhaft, das im Falle der Güterabteilung „Umzugsgut“ in der Regel nicht unbedingt gegeben sein dürfte.

Tabelle 23: Indexbasierte Eignungsbewertung für den Betrieb mit Batterie-Lkw nach Gütergruppe[1]

Güterklasse	Mittlere Transport-weite	Geringer Mehrschicht-betrieb	Potentielle Lademög-lichkeit	Zeit-sensitivität	Wenig Zusatz-verbraucher	Sendungs-gewicht	Eignung
Gewichtung	25%	25%	10%	15%	5%	20%	
Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei	0,4	0,8	0,0	0,5	0,5	0,3	**46%**
Kohle, rohes Erdöl und Erdgas	0,5	0,7	0,0	1,0	0,0	0,0	**44%**
Erze, Steine und Erden, Bergbauerzeugnisse	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,1	**50%**
Nahrungs- und Genussmittel	0,4	0,4	1,0	0,5	0,5	0,5	**50%**
Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren	0,2	0,4	1,0	0,5	0,5	0,8	**51%**
Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse	0,3	0,8	1,0	1,0	0,0	0,5	**63%**
Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	0,6	0,8	1,0	1,0	0,0	0,2	**63%**
Chemische Erzeugnisse	0,3	0,8	1,0	1,0	0,0	0,4	**59%**
Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips etc.)	0,7	1,0	0,0	1,0	0,0	0,3	**62%**
Metalle und Metallerzeugnisse	0,4	0,8	1,0	1,0	0,0	0,5	**65%**
Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.	0,3	0,7	1,0	0,0	1,0	0,6	**51%**
Fahrzeuge	0,4	0,9	1,0	0,0	1,0	0,5	**56%**
Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.	0,0	0,8	1,0	0,5	0,5	0,7	**53%**
Sekundärrohstoffe, Abfälle	0,8	0,4	0,0	1,0	0,0	0,6	**56%**
Post, Pakete	0,4	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	**63%**
Geräte und Material für die Güterbeförderung	0,7	0,8	0,5	1,0	0,0	0,8	**74%**
Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter	0,7	1,0	0,0	0,5	0,5	0,7	**67%**
Sammelgut	0,3	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	**50%**

Die in Kapitel 3.5 zusätzlich erläuterten qualitativen Kriterien (durchschnittliche Unternehmensgröße, Endkundenaffinität, Preissensibilität) sind in der vorstehenden Bewertungsmatrix nicht enthalten, da sie sich primär auf die Unternehmen beziehen, welche die entsprechenden Güter transportieren. Der Bezug zum Gütertransport selbst (Sendung und Prozess) ist hingegen indirekter Natur. Die Ergebnisse werden daher separat in Tabelle 24 dargestellt. Wie zuvor bedeutet ein Wert von 1 eine hohe Eignung beim jeweiligen Kriterium.

Auch hier zeigt sich ein heterogenes Bild: Es gibt keine Güterabteilung, bei der die Eignung in allen drei Kriterien gleichermaßen hohe Werte erreicht. Die Ergebnisse geben vielmehr Hinweise auf mögliche begünstigende Faktoren bei Einführung von Elektro-Lkw in einzelnen Branchen. In spezialisierten Branchen wie beispielsweise bei Chemietransporten ist die Anzahl der Transportunternehmen eher gering und Ankernutzer somit leichter zu identifizieren. Bei Lebensmitteltransporten kann man sich den Imagegewinn durch umweltfreundliche Fahrzeuge für die Umsetzung von Pilotvorhaben zunutze machen, andererseits ist hier die Preissensibilität vergleichsweise hoch und Kostenrisiken werden daher möglicherweise weniger toleriert.

[1] Ein Wert von 1 entspricht hier der höchsten Eignung für Betrieb mit Batteriefahrzeugen, ein Wert von 0 der geringsten Eignung.

Tabelle 24: Eignungsbewertung der Güterabteilungen hinsichtlich qualitativer Kriterien

	Güterklasse	Unternehmens-größe	Preissensibilität	Endkundenaffinität
		Bestimmung über durchschnittlichen Unternehmensumsatz	Bestimmung über Anteil der Transportkosten am Endproduktpreis	Bestimmung über Anteil des privaten Konsums in der Input-Output-Statistik
1	**Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei**	0,0	0,0	0,5
2	**Kohle, rohes Erdöl und Erdgas**	0,8	0,5	0,0
3	**Erze, Steine und Erden, Bergbauerzeugnisse**	1,0	0,5	0,0
4	**Nahrungs- und Genussmittel**	0,5	0,0	1,0
5	**Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren**	0,5	0,5	1,0
6	**Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse**	0,6	0,0	0,5
7	**Kokerei- und Mineralölerzeugnisse**	1,0	0,0	0,5
8	**Chemische Erzeugnisse**	1,0	0,0	0,0
9	**Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips etc.)**	0,5	0,5	0,0
10	**Metalle und Metallerzeugnisse**	1,0	1,0	0,0
11	**Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.**	0,9	1,0	0,5
12	**Fahrzeuge**	0,7	1,0	0,5
13	**Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.**	0,6	0,5	1,0
14	**Sekundärrohstoffe, Abfälle**	0,1	0,0	0,5
15	**Post, Pakete**	0,7	0,5	1,0
16	**Geräte und Material für die Güterbeförderung**	0,3	0,5	0,0
17	**Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter**	0,0	0,5	0,5
18	**Sammelgut**	0,7	0,5	0,5

Die Ergebnisse bestätigen insgesamt die in Kapitel 2.1 angestellten Überlegungen zur Eignung einzelner Logistiksegmente. Für die meisten Gütergruppen gibt es sowohl begünstigende als auch hemmende Faktoren für den Einsatz von Batterie-Lkw. Aus den Ergebnissen lässt sich keine klare „Priorisierung“ von Branchen bezüglich des Einsatzes von Batterie-Lkw ableiten. Vielmehr ergeben sich eine Reihe von Hinweisen, welche Hemmnisse bei der Einführung von Batterie-Lkw in einzelnen Branchen besonders beachtet werden müssen bzw. welche begünstigenden Faktoren genutzt werden können. Insgesamt zeichnen sich v.a. bei

den Güterabteilungen Lebensmittel (GA 4), Holz- und Papierprodukte (GA 6) und Metallerzeugnisse (GA 10) sowohl absolut gesehen hohe wirtschaftliche Potentiale als auch relativ gesehen eine vergleichsweise hohe Eignung ab. Vor allem im Falle der Lebensmittellogistik ist die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur zur Zwischenladung aber von hoher Bedeutung.

4.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die für die Jahre 2025 (siehe Abschnitt 4.2) sowie 2030 (siehe Abschnitt 4.3) errechneten wirtschaftlichen Fahrleistungspotentiale für Batterie-Lkw sind in Abbildung 52 zusammengefasst, die Transportleistungspotentiale in Abbildung 53. Es ist zu sehen, dass die geplanten Förderinstrumente bereits im Jahr 2025 (ohne Annahme öffentlicher Ladeinfrastruktur) den Einsatz von Batterie-Lkw für etwa ein Drittel (37 %) der gesamten Fahrleistung schwerer Lkw im innerdeutschen Betrieb wirtschaftlich machen dürften. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das in der Modellierung erreichbare Potential durch die Nichtbetrachtung von Lastzügen lediglich 64 % der gesamten Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge beträgt. Für eine erhebliche Zahl von Einsatzfällen dürfte damit die rein finanzielle Hürde wegfallen und andere Hürden in den Vordergrund treten, die nicht bzw. nicht unmittelbar monetär bedingt sind, wie beispielsweise die Fahrzeugverfügbarkeit, die Konfigurierbarkeit von Fahrzeugen für bestimmte Kundenwünsche, die Installation und der Netzanschluss von betrieblicher Ladeinfrastruktur sowie die Zuverlässigkeit und Akzeptanz der Technologie bei den Lkw-Betreibern.

Bei der geplanten Förderung von 80 % der Mehrkosten ergeben sich für die wirtschaftlich attraktiven Batterie-Lkw im Jahr 2025 TCO-Vorteile von durchschnittlich ca. 7 %. Für einen typischen Lkw > 26 t mit 450.000 km Fahrleistung ergibt sich dadurch ein Kostenvorteil von ca. 38.000 € über die gesamte Haltedauer. Dies bedingt Mitnahmeeffekte. Insbesondere in einem Markt mit noch begrenztem Fahrzeugangebot und mit nur wenigen Herstellern auf der Angebotsseite ist damit zu rechnen, dass die Hersteller durch ihre Preisgestaltung einen Teil der Förderung abschöpfen werden. Zudem überschreiten die anfallenden Fördersummen das dafür vorgesehene Budget erheblich, sobald größere Teile des wirtschaftlichen Potentials ausgeschöpft werden (das eingeplante Budget beträgt mit 1,6 Mrd. € etwa 12 % der Summe, die bei Realisierung der berechneten Potentiale nachgefragt würde). Es empfiehlt sich daher, die Förderung von vorne herein degressiv anzulegen und die Kostenparität in zunehmendem Maße über die Energiepreise zu sichern (siehe dazu die Sensitivitätsbetrachtung in Abschnitt 4.4.1). Dies kann für die Lkw-Betreiber auch die Restwertentwicklung kalkulierbarer machen, da diese sensibel auf Änderungen der Förderhöhe reagiert.

Für 2030 wird keine Förderung mehr unterstellt. Hier ergibt sich bei Annahme von Depotladung ein elektrisches Fahrleistungspotential von etwa 26 %, wobei es für elektrische Lkw > 26 t in diesem Szenario kaum wirtschaftliche Einsatzfälle gibt. Dies ändert sich, wenn öffentliche Schnellladeinfrastruktur eine Zwischenladung auf langen Strecken ermöglicht und somit die notwendigen Batteriekapazitäten reduziert. In diesem Fall wird etwa 44 % der Gesamtfahrleistung schwerer Lkw für den Batteriebetrieb wirtschaftlich. Wiederum ist zu beachten, dass das theoretische Fahrleistungspotential für Batterie-Lkw durch die Nichtbetrachtung von Lastzügen auf 64 % beschränkt ist.

Beim Vergleich der Transportleistungen fallen die schweren Lkw-Klassen stärker ins Gewicht. Zwischen den Szenarien mit und ohne Zwischenladung ergibt sich daher sogar mehr als eine Verdopplung der elektrischen Transportleistung. Dies zeigt, wie wichtig die Möglichkeit zusätzlicher Energieaufnahme für Fernverkehrs-Lkw während des Betriebstages ist, um einen wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen. In den hier durchgeführten Modellierun-

gen wurde dazu eine stationäre Schnellladeinfrastruktur angenommen wurde. Das vorgenannte Ergebnis lässt sich jedoch auf sämtliche Infrastruktur verallgemeinern, die eine zusätzliche Energieaufnahme für Lkw während des Betriebstages ermöglicht, also insbesondere auch Oberleitungsinfrastruktur (oder andere elektrische Straßensysteme) für einen Strombezug während der Fahrt.

Es ist zu beachten, dass hier lediglich das für Batterie-Lkw wirtschaftliche Fahrleistungspotential berechnet wurde. Somit sind keine direkten Rückschlüsse auf den Fahrzeugmarkt möglich. Insbesondere hängt die Anzahl der Neuzulassungen zusätzlich von der Anzahl neu anzuschaffender Lkw, der Fahrzeugverfügbarkeit und weiteren Faktoren ab, wird also wahrscheinlich unterhalb des wirtschaftlichen Potentials liegen.

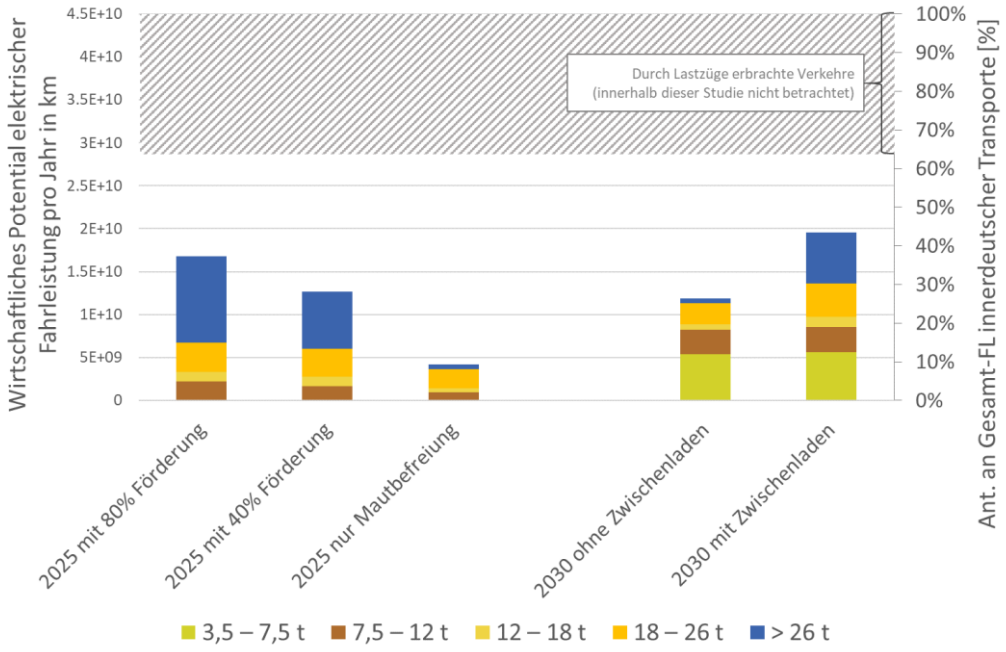


Abbildung 52: Wirtschaftliches Fahrleistungspotential für Batterie-Lkw (Modellergebnisse)

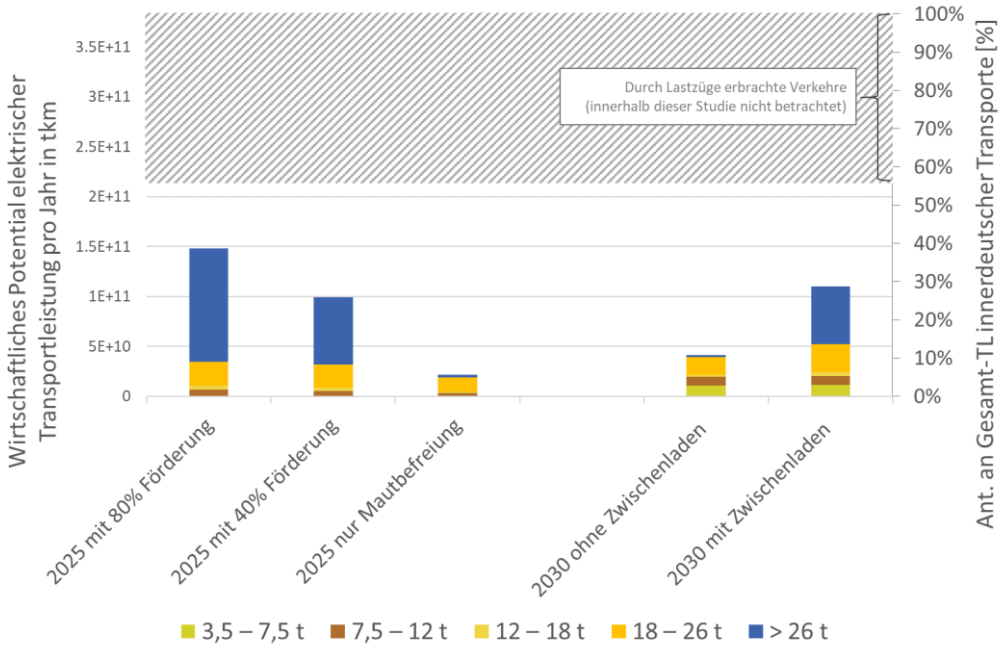


Abbildung 53: Wirtschaftliches Transportleistungspotential für Batterie-Lkw (Modellergebnisse)

Um den Einfluss zentraler Modellparameter zu bestimmen, wurden verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt; die Ergebnisse für die einflussreichsten Parameter sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Ausgangspunkt ist Fall A des Basisszenarios (Aufladung ausschließlich im Depot, siehe Abschnitt 4.3.1). In der Tabelle werden die Werte genannt, die die einzelnen Modellparameter (unter Beibehaltung aller anderen Werte) jeweils annahmen müssten, um

- das technische Einsatzpotential für Batterie-Lkw vollständig auszureizen[1] bzw.
- das wirtschaftliche Fahrleistungspotential für Batterie-Lkw unter 10 % zu drücken.

Jeder dieser Parameter wirkt sich in einem relativ breiten Wertebereich auf das Marktpotential aus. Dies verdeutlicht, dass die Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw stark vom Einsatzprofil abhängt und das zukünftige wirtschaftliche Potential durch isolierte Betrachtung und Verallgemeinerung von Einzelfällen nur eingeschränkt abgebildet werden kann.

Werden mehrere dieser Parameter gemeinsam gegenüber dem Basiswert verändert, ist zu erwarten, dass sich die Wirkungen gegenseitig verstärken oder auch kompensieren können. Insbesondere bei den Energiepreisen gilt es, zur Gewährleistung von Planungssicherheit für alle Akteure Instrumente zu entwickeln, die eine gewisse Relation zwischen dem CO_2-Preis für Diesel und dem Strompreis sicherstellen.

[1] Entsprechend der durchgeführten Modellierungen wird hier als Maximum eine Realreichweite von 600 km für Batterie-Lkw angenommen.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse[1]

	CO_2-Preis	Strompreis	Fahrzeug-preis	Batteriepreis
Basisszenario (Fall A: nur Depotladen)	*100 €/t*	*20,4 ct*	*+/- 0 %*	*83 €/kWh*
Ausreizung des technischen Potentials für Batterie-Lkw (bis BEV600)	> 230 €/t	< 14 ct	< -40 %	< 35 €/kWh
< 10 % elektrische Fahrleistung	< 30 €/t	> 24 ct	> +30 %	> 150 €/kWh

Die Ergebnisse der Modellrechnungen geben eine Reihe von Hinweisen für die weitere Ausgestaltung des politischen Rahmens:

- Der Strompreis (genauer gesagt: das Verhältnis zwischen Strom- und CO_2-Preis) ist der wirkmächtigste Hebel, den die Politik zur Gestaltung des Markthochlaufs von Batterie-Lkw in der Hand hält. Hier sind verlässliche Rahmenbedingungen für Lkw-Betreiber mindestens über einen Investitionszyklus erforderlich. In der Markteinführungsphase könnte dies beispielsweise mittels Differenzkontrakten (Contracts for Difference (CfD)) oder vergleichbarer Instrumente geschehen.
- Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Vollkosten für Batterie-Lkw bei Verfügbarkeit von Infrastruktur zum Zwischenladen im Mittel deutlich niedriger liegen als ohne eine solche Infrastruktur, da dann kleinere Batterien ausreichend sind. Der Aufbau solcher Infrastruktur kann daher schon allein aus Kostensicht (ungeachtet der betrieblichen Vorteile) das Marktpotential von Batterie-Lkw erheblich ausweiten. Hierfür ist zunächst lediglich entscheidend, dass die Fahrzeuge während des Betriebstages nachladen können; ob dafür Hochleistungs-Schnelllader oder ein Nachladen während der Fahrt über eine Oberleitung sinnvoller ist, wird voraussichtlich vom Anwendungsfall abhängen und ist Gegenstand weiterer Untersuchungen in diesem Vorhaben.
- In einem Marktumfeld, das von hoher staatlicher Förderung geprägt ist, unterliegt der Wiederverkaufswert erheblichen Unsicherheiten, ist aber für die Kostenrechnung der Betreiber von großer Bedeutung. Die Erwartung eines Fortbestands von Kaufprämien für Neufahrzeuge über die Haltedauer des Fahrzeugs hinaus macht Neufahrzeuge im Vergleich attraktiver und senkt den mutmaßlichen Restwert gebrauchter Fahrzeuge. Die Wirtschaftlichkeit geförderter Fahrzeuge kann damit sinken, wie im Pkw-Markt bereits beobachtet wird. Neben dem politischen Rahmen (z. B. Fortbestand von Förderinstrumenten, gezielte Stützung des Zweitmarktes) sind hierbei auch die gewählten Finanzierungsmodelle für die auf den Markt kommenden Elektro-Lkw (Leasing, Restwertgarantie, …) entscheidend.

[1] Hierbei handelt es sich um Richtwerte, die sich aus einer Interpolation der Sensitivitätsanalysen ergeben, da hierbei nur mit einer begrenzten Anzahl von Parameterwerten gerechnet werden konnte.

- Wenn Skaleneffekte nicht im erhofften Umfang eintreten, besteht das Risiko höherer Fahrzeugkosten, die das Marktpotential in unseren Berechnungen empfindlich senken. Die Politik sollte daher darauf hinwirken, die Skaleneffekte durch stabile Rahmenbedingungen zu sichern, nicht zuletzt durch einen verlässlichen Infrastrukturausbau.
- Die unterschiedlichen Treiber und Hemmnisse für den Einsatz von Batterie-Lkw je nach Logistiksegment bzw. Güterklasse sollten beim Aufsetzen von Pilotprojekten sowie bei der Strategieentwicklung für den Aufbau von Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

ACEA (2020): Joint Statement - The Transition to Zero Emission Road Freight Transport. In: *European Automobile Manufacturers Association*. https://www.acea.be/uploads/publications/acea-pik-joint-statement-the-transition-to-zero-emission-road-freight-trans.pdf. (15.12.2020).

ACEA (2021): Report Vevhicles in use europe. https://www.acea.be/uploads/publications/report-vehicles-in-use-europe-january-2021.pdf. (28.01.2021).

ADAC (2020a): AdBlue kaufen, tanken und nachfüllen. https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/benzin-und-diesel/adblue-nachfuellen/. (23.03.2021).

ADAC (2020b): Elektroautos auf der Langstrecke: Wie kann das funktionieren? https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/schnellladen-langstrecke-ladekurven/. (23.03.2021).

ADAC (2020c): Ladestationen für Elektroautos: Das kostet der Strom. In: *www.adac.de*. *Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.*, https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/. (15.12.2020).

ADAC (2021): CO_2-Steuer – warum manche Autos nun mehr kosten. In: *www.adac.de*. *Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.*, https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/kfz-steuer/co2-steuer/. (21.04.2021).

Adler, A. (2019): 2019 Work Truck Show: Adoption of Electrification Won't be Fast. In: *www.trucks.com*. https://www.trucks.com/2019/03/08/2019-work-truck-show-adoption-electrification-wont-be-fast/. (20.04.2021).

auto motor sport (2020): Bis zu 10-facher Preis, wenig Zapfsäulen. https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/adblue-nachfuellen-scr-kat-diesel-abgas/. (23.03.2021).

Autobild (2021): Gebrauchte E-Autos: warum sie auf Dauer günstig zu haben sind. https://www.autobild.de/artikel/e-autos-umweltpraemie-restwert-gebraucht-kaufen-18492401.html. (29.04.2021).

BASt (2017): Fahrleistungserhebung 2014. https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrssicherheit/Fachthemen/U2-fahrleistung-2014/u2-Fahrleistung-2014-ergebnisse.html;jsessionid=C1AF6B1E9015BB8BF7FA7F12470DCCB3.live21302?nn=1817128. (21.12.2020).

Berckmans, G.; Messagie, M.; Smekens, J.; Omar, N.; Vanhaverbeke, L.; Van Mierlo, J. (2017): Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. MOBI Research Group, Brüssel.

BGL (2019): Dieselpreis-Information (ab Tankstelle). http://www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation_tankstelle.pdf. (16.01.2020).

Biehl, S. N.; Schönemann, A.; Melz, T.; Heim, R. (2020): Hochvolt-Energiespeicher in Leichtbauweise für elektrifizierte Sattelauflieger. In: *ATZheavy duty*. Vol. 13, No.3, pp. 56–61.

BME (2018): BME-Preisspiegel Frachten: Preisanstieg setzt sich fort. https://www.bme.de/bme-preisspiegel-frachten-preisanstieg-setzt-sich-fort-2498/. (23.03.2021).

BMVI (2018): Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO2-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile. (24.01.2019).

BMVI (2020): Lkw-Maut. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html. (21.12.2020).

BNEF (2019): Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At $156/kWh In 2019. https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/. (20.04.2021).

den Boer, E.; Aanink, S.; Kleiner, F.; Pagenkopf, J. (2013): Zero emission trucks – An overview of state-of-the-art technologies and their potential.

Braun, M.; Augustin, K.-H.; Küppers, T. (2015): Zwischenbilanz beim Praxistest mit sieben Euro-6-Lkw. Aus den bislang ermittelten Daten lassen sich die Betriebskosten fürs erste Jahr hochrechnen. p. 4.

Bundesfinanzministerium (2020): Kfz-Steuer-Rechner. https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html. (21.12.2020).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile* (12.11.2020).

Bundesregierung (2019): Steuerliche Anreize für Elektroautos. https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/steuerliche-anreize-e-autos-1653134. (21.12.2020).

Bundesregierung (2020): Einstieg in CO2-Bepreisung - Grundlage für CO2-Preis steht. https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/nationaler-emissionshandel-1684508. (30.04.2021).

Bussgeldkatalog.net (2021a): Wann muss die Sicherheitsprüfung beim Lkw erfolgen? https://www.bussgeldkatalog.net/lkw/sicherheitspruefung/. (23.03.2021).

Bussgeldkatalog.net (2021b): Kfz-Steuer für Anhänger - Kraftfahrzeugsteuer 2021. https://www.bussgeldkatalog.org/kfz-steuer-anhaenger/. (30.03.2021).

bussgeldkatalog.org (2021): Lkw-Pausen - die Pausenregelung für Lkw-Fahrer 2021. In: *bussgeldkatalog.org*. https://www.bussgeldkatalog.org/lkw-pausen/. (23.03.2021).

BVL (2016): Stückgut- und Ladungsverkehre: Ende der niedrigen Margen? | BVL Blog - Die BVL: Das Logistik-Netzwerk für Fach- und Führungskräfte. https://www.bvl.de/blog/stuckgut-und-ladungsverkehre-ende-der-niedrigen-margen/. (30.04.2021).

BVU; Intraplan; IVV; Planco Consulting (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht. *http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf* (29.01.2020).

De Gennaro, M.; Paffumi, E.; Martini, G. (2016): Big Data for Supporting Low-Carbon Road Transport Policies in Europe: Applications, Challenges and Opportunities. In: *Big Data Research*. Vol. 6, pp. 11–25.

De Gennaro, M.; Paffumi, E.; Martini, G.; Giallonardo, A.; Pedroso, S.; Loiselle-Lapointe, A. (2020): A case study to predict the capacity fade of the battery of electrified vehicles in real-world use conditions. In: *Case Studies on Transport Policy*. Vol. 8, No.2, pp. 517–534.

Deutscher Bundestag (2019): Förderung der Elektromobilität in den Bundesländern. In: *Förderung der Elektromobilität in den Bundesländern*. https://www.bundestag.de/resource/blob/655730/082a932838b96c1a3d4cc8dc0feb7aaa/WD-5-068-19-pdf-data.pdf. (21.12.2020).

Dixon, L.; Porche, I.; Kulick, J. (2002): Driving Emissions to Zero - Are the Benefits of California's Zero Emission Verhicle Program Worth the Costs? RAND Science and Technology.

DSLV (2015): Zahlen · Daten · Fakten aus Spedition und Logistik. In: *www.dslv.org*. *Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V.*, https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/6CFE028FC9D5A06BC1257E5B003C8189/$file/DSLV_Zahlen-Daten-Fakten_2015-Downloadversion.pdf. (22.04.2021).

DSLV (2020): Umsatz und Beschäftigte. https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/id/pa_de_beschaeftigte.html. (18.12.2020).

E3M-Lab; IIASA; EuroCARE (2016): EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050. European Commission. *https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf* (21.04.2021).

Edenhofer, O.; Flachsland, C.; Kalkuhl, M.; Knopf, B.; Pahle, M. (2019): Bewertung des Klimapakets und nächste Schritte: CO2-Preis, sozialer Ausgleich, Europa, Monitoring. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change gGmbH, Berlin. *https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Bewertung_des_Klimapakets_final.pdf* (22.04.2021).

EIA (2019): Annual Energy Outlook 2019 - Table: Petroleum and Other Liquids Prices - Case: Reference case. In: *www.eia.gov*. *U.S. Energy Information Administration*, https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=12-AEO2019&cases=ref2019&sourcekey=0. (21.04.2021).

EIA (2021): Short-Term Energy Outlook. In: *www.eia.gov*. *U.S. Energy Information Administration*, https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/prices.php. (21.04.2021).

Electrive (2019): Quantron lüftet Preise für Umrüstung des Iveco Daily. https://www.electrive.net/2019/12/11/quantron-lueftet-preise-fuer-umruestung-des-iveco-daily/. (24.03.2021).

Europäische Union (2019): Verordnung (EU) 2019/ des europäischen parlaments und des rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates. p. 39.

EurotaxSchwacke (2015): Schwacke Liste Nutzfahrzeuge. IV.

Eurotransport (2020): Marktübersicht Verteiler-Lkw, Fernverkehrs-Lkw, Kipper und Elektro-Lkw. https://www.eurotransport.de/artikel/bildergalerie-marktuebersicht-verteiler-lkw-fernverkehrs-lkw-kipper-elektro-lkw-11166736.html. (21.12.2020).

FfE; TUM (2016): Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen - Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) *Ergebnispapier*, *https://www.ffe.de/publikationen/vortraege/620-second-life-konzepte-fuer-lithium-ionen-batterien-aus-elektrofahrzeugen*.

Fraunhofer ISI (2017): Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) - Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. S. 124. *https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf*.

Fraunhofer ISI (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf.

Fries, M.; Lehmeyer, M.; Lienkamp, M. (2017): Multi-criterion optimization of heavy-duty powertrain design for the evaluation of transport efficiency and costs. Technische Universität München.

Gerhardt, N.; Scholz, A.; Hahn, H.; Schumacher, P.; Sager, C.; Bergk, F. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Endbericht. Fraunhofer IWES, Kassel. *https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2016/02/stiftungumweltenergierecht_Endbericht_EE-Strom_W%C3%A4rme-Verkehr_2015.pdf*.

Gipfel der Logistikweisen (2018): Logistik 2018: Eine Digitalisierte Welt und ihre Wirkung auf die Logistik - Ergebnisse des Herbstgipfels 2017.

Helms, H.; Kräck, J. (2016): Energy savings by light-weighting - 2016 Update. p. 70.

IEA (2017a): Framework assumptions – ETP Model 2017 – Analysis - IEA. In: *www.iea.org*. *International Energy Agency*, https://www.iea.org/reports/etp-model-2017/framework-assumptions. (21.04.2021).

IEA (2017b): World Energy Outlook.

IEA (2020): World Energy Outlook 2020. Paris. *https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020* (11.12.2020).

ifeu (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) – Berichtsteil „TREMOD“. Heidelberg.

ifeu (2021): Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOD-MM)“ 2020. Heidelberg.

IVECO (2019): IVECO Daily E6 Preisliste 4 I. https://www.iveco.com/Germany/Neufahrzeuge/Documents/Daily%20E6%20Preisliste/Daily2016PL41_Manuell_2019_02_18.pdf. (24.03.2021).

Johannsen, F. (2020): Neue Konzernstrategie Nachhaltigkeit 2030: Wie BMW-Chef Zipse die Klimaziele erreichen will. In: *Automobilwoche.de*. https://www.automobilwoche.de/article/20200727/BCONLINE/200729919/neue-konzernstrategie-nachhaltigkeit--wie-bmw-chef-zipse-die-klimaziele-erreichen-will. (20.04.2021).

Jöhrens, J.; Jamet, M.; Keller, M.; Lambrecht, U.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Veres-Homm, U.; Schwemmer, M.; Scs, F.-A.; Allekotte, M. (2018): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. *https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/2018-12-20-ifeu-PTV-SCS-Potentialanalyse-Roadmap-OH-Lkw.pdf*.

Jöhrens, J.; Waßmuth, V.; Rücker, J.; Kräck, Jan (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Heidelberg. *https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw-Bericht-Einfuehrungsszenarien-web.pdf*.

Jordbakke, G. N.; Amundsen, A.; Sundvor, I.; Figenbaum, E.; Hovi, I. B. (2018): Technological maturity level and market introduction timeline of zero-emission heavy-duty vehicles. Oslo. S. 82. *https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=48918*.

JRC (2020): JEC Tank-to-Wheels Report v5: Heavy duty vehicles. *Text*, *https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/jec-tank-wheels-report-v5-heavy-duty-vehicles*.

KBA (2011): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen Jahr 2010.

KBA (2019): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen Jahr 2018.

KBA (2020a): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge - Inlandsverkehr (VD 3) 2019. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Kraftverkehr/vd3_uebersicht.html. (23.03.2021).

KBA (2020b): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge - Güterbeförderung (VD 4) - Jahr 2019. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg. *https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Kraftverkehr/vd4_uebersicht.html* (30.04.2021).

Kerler, M.; Fries, M.; Rohr, S.; Schickram, S.; Sinning, M. (2017): An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership Update 2017. p. 26.

Lambert, F. (2016): Tesla confirms base Model 3 will have less than 60 kWh battery pack option, cost is below $190/kWh and falling. In: *www.electrek.co*. https://electrek.co/2016/04/26/tesla-model-3-battery-pack-cost-kwh/. (20.04.2021).

Laslau, C.; See, K.; Frankel, D. (2015): Crossing the Line: Li-ion Battery Cost Reduction and Its Effect on Vehicles and Stationary Storage.

Lastauto Omnibus (2014): Katalog 2014.

leasinGo (2021): Finanzierungsangebote für Lkw. https://www.leasingo.de/lkw-leasingvergleich?gclid=EAIaIQobChMIvuqpr4vd7gIVk53VCh2MGAwrEAAYAiAAEg-KMQPD_BwE. (17.02.2021).

Lipman, T.; Delucchi, M. A. (2010): Expected Greenhouse Gas Emission Reductions by Battery, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles.

Logistra.de (2015): Reparaturen am Trailer. In: *Fachartikel*. https://logistra.de/fachmagazin/fachartikel/reparaturen-am-trailer-14552.html. (23.03.2021).

Lohse, D.; Schnabel, W. (2011): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2 - Verkehrsplanung. Beuth Verlag.

Markel, T.; Simpson, A. (2007): Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology. In: *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 1, No.1, pp. 294–301.

McKinsey (2017): Electrifiying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability.

Mercedes-Benz Bank (2021): LKW & Nutzfahrzeug Finanzierung. https://www.mercedes-benz-bank.de/content/mbbank/de/produkte/autofinanzierung/lkw-finanzierung.html. (18.03.2021).

Mundt (2005): Spitz kalkuliert: So viel kostet die eigene Betriebstankstelle für mittlere Transport- und Speditionsbetriebe. In: *www.mundt.de*. https://www.mundt.de/_medien/downloads/M1_Kalkulation-Betriebstankstelle.pdf?m=1536223866&. (22.04.2021).

MWV (2021): Ölpreis - Monatliche Kraftstoffpreise - Tankstellenbestand. In: *www.mwv.de*. *Mineralölwirtschaftsverband e.V.*, https://www.mwv.de/statistiken/. (22.04.2021).

Nationale Plattform Mobilität (2021): Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw. *AG 5*, *https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/ladeinfrastruktur-fuer-batterieelektrische-lkw/*.

NDR (2021): VW will Elektro-Anteil bis 2030 auf 70 Prozent verdoppeln. https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/VW-will-Elektro-Anteil-bis-2030-auf-70-Prozent-verdoppeln,vw5562.html. (17.03.2021).

Öko-Institut; Hochschule Heilbronn (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr.

Phadke, A.; Khandekar, A.; Abhyankar, N.; Wooley, D.; Rajagopal, D. (2021): Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now. *https://eta.lbl.gov/publications/why-regional-long-haul-trucks-are*.

Quantron (2020): Quantron Daily Flyer. https://www.quantron.net/wp-content/uploads/2020/10/Quantron-Daily-Flyer_8seiter_DE.pdf. (24.03.2021).

Reuß, L. (2020): E-Auto-Akku: Kosten, Preis, Pflege & Wartung - Das muss man über Batterien für E-Autos wissen. In: *www.autozeitung.de*. https://www.autozeitung.de/elektroauto-akku-191698.html. (20.04.2021).

Schmidt, O.; Hawkes, A.; Gambhir, A.; Staffell, I. (2017): The future cost of electrical energy storage based on experiencerates. Imperial College London, London.

Strom-Report (2020): Strompreis Gewerbe. https://strom-report.de/strompreis-gewerbe/. (15.12.2020).

the balance (2021): Crude Oil Price Prediction. In: *www.thebalance.com*. https://www.thebalance.com/oil-price-forecast-3306219. (21.04.2021).

Toll Collect (2020): Mauttarife. https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html. (21.12.2020).

Triami Media BV (2021): Historische harmonisierte Inflation Deutschland. In: *www.inflation.eu*. https://www.inflation.eu/de/inflationsraten/deutschland/historische-inflation/hvpi-inflation-deutschland.aspx. (22.04.2021).

TruckScout24 (2017): LKW, Transporter, Baumaschinen & Wohnwagen. https://www.truckscout24.de/. (14.01.2020).

TÜV Süd (2020): Gebühren/Preise für Hauptuntersuchung, Abgasuntersuchung, Nachuntersuchung. https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/mobilitaet-und-automotive/hauptuntersuchung/gebuehren. (21.12.2020).

TÜV Süd (2021): Gebühren/Preise für Hauptuntersuchung, Abgasuntersuchung, Nachuntersuchung. https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/mobilitaet-und-automotive/hauptuntersuchung/gebuehren. (23.03.2021).

UBA (2021): Trends der Lufttemperatur. In: *Umweltbundesamt*. *Text*, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur. (19.02.2021).

Volvo (n.d.): Nebenantriebe und Hydraulikpumpen - Anwendungsbereiche Berechnungsleitfaden.

Wang, J.; Purewal, J.; Liu, P.; Hicks-Garner, J.; Soukazian, S.; Sherman, E.; Sorenson, A.; Vu, L.; Tataria, H.; Verbrugge, M. W. (2014): Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel–cobalt–manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation. In: *Journal of Power Sources*. Vol. 269, pp. 937–948.

Wansart, J. (2012): Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO2-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe: Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der kalifornischen Gesetzgebung.

Wittenbrink, P. (2014): Transportmanagement. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

Zoll.de (2020): Steuervergünstigungen für reine Elektrofahrzeuge. https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerverguenstigung/Elektrofahrzeuge/elektrofahrzeuge_node.html. (21.12.2020).

Anhang

A1 Modellbeschreibung PTV Validate

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

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

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

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

PTV Validate wird in der vorliegenden Analyse eingesetzt, um stark befahrene Relationen von Lkw-Transporten nach bestimmten Kriterien zu selektieren und somit für BEV-Lkw-Betrieb geeignete Fahrten zu erhalten.

A2 Dokumentation von Eingangsgrößen und Annahmen

A2a Energiepreise

Der Dieselpreis setzt sich in der Betrachtung aus den Kostenblöcken „Produktbeschaffungskosten“, „Deckungsbeitrag“, „Energie- und CO_2-Steuer“ und „Mehrwertsteuer“ zusammen. Während die ersten beiden Blöcke insbesondere von den Marktbedingungen – hier abgebildet durch den Rohölpreis – abhängen, beeinflusst die Gesetzgebung direkt die beiden zuletzt genannten Blöcke.

Für die künftige Entwicklung der Produktbeschaffungskosten und des Deckungsbeitrags werden zunächst unterschiedliche Rohölpreisszenarien ausgewertet. Als Datenquelle wurden Szenarien von (E3M-Lab et al., 2016), (EIA, 2019), (IEA, 2017a), (the balance, 2021), (EIA, 2021) und (IEA, 2020) verwendet. Alle Preise gelten für die Sorte Brent und wurden hierbei in $\$_{2020}$ umgerechnet. Für die angenommenen Preise wurde der Mittelwert der Szenarienwerte genommen. Abbildung 54 zeigt die Preisentwicklung des Rohöls aus den genannten Quellen sowie den angenommenen Mittelwert.

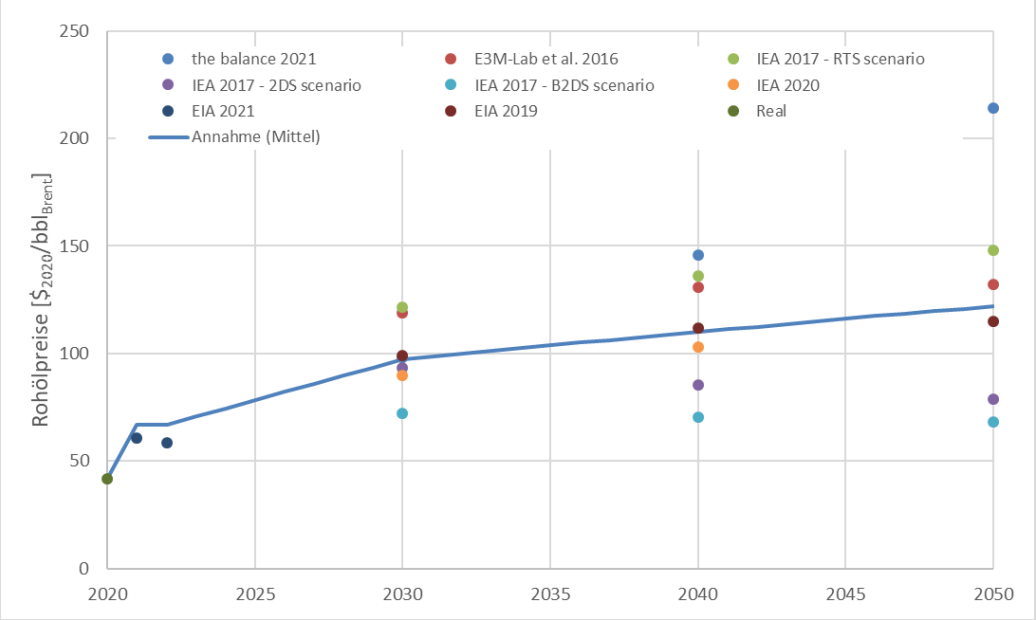
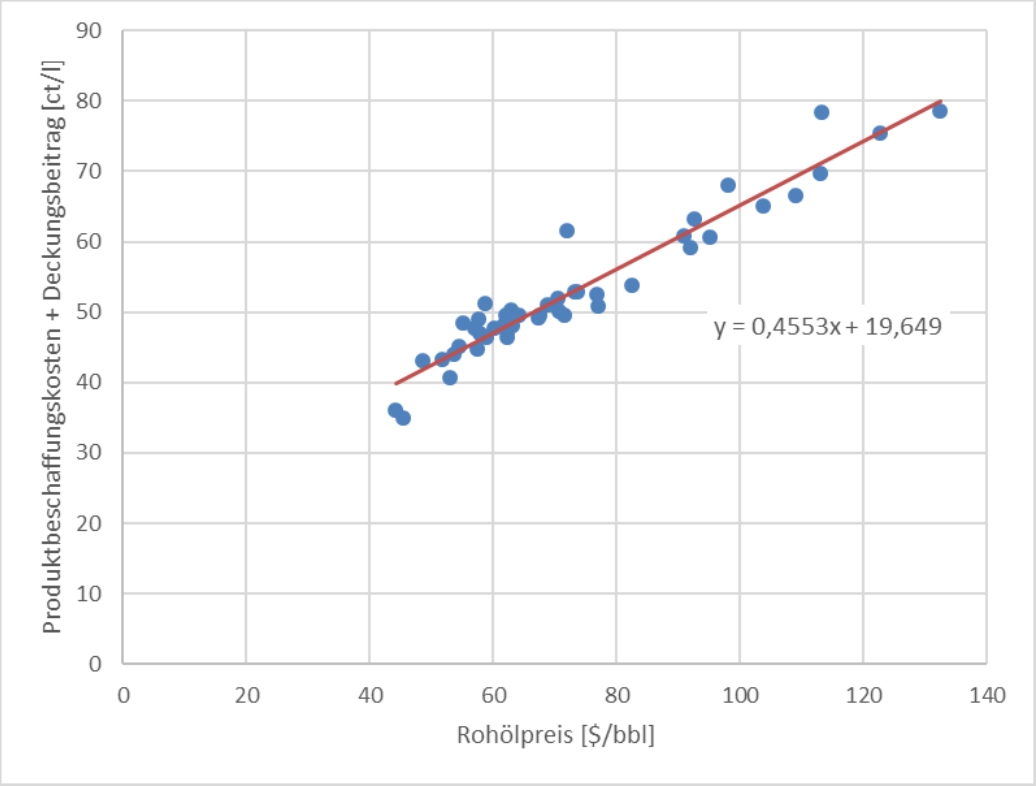


Abbildung 54: Rohölpreisentwicklung

Anhand der historischen Rohölpreisentwicklung und dem Verlauf der Produktbeschaffungskosten und des Deckungsbeitrags von Dieselkraftstoff nach Angaben des Mineralölverbands (MWV, 2021) kann der Zusammenhang der Größen abgeleitet werden. Abbildung 55 zeigt diese Abhängigkeit sowie die hieraus ermittelte Bestimmungsfunktion.



Quelle: (MWV, 2021)*, Monatsdaten Januar 2005 bis Februar 2021.*

Abbildung 55: Produktbeschaffungskosten zzgl. Deckungsbeitrag (exkl. MwSt.) als Funktion des Rohölpreises

Einen großen Anteil am Dieselpreis weist die Energiesteuer und seit 2021 auch die CO_2-Steuer auf. Die Energiesteuer löste 2006 die Mineralölsteuer ab und liegt aktuell bei 47,04 ct/l (Stand April 2021). Im Szenario wird angenommen, dass diese Steuer nominal konstant bleibt. Die CO_2-Steuer beträgt rund 17 ct/l (55 €/t_{CO2}) im Jahr 2025 (ADAC, 2021). Bis zum Jahr 2030 wird angenommen, dass die Steuer steigen wird. Für die nominale prozentuale Steigerung von 82 % (2025-2030) wird der untere Preispfad nach (Edenhofer et al., 2019) verwendet. Nach 2030 wird von einem linearen nominalen Anstieg ausgegangen. Aufgrund der Inflation sinken die angegebenen nominalen Werte. Für die Inflation wird ein Wert von 1,22 % pro Jahr angenommen. Dies entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Jahre 2010-2020 (Triami Media BV, 2021). Abbildung 56 zeigt die Entwicklung der realen Dieselpreise sowie die Zusammensetzung.

Da lediglich Nettopreise betrachtet werden, bleibt die MwSt. unberücksichtigt. Bei den Preisen handelt es sich um Tankstellenpreise. Großabnehmerrabatte bleiben unberücksichtigt. Große Speditionen können durchaus einen Vorteil von Betriebstankstellen haben, jedoch ist der um ca. 7 ct geringere Kraftstoffpreis (BGL, 2019) den Kosten für die eigene Betriebstankstelle gegenüberzustellen. Die Kosten für eine Betriebstankstelle belaufen sich auf ca. 16.640 €/a (Mundt, 2005). Nach (DSLV, 2015) beträgt der durchschnittliche Fuhrpark pro Unternehmen 9,3 Lkw. Bei einer Jahresfahrleistung von 83.700 km/a und einem Verbrauch von 29,5 l/100 km (beide Daten aus TREMOD 6.03 für das Jahr 2018) ergibt sich ein Gesamtverbrauch pro Jahr und Unternehmen von 230.300 l. Somit folgen bei einer Umlegung der Kosten für die Betriebstankstelle auf den Dieselverbrauch Zusatzkosten in Höhe von 7 ct/l, sodass der Rabatt (im Durchschnitt) ausgeglichen wird. Aus diesem Grund wird hierauf nicht weiter eingegangen. Des Weiteren sind Kostenänderungen aufgrund von sich ändernden Biokraftstoff- oder PtL-Quoten nicht berücksichtigt.

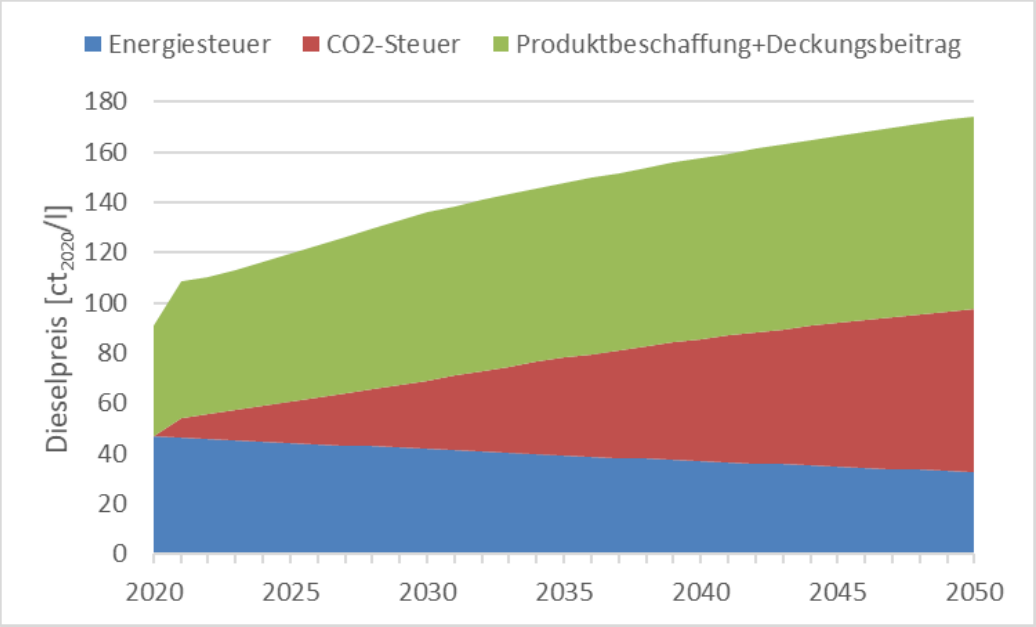


Abbildung 56: Dieselpreisentwicklung

Für den Strompreis wird zwischen dem Ort der Nachladung differenziert: Es werden jeweils Preispfade für „Öffentliches Laden“, „Laden am eigenen Betriebshof“ und „Laden an Fremdrampen“ vorgegeben. Es werden die Preise für das Jahr 2020 angegeben und die absoluten Änderung in den Folgejahren wird einheitlich anhand der Entwicklung aus (Jöhrens et al., 2020) angenommen. Pro Jahr nimmt der Strompreis zwischen 2020 und 2030 durchschnittlich um 0,46 ct_{2020} ab. Hintergrund für die Abnahme ist insbesondere das Ausschieden hoch geförderter EE-Anlagen der „ersten Generation“.

Der Strompreis für das öffentliche Laden wird anhand aktueller Preise für Pkw (Stand 2020) abgeleitet. Für den Ausgangspreis im Jahr 2020 werden die Preise von unterschiedlichen Anbietern für DC-Laden verwendet und der Mittelwert gebildet. Tabelle 26 fasst die verwendeten Werte zusammen.

Tabelle 26: Ableitung des Strompreises an öffentlichen Ladepunkten

Anbieter	Preis [ct/kWh]
ADAC e-charge	32,8
Charge Now	23,8-25,2
EnBW	41,2
Maingau Energie	40,3
Telekom Get charge	32,8
Stadtwerke Dresden DREWAG	27,7
Stadtwerke München	31,9
Annahme (Mittel)	**32,0**

Quelle: (ADAC, 2020c)

Für das Laden am eigenen Betriebshof wird der Gewerbestrompreis herangezogen und hinzugerechnet wird die Abschreibung für die Ladeinfrastruktur. Der Gewerbestrompreis betrug im Jahr 2020 21,2 ct/kWh (Strom-Report, 2020). Für die Abschreibung der Ladesäule

wird eine einfache Abschätzung durchgeführt. Es wird angenommen, dass an 230 Tagen im Jahr täglich 200 kWh Endenergie bezogen werden (dies entspricht in etwa dem täglichen Verbrauch eines durchschnittlichen Lkws). Hieraus resultieren 46.600 kWh jährlich. Bei einem angenommenen Preis für die Ladesäule von 25.000 € und einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren resultieren 1.250 € pro Jahr. Zuzüglich Wartungs- und Instandhaltungskosten von angenommenen 500 €/a ergeben sich insgesamt 1.750 €/a bei 46.600 kWh/a. Hieraus folgt ein Aufschlag für die Ladeinfrastruktur von 3,8 ct/kWh, sodass der Preis für Laden am eigenen Betriebshof im Jahr 2020 mit 25 ct/kWh angesetzt wird.

Für das Laden an Fremdrampen können keine Preise ermittelt werden. Der zu entrichtende Preis hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Vereinfacht wird hierfür der mittlere Preis für öffentliches Laden und Laden auf dem eigenen Betriebshof angenommen, sodass der Wert für Laden an der Fremdrampe im Jahr 2020 mit 28,5 ct/kWh angesetzt wird. Abbildung 57 zeigt die angenommenen Strompreise für das Jahr 2020 sowie die angenommenen Degression bis 2030.

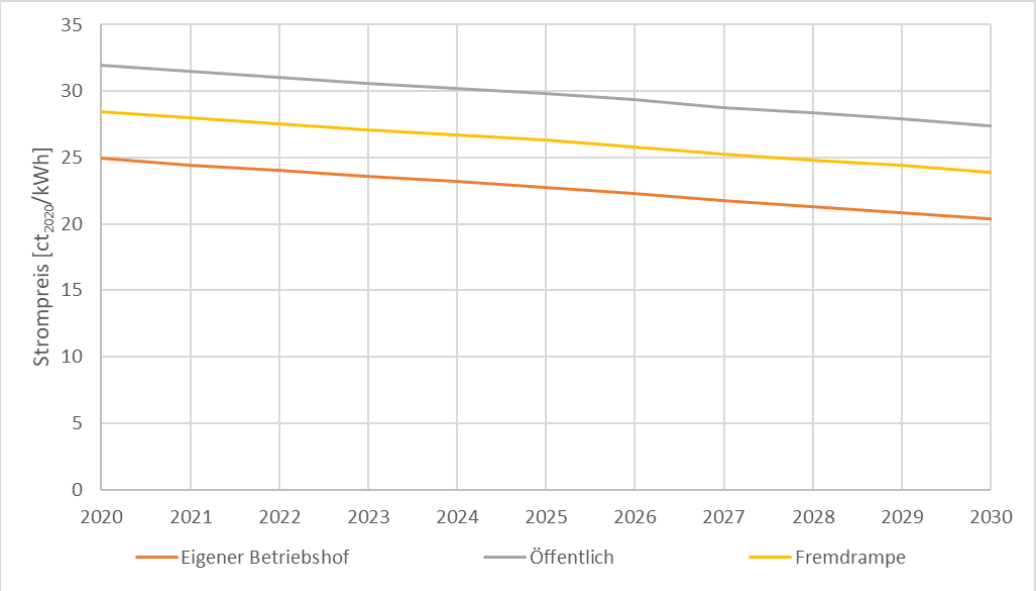


Abbildung 57: Strompreisentwicklung für unterschiedliche Bezugsorte 2020-2030

A2b Spezifischer Energieverbrauch

Die Energiekosten errechnen sich aus den Kraftstoff- bzw. Strompreisen sowie dem Verbrauch der Fahrzeuge. Da derzeit nur wenige empirische Verbrauchswerte für E-Lkw vorliegen und für diese wiederum oftmals die Rahmenbedingungen der Erhebung nicht hinreichend bekannt sind, wird für die Ableitung der Verbrauchsannahmen auf dem Modell TREMOD (ifeu, 2020)[1] und den Simulationswerten aus (Jöhrens et al., 2018) aufgesetzt. Die Verbräuche auf Autobahnen für ICEV und BEV der Größenklasse ≥26t für die Jahre 2025 und 2030 sind in (Jöhrens et al., 2018) gegeben.

Die Stromverbräuche der kleineren Größenklassen werden anhand der Dieselverbräuche der jeweiligen Größenklasse nach TREMOD und dem Verhältnis der Verbräuche BEV/ICEV

[1] Um Konsistenz zu wahren, werden die Verbrauchsannahmen für E-Lkw und Diesel-Lkw auf die gleiche Weise bestimmt.

der Größenklasse ≥26t auf Autobahnen hergeleitet. Hier wird angenommen, dass dasselbe Verhältnis für alle Größenklassen gilt. Das Verhältnis ist im Jahr 2020 4,2 kWh_{el}/l_{Diesel} und im Jahr 2030 4,8 kWh_{el}/l_{Diesel}. dass die Verhältnisse des Energieverbrauchs zwischen verschiedenen Straßentypen bei Pkw und Lkw in etwa gleich sind. Als Datengrundlage für die straßentypspezifischen Verbrauchsunterschiede von Pkw wird TREMOD 6.1 verwendet. Allgemein wird von einer Verbrauchsverbesserung auf Basis von Simulationsergebnissen aus (Jöhrens et al., 2018) und TREMOD 6.1 bis zum Jahr 2030 ausgegangen. Für eine mittlere Beladung (50 %) werden in den folgenden Tabellen die Verbräuche von BEV und ICEV angegeben:

Tabelle 27: Verbräuche von batterieelektrischen Neufahrzeugen (exkl. Batteriegewicht) in den Jahren 2025 und 2030

Größenklasse	Straßentyp	Verbrauch [kWh/100km]	
		2025	2030
3,5-7,5t	AB	72	70
	AO	69	67
	IO	77	74
7,5-12t	AB	81	79
	AO	75	73
	IO	88	86
12-18t	AB	92	89
	AO	81	79
	IO	99	97
18-26t	AB	105	102
	AO	92	90
	IO	116	113
SNF ≥26t	AB	128	125
	AO	123	120
	IO	187	184

Tabelle 28: Verbräuche von Diesel-Neufahrzeugen in den Jahren 2025 und 2030

Größenklasse	Straßentyp	Verbrauch [l/100km]	
		2025	2030
3,5-7,5t	AB	16,4	15,1
	AO	14,2	13,1
	IO	14,2	13,0
7,5-12t	AB	18,2	16,6
	AO	16,2	14,8
	IO	18,1	16,5
12-18t	AB	20,6	18,9
	AO	19,6	17,9
	IO	25,6	23,5
18-26t	AB	23,6	21,6
	AO	23,0	21,1
	IO	30,8	27,0
SNF ≥26t	AB	28,5	25,8
	AO	28,5	25,6
	IO	40,8	36,7

Die angegebenen Verbräuche sind nach oben bzw. nach unten zu korrigieren, sofern die transportierte Tonnage von einer 50 % Beladung abweicht. Da für die einzelnen Güterabteilungen typische Auslastungsfaktoren vorliegen, wird davon im Modell auch Gebrauch gemacht. Hierzu werden die marginalen Verbrauchsänderungen pro kg Zusatzgewicht in Anlehnung an (Helms / Kräck, 2016) verwendet. Bei BEV wird dieser Faktor auch auf das Zusatzgewicht von großen Batterien angewendet. Es wird für 2030 von einem Zusatzgewicht durch die Traktionsbatterie in Höhe von 4,44 kg/kWh ausgegangen, was einer Energiedichte von 225 Wh/kg entspricht.[1] Die folgende Tabelle gibt die Verbrauchsänderung pro t Zusatzgewicht an. Das Zusatzgewicht resultiert aus einer höheren Beladung und/oder im Fall von BEV aus größer dimensionierten Traktionsbatterien. Die hier angegebenen Werte entsprechen den Mittelwerten für übliche Einsatzfälle. In der Modellrechnung werden spezifische Werte pro Straßenkategorie verwendet.

Tabelle 29: Gewichtseinfluss auf den Verbrauch

Größenklasse	Zusatzverbrauch	
	ICEV [l/100km/t]	BEV [kWh/100km/t]
3,5-7,5t	0,8	4,0
7,5-12t	0,8	4,2
12-18t	0,9	4,2
18-26t	0,9	4,6
SNF ≥26t[1]	0,6	3,8

[1] Höherer Anteil an Autobahn und somit geringerer durchschnittlicher Gewichtseinfluss

Einen Einfluss auf den Verbrauch der Fahrzeuge und somit auf die Reichweite haben neben der Traktion des Fahrzeugs auch die Zusatzverbraucher. Als Zusatzverbraucher werden hier Aggregate wie Betonmischer, Hebebühnen oder Kühler verstanden. Je nach transportiertem Gut entstehen unterschiedliche Stromlasten, die zusätzlich durch den Kraftstoff (ICEV) oder die Batterie (BEV) zu decken sind. Der Energiebedarf der Zusatzaggregate wurde anhand von (Volvo, n.d.) und den Anteilen der Aufbauten pro Gütergruppe (abgeschätzt über www.truckscout24.de) ermittelt. Hierbei wurden die Zusatzverbräuche von unterschiedlichen Aufbauten den jeweiligen Gütergruppen (aus Abschnitt 3.2.1) zugeteilt und ein Mittelwert gebildet. Es wird davon ausgegangen, dass die Zusatzaggregate aus der Traktionsbatterie versorgt werden und der Wirkungsgrad bei BEV doppelt so hoch ist wie bei Dieselaggregaten. Die folgende Tabelle zeigt den zusätzlichen Verbrauch, der auf die Fahrleistung umgelegt wird. Zwar wurden auch Zusatzverbräuche für die beiden kleinsten Größenklassen hergeleitet, jedoch kann aufgrund der Datenbasis keine Zuordnung zu den Gütergruppen vorgenommen werden. Daher werden vereinfacht keine Zusatzverbraucher für diese Größenklassen angenommen. Die Verbräuche der Zusatzaggregate der drei größten SNF-Klassen befinden sich in Tabelle 30.

[1] Die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien mit den wesentlichen Zellchemien (NCA, NMC, LMO, LFP) wird für 2030 je nach Zellformat (Zylindrisch, Prismatisch, Pouch) zwischen 225 und 300 Wh/kg angegeben (Modulebene). Für das gesamte Batteriesystem ergibt sich eine Bandbreite von 185 bis 260 Wh/kg, wenn man eine ähnliche Reduktion der Energiedichte wie beim Übergang von Zell- zu Modulebene zugrunde legt. Für 2025 wird eine Energiedichte von 209 Wh/kg angenommen. (Fraunhofer ISI, 2017, 2020)

Tabelle 30: Energiebedarf der Zusatzaggregate

Gütergruppe	Strombedarf [kWh/100km]			Dieselbedarf [l/100km]		
	12-18t	18-26t	≥26t	12-18t	18-26t	≥26t
4	1,46	1,66	2,03	0,36	0,42	0,53
5	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08
6	1,45	1,65	2,02	0,36	0,42	0,53
7	1,50	1,70	2,09	0,37	0,44	0,55
8	0,55	0,63	0,77	0,14	0,16	0,20
9	3,61	4,10	5,03	0,90	1,05	1,32
10	1,24	1,41	1,72	0,31	0,36	0,45
11	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08
12	0,32	0,36	0,44	0,08	0,09	0,12
13	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08
14	1,71	1,94	2,38	0,43	0,50	0,63
15	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08
16	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08
17	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08
18	0,21	0,24	0,29	0,05	0,06	0,08

Quelle: Eigene Abschätzung anhand www.truckscout24.de, (Volvo, n.d.) *und TREMOD 6.1*

A2c Fahrzeugpreise

Für diese Studie wurde ein komponentenbasiertes Kostenmodell für den Fahrzeugpreis entwickelt. Es berücksichtigt die in Tabelle 31 dargestellten Kostenkomponenten, die von der Fahrzeuggröße, der Antriebsleistung und der Batteriegröße abhängen. Für ICEV liegen detaillierte Informationen für die komponentenspezifische Anteile der Produktionskosten vor (Fries et al., 2017). Um nun die Produktionskosten für BEV abzuleiten, wird im ersten Schritt überprüft welche Komponenten bei einer Serienproduktion (quasi) identisch sind und daher bei einer Serienproduktion keine Kostenunterschiede bewirken würden. Dies betrifft die Komponenten Führerhaus, Achsen, Antriebsstrang + Sonstiges (mit „I“ gekennzeichnet). Zusätzliche Komponenten sind die Leistungselektronik, der E-Motor, die Traktionsbatterie und sonstige Komponenten des E-Antriebs (mit „A“ gekennzeichnet). Diese wurden ergänzend recherchiert. Hingegen entfallen bei BEV die Komponenten Tanksystem, Abgassystem, Getriebe und Verbrennungsmotor. Der Kostenpunkt Fertigung liegt zwar bei beiden Technologien vor, unterscheidet sich aber.

Tabelle 31: Betrachtete Fahrzeugkomponenten zur Ableitung der BEV-Fahrzeugpreise („A“ = antriebsabhängige Komponenten)

Komponente	ICEV	BEV
Führerhaus	I	I
Achsen	I	I
Antriebsstrang + Sonstiges	I	I
Tanksystem	A	
Abgassystem	A	
Getriebe	A	
Verbrennungsmotor	A	
Leistungselektronik		A
E-Motor		A
Traktionsbatterie		A
Sonstige Komponenten E-Antrieb		A
Fertigung	A	A

Die Kostenanteile für ICEV liegen vollständig über (Fries et al., 2017) vor. Über die Fahrzeugpreise nach (EurotaxSchwacke, 2015) und dem in Abschnitt 3.3.1 angegebenen Retail Price Equivalent Factors (RPEF) können die absoluten Produktionskosten für ICEV pro Größenklasse und Komponente abgeleitet werden.

Die Kosten für „Führerhaus“, „Achsen“ und „Antriebsstrang + Sonstiges“ werden für BEV übernommen. Die BEV-spezifischen Komponenten „Leistungselektronik“, „E-Motor“, „Traktionsbatterie“ und „sonstige Komponenten E-Antrieb“ werden über andere Quellen hergeleitet. Für die Leistungselektronik werden die Quellen (Gerhardt et al., 2015), (Fries et al., 2017) und (Dixon et al., 2002) verwendet. Die Kosten des E-Motors sind aus (Markel / Simpson, 2007), (Lipman / Delucchi, 2010), (Gerhardt et al., 2015), (Fries et al., 2017) und (Markel / Simpson, 2007) abgeleitet. Die Fertigungskosten und die Batteriepreise sind unten eingehend erläutert. Die sonstigen Komponenten E-Antrieb sind aus (Jöhrens et al., 2018) übernommen. Die folgende Tabelle zeigt die Produktionskosten (bei geringen Produktionszahlen) differenziert nach Technologie und Größenklasse. Um die Preise zu erhalten sind diese Kosten mit dem RPEF zu multiplizieren.

Tabelle 32: Produktionskosten von ICEV und BEV differenziert nach Komponenten (bei geringen Stückzahlen)

Komponente	Größenklasse	ICEV	BEV
Führerhaus, Achsen, Antriebs-strang + Sonstiges	<7,5 t	11.055 €	
	7,5-<12 t	14.990 €	
	12-<18 t	17.747 €	
	18-<26 t	23.957 €	
	≥26 t	27.571 €	
Tank-, Abgassystem, Getriebe und Verbrennungsmotor	<7,5 t	12.450 €	/
	7,5-<12 t	16.882 €	
	12-<18 t	19.987 €	
	18-<26 t	26.981 €	
	≥26 t	31.050 €	
Fertigungskosen	<7,5 t	2.498 €	siehe unten
	7,5-<12 t	3.388 €	
	12-<18 t	4.011 €	
	18-<26 t	5.414 €	
	≥26 t	6.231 €	
Leistungselektronik*	alle	/	143 € + 22,5 €/kW
E-Motor*	alle	/	105 € + 15,5 €/kW
Sonstige Komponenten E-Antrieb*	alle	/	289 € + 1,5 €/kW

*Anmerkung: *Die Kosten pro Größenklasse können über die Leistung hergeleitet werden. Es wird angenommen, dass die Systemleistung von BEV gleich der Leistung von ICEV ist. Die Leistung pro Größenklasse wurde aus* (TruckScout24, 2017) *und* (BASt, 2017) *abgeleitet. SNF <7,5 t: 125 kW, SNF 7,5-<12 t: 145 kW, SNF 12-<18 t: 266 kW, SNF 18-<26 t: 287 kW, SNF ≥26 t: 310 kW. Kosten gelten für 20.000 produzierte Einheiten pro Jahr*

Die in Tabelle 32 aufgelisteten Kosten für ICEV werden konstant angenommen. Bei den BEV wird hingegen eine Kostendegression nach (Markel / Simpson, 2007) angenommen. Die Kosten für „Leistungselektronik“, „E-Motor“ und „sonstige Komponenten E-Antrieb“ werden für niedrige Stückzahlen angesetzt und es erfolgt eine lineare Kostendegression bis sich das Produktionsvolumen verzehnfacht hat. Die niedrigen Stückzahlen (und somit die Kosten aus Tabelle 32) werden in den Jahren werden in den Jahren 2026 (<7,5 t), 2027 (7,5-<26 t) und 2028 (≥26 t) erreicht und ergeben sich aus der unten beschriebenen Annahme für den Markthochlauf. Vor den genannten Jahren werden höhere Kosten angesetzt, die anhand der prozentualen Kostendegression des Kostenblocks „Fertigung“ abgeleitet werden (siehe unten). Bis zu den Jahren 2035 (≥12 t), 2036 (7,5-<12 t) und 2037 (<7,5 t) erhöhen sich die produzierten Stückzahlen deutlich, sodass sich bis dahin die Kosten um ca. 50 % (Leistungselektronik), 27 % (Elektromotor) und 34 % (sonstige Komponenten E-Antrieb) reduzieren. In den Zwischenjahren wird von einer linearen Kostendegression ausgegangen. Nach der erwähnten Verzehnfachung werden die Produktionskosten konstant gelassen. Es ergeben sich die Produktionskosten für die Komponenten „Leistungselektronik“, „Elektromotor“ und „sonstige Komponenten E-Antrieb“ aus Abbildung 58.

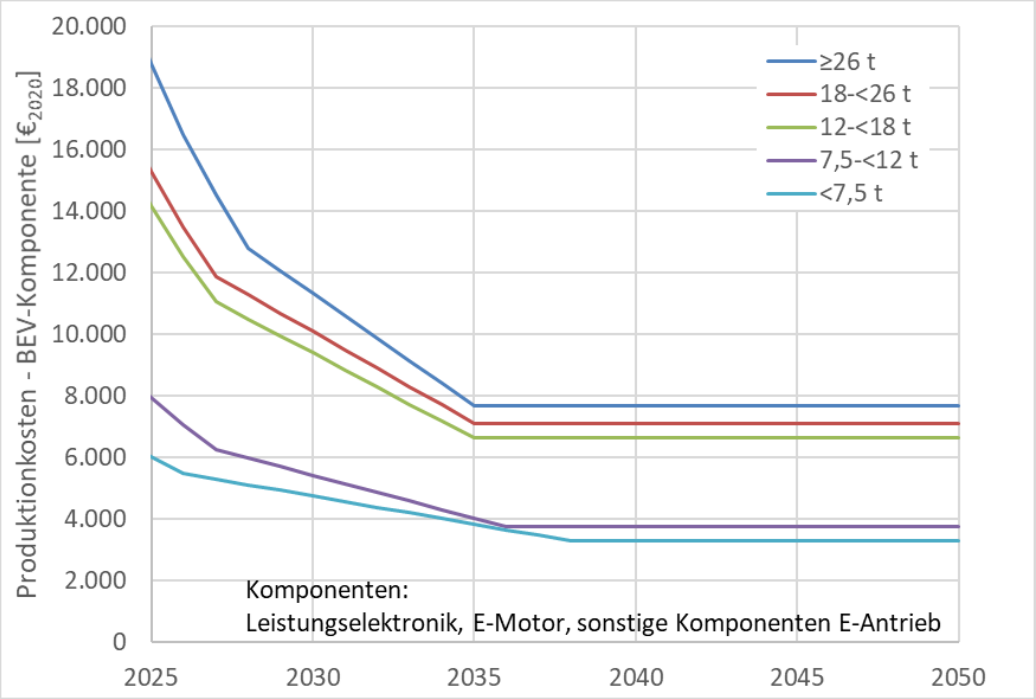


Abbildung 58: Produktionskosten der BEV-Komponente

Beim Kostenblock „Fertigung“ wird von Fertigungskosten während des Markthochlaufs ausgegangen, die die Fertigungskosten vergleichbarer ICEV deutlich übersteigen werden. Jedoch ist auch anzunehmen, dass sich hier eine Kostendegression einstellen wird, die auf lange Frist in ähnlichen Kosten mündet wie bei ICEV. Für diese Kostendegression in der Fertigung wird die Standard-Erfahrungskurve verwendet (Wansart, 2012):

$$k(t) = k(t_0) \cdot \left(\frac{M(t)}{M(t_0)}\right)^{-\alpha}$$

mit k – Kosten je produzierte Einheit
M – Kumulierte Produktionsmenge
α – Wirkung des Erfahrungseffektes

Um die Parameter dieser Gleichung zu bestimmen, wird zunächst angenommen, dass bei einer BEV-Produktionsmenge, die der heutigen Produktionsmenge von ICEV entspricht, dieselben Fertigungskosten wie ICEV aufweisen. Um die kumulierte Produktionsmenge zu bestimmen, muss also eine Marktdurchdringungskurve definiert werden (siehe Abbildung 59). Diese dient im Folgenden ausschließlich der Abschätzung der anzunehmenden zukünftigen Kostendegressionen bei den Fahrzeugkosten und nimmt insbesondere nicht die Berechnung des wirtschaftlichen Potentials einzelner Antriebsarten vorweg.

Grundlage für die Form des angenommenen Markthochlaufs ist die Entwicklung bei Pkw. Hier wurde anhand der realen Marktentwicklung im Zeitraum 2010-2021 (nach Statistiken des Kraftfahrtbundesamts) und einschlägiger Herstellerziele für die Zeit bis 2030 der Markthochlauf abgeleitet (Johannsen, 2020) (NDR, 2021). Anhand eines Vergleichs der historischen Entwicklung bei Lkw im Zeitraum 2014-2019 wird abgeschätzt, dass die Elektrifizierungsquote bezogen auf die Neuzulassungen bei SNF um 1,5 (<7,5t), 5,5 (7,5-26t) und 7,5 (>26t) Jahre hinter der Quote im Pkw-Bereich liegt. Diese zeitliche Verzögerung wird für die

jeweiligen Größenklassen angenommen. Diese zeitliche Verzögerung spiegelt sich auch in den aktuell verfügbaren Modellen und Ankündigungen wider.

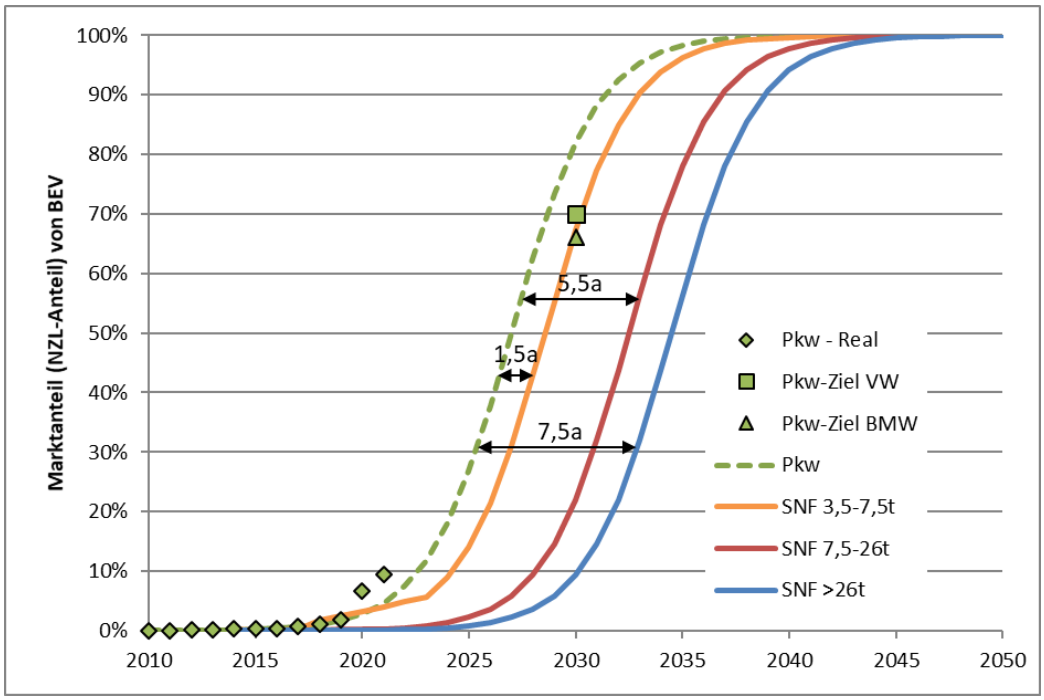


Abbildung 59: Angenommener Markthochlauf zur Ermittlung der Fertigungskosten von BEV

Aus der Kurve ergibt sich, dass im Jahr 2044 bei kleinen Lkw eine vollständige Marktdurchdringung vollzogen sein wird. Für größere SNF erfolgt die komplette Durchdringung in den Jahren 2048 (7,5-26t) bzw. 2050 (>26t). Diese Annahme passt gut zur Aussage des Europäischen Automobilherstellerverbands (ACEA, 2020), derzufolge ab 2040 nur noch emissionsfreie Nutzfahrzeuge neu zugelassen werden müssen, um die Ziele zu erreichen, wobei im Jahr 2020 bereits mit dem Technologiewandel begonnen wurde. Vor der kompletten Marktdurchdringung werden die Fertigungskosten von BEV höher angesetzt als von ICEV. Für die Kostenermittlung vor 2043 fehlt noch der Koeffizient α. Dieser ergibt sich aus der Gleichung

$$\alpha = -log_2(100\% - R)$$

mit R – Prozentuale Reduktion bei Verdopplung der Produktionsmenge

Für den Faktor *R* wird in der Literatur ein Wert von ca. 10 % für die Automobilindustrie angegeben (Wansart, 2012). Anhand der historischen Kostendegression bei Traktionsbatterien ergibt sich demgegenüber eine schnellere Degression, die sich durch einen höheren *R*-Wert in Höhe von 22 % widerspiegelt. Um nun die Kostendegression bei der Herstellung von elektrischen Nutzfahrzeugen abzubilden, wird als Abschätzung für die Fertigungskosten der Mittelwert aus beiden Angaben (16 %) verwendet. Die folgende Abbildung zeigt die angenommenen Fertigungskosten von BEV, die auf die Komponentenkosten zu addieren sind.

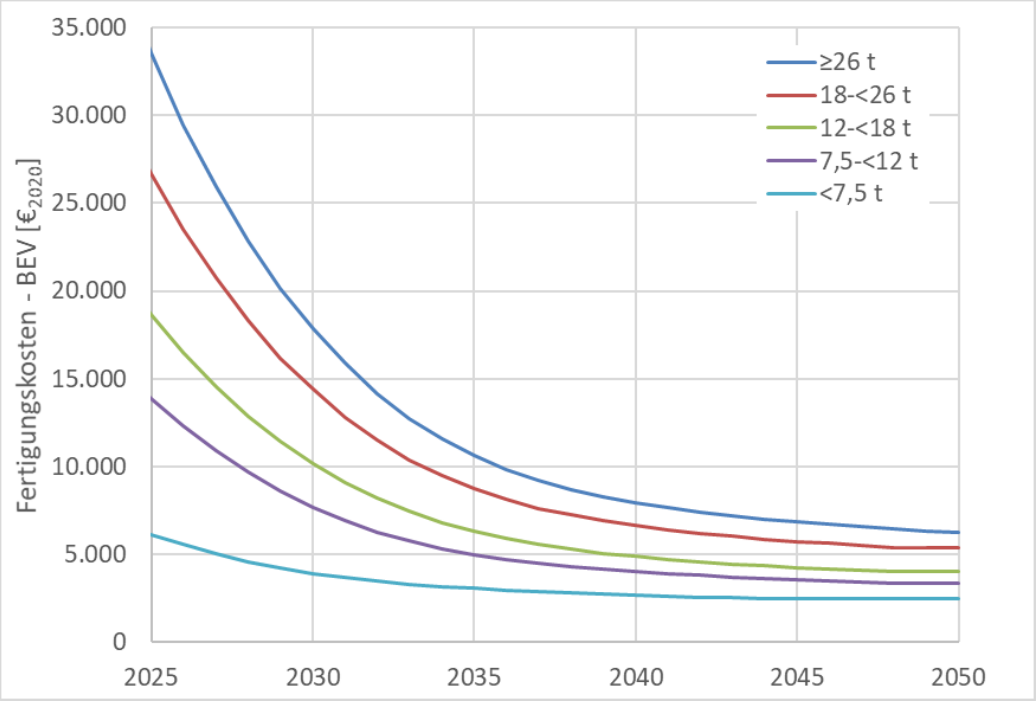


Abbildung 60: Fertigungskosten von BEV (ohne Komponente)

Für die Traktionsbatterie selbst wurden mehrere Quellen (aus dem Pkw-Bereich) verwendet, um sowohl den aktuellen Marktpreis als auch künftige Entwicklungen zu evaluieren. Die spezifischen Batteriekosten für SNF werden höher angenommen als bei Pkw, da hier die Stückzahl geringer ist und auch die Anforderungen an die Batterie (hohe Leistung) anspruchsvoller sind. Angenommen wird daher, dass die Kostendegression der Batterien von SNF um drei Jahre verzögert ggü. Pkw-Batterien erfolgt. Für die Batteriepreise wurden die folgenden Quellen verwendet: (McKinsey, 2017), (Laslau et al., 2015), (Berckmans et al., 2017), (Schmidt et al., 2017), (IEA, 2017b), (Lambert, 2016), (BNEF, 2019), (Reuß, 2020), (Adler, 2019) und (Phadke et al., 2021) . Die Umrechnung der realen Preise auf $€_{2020}$ erfolgt anhand der Inflation von USD und einem Wechselkurs von 0,84. Der verwendete Preis (für Pkw) ist der Mittelwert aus allen Angaben. Die folgende Abbildung zeigt die Preise der Traktionsbatterien pro kWh für Pkw und SNF.

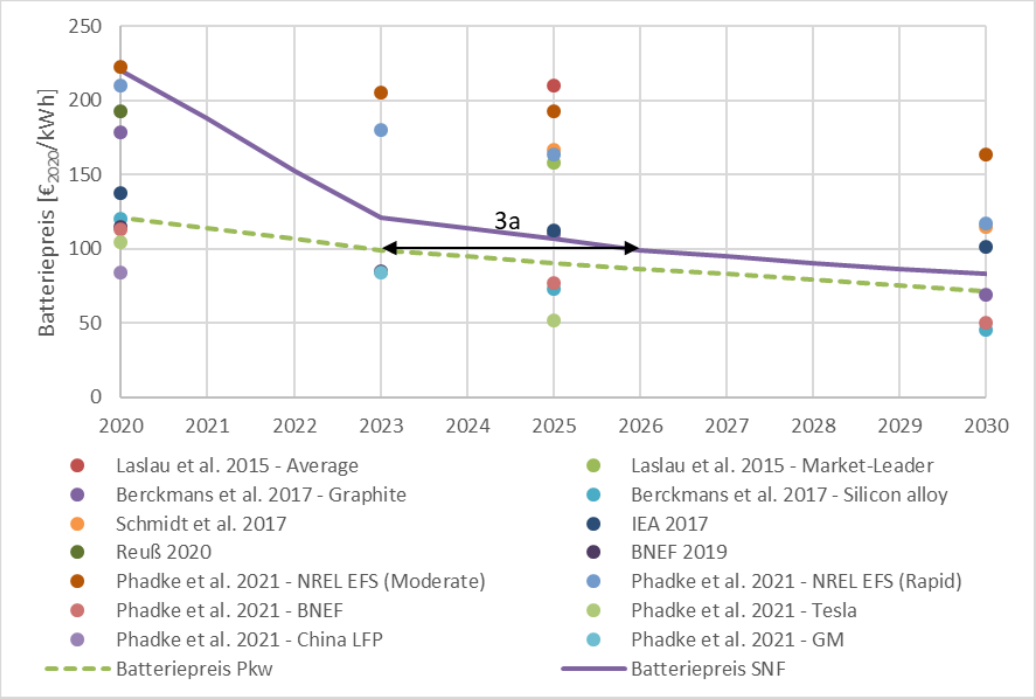


Abbildung 61: Herleitung der Batteriepreise für den Zeitraum 2020-2030

Allgemein können die oben genannten Kosten mit dem angenommenen RPEF (1,588) in Preise umgerechnet werden. Alle Preisangaben sind netto Realpreise (ohne MwSt.) in $€_{2020}$.

Anzumerken ist, dass über die oben genannte Methode, keine Kosten und Preise aktueller Fahrzeuge (Stand 2020) abgebildet werden können. Dies hat den Hintergrund, dass die Gleichungen und Kosten lediglich für Serienproduktionen gültig sind. Eine Serienproduktion für BEV im SNF-Bereich ist jedoch noch nicht umfassend gestartet. Aktuell gibt es nur etwa 23 verfügbare Batterie-Lkw-Modelle auf dem deutschen Markt (Eurotransport, 2020), Anfang des Jahres 2020 befanden sich insgesamt 925 Fahrzeuge im Bestand (siehe Abschnitt 2.2). Dies entspricht einem Anteil von 0,1 % an den schweren Nutzfahrzeugen in Deutschland. Da es aktuell noch keine (Groß-)Serienfertigung gibt und der Bestand vorwiegend aus Umbauten von konventionellen Fahrzeugen besteht, sind die Fahrzeugpreise sehr hoch: der Preis für einen großen BEV-Lkw (≥26 t) liegt nach aktuellen Angaben aus der Praxis im Bereich von ca. 250.000-320.000 € zzgl. Batterie. Bei einer Batteriekapazität von 450 kWh und einem Batteriepreis von 500 €/kWh ist der BEV aktuell noch ca. 4,5-5 mal teurer als ein konventionelles Fahrzeug. Bei kleinen Nutzfahrzeugen ist die Differenz geringer wie bspw. beim IVECO Daily 40 C (SNF 3,5-7,5 t). Hier ist ein BEV mit einer Kapazität von 75 kWh (Quantron, 2020) mit 68.500 € (Electrive, 2019) gut 40 % teurer als das Verbrennermodell mit 48.760 € Listenpreis (IVECO, 2019). Die Preise des IVECO Daily decken sich gut mit den Annahmen für das Jahr 2020 (ICEV Listenpreis: 44.800 €, BEV 75 kWh: 62.800 €), wobei wie bereits beschrieben aktuell der Marktpreis höher ausfällt als durch die rechnerische Methode.

Jedoch sind einige Fahrzeuge bereits angekündigt, sodass die geplanten Serienproduktionen einen enormen Kostensprung gegenüber den aktuellen „Einzelanfertigungen“ bewirken wird. Für das Jahr 2025 wird ausgegangen, dass bereits eine (Klein-)Serienproduktion gestartet sein wird.

Im Zuge des Markthochlaufs von Batterie-Lkw ist davon auszugehen, dass die Preise in Zukunft sinken werden. Die prozentuale Preisentwicklung der BEV (exkl. Batterie) bezogen auf 2025 (entsprechend der oben beschriebenen Berechnungsmethodik) ist in Tabelle 33 gegeben. Die Preisdegression bezieht sich hierbei auf den Neuwagenpreis (exkl. Batterie). Für die Betrachtung werden die oben erwähnten Markthochläufe berücksichtigt. Bei ICEV wird angenommen, dass der Realpreis konstant bleibt.

Tabelle 33: Fahrzeugpreise von ICEV und BEV (exkl. Batterie) für die Jahre 2025 und 2030

Antriebstechnologie	Größenklasse	2025	2030
ICEV	<7,5 t	41.300 €	
	7,5-<12 t	56.000 €	
	12-<18 t	66.300 €	
	18-<26 t	89.500 €	
	≥26 t	103.000 €	
BEV (exkl. Batterie)	<7,5 t	36.900 €	31.400 €
	7,5-<12 t	58.500 €	44.700 €
	12-<18 t	80.400 €	59.300 €
	18-<26 t	104.800 €	77.000 €
	≥26 t	126.900 €	90.200 €
Traktionsbatterie	alle	107 €/kWh	83 €/kWh

A2d Wertverlust

Der Restwert der Fahrzeuge (ICEV und BEV exkl. Traktionsbatterie) wird anhand der angebotenen Fahrzeuge des Portals „truckscout24.de“ abgeleitet. Zum einen fließt die Fahrleistung bis Verkauf in den Restwert mit ein und zum anderen wird auch die Haltedauer berücksichtigt. Angenommen wird ein exponentieller Einfluss der Haltedauer und der Jahresfahrleistung auf den Restwert. Die Koeffizienten der verwendeten Gleichungen werden über die Methode der kleinsten Quadrate anhand der angegebenen Preise des Gebrauchtwagenportals ermittelt. Hieraus ergeben sich folgende Gleichungen pro Größenklasse:

$$RW_{rel} = e^{-\frac{1{,}33 \cdot JFL \cdot HD}{1.000.000}} \cdot e^{-\frac{193 \cdot HD}{10.000}}$$ für SNF <7,5t

$$RW_{rel} = e^{-\frac{2{,}12 \cdot JFL \cdot HD}{1.000.000}} \cdot e^{-\frac{423 \cdot HD}{10.000}}$$ für SNF 7,5-12t

$$RW_{rel} = e^{-\frac{1{,}10 \cdot JFL \cdot HD}{1.000.000}} \cdot e^{-\frac{655 \cdot HD}{10.000}}$$ für SNF 12-18t

$$RW_{rel} = e^{-\frac{1{,}36 \cdot JFL \cdot HD}{1.000.000}} \cdot e^{-\frac{876 \cdot HD}{10.000}}$$ für SNF 18-26t

$$RW_{rel} = e^{-\frac{1{,}62 \cdot JFL \cdot HD}{1.000.000}} \cdot e^{-\frac{354 \cdot HD}{10.000}}$$ für SNF >26t

mit RW_{rel} - Restwert [%]
JFL - Jahresfahrleistung [km]

HD - Haltedauer [a]

Für die Haltedauer wird angenommen, dass ungefähr nach der halben Lebensfahrleistung des Fahrzeugs der Verkauf erfolgt. Die Lebensfahrleistung wird TREMOD 6.1 entnommen. Aus der Hälfte der Lebensfahrleistung dividiert durch die Jahresfahrleistung ergibt sich demnach die Haltedauer. Eingrenzend wird jedoch angenommen, dass das Fahrzeug mindestens vier Jahre und maximal zehn Jahre gehalten wird. Insbesondere für BEV erscheint eine längere Haltedauer aufgrund der schnellen technologischen Entwicklung nicht wahrscheinlich. Der folgenden Tabelle können die angenommene durchschnittliche Lebensfahrleistung und der (rechnerisch resultierende) angenommene Tachostand bei Verkauf entnommen werden.

Tabelle 34: Lebensdauer und Tachostand bei Verkauf

Größenklasse	Lebensfahrleistung [km]	Tachostand bei Verkauf[1] [km]
SNF <7,5t	682.200	341.100
SNF 7,5-12t	715.800	357.900
SNF 12-18t	828.000	414.000
SNF 18-26t	837.000	418.500
SNF >26t	936.200	468.100

[1] Aufgrund der angenommenen oberen und unteren Schranken der Haltedauer kann die Fahrleistung bis Verkauf je nach Relation abweichen.

Eine besondere Bedeutung kommt bei den TCO der Batterie-Lkw den Kosten für die Traktionsbatterie zu. Oben angegeben ist der Batteriepreis, der einen Großteil der Gesamtinvestitionskosten ausmacht[1]. Zusätzlich zu berücksichtigen ist, dass bei Nutzfahrzeugen die Lebensdauer der Batterie von der Lebensdauer des Basisfahrzeugs abweichen kann und die Kosten für mögliche Ersatz-Batterien daher ebenfalls einkalkuliert werden müssen. Die angenommene Lebensdauer für Akkus hat somit einen großen Einfluss auf die TCO. Aus diesem Grund wurde der Kapazitätsverlust durch zyklische und kalendarische Alterung in Abhängigkeit von Nutzungsprofil und Ladeleistung modelliert. Die zyklische Alterung hängt dabei maßgeblich von der C-Rate und dem Energiedurchsatz der Batteriezellen ab. Die C-Rate beschreibt das Verhältnis zwischen Ladeleistung und Batteriekapazität, wobei eine höhere C-Rate mit einer schnelleren zyklischen Alterung einhergeht. Aus diesem Grund altern kleinere Batterien bei sonst gleichbleibenden Bedingungen für Ladeleistung und Gesamt-Energiedurchsatz schneller als größere.[2]

Für den nutzbaren SOC-Bereich[3] wird von 80 % der Bruttokapazität ausgegangen, wobei eine Kapazitätsreserve von 15 % zur Verfügung steht, welche mit fortschreitender Alterung vom Batterie-Management-System (BMS) freigegeben wird. Sinkt die Bruttokapazität durch Alterung innerhalb der Haltedauer unter 80 % des Anfangswertes, wird von einem Batterietausch ausgegangen. Der Restwert einer im Fahrzeug verbauten gebrauchten Batterie wird

[1] Sofern die Batterie gekauft wird. Grundsätzlich ist auch eine Batteriemiete möglich, wird hier aber nicht betrachtet.
[2] Für eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Alterungsmodells siehe Anhang A2f.
[3] State of Charge: Ladezustand in Prozent bezogen auf die Bruttokapazität

analog zum Restwert des Fahrzeuges berechnet, wobei nur die Nutzungsdauer und Fahrleistung der bei Verkauf eingebauten Batterie berücksichtigt wird. Der resultierende relative Restwert wird mit der bei Verkauf verbleibenden Restkapazität und dem Marktpreis neuer Batterien im Verkaufsjahr multipliziert. Für eine getauschte Batterie wird ein Weiterverkauf zu 25 % des Marktpreises angenommen.[1] Eine Einsatzmöglichkeit von gebrauchten Batterien könnte beispielsweise die Nutzung in stationären Speichern sein („Second Life“).

A2e Finanzierungskosten

Da ein Fahrzeugkauf i. d. R. nicht vollständig aus Eigenkapital finanziert wird, ist hierfür zusätzlich ein Kredit aufzunehmen. Die Kreditform wird hier als Annuitätsdarlehen angenommen. Zwar ist ein Leasing neben dem Kauf im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge ebenfalls verbreitet, jedoch wird der Einfachheit halber in der gesamten TCO-Berechnung davon ausgegangen, dass das Fahrzeug käuflich erworben wird. Ein eigener Abgleich der Kosten bei Kauf verglichen mit den Leasingkosten ergab, dass im Durchschnitt keine großen Kostenunterschiede zwischen beiden Formen vorliegen. Da ein Leasing jedoch die Unsicherheit bzgl. des Wertverlusts bei BEV eliminiert, könnte diese Finanzierungsform durchaus eine verbreitete Anwendung in der Initialphase des Markts für Batterie-Lkw darstellen.

Für die Anzahlung (Eigenkapital) wird ein Anteil in Höhe der Umsatzsteuer von 19 % angenommen. Der Kredit ist über eine Laufzeit abzubezahlen, die der Haltedauer entspricht. Die Laufzeit ist dabei auf sieben Jahre gedeckelt (Mercedes-Benz Bank, 2021).

Der Zinssatz ist abhängig von der Laufzeit und der Kredithöhe. Mit Parametern aus (leasinGo, 2021) ist die folgende Gleichung abgeleitet:

$$Z = 4{,}8\% \cdot (1{,}1295 \cdot L^{-0{,}209}) \cdot (4{,}4956 \cdot K^{-0{,}139})$$

mit Z – Zinssatz [%]
K – Kredithöhe [$€_{2020}$]
L – Laufzeit [a]

Diese Gleichung basiert zwar auf den heutigen Gegebenheiten (Konjunktur, Leitzins etc.), jedoch können keine verlässlicheren Abschätzungen für die Zukunft getroffen werden. Zudem wird angenommen, dass die beschriebene Finanzierung für beide Technologien gleichermaßen getätigt wird. Problematisch könnte allerdings die Anzahlung bei BEV (inkl. Batterie) sein, da hier die Fahrzeugpreise deutlich höher ausfallen. Liquiditätsengpässe und hohe Verbindlichkeiten könnten Hemmnisse für eine Investition in BEV sein, auch wenn diese aus TCO-Sicht profitabel sein könnten.

A2f Alterung der Traktionsbatterie

Die Grundlage zur Modellierung der Batteriealterung liefert (De Gennaro et al., 2020), wo verschiedene Modelle für den Kapazitätsverlust durch kalendarische und zyklische Alterung von Lithium-Ionen-Batterien untersucht und angewandt werden. Die dort gezeigten Modelle werden für verschiedene Zellchemien auf der Plattform TEMA[2] des JRC verwendet.

[1] Der maximale Wiederverkaufswert einer Batterie mit 80 Prozent Restkapazität wird in der Literatur mit ca. 50 Prozent des Neupreises zum Verkaufszeitpunkt angegeben (FfE / TUM, 2016).
[2] Transport tEchnology and Mobility Assessment (De Gennaro et al., 2016)

Das hier verwendete Modell geht auf Messungen an einzelnen Batteriezellen (NCM + Spinell Mn) in (Wang et al., 2014) zurück. Die so ermittelten semi-empirischen Gleichungen für den kalendarischen bzw. zyklischen Kapazitätsverlust $Q_{\text{Loss.kal}}$ bzw. $Q_{\text{Loss.zyk}}$ sind in Abhängigkeit der Ruhetemperatur T_{Ruhe} und der Ruhezeit[1] t_{Ruhe} bzw. der Betriebstemperatur T_{Betrieb}, der *C-Rate* und dem Durchsatz *Ah* angegeben. Die *C-Rate* gibt das Verhältnis zwischen Strom (Einheit: Ampere) und Zellkapazität (Einheit: Ah) bzw. zwischen Ladeleistung (Einheit: kW) und Energieinhalt (Einheit: kWh) an. Die beiden Gleichungen lauten

$$Q_{\text{Loss.kal}} = A \cdot e^{-\left(\frac{E_{\text{a}}}{RT_{\text{Ruhe}}}\right)} \cdot \sqrt{t_{\text{Ruhe}}}$$

$$Q_{\text{Loss.zyk}} = \left(a \cdot T_{Betrieb}^2 + b \cdot T_{Betrieb} + c\right) \cdot e^{\left((d \cdot T_{Betrieb} + e) \cdot C-Rate\right)} \cdot Ah$$

und beschreiben den Kapazitätsverlust in % relativ zur Anfangskapazität[2].

Tabelle 35 zeigt die verwendeten Parameter zusammen mit den entsprechenden Einheiten.

Tabelle 35: Parameter und Einheiten für Batteriealterung

$Q_{\text{Loss.kal}}$			$Q_{\text{Loss.zyk}}$		
Parameter	**Wert**	**Einheit**	**Parameter**	**Wert**	**Einheit**
A	14.786	$\frac{1}{\sqrt{Tag}}$	a	$8{,}6772 \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{\text{Ah} \cdot \text{K}^2}$
E_{a}	24.500	$\frac{\text{J}}{\text{mol}}$	b	$-5{,}1613 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{\text{Ah} \cdot \text{K}}$
R	8,314	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$	c	$7{,}6788 \cdot 10^{-1}$	$\frac{1}{\text{Ah}}$
T_{Ruhe}	283,453	K	d	$-6{,}7 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\text{h}}{\text{K}}$
t_{Ruhe}		Tag	e	2,35	h
			$T_{Betrieb}$		K
			C-Rate		$\frac{1}{\text{h}}$
			Ah		Ah

Für die Betriebstemperatur $T_{Betrieb}$ wird in Abhängigkeit der C-Rate eine optimale Temperatur durch Lösen von $\min Q_{\text{Loss.zyk}}(T_{Betrieb})$ angenommen. Diese liegt je nach C-Rate zwischen 24 und 25 °C. Diese Annahme soll eine Temperaturoptimierung durch das BMS nachbilden.

[1] Ruhetemperatur- und Ruhezeit beziehen sich hier auf den Zeitabschnitt, in dem eine Zelle weder ent- noch geladen wird.
[2] *e* mit Exponent beschreibt hier die Exponentialfunktion während *e* alleinstehend der Konstante aus Tabelle 35 entspricht.
[3] Durchschnittliche Außentemperatur in Deutschland 2019: 10,3 °C (UBA, 2021)

Um die Betriebsparameter von Batteriesystemebene auf Zellenebene, für die die Gleichungen gelten, zu beziehen, wird eine Batteriearchitektur angenommen, wie sie in (Biehl et al., 2020) für eine Sattelzugmaschine umgesetzt wurde: Eine 100 kWh-Batterie aus NMC-Zellen (zylindrisch, Formfaktor: 18650), mit jeweils 3 Ah Kapazität und 3,6 V Nominalspannung. Diese sind in 42 Modulen mit je 240 Zellen verschaltet, wobei jedes Modul 12 Zellen in Serie in 20 parallelen Strängen besitzt (12s20p). Für eine Batterienennspannung von 605 V müssen demnach 168 Zellen in Reihe geschaltet werden, was 14 Modulen in Reihe in drei parallelen Strängen entspricht (168s60p).

Diese 100 kWh-Batterie wird für die hier modellierten Batteriegrößen als Basis genommen. Für größere bzw. kleinere Batterien werden parallele Stränge hinzugefügt bzw. weggenommen, um die entsprechende Kapazität zu erreichen.

Für die C-Rate wird die durch Ladeleistung und Batteriearchitektur gegebene Stromstärke durch eine Zelle verwendet. Als Ladeleistung wird als konservative Abschätzung die mit der entnommenen Energie gewichtete maximale Ladeleistung verwendet. Demnach wird hier die C-Rate als maximale C-Rate während des Ladens verstanden. Der Ladungsdurchsatz Ah ergibt sich aus der geladenen Energiemenge.Für den Kapazitätsverlust auf Systemebene wird analog zu (De Gennaro et al., 2020) angenommen, dass alle Zellen gleichmäßig altern. Außerdem wird eine Kapazitätsreserve von 15 % angenommen, die vom BMS sukzessive freigeschaltet wird und bis dahin als nicht nutzbare Kapazität (20 % der Bruttokapazität im Neuzustand) besteht. Damit ergibt sich für den Kapazitätsverlust der gesamten Batterie

$$Q_{\text{Loss.Batterie}} = Q_{\text{Loss.Zelle}} - \text{Reserve}$$

$$\text{mit } Q_{\text{Loss.Zelle}} = Q_{\text{Loss.kal}} + Q_{\text{Loss.zyk}}$$

A2g Antriebsunabhängige Kosten

Fahrer/Fahrerin

Für den Fahrer wird ein Stundenlohn von 17 € angesetzt (Jöhrens et al., 2020). Diese kann über übliche Durchschnittsgeschwindigkeiten pro Straßenkategorie auf die Fahrleistung bezogen werden. Fahrleistungsspezifisch ergeben sich Kosten für den Fahrer in Höhe von 42,5 ct/km innerorts, 28,3 ct/km außerorts und 21,3 ct/km auf der Autobahn. Der Fahrerlohn unterscheidet sich zwischen beiden Antriebstechnologien nicht.

Anhänger und Auflieger

Für Anhänger und Auflieger fallen Kosten für die Anschaffung (bzw. Wertverlust), Steuer, Versicherung, Instandhaltung sowie HU und SP an. Es wird angenommen, dass sich die Kosten nicht zwischen den Antriebstechnologien unterscheiden. Für die Zeitkostenrechnung (Abschnitt 3.4.4) werden lediglich die variablen Betriebskosten benötigt. Aus (Wittenbrink, 2014) ergeben sich die Preise für unterschiedliche Anhänger und Auflieger und die durchschnittliche Jahresfahrleistung und Nutzungsdauer. Anhand einer eigenen Analyse aus diesen Werten und Daten aus www.truckscout24.de ergibt sich ein durchschnittlicher Marktpreis für Anhänger und Auflieger von 47.400 €. Wenn für das Ende der Nutzungsdauer (1,56 Mio. km) kein Restwert angenommen wird, dann entspricht dies einem Wertverlust von

3,0 ct/km. Die Kosten für die Instandhaltung werden mit 0,92 ct/km angenommen (Logistra.de, 2015). Die Fixkosten setzen sich aus Steuer, Versicherung und Untersuchung zusammen. Die Versicherung ergibt sich aus (Wittenbrink, 2014) und die Steuer aus (Bussgeldkatalog.net, 2021b). Beide Kostenpunkte zusammen ergeben einen Wert von 1.084 € pro Jahr. Dazu kommen noch die HU und SP mit 127 €/a (TÜV Süd, 2021). Die Kosten für Anhänger und Auflieger werden zu 94 % den Kosten für SNF ≥26 t angerechnet, da in der Größenklasse auch Fahrleistung von Fahrzeugen ohne Anhänger/ Auflieger erbracht wird. Dies entspricht dem Anteil von Fahrzeugen mit Anhänger bzw. Auflieger an der Fahrleistung aller SNF ≥26 t nach TREMOD 6.1. Insgesamt entstehen somit bei der Größenklasse ≥26 t zusätzliche Kosten für den Anhänger/ Auflieger von 3,73 ct/km zzgl. 1.142 €/a.

Fuhrparkverwaltung und Unterstellung

Die Fuhrparkverwaltungskosten und die Unterstellung sind durch (Lastauto Omnibus, 2014) gegeben. Die folgende Tabelle zeigt die Kostenpunkte pro Größenklasse.

Tabelle 36: Kosten für Fuhrparkverwaltung und Unterstellung in €/a

Größenklasse	Fuhrparkverwaltung	Unterstellung
SNF <7,5 t	7.286	874
SNF 7,5-<12 t	8.272	1.118
SNF 12-<18 t	8.272	1.118
SNF 18-<26 t	8.272	1.118
SNF ≥26 t	8.272	1.118

Quellen: (Lastauto Omnibus, 2014)

A3 Technologiepotential nach Tagesfahrweite

Nachfolgend sind für die in den Abschnitten 4.2 und 4.3 betrachteten Szenarien die Potentiale der verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen zusätzlich nach Tagesfahrweite aufgeschlüsselt.

Szenario 2025

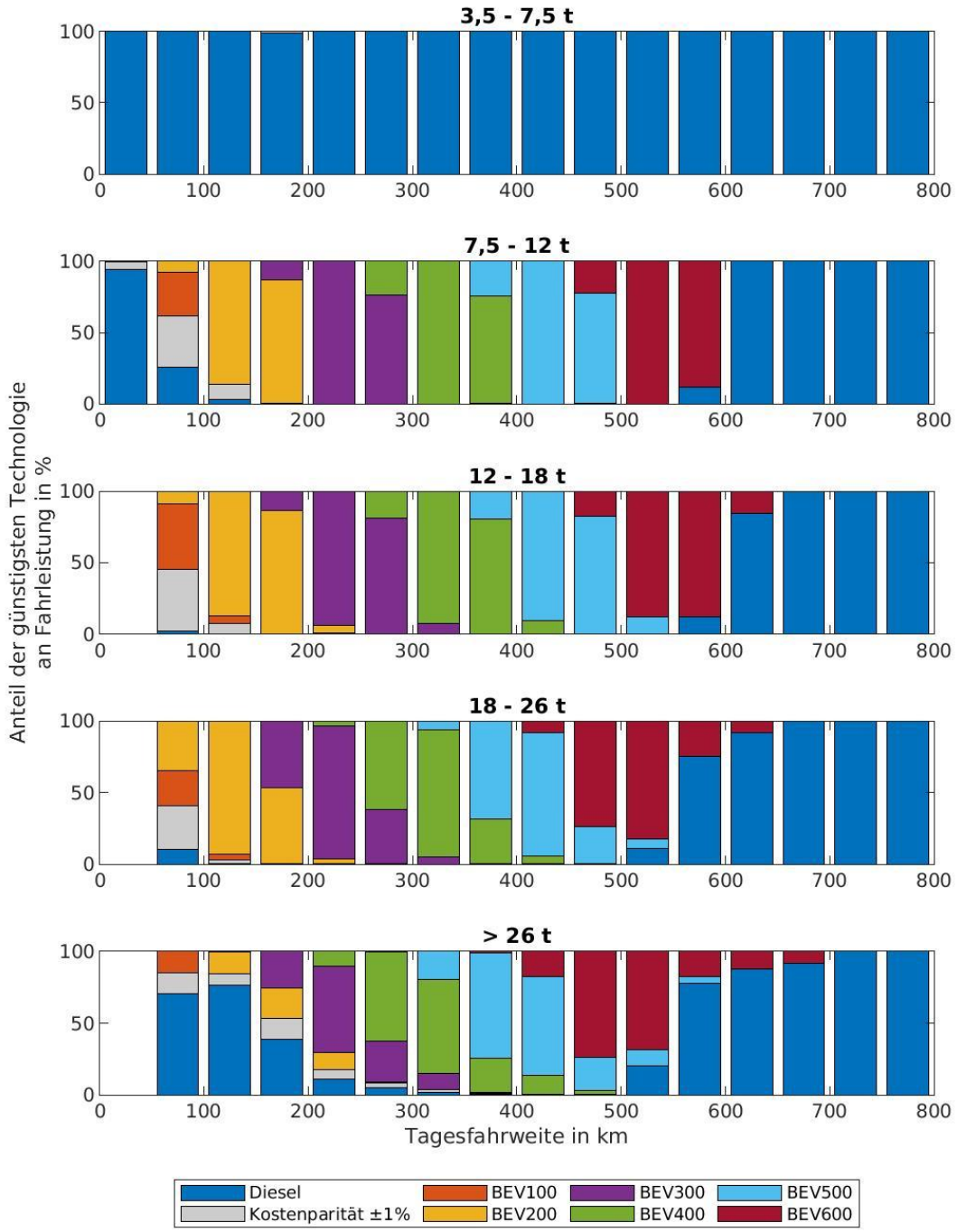


Abbildung 62: Anteil der wirtschaftlichsten Antriebsarten für verschiedene Tagesfahrweiten je Größenklasse im Jahr 2025 (Modellrechnung)

Szenario 2030 – Fall A (nur Depotladen)

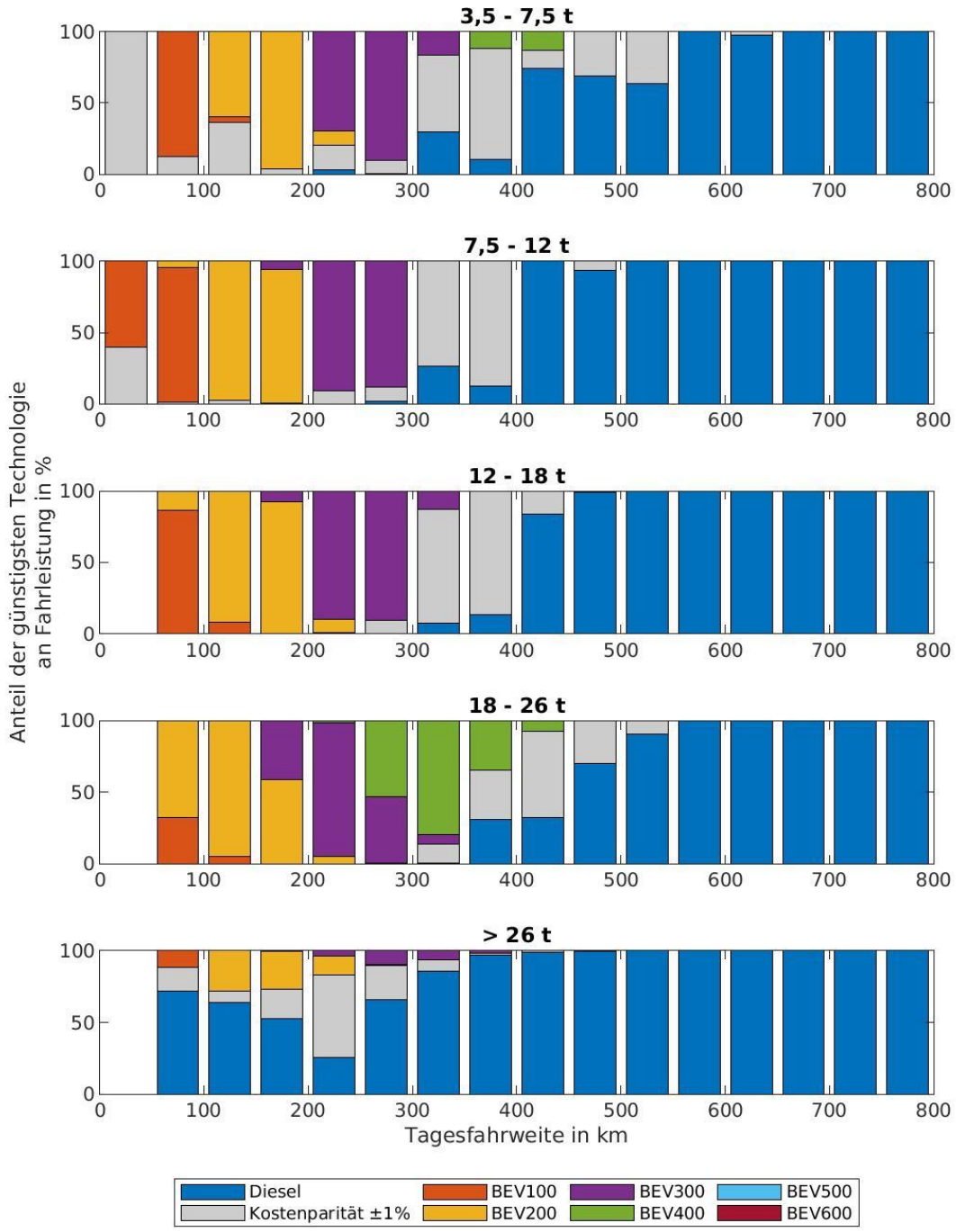


Abbildung 63: Anteil der wirtschaftlichsten Antriebsarten für verschiedene Tagesfahrweiten je Größenklasse im Jahr 2030 ohne Zwischenladen (Modellrechnung)

Szenario 2030 – Fall B (mit Zwischenladen)

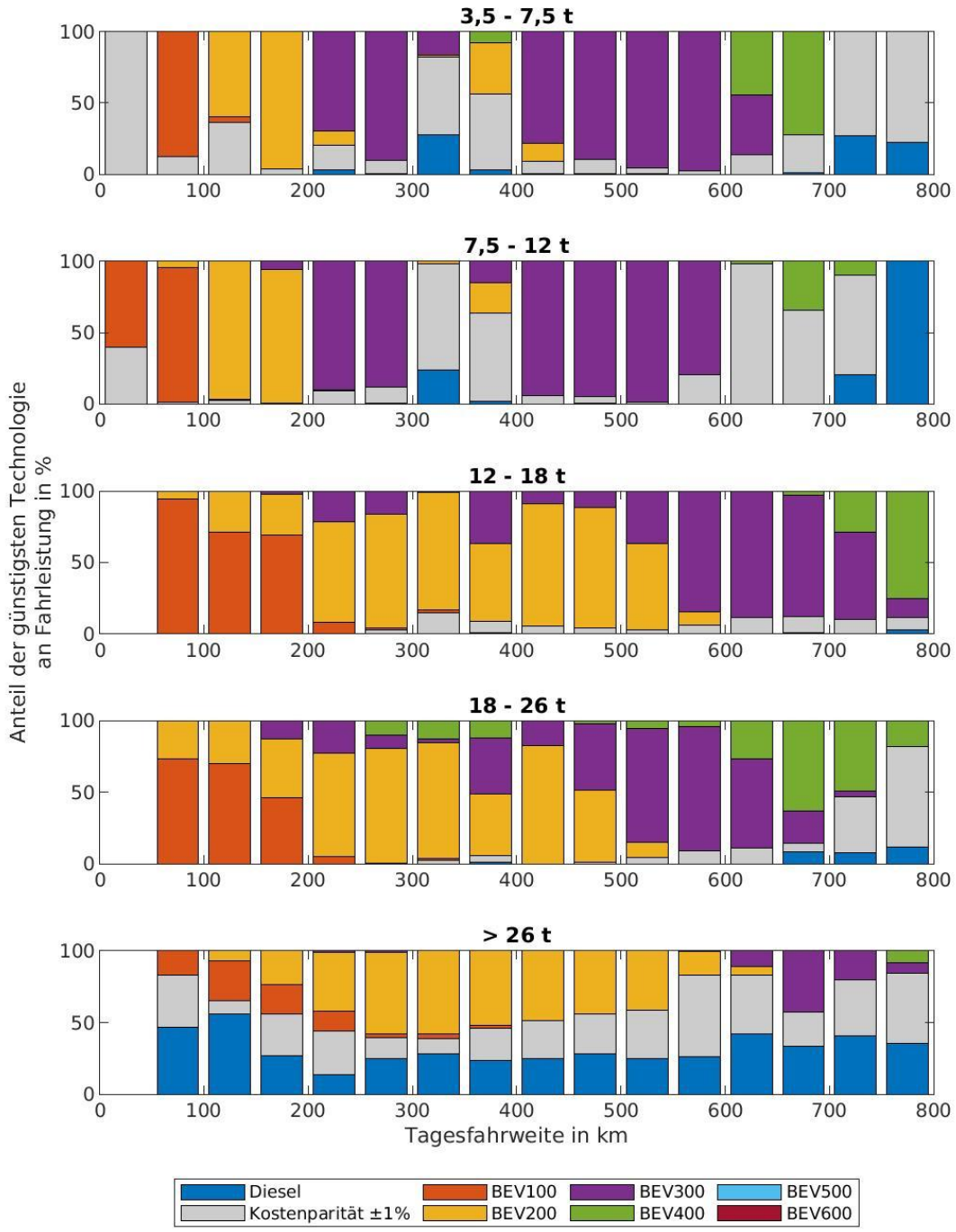


Abbildung 64: Anteil der wirtschaftlichsten Antriebsarten für verschiedene Tagesfahrweiten je Größenklasse im Jahr 2030 mit Zwischenladen (Modellrechnung)

A4 Teilmärkte der Logistik

Im Folgenden findet sich eine detailliertere Ausführung der Logistiksegmente, welche für den Einsatz von Batterie-Lkw eine besondere Relevanz aufweisen, inklusive einer Auflistung der jeweils wichtigsten Akteure bzw. Flottenbetreiber. Im Anschluss der detaillierten Beschreibungen folgen kurze Erläuterungen zum Ausschluss der nicht relevanten (und daher nicht näher betrachteten) Logistiksegmente.

Nachfolgendes Diagramm (Abbildung 65) zeigt die Umsatzanteile aller Logistiksegmente an dem Umsatz der Gesamtlogistik. Die betrachteten Logistiksegmente (in Blautönen) decken knapp 2/3 des Gesamtlogistikumsatzes ab.

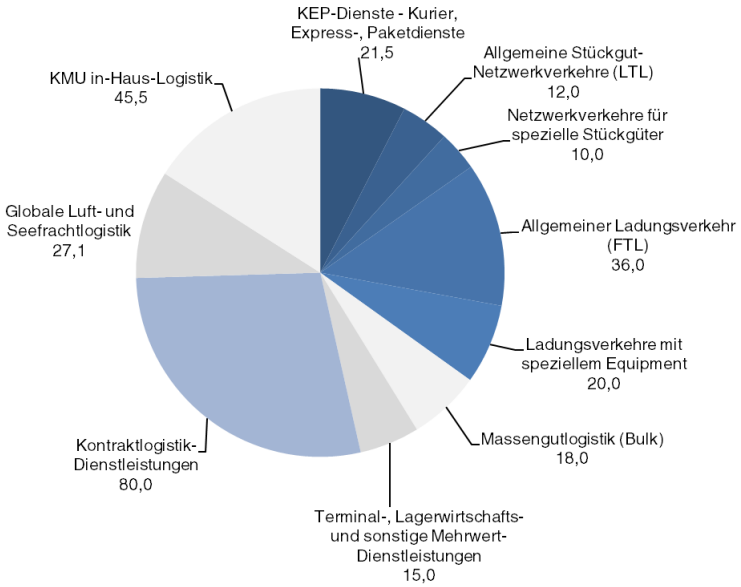


Abbildung 65: Umsatzanteile der Logistiksegmente, Angaben in Mrd. € (Quelle: Fraunhofer SCS)

KEP-Logistik

Die KEP-Logistik umfasst Kurier-, Express- und Paketdienste mit einem regulären Sendungsgewicht von weniger als 32 kg. Das Nachfragevolumen des Segmentes der KEP-Logistik (Kurier-, Express- und Paketdienste) beträgt 21,5 Mrd. € jährlich, dies entspricht einem Anteil am Gesamtlogistikumsatz von 8 %. In der KEP-Logistik arbeiten rund 300 Tsd. Beschäftigte (Vollzeitbasis) und ca. 125 Tsd. Zustellfahrzeuge sind im Einsatz. Das Segment fasst ca. 15.000 Unternehmen, wovon 25 Unternehmen einen Jahresumsatz von über 20 Mio. € aufweisen.

KEP-Dienste - Kurier, Express-, Paketdienste	Mrd. €		
Umsatzwert Logistik Deutschland gesamt	285,0		
Logistikkosten des Segments	21,5	**Anteil des Segments an den Gesamtlogistikkosten**	**8%**
An Logistikdienstleister vergeben	20,4	Outsourcingquote	95%
Umsatz der TOP10	16,2	Anteil der TOP10 an den Logistikkosten des Segments	75%
		Anteil der TOP10 am fremdvergebenen Anteil	79%

Abbildung 66: Kennzahlen der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Akteure/Flottenbetreiber des Segmentes der KEP-Logistik. Betrachtet werden rechtlich eigenständige Unternehmen. Knapp über 16 Mrd. € Umsatz werden von den 10 wichtigsten Akteuren in diesem Segment umgesetzt, dies entspricht ca. 75 % der Gesamtumsätze der KEP-Dienste in Deutschland. Es herrscht hier also eine relativ starke Marktkonzentration vor. Der mit Abstand größte Akteur ist die Deutsche Post DHL Group.

Rang	Unternehmen	KEP-Dienste - Kurier-, Express-, Paketdienste (in Mio. €)	Anteil an gesamtem Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Prozent)	Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Mio. €)	Kommentar
1	Deutsche Post DHL (Group)	7.600	73	10.360	x2C/x2B, Paket und Express
2	United Parcel Service Deutschland Inc. & Co. OHG (UPS)	2.070	100	2.070	B2B, Paket und Express
3	DPD Deutschland GmbH	1.940	100	1.940	B2B, Paketdienst
4	Hermes Europe GmbH	1.700	83	2.040	B2C, Paket
5	General Logistics Systems Germany GmbH&Co.OHG (GLS)	1.010	100	1.010	B2B, Paketdienst
6	FedEx Express International B.V. (NL)	750	100	750	B2B, Express
7	trans-o-flex Express GmbH	495	100	495	B2B, Express u. Pharma
8	GO! Express & Logistics (Deutschland) GmbH (Kooperation)	257	100	257	Kooperation, Express
9	Innight Express Germany GmbH	193	100	193	B2B, Express
10	Profex Couriersystem GmbH (Kooperation)	140	100	140	Kooperation, B2B, Express
	Summe TOP 10	**16.155**		**19.255**	
	Umsatzanteil KEP an Gesamtumsatz (Ø)		**96**		

Abbildung 67: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Besonders Branchen, deren Güter eher vergleichsweise kleine Maße und Gewichte aufweisen, gehören zu den Hauptnachfragern. Die größten Nachfragebranchen mit einem gemeinsamen Anteil von knapp über 50% sind Kleinbetriebe und die Lebensmittelbranche.

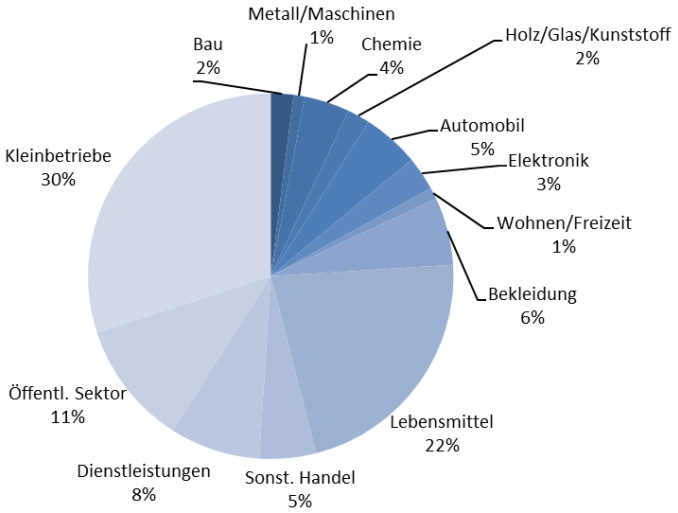


Abbildung 68: Nachfragebranchen der KEP-Logistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Stückgutverkehre

Stückgutverkehre sind i.d.R. Sammeltransporte von individuell etikettierten Trocken- und Stapelgütern ohne besondere Behandlungsanforderungen im Gewichtsbereich oberhalb von ca. 31 kg bis zu ca. 2.500 kg, welche auf dem Landweg transportiert werden. Typische Güterarten der Stückgutverkehre sind Sammelgüter, aber beispielweise auch einzelne palettierte Maschinen. Das Nachfragevolumen der verladenden Wirtschaft in diesem Segment liegt mit 22 Mrd.€ bei einem Anteil von 7,7% des Gesamtlogistikumsatzes. Im Bereich der Stückgutverkehre sind etwa 148 Tsd. Beschäftigte (Vollzeitbasis) tätig und rund 95 Tsd. Fahrzeuge im Einsatz, wovon ca. 46 Tsd. Verteilerfahrzeuge sind. Das gesamte Segment umfasst 500 Unternehmen und zusätzlich 8.500 Subunternehmer.

Tabelle 37: Umsatzanteil der Stückgutverkehre (LTL = Less than Truck Load) (Quelle: Fraunhofer SCS)

Stückgutverkehre (LTL)	Mrd. €		
Umsatzwert Logistik Deutschland gesamt	285,0		
Logistikkosten des Segments	22,0	Anteil des Segments an den Gesamtlogistikkosten	7,7 %
An Logistikdienstleister vergeben	18,9	Outsourcingquote	86%
Umsatz der TOP10	7,8	Anteil der TOP10 an den Logistikkosten des Segments	35%
		Anteil der TOP10 am fremdvergebenen Anteil	41%

Bei den nachfolgenden Ranglisten werden die wichtigsten (rechtlich eigenständigen) Unternehmen/ Flottenbetreiber abgebildet. Tochtergesellschaften oder Kooperationen werden ohne Rangfolgezahl aufgeführt, da die aufgeführten Umsätze bereits in den Umsätzen ihrer Mutter- /Partnergesellschaften enthalten sind. Die Ranglisten teilen sich auf in die Bereiche des allgemeinen und des speziellen Stückgutverkehrs. Diese Perspektive bietet sich gerade bei den Flottenbetreibern an, da einige der wichtigsten Unternehmen im allgemeinen oder speziellen Stückgutverkehr spezialisiert sind.

Rang	Unternehmen	Allgemeine Stückgut-Netzwerkverkehre (LTL) (in Mio. €)	Anteil an gesamtem Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Prozent)	Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Mio. €)	Kommentar
1	Dachser SE	1.535	43	3.583	Forwarder mit eigenen Assets
2	IDS Logistik GmbH (Kooperation)	1.500	100	1.500	Kooperation
3	CargoLine GmbH & Co. KG (Kooperation)	1.170	80	1.460	Kooperation
4	Deutsche Bahn AG	920	12	7.473	Forwarder, teils eigene Assets
	DB Schenker (Geschäftsfeld der DB AG)	*920*	*22*	*4.113*	*Teil der DB AG*
5	System Alliance GmbH (Kooperation)	635	100	635	Kooperation
6	Deutsche Post DHL (Group)	630	6	10.360	Forwarder, teils eigene Assets
	DSV Deutschland (Teil der IDS)	*454*	*32*	*1.423*	*Forwarder*
7	24plus Systemverkehre GmbH & Co. KG (Kooperation)	453	100	453	Kooperation
	Hans →Geis GmbH + Co. KG (Teil der IDS)	*333*	*50*	*663*	*Forwarder mit eigenen Assets*
8	Raben Trans European Germany GmbH	325	88	370	*Neupostion m. LTL-Netzwerk seit 2018*
	C.E. →Noerpel GmbH (Teil der IDS)	*317*	*78*	*405*	*Forwarder*
	Kuehne + Nagel (AG & Co.) KG (Teil der IDS)	*308*	*10*	*3.178*	*Forwarder*
	Hellmann Worldwide (Teil der Syst. All/SAE)	*298*	*34*	*879*	*Forw./ wichtigster Partner Syst. All.*
9	Online Systemlogistik GmbH & Co. KG (Kooperation)	250	55	1.300	Kooperation
10	Emons Holding GmbH & Co. KG (Emons Gruppe)	248	54	463	Forwarder mit eigenen Assets
	Summe TOP 10	**7.666**		**27.597**	
	Umsatzanteil LTL an Gesamtumsatz (Ø)		**64**		

Abbildung 69: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der allgemeinen Stückgutverkehre (Quelle Fraunhofer SCS)

Rang	Unternehmen	Netzwerkverkehre für spezielle Stückgüter (in Mio. €)	Anteil an gesamtem Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Prozent)	Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Mio. €)	Kommentar
1	Rhenus SE & Co. KG	305	12	2.470	High-Tech-, Neumöbel.Distribution
2	UTS Umzugs- und Transportsysteme GmbH & Co. KG (Kooperation)	300	100	300	Kooperation, Möbel
3	Prosegur Cash Services Germany GmbH	242	100	242	Sicherheits-/Geldtransporte
4	Confern Möbeltransportbetriebe GmbH (Kooperation)	205	100	205	Kooperation, Möbel
5	Meyer & Meyer Holding SE & Co. KG	185	84	220	Hängende Kleider
6	Transmed Transport GmbH	155	100	155	Pharma, Ersatzteile, Automobil
7	DMS Deutsche Möbelspedition GmbH & Co. KG (Kooperation)	145	64	225	Kooperation, Möbel
8	GEL Express Logistik GmbH (Kooperation)	130	111	117	Koop., div. handlingsbed. Güter, B2C
9	Logwin AG (LU)	120	24	495	Hängende Kleider
10	Hansetrans Holding GmbH	100	60	167	diverse handlingsbed. Güter
	Summe TOP 10	**1.887**		**4.596**	
11	DTL Deutsche Textil Logistik GmbH (Kooperation)	50	100	50	Meyer & Meyer und Barth+Co.
12	Deutsche Bahn AG	30	0	7.473	diverse handlingsbed. Güter
	DB Schenker (Geschäftsfeld der DB AG)	*30*	*1*	*4.113*	*Teil der DB AG*
13	Huettemann Logistik GmbH	25	31	80	Konsumgüter
14	Offergeld Logistik Gruppe	24	16	154	verschiedene Branchenlösungen
15	Simon Hegele Holding GmbH	22	10	211	insb. High-Tech-Güter
	Summe TOP 15	**2.038**		**12.564**	
	Umsatzanteil Netzwerkverk. spez. LTL an Gesamtumsatz (Ø)		**61**		

Abbildung 70: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der speziellen Stückgutverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Mit 9,6 von 22 Mrd. € (jeweils die TOP 10 beider Bereiche) können wir 43,6% des Segmentes erfassen. Die Nachfragebranchen der Stückgutverkehre sind breit gefächert, es besteht eine diversifizierte Nachfrage aus nahezu allen Branchen.

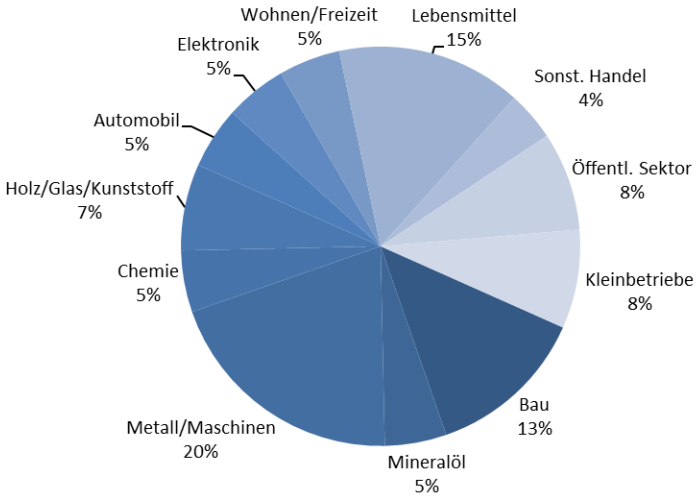


Abbildung 71: Nachfragebranchen der Stückgutverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Ladungsverkehre

- Der Umsatz/ bzw. das Nachfragevolumen der Ladungsverkehre liegt bei 56 Mrd. €, der Anteil dieses Segmentes am Gesamtlogistikumsatz liegt bei 19,6 %. Rund 415 Tsd. Beschäftigte (Vollzeitbasis) sind im Segment tätig. Ca. 517 Tsd. Fahrzeuge sind für Ladungsverkehre im Einsatz, davon zählen etwa 75 Tsd. als schwere Lkw. Insgesamt sind rund 6.500 Unternehmen in diesem Segment aktiv.

Tabelle 38: Umsatzanteil der Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Ladungsverkehre (FTL)	Mrd. €		
Umsatzwert Logistik Deutschland gesamt	285,0		
Logistikkosten des Segments	56,0	Anteil des Segments an den Gesamtlogistikkosten	19,6 %
An Logistikdienstleister vergeben	37,0	Outsourcingquote	66%
Umsatz der TOP10	5,7	Anteil der TOP10 an den Logistikkosten des Segments	10%
		Anteil der TOP10 am fremdvergebenen Anteil	15%

In diesem Segment werden die wichtigsten Akteure separat nach allgemeinen und speziellen Ladungsverkehren betrachtet. Diese getrennte Perspektive schafft einen detaillierteren Überblick, da die Unternehmen zum Teil in beiden oder zum Teil in nur einem Bereich aktiv sind. In den folgenden Ranglisten werden die wichtigsten (rechtlich eigenständigen) Akteure abgebildet. Tochtergesellschaften oder Kooperationen werden ohne Rangzahl aufgeführt, da die aufgeführten Umsätze bereits in den Umsätzen ihrer Mutter- /Partnergesellschaften enthalten sind. Die 15 wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der allgemeinen Ladungsverkehre sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

Rang	Unternehmen	Allgemeiner Ladungsverkehr (FTL) (in Mio. €)	Anteil an gesamtem Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Prozent)	Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Mio. €)	Kommentar
1	Deutsche Bahn AG	2.420	32	7.473	Forwarder, eigene Assets
	DB Cargo (Geschäftsfeld der DB AG)	*1.250*	*37*	*3.360*	*Teil der DB AB. Schiene*
	DB Schenker (Geschäftsfeld der DB AG)	*1.170*	*28*	*4.113*	*Teil der DB AG, primär Forwarder*
	Kombiverkehr GmbH & Co. KG (Kooperation)	*411*	*100*	*411*	*Koop., primär mit eigenen Assets*
2	Dachser SE	400	11	3.583	primär als Forwarder
3	LKW Walter Internationale Transportorg. AG (AT)	394	100	394	primär als Forwarder
4	Hamburger Hafen und Logistik AG (→HHLA)	320	34	945	primär als Forwarder
5	Deutsche Post DHL (Group)	300	3	10.360	primär als Forwarder
	E.L.V.I.S. AG (Kooperation)	*250*	*28*	*1.945*	*Ums. Koop-Partn. 1,9 Mrd. €*
	TFG Transfracht GmbH	*246*	*100*	*246*	*Teil der DB Cargo*
6	Duvenbeck Holding GmbH	245	56	440	primär mit eigenen Assets
7	DSV Deutschland	232	16	1.423	primär als Forwarder
8	Kuehne + Nagel (AG & Co.) KG	207	7	3.178	primär als Forwarder
9	Rail Cargo Group (Geschäftsbereich der ÖBB) (AT)	185	14	1.316	Schwerp. Schiene
10	Neufra Speditions-Gesellschaft mbH	163	99	165	primär Forwarder, Linienverkehre
	Summe TOP 10	**4.866**		**29.277**	
11	Captrain Deutschland GmbH	158	43	368	Schwerp. Schiene
12	L.I.T. AG	150	55	273	primär mit eigenen Assets
13	Schnellecke Group AG & Co. KG	145	30	485	primär als Forwarder
	CargoLine GmbH & Co. KG (Kooperation)	*143*	*10*	*1.460*	*Ums. Koop-Partn. 1,5 Mrd. €*
14	Finsterwalder Transport & Logistik GmbH	136	70	195	primär als Forwarder
15	Hellmann Worldwide Logistics SE & Co. KG	133	15	879	primär als Forwarder
	Summe TOP 15	**5.588**		**31.477**	
	Umsatzanteil FTL an Gesamtumsatz (Ø)		**39**		

Abbildung 72: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der allgemeinen Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Die 10 wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der speziellen Ladungsverkehre sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet. Bei Betrachtung der wichtigsten Flottenbetreiber, welche einen Umsatzanteil von 7,4 Mrd.€ (jeweils TOP 10 beider Bereiche) von insgesamt 56 Mrd. € aller Ladungsverkehre einnehmen, können wir 13,2% dieses Segmentes erfassen.

Rang	Unternehmen	Umsatz Ladungsverkehre mit speziellem Equipment (in Mio. €)	Spezielle Ladungsverkehre, Krandienste für schwere Güter (in Mio. €)	Spezielle Ladungsverkehre für Flüssig- und Schüttgüter (Tank u. Silo) (in Mio. €)	Ladungsverkehre mit sonstigem speziellen Equipment (in Mio. €)	Anteil an gesamtem Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland (in Prozent)	Umsatz (Deutschland)	Kommentar
1	Deutsche Bahn AG	**630**	30	200	400	51	**7.473**	stark diversifiziert
	DB Schenker (Geschäftsfeld der DB AG)	***30***	*30*			*52*	***4.113***	*Teil der DB AG*
	DB Cargo Deutschland AG (Geschäftsfeld der DB AG)	***600***		*200*	*400*	*19*	***3.360***	*Teil der DB AG*
2	Bertschi AG (CH)	**270**		270		86	**315**	Tank u. Silo
3	BLG Logistics Group AG & CO. KG	**264**			264	24	**1.107**	primär als Forwarder
4	ARS Altmann AG Automobillogistik	**250**			250	84	**299**	Automobillogistik
5	Hoyer GmbH Internationale Fachspedition	**242**		242		70	**345**	Tank u. Silo
6	Karl →Schmidt Spedition GmbH & Co. KG	**213**		213		82	**260**	Tank u. Silo
7	Mosolf SE & Co. KG	**210**			210	57	**370**	Automobillogistik
8	Alfred Talke Logistic Services (TALKE Gruppe)	**160**		160		76	**210**	Tank u. Silo
9	Universal Transport Gruppe	**151**	146	5		99	**152**	mit eigenen Assets
10	Captrain Deutschland GmbH (DE)	**140**		140		38	**368**	Tank u. Silo
	Summe TOP 10	**2.530**	**200**	**1.230**	**860**		**10.899**	
	Umsatzanteil Ladungsverkehre mit speziellem Equipment an Gesamtumsatz der Unternehmen (Ø)					**67**		

Abbildung 73: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der speziellen Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Im Segment der Ladungsverkehre besteht eine diversifizierte Nachfrage aus nahezu allen Branchen. Branchen, deren Güter entweder großvolumig und schwer oder keinen gemeinsamen Transport mit anderen Gütern (Lebensmittel, Mineralöl, etc.) zulassen, gehören den größten Nachfragegruppen an.

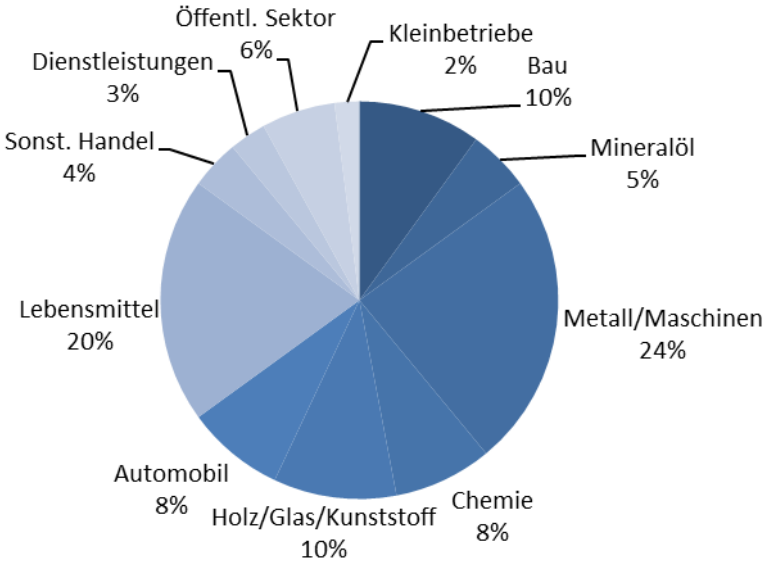


Abbildung 74: Nachfragebranchen der allgemeinen Ladungsverkehre (Quelle: Fraunhofer SCS)

Kontraktlogistik

Die Kontraktlogistik umfasst sämtliche fest vertraglich vereinbarte langfristige Logistikdienstleistungen, wie etwa die Produktions-, und Ersatzteilversorgung in der Industrie oder der Distributionslogistik im Handel. Das Segment der Kontraktlogistik kann in zwei grundlegende Bereiche unterteilt werden, zum einen in die industrielle Kontraktlogistik und zum anderen in die Konsumgüterdistribution/ -kontraktlogistik. Insgesamt umfasst die

Kontraktlogistik rund 1.200 Tsd. Beschäftigte (Vollzeitbasis) und 190 Tsd. Fahrzeuge. In diesem Segment sind etwa 500 Logistikdienstleistungsunternehmen tätig, wovon 150 einen Jahresumsatz von mehr als 20 Mio. € aufweisen. Der Umsatz/ das Nachfragevolumen dieses Segmentes beträgt 80 Mrd. € und nimmt einen Anteil von etwa 28% des Gesamtlogistikumsatzes ein.

Kontraktlogistik-Dienstleistungen	**Mrd. €**		
Umsatzwert Logistik Deutschland gesamt	285,0		
Logistikkosten des Segments	80,0	**Anteil des Segments an den Gesamtlogistikkosten**	**28%**
An Logistikdienstleister vergeben	25,6	Outsourcingquote	32%
Umsatz der TOP10	7,4	Anteil der TOP10 an den Logistikkosten des Segments	9%
		Anteil der TOP10 am fremdvergebenen Anteil	29%

Abbildung 75: Kennzahlen der Kontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Mit 7,4 Mrd. € von 80 Mrd. € umfassen die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber einen Anteil am Segmentumsatz von 9%. Nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Akteure der Kontraktlogistik. Betrachtet werden rechtlich eigenständige Unternehmen. Tochterunternehmen oder Partnerunternehmen erhalten keine eigene Rangfolgezahl, da deren Umsätze bereits in den Umsätzen der Mutter-/ Partnerunternehmen enthalten sind.

Rang	***Unternehmen***	**Kontraktlogistik-Dienstleistungen** (in Mio. €)	**Konsumgüterdistribution und -kontraktlogistik** (in Mio. €)	**Industrielle Kontraktlogistik** (in Mio. €)	**Anteil an gesamtem Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland** (in Prozent)	**Logistikumsatz des Unternehmens in Deutschland** (in Mio. €)	**Kommentar**
	Volkswagen Konzernlogistik GmbH & Co. OHG	*2.370*		*2.370*	*100*	*2.370*	*hauptsächlich Konzern, o. Rang*
1	Nagel-Group SE & Co. KG	1.400	1.400		100	1.400	Kühltransporte Straße, eig. Assets
2	Fiege Logistik Holding Stiftung & Co. KG	939	675	264	91	1.035	langlebige Konsumgüter
3	Dachser SE	816	816		23	3.583	Lebensmittel u.a. FMCG
4	Deutsche Post DHL (Group)	760	510	250	7	10.360	diverse Branchen
5	Arvato	740	555	185	100	740	diverse Branchen
6	Rhenus SE & Co. KG	670	670		27	2.470	langlebige Konsumgüter
7	Deutsche Bahn	640	180	460	9	7.473	diverse Branchen
8	Kuehne + Nagel (AG & Co.) KG	515	378	137	16	3.178	langlebige Konsumgüter
9	BLG Logistics Group AG & CO. KG	487	252	235	44	1.107	diverse Branchen
	DB Schenker (Geschäftsfeld der DB AG)	*480*	*180*	*300*	*12*	*4.113*	*Teil der DB AG*
	Metro LogisticsGermany GmbH	*453*	*453*		*100*	*453*	*Organisation d. METRO Logistik*
10	LGI Logistics Group International (Group) (DE)	443	138	305	*89*	500	diverse Branchen
	Summe TOP 10	**7.410**	**5.574**	**1.836**		**31.846**	
	Umsatzanteil Kontraktlogistik an Gesamtumsatz (Ø)				**51**		

Abbildung 76: Die wichtigsten Akteure/ Flottenbetreiber der Kontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Die wichtigsten Nachfragebranchen des Segmentes der Kontraktlogistik im Bereich der Konsumgüterdistribution ist die Lebensmittelbranche und im Bereich industrielle Kontraktlogistik die Automobilbranche.

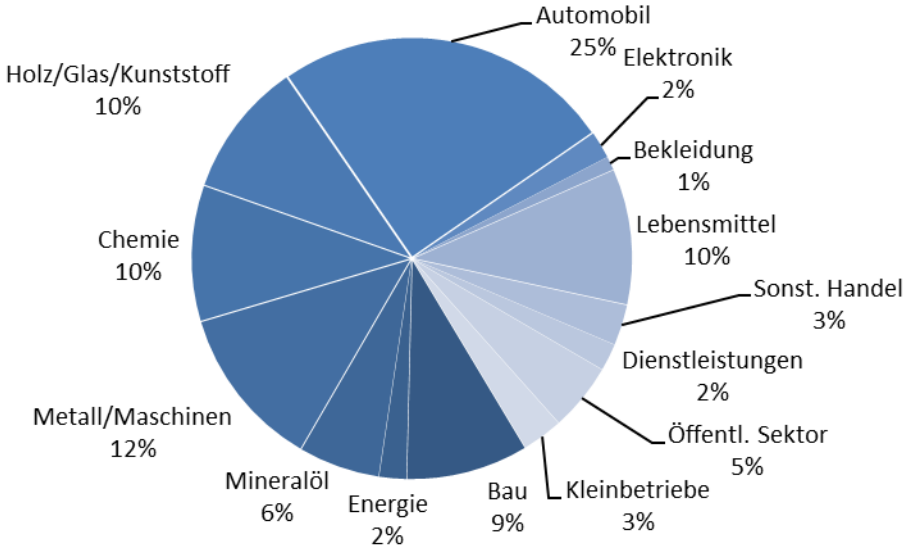


Abbildung 77: Nachfragebranchen der Industriekontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

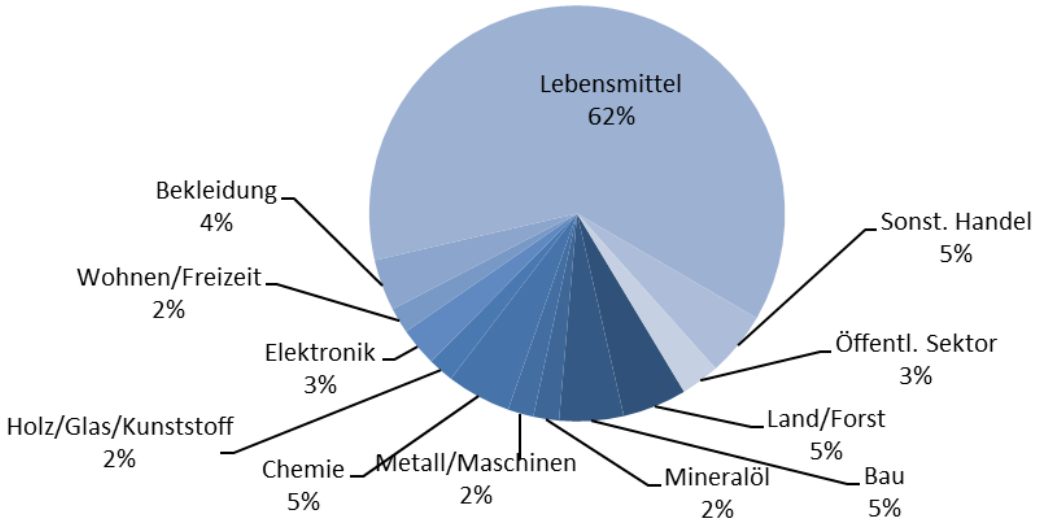


Abbildung 78: Nachfragebranchen der Handelskontraktlogistik (Quelle: Fraunhofer SCS)

Ausschluss nicht betrachteter Segmente

Nachfolgend werden die Gründe für den Betrachtungsausschluss der nicht relevanten Logistiksegmente dargelegt:

- Das Segment Massengutlogistik wird nicht näher betrachtet, da hier ein relativ geringer Anteil der Gütertransporte auf der Straße abgewickelt wird. Wenn Lkw-Transporte eingesetzt werden, dann sind meist Aufbauten als Zusatzverbraucher vorhanden (z.B. hydraulische Kippeinrichtungen) und es werden vorwiegend schwere und voluminöse Schüttgüter transportiert.

- Das Segment Terminal- und Warehousinglogistik wird von der Betrachtung ausgeschlossen, da hier ebenfalls kaum Lkw-Transporte eingesetzt werden. Die Güterbewegungen finden nahezu ausschließlich über Krane und Spezialfahrzeuge statt.
- Das Segment „Internationale Spedition (Luft/ See)“ wird nicht näher betrachtet, da der Lufttransport generell ein geringes Transportvolumen aufweist und der Haupttransport mit dem Flugzeug durchgeführt wird. Beim Seetransport gibt es hingegen ein großes Transportvolumen, aber hier erfolgt der Haupttransport mit dem Schiff. Bei beiden Formen des Haupttransportes (Luft und See) müssen die Güter vom Lagerplatz zum Hafen oder Flughafen transportiert werden, dabei kommen auch Lkw-Transporte zum Einsatz, welche vorwiegend durch eigenständige Frachtunternehmer durchgeführt werden und als solche bereits im Logistiksegment Ladungsverkehre beinhaltet sind.
- Die KMU-Logistik ist die innerbetriebliche Logistik von kleinen und mittleren Unternehmen, welche von den Unternehmen selbstständig durchgeführt wird. Die KMU-Logistik wird von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da durch die Unternehmensgröße bedingt, auch wenig Lkw je Unternehmen im Einsatz sind. Die Auslastung dieser Lkw ist zudem als deutlich geringer anzunehmen, im Vergleich zum gewerblichen Güterverkehr der Logistikdienstleister.