

Lieferverkehr mit Batterie-Lkw: Machbarkeit 2021

Fallbeispiel REWE Group - Region Nordost

Ort: Karlsruhe

Datum: 11.11.2021

Final

Impressum

Lieferverkehr mit Batterie-Lkw: Machbarkeit 2021

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Patrick Plötz, Patrick.Ploetz@isi.fraunhofer.de

Autoren

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Steffen Link, Steffen.Link@isi.fraunhofer.de
Patrick Plötz, Patrick.Ploetz@isi.fraunhofer.de
Janik Griener, Janik.Griener@isi.fraunhofer.de
Cornelius Moll, Cornelius.Moll@isi.fraunhofer.de

Auftraggeber

Transport & Environment (T&E) / European Climate Foundation (ECF)
T&E Deutschland: Neue Promenade 6, 10178 Berlin, Deutschland
ECF: Riviervismarkt 5, 2513 AM The Hague, Niederlande

Bildnachweis

Deckblatt: Eigene Abbildung - Leaflet | Data by © OpenStreetMap, under ODbL

Zitierempfehlung

Link, S.; Plötz, P.; Griener, J.; Moll, C. (2021): Lieferverkehr mit Batterie-Lkw: Machbarkeit 2021 – Fallbeispiel REWE Group - Region Nordost. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Veröffentlicht

November 2021

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen internen und externen Gutachtern dieses Berichts, insbesondere bei Fedor Unterlohner und Jekaterina Boening (beide T&E), Martin Wietschel und Daniel Speth (beide Fraunhofer ISI) sowie der REWE Group für die Begutachtung und Freigabe des Berichts. Ein besonderer Dank gilt weiterhin der gesamten Projektgruppe und den Mitgliedern des Beirats für den fachlichen Austausch und die konstruktiven Diskussionen.

Hinweise

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

Inhaltsverzeichnis

Kernergebnisse	4	
Key Findings	5	
Zusammenfassung	6	
Summary	14	
1	Einleitung und Zielsetzung	22
2	Daten und Methodik	23
2.1	Touren und Fahrzeuge.....	23
2.2	Methodik.....	26
2.2.1	Marktrecherche E-Lkw.....	26
2.2.2	Fahrzeug- und Energiesimulation.....	27
2.2.3	Analyse der technischen Machbarkeit.....	30
2.2.4	Gesamtnutzungskosten.....	31
3	Ergebnisse	37
3.1	Tourenlängen und Fahrleistungen.....	37
3.2	Energieverbrauch und technische Machbarkeit von Elektro-Lkw.....	42
3.3	Gesamtnutzungskosten.....	47
3.4	Techno-ökonomisches Ersetzungspotential.....	51
4	Diskussion	53
5	Fazit und Handlungsempfehlungen	55
6	Abbildungsverzeichnis	57
7	Tabellenverzeichnis	59
8	Literatur	60

Kernergebnisse

- Schwere Batterie-elektrische Lkw können einen deutlichen Beitrag zur Senkung der Treibhausgas-Emissionen im Verkehr liefern. Aber aufgrund der noch begrenzten elektrischen Reichweite und hoher Anschaffungskosten steht Ihre derzeitige Einsatzfähigkeit in der Logistik regelmäßig in der Diskussion.
- In der vorliegenden Studie werden alle Touren über einen Monat eines großen Logistikbetriebes auf ihre techno-ökonomische Machbarkeit mit aktuellen Batterie-Lkw untersucht. Datenbasis bilden 9.500 reale Touren zu 543 Filialen von 224 schweren Lkw über 12 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG). Für jedes Fahrzeug werden der individuelle Energiebedarf anhand des Einsatzprofils inklusive Nebenaggregaten simuliert sowie die Gesamtnutzungskosten für eine heutige Anschaffung (im Jahr 2021) und einen Betrieb über acht Jahre berechnet.
- Mit den heute verfügbaren Reichweiten (Modelle der Jahre 2021 - 2023) von Batterie-Lkw sind alle Lkw im städtischen Lieferverkehr und fast die Hälfte der Lkw im regionalen Einsatz direkt mit Batterie-Lkw durchführbar. Nächtliches Laden ist fast immer ausreichend. Vor allem sehr schwere Lkw über 26 t zGG mit sehr langen Tagestouren stellen hinsichtlich der bis 2023 angekündigten Reichweiten eine Herausforderung dar, wären aber mit größeren Reichweiten, zusätzlichem Zwischenladen oder einer optimierten Routenplanung perspektivisch ebenfalls möglich.
- Bereits heute können Batterie-Lkw aus ökonomischer Sicht günstiger als Diesel-Lkw sein, wenn sie möglichst viel fahren. Dabei steigt der Kostenvorteil der Batterie-Lkw mit der Fahrleistung an, da sich die höheren Anschaffungskosten durch geringere Betriebskosten amortisieren können. Im städtischen Einsatz reichen die Jahresfahrleistungen auch unter den aktuellen Förderbedingungen teilweise nicht für einen Gesamtkostenvorteil aus. Dagegen könnten gerade im Regionalverkehr bereits heute viele Fahrzeuge einen signifikanten Kostenvorteil erzielen. Insgesamt sind nach heutigem Stand rund 42 % der hier betrachteten Fahrzeuge und 21 % der Verkehrsleistung sowohl technisch mit Batterie-Lkw umsetzbar als auch günstiger in den Gesamtnutzungskosten.
- Wichtig für die heutige Wirtschaftlichkeit der Batterie-Lkw ist die aktuelle Förderung von 80 % der Mehrkosten für Fahrzeug und Infrastruktur sowie die steigende CO₂-Bepreisung von Dieselmotoren bzw. eine entsprechende CO₂-abhängige Maut. Zukünftig erlauben die sinkenden Preise für Batterie-Lkw auch bei verringerter Förderung einen wirtschaftlichen Betrieb, insbesondere bei einer nennenswerten CO₂-Bepreisung oder -Maut.
- Aufgrund der hohen Ersetzbarkeit und möglichen Kostenvorteile sollten Spediteure und Flottenbesitzer bereits heute die Umstellung Ihrer Lkw im städtischen und regionalen Lieferverkehr prüfen. Im aktuellen Förderregime können sie Kosten sparen und wertvolle Erfahrungen für die kommende Umstellung auf elektrische Nutzfahrzeuge sammeln.

Key Findings

- Heavy-duty battery-electric trucks (BET) offer tremendous potential for greenhouse gas emission reduction in transport. However, owing to limited electric range and high acquisition costs, their current feasibility in logistics is under discussion.
- The present study examines the current techno-economic feasibility of BET for a large logistics company based on real tours during one month. The tour data sample consists of 9,500 real tours to 543 retail stores executed by 224 heavy trucks over 12 t gross vehicle weight (GVW). For each vehicle, the individual energy demand is simulated based on its operating profile including auxiliaries, and the total costs of ownership (TCO) are calculated for vehicle purchase in 2021 and eight year service life.
- Given currently available battery truck ranges (model years 2021 - 2023), all trucks in urban delivery and almost half of the trucks in regional delivery are technically feasible with BET. Charging at night is almost always sufficient. Especially very heavy trucks with GVW over 26 t and very long daily trips pose a challenge given the announced ranges up to 2023. In future, however, these are likely to become feasible with extended battery capacities, additional opportunity charging or optimized route planning.
- Even in 2021, BETs may be economically viable compared to diesel trucks if they exhibit high mileage. The cost advantage of BET increases with mileage, as higher purchase costs amortize through lower operating costs. In urban delivery, the annual mileage is often insufficient for an overall cost advantage, even under the current German purchase subsidies for BET. However, especially in regional delivery, many vehicles already achieve significant cost advantages. Overall, around 42% of the considered vehicles and 21% of their transport activity are both technically feasible and more cost-effective with BET as of today.
- Key factors affecting the current economic viability of BET are the 80% purchase subsidy for the additional vehicle costs (as compared to a diesel truck) and infrastructure as well as the increasing CO₂ price for diesel fuel or a corresponding CO₂-based road toll. In future, decreasing prices for BET will enable economic operation even with decreasing subsidies, particularly safeguarded and enhanced by significant CO₂ pricing.
- Due to the high feasibility and possible cost-effectiveness, logistics operators and fleet owners are advised to evaluate their fleet with respect to a switch to battery electric trucks for city logistics and regional delivery as of today. The current policy framework offers not only cost saving opportunities but allows to gain valuable experience for the transition to electric trucks in future.

Zusammenfassung

Motivation und Zielsetzung

Batterie-Lkw können einen Beitrag zur Treibhausgasminderung im Verkehr leisten und sind bereits heute kommerziell verfügbar. Gleichzeitig steht ihre heutige Einsatzfähigkeit in der Logistik jedoch regelmäßig in der Diskussion. Ziel der vorliegenden Studie ist die Analyse der technischen Ersetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw in einem wichtigen Teil des schweren Straßengüterverkehrs über 12 t zulässiges Gesamtgewicht (zGG) aus heutiger Sicht. Als Fallbeispiel dient die urbane und regionale Distributionslogistik im Lebensmitteleinzelhandel. Auf Basis dieser Analysen sollen Handlungsempfehlungen ausgesprochen und Entscheidungswissen für Politik und Industrie bereitgestellt werden.

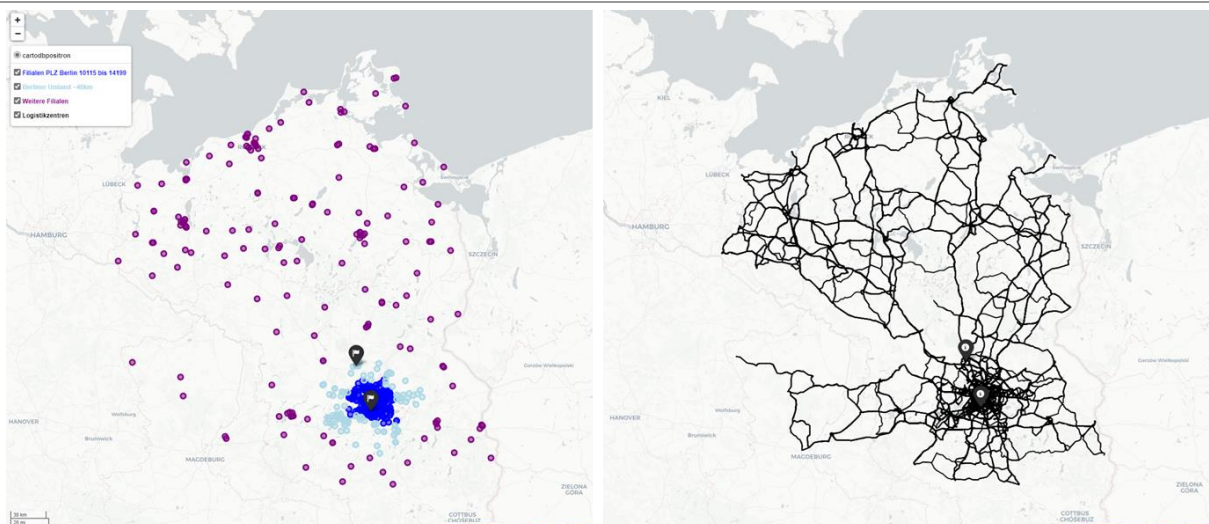
Datenbasis: 9.500 reale Touren zu 543 Filialen von 224 Lkw über einen Monat

Im hier untersuchten Fallbeispiel liegen alle Daten der Touren- und Einsatzplanung für zwei Depots der REWE-Group in der Region Nord-Ost Deutschlands vor. Der kleinere Standort in Mariendorf wird hauptsächlich für die Belieferung von Kunden in Berlin und im Berliner Umland genutzt. Der größere Standort in Oranienburg wird zusätzlich und überwiegend für die regionale Belieferung der gesamten Region Nord-Ost genutzt. Der Datensatz deckt den gesamten Monat Februar 2021 ab und enthält für jedes Fahrzeug unter anderem Informationen zur zeitlichen Abfolge, der Strecke und der Zuladung je Tour.

Der Datensatz umfasst nach einer Aufbereitung 8.300 der 9.500 insgesamt enthaltenen Einzeltouren von 224 Lkw und eine Gesamtfahrleistung von rund 1 Million km. Es werden Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 oder 26 Tonnen im Betrieb als Solokühlfahrzeug eingesetzt sowie mit einem zGG von 40 Tonnen als Hängerzug oder eine Kombination aus Sattelzugmaschine und Kühlaufleger (48 % der Gesamtflotte). Solo-Lkw werden insbesondere im städtischen Lieferverkehr eingesetzt. Hängerzüge und Sattelzüge werden sowohl im städtischen als auch im regionalen Verkehr eingesetzt. 162 der 224 Fahrzeuge werden in Oranienburg genutzt.

Beliefert werden in der Region Nord-Ost insgesamt 543 Filialen. Abbildung 1 zeigt die beiden Depot-Standorte und die einzelnen Kundenstandorte (Links) sowie die dazugehörigen Touren (Rechts). Rund 50 % der Kunden sind dabei im Postleitzahlbereich von Berlin lokalisiert (**Blau**). Gemeinsam mit dem Berliner Umland ergibt sich eine lokale Konzentration von 70 % (**Hellblau**) in und um Berlin. Die restlichen 30 % der Kundenstandorte verteilen sich über den Nordosten Deutschlands (**Violett**).

Abbildung 1: Zusammenfassung - Region Nord-Ost: Kunden (Links) und Touren (Rechts)



Quellen: Eigene Darstellung mit Leaflet | Data by © OpenStreetMap

Methodik: Bestimmung des techno-ökonomischen Ersetzungspotentials

Die technische Machbarkeit beinhaltet eine individuelle Energiesimulation für jedes Fahrzeug sowie eine Recherche der aktuell am Markt verfügbaren Batterie-Lkw. Die Simulation nutzt ein vereinfachtes mathematisch-physikalisches Fahrzeugmodell, um die spezifischen Energieverbräuche für jede einzelne Tour im Datensatz abzuleiten. Das Fahrzeugmodell berücksichtigt dabei zusätzliche Energiebedarfe wie bspw. Nebenaggregate oder Ladungskühlung. Als Ergebnis ergibt sich der spezifische Energieverbrauch für jedes einzelne Fahrzeug. Zusätzlich wird ein mögliches Depot-Zwischenladen innerhalb des Werks-geländes – bspw. direkt an den Warenschleusen – zur Absicherung von Touren und zur Reichweitenverlängerung untersucht. Die Studie betrachtet die Touren und deren Reihenfolge exakt wie erfolgt, eine mögliche Optimierung der Tourenplanung auf die elektrische Reichweite erfolgt nicht. Zudem wird konservativ angenommen, dass alle Touren des jeweiligen Fahrzeugs machbar sein müssen. Aus dem Abgleich der notwendigen Batteriekapazität und der heute am Markt verfügbaren Batteriegrößen wird je Standort eine mittlere Batteriegröße für alle Fahrzeug des jeweiligen Segments abgeleitet. Eine fahrzeug-individuelle Auswahl der Batteriegröße erfolgt nicht.

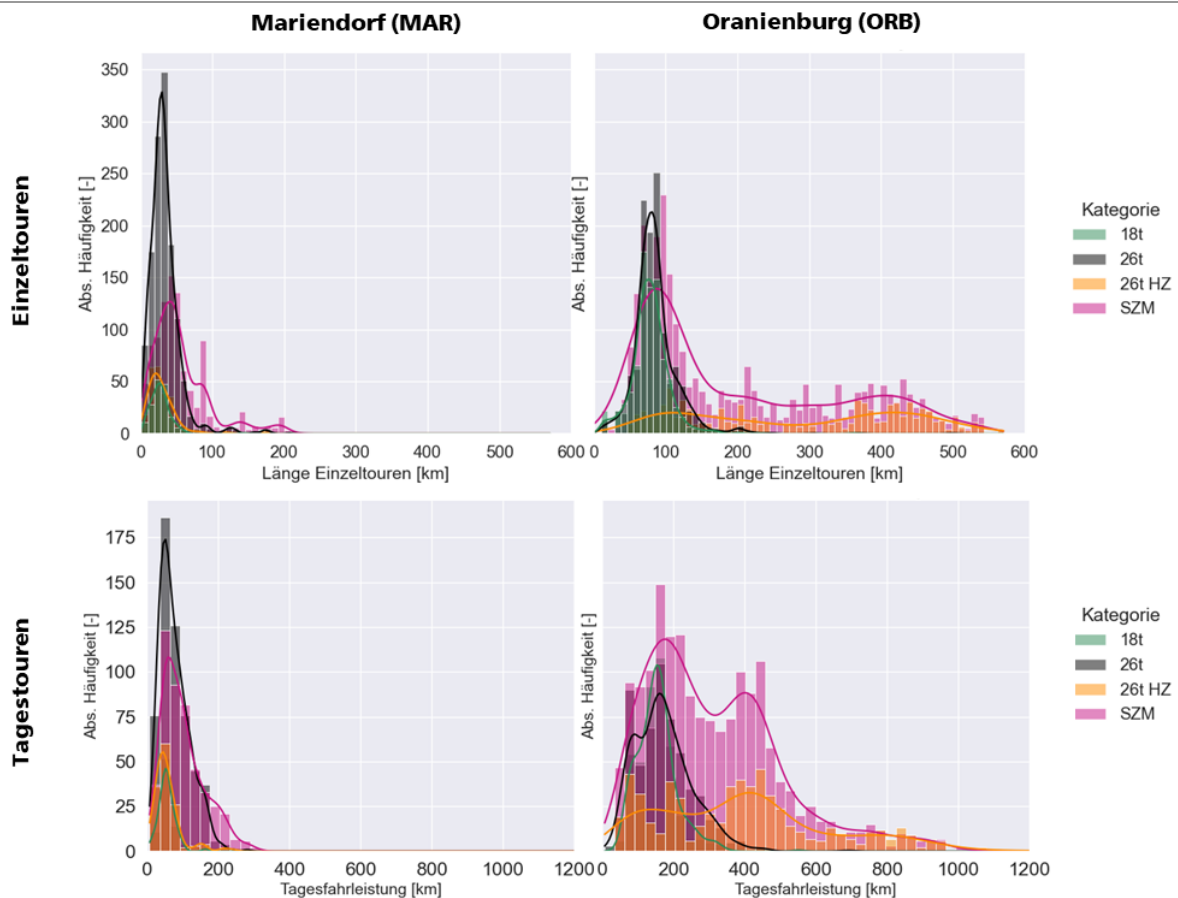
Für die ökonomische Bewertung von Batterie-Lkw im Vergleich zu Diesel-Lkw werden die Gesamtnutzungskosten über acht Jahre Haltedauer bei heutiger Anschaffung (2021) verglichen. Im Falle der Batterie-Lkw sind neben den Kosten für Erwerb, Nutzung und Wiederverkauf auch die Kosten für Ladeinfrastruktur in den Depots integriert. Die Infrastrukturkosten für Nachladen werden je Fahrzeug betrachtet, während weitere Ladeinfrastruktur zum Depot-Zwischenladen über die gesamte technisch elektrifizierbare Flotte gemittelt wird. Es werden die derzeit geltende Förderung von klimaschonenden Nutzfahrzeugen und dazugehöriger Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Statt einer CO₂-basierten Mautabgabe im Sinne der Eurovignetten-Richtlinie wird eine äquivalente CO₂-Abgabe im Dieselpreis mit der aktuellen deutschen Mautregelung genutzt. Die Ergebnisse können aber in weiten Teilen als äquivalent zu einer CO₂-abhängigen Maut betrachtet werden. Als Ergebnis liegen für jedes einzelne Fahrzeug die Gesamtnutzungskosten für beide Antriebe vor.

Tagesfahrleistungen im städtischen Lieferverkehr überwiegend unter 200 km und im regionalen Lieferverkehr unter 500 km

Abbildung 2 zeigt die absoluten Häufigkeiten sowie geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen von Einzeltouren und Tagesfahrleistungen nach Fahrzeugsegment und nach Depotstandort. Die obere Zeile zeigt Einzeltouren, die untere die Tagedtouren. Letztere setzen sich dabei aus einer bis fünf Einzeltouren pro Tag und Fahrzeug zusammen. Am häufigsten werden ein und zwei Touren pro Tag gefahren. Die Analyse der **Einzeltouren** zeigt, dass für den städtischen Lieferverkehr ab Mariendorf nahezu alle Einzeltouren (99 %) in allen Segmenten unter 200 km Länge sind. Fahrzeuge ab Oranienburg weisen insgesamt höhere Fahrleistungen auf. Solo-Lkw werden vorwiegend in Berlin und im Berliner Umland eingesetzt. Entsprechend liegt der Anteil an Touren unter 200 km Länge bei 99 %. Hängerzug und Sattelzug werden zusätzlich und überwiegend zur Belieferung der gesamten Region eingesetzt. Rund ein Viertel aller Touren für den Sattelzug und gut die Hälfte aller Touren für den Hängerzug sind über 300 km lang. Die längste Einzeltour liegt bei 570 km für Oranienburg und 220 km für Mariendorf.

Die Analyse der **Tagedtouren** zeigt für den Standort Mariendorf eine maximale Tagesfahrleistung von 320 km sowie einen hohen Anteil (96 %) von unter 200 km Tagesfahrleistung. In Oranienburg liegt dieser Anteil bei lediglich 45 % und die Fahrzeuge weisen insgesamt höhere Fahrleistung auf. Für die Solo-Lkw liegt die maximale Tagesfahrleistung bei rund 400 km, wobei ein hoher Anteil der Touren (85 %) bereits bei unter 200 km pro Tag liegt. Hängerzug und Sattelzug weisen erneut noch höhere Fahrleistungen auf. Hier liegen nur rund 54 % (Sattelzug) bzw. 36 % (Hängerzug) der Touren unter 300 km pro Tag. Beim Hängerzug sind sogar 20 % aller Touren über 600 km pro Tag. Beim Sattelzug liegt der Anteil lediglich bei 10 %. Im Mehrschichtbetrieb liegt die längste Tagedtour für Oranienburg bei 1.280 km.

Abbildung 2: Zusammenfassung - Analyse der Einzel- und Tagestouren



Quellen: Eigene Darstellung

Repräsentativität der Daten

Aufgrund der stark unterschiedlichen Einsatzzwecke von Lkw und Besonderheiten je nach Branche und Industrie sowie nur weniger Lkw-Datensätze mit längerer Beobachtungsdauer ist die Beurteilung der Repräsentativität der vorliegenden Daten schwierig. Zur besseren Einordnung der Daten und der Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse sind folgende Punkte nützlich:

- 1) Mit der Untersuchung des Lebensmitteleinzelhandels als Teil der Distributionslogistik deckt diese Studie bis zu ein Viertel der gesamten Transportleistung im deutschen Straßengüterverkehr ab. Weiterhin betrachtet diese Studie rund 15 % der Gesamtfläche Deutschlands, umfasst rund 9 % der Gesamtbevölkerung und die vier betrachteten Segmente decken rund 87 % des N3 Nutzfahrzeugbestands in Deutschland ab.
- 2) Die Gegenüberstellung der Touren mit den Fahrprofilen der KiD-Erhebung (Wermuth et al. 2012) zeigt einen überproportionalen Anteil an Jahresfahrleistungen unter 100.000 km im vorliegenden Datensatz, jedoch insgesamt eine ähnliche Verteilung der Fahrleistungen für Touren ab Oranienburg. Die städtischen Touren ab Mariendorf sind kürzer als im Mittel aller Fahrzeuge gleicher Größe.
- 3) Der Vergleich für Touren ab Oranienburg mit verschiedenen Eurostat-Transportstatistiken legt eine ähnliche Verteilung der transportierten Ware auf die Fahrzeugklassen nahe und deutet weiterhin eine ähnliche Verteilung der Transportleistung auf Distanzintervalle an.

Insgesamt betrachtet diese Studie mit dem städtischen und regionalen Verteilerverkehr einen wichtigen Teil des deutschen Straßengüterverkehrs. Obgleich eine eindeutige Einordnung nicht möglich ist, liegt der Schluss nahe, dass insbesondere der Standort Oranienburg den urbanen und regionalen Lieferverkehr in Deutschland gut abbilden kann und Erkenntnisse in Teilen auch auf den gesamten Straßengüterverkehr übertragen werden können.

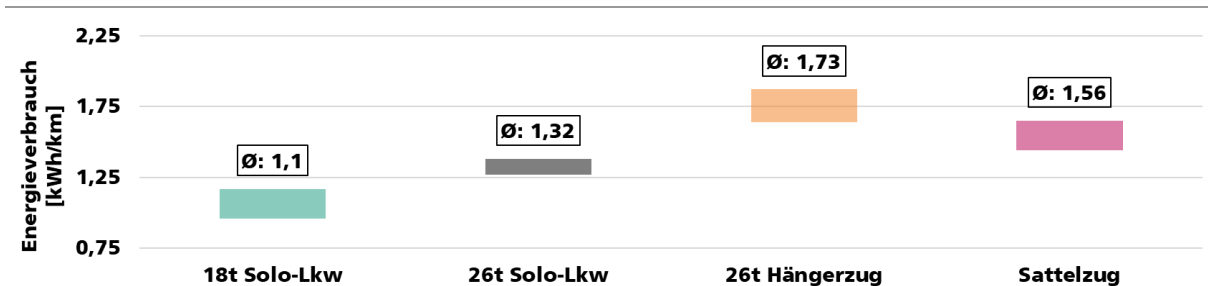
Marktübersicht: Eine Vielzahl an Modellen zwischen 250 und 550 kWh in Serie oder seriennah

Die Marktrecherche fokussiert den Zeitraum von 2021 bis 2023 und zeigt für 18 t und 26 t Solo-Lkw einen überwiegenden Anteil an Ankündigungen großer europäischer Lkw-Hersteller zwischen 250 und 400 kWh Brutto-Batteriekapazität. Für Sattelzugmaschinen liegt dieser Korridor zwischen 350 und 550 kWh. In allen Kategorien zeigen sich bereits heute erste Ankündigungen sowie verfügbare Modelle mit über 600 kWh und bis 900 kWh Batteriekapazität, die perspektivisch insbesondere im Fernverkehr benötigt werden. Auch zeigt sich ein modulares Angebot der Hersteller mit verschiedenen Batteriegrößen für die Modelle, passend für den individuellen Reichweitenbedarf der Kunden.

Simulation: Je nach Segment Energieverbrauch zwischen 1,1 und 1,7 kWh pro km

Abbildung 3 zeigt den mittleren simulierten Energieverbrauch je Segment als Median mit Interquartilsabstand über alle Touren. Die größere Streuung bei Hängerzug und Sattelzug ist unter anderem auf die größere Variation im Einsatzgebiet zurückzuführen. Die Ergebnisse reichen von 1,1 kWh/km im Median beim 18 t Solo-Lkw, 1,32 kWh/km beim 26t Solo-Lkw, 1,56 kWh/km bei Sattelzügen bis zu 1,73 kWh/km beim Hängerzug. Die Simulationsergebnisse stimmen mit den Ergebnissen anderen Studien überein.

Abbildung 3: Zusammenfassung - Simulierter Energieverbrauch (battery-to-wheel)



Quellen: Eigene Darstellung

Technische Ersetzbarkeit: 58 % der Fahrzeuge und 25 % der Transportleistung (tkm)

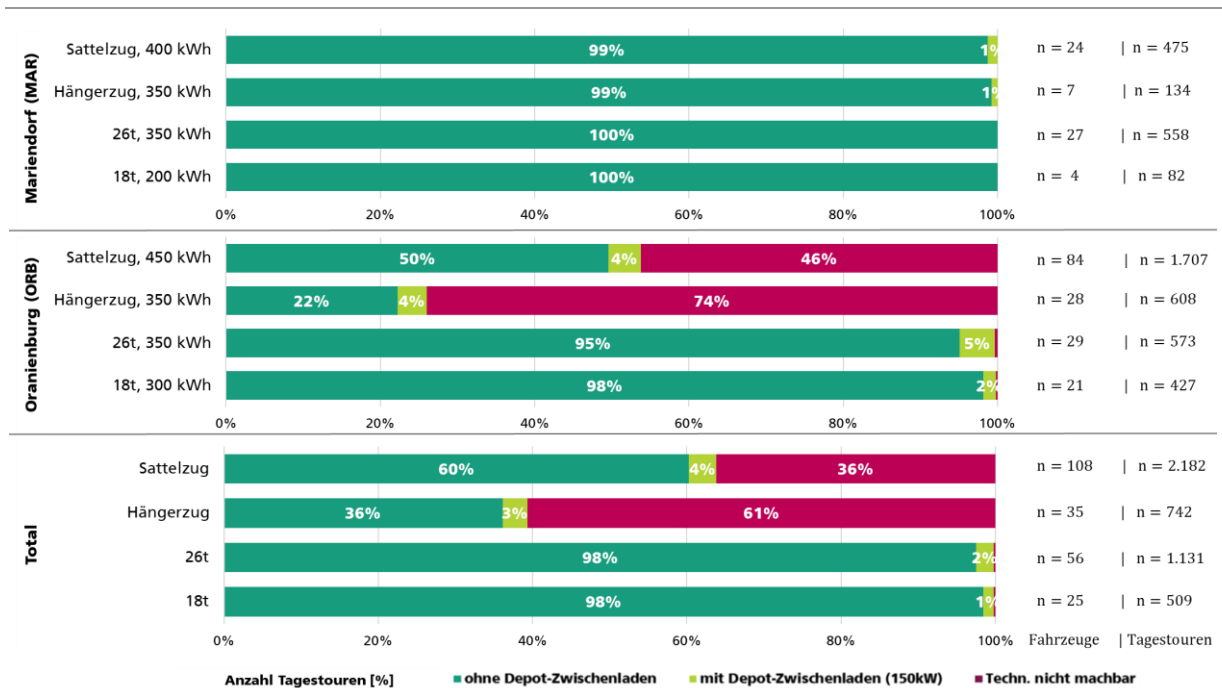
Abbildung 4 zeigt die technische Machbarkeit als Anteil der elektrifizierbaren Tagestouren je Segment und je Standort in Abhängigkeit der gewählten Brutto-Batteriegrößen.

Für den **städtischen Lieferverkehr ab Mariendorf** sind aufgrund der kurzen Touren 100 % oder 62 der 62 eingesetzten Fahrzeuge elektrifizierbar. Das Zwischenladen am Depot hat eine geringe Bedeutung und sichert einige wenige Tagestouren ab.

Für den **städtischen und regionalen Lieferverkehr ab Oranienburg** sind in Berlin und im Berliner Umland eingesetzten Solo-Lkw aber auch die wenigen großen Gespanne elektrifizierbar. In der gesamten Region Nord-Ost sind insbesondere bei Sattelzug und Hängerzug die Elektrifizierungspotentiale nach heutigem Stand deutlich geringer als bei den Solo-Lkw. Hier hat das Depot-Zwischenladen eine gewisse Bedeutung. Dennoch sind viele lange Einzeltouren mit der einmaligen Batterieladung zu Beginn nicht zu absolvieren, was entsprechend auch den Effekt des Depot-Zwischenladens limitiert. Anhand der Zuordnung der einzelnen Tagestouren auf die Fahrzeuge lässt sich ableiten, dass 43 % bzw. 69 der 162 Fahrzeuge in Oranienburg aus technischer Sicht elektrifizierbar sind.

Für die **Gesamtflotte** bedeutet dies eine technisch mögliche Elektrifizierung von 58 % bzw. 131 von 224 Fahrzeugen mit aktuell verfügbaren Modellen. Eine Umrechnung der Touren auf die Transportleistung in Tonnenkilometer führt auf eine technische Elektrifizierung von 32 % ohne Zwischenladen und 36 % mit Depot-Zwischenladen. Werden die Tagestouren wiederum auf Fahrzeuge gemäß der Tourenplanung zugerechnet, so liegt die elektrifizierbare Transportleistung jedoch bei nur 25 %. Alle genannten Analysen gelten für die Touren wie sie über einen Monat gefahren wurden, ohne mögliche Optimierung der Tourenplanung auf die Reichweite der Batterie-Lkw.

Abbildung 4: Zusammenfassung - Technisches Elektrifizierungspotential aus heutiger Sicht



Quellen: Eigene Darstellung

Wirtschaftlichkeit: Für 82 % der Fahrzeuge erzielen heutige Batterie-Lkw einen Kostenvorteil

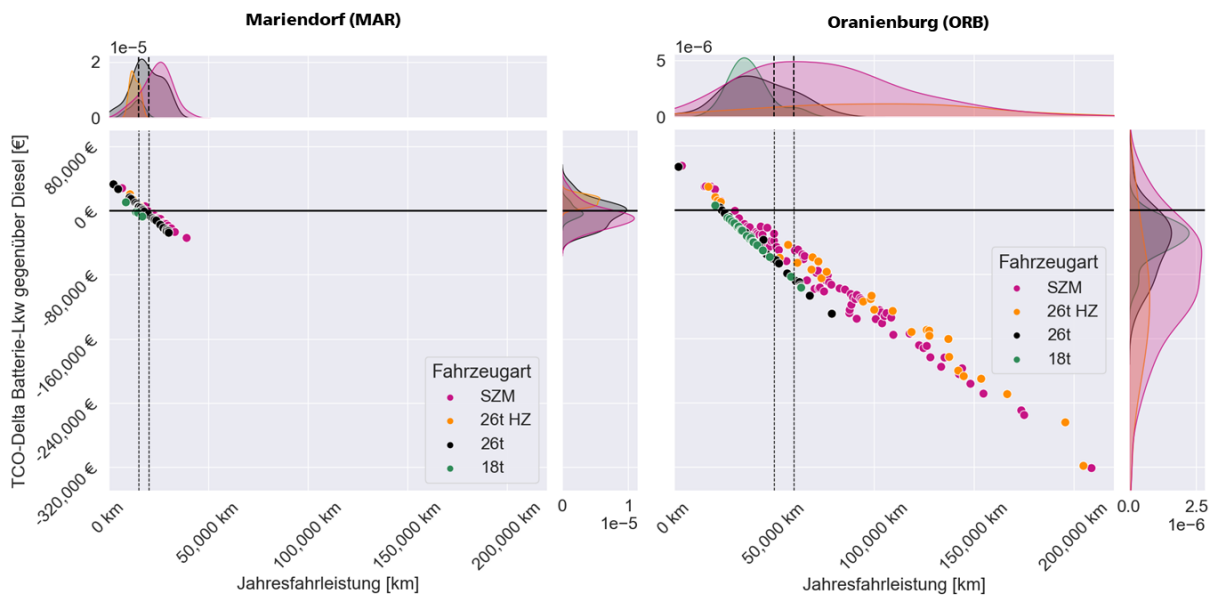
Abbildung 5 zeigt die Differenz der Gesamtnutzungskosten von Batterie-Lkw im Vergleich zu Diesel-Lkw für jedes einzelne Fahrzeug nach Standort in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung. Eine negative Kostendifferenz bedeutet, dass ein Batterie-Lkw mit Anschaffung in 2021 insgesamt günstiger als der Diesel-Lkw ist. Die Jahresfahrleistung wird aus der Monatsfahrleistung hochgerechnet. Es ergibt sich eine mittlere Jahresfahrleistung von rund 18.000 km in Mariendorf und 60.000 km in Oranienburg. Zusätzlich ist für beide Standorte der Standard-Korridor für die Jahresfahrleistung gemäß REWE eingezeichnet.

In **Oranienburg** zeigt sich, dass der Diesel aktuell über alle Segmente bei einer Jahresfahrleistung von unter 30.000 km ökonomisch im Vorteil ist. Bei höheren Fahrleistungen amortisieren sich die höheren Anschaffungskosten des Batterie-Lkw und Kosten für die Infrastruktur durch geringe Betriebs- und Unterhaltskosten. Insgesamt erzielen Batterie-Lkw bei 90 % bzw. 147 von 162 der Fahrzeuge einen Kostenvorteil. Bei 141 Fahrzeugen liegt der Kostenvorteil über 10.000 € über die gesamte Haltedauer. Dies sind insbesondere die 18 t und 26 t Solo-Lkw sowie die Sattelzugmaschinen. Diese Analyse berücksichtigt nicht die technische Ersetzbarkeit, sondern nur die Gesamtkosten aufgrund der Jahresfahrleistung.

In **Mariendorf** amortisieren sich die höheren Anschaffungskosten aufgrund der geringen Fahrleistungen seltener, obgleich die Ausgaben für Infrastruktur durch weniger Relevanz von Zwischenladen geringer sind. Für eine mittlere Jahresfahrleistung unter 20.000 km erzielen Batterie-Lkw in allen Segmenten keinen oder nur einen geringen Gesamtkostenvorteil. Insgesamt erzielen 58 % bzw. 36 von 62 Fahrzeugen einen Vorteil, wobei nur 19 Fahrzeuge einen nennenswerten Kostenvorteil von über 10.000 € über die gesamte Haltedauer aufweisen. Dies sind insbesondere die 26 t Solo-Lkw und die Sattelzugmaschinen. Diese Analyse berücksichtigt nicht die technische Ersetzbarkeit, sondern nur die Gesamtkosten aufgrund der Jahresfahrleistung.

Für die **Gesamtflotte** bedeutet dies eine wirtschaftliche attraktive Elektrifizierung von bis zu 82 % bzw. 183 von 224 Fahrzeugen unter der aktuellen Förderung von klimaschonenden Nutzfahrzeugen, heutigen Kaufpreisen sowie Rahmenbedingungen und ohne Berücksichtigung der technischen Ersetzbarkeit.

Abbildung 5: Zusammenfassung – Differenz der Gesamtnutzungskosten aus heutiger Sicht



Quellen: Eigene Darstellung

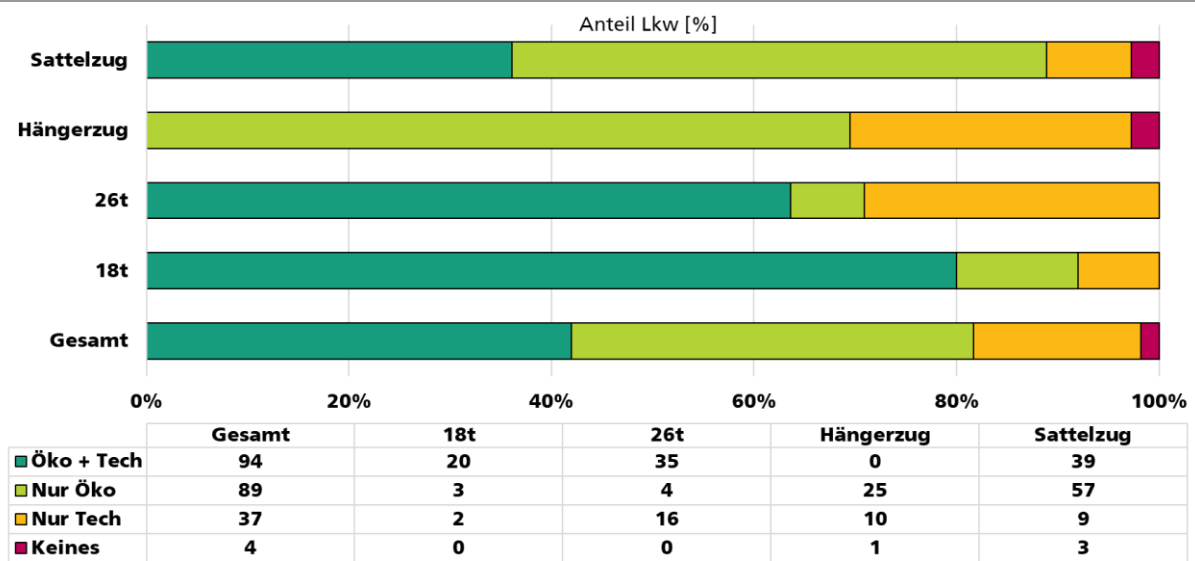
Techno-ökonomische Machbarkeit: 42 % der Fahrzeuge und 21 % der Transportleistung (TKM)

Die techno-ökonomische Machbarkeit kombiniert nun die Ergebnisse der technischen Machbarkeit und ökonomischen Bewertung je Fahrzeug. Insgesamt zeigt sich der Trade-Off aus Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung. Der Kostenvorteil des Batterie-Lkw steigt mit der Fahrleistung an, da sich die höheren Anschaffungskosten durch geringere Betriebskosten amortisieren können. Gleichzeitig sinkt die technische Machbarkeit mit steigender Jahresfahrleistung, da Einzel- oder auch Tagesfahrprofile – auch mit Zwischenladen am Depot – nicht erfolgreich absolviert werden können. Bei kurzen Touren und entsprechend geringer Jahresfahrleistungen ist also die technische Machbarkeit oft hoch, jedoch können sich die höheren Anschaffungskosten nicht amortisieren.

Als finales Ergebnis dieser Studie visualisiert Abbildung 6 das techno-ökonomische Ersetzungspotential über beide Standorte und damit für die gesamte Region Nord-Ost. Das Balkendiagramm spiegelt die relativen Anteile je Segment wieder und wird von einer Übersichtstabelle in absoluten Zahlen ergänzt. Für die **Region Nord-Ost** sind in Summe rund 42 % der Fahrzeuge (94 von 224) aus techno-ökonomischer Sicht elektrifizierbar. Eine Umrechnung der Fahrzeuge auf die Transportleistung in Tonnenkilometer führt auf eine techno-ökonomische Elektrifizierung von 21 % der Tonnenkilometer.

In der Detailbetrachtung liegt das techno-ökonomische Ersetzungspotential in **Mariendorf** bei 36 von 62 Fahrzeugen und in **Oranienburg** bei 58 von 162 Fahrzeugen. Dies setzt sich zusammen aus 20 18 t Solo-Lkw, 35 26 t Solo-Lkw sowie 39 Sattelzugmaschinen. Aus ökonomischer Sicht läge das Elektrifizierungspotential deutlich höher, jedoch limitiert die technische Machbarkeit aufgrund von zu hohen Fahrleistungen das Potential. Durch eine optimierte Tourenplanung ließe sich das Ergebnis noch verbessern, aber eine entsprechende Möglichkeit und die Integration in bestehende Betriebsabläufe wurden nicht untersucht.

Abbildung 6: Zusammenfassung - Techno-ökonomisches Ersetzungspotential Region Nord-Ost aus heutiger Sicht



Quellen: Eigene Darstellung

Diskussion: Höheres Potential im urbanen und regional Lieferverkehr in Deutschland naheliegend

Zunächst wird das Einsatzprofil der Fahrzeuge gemäß Tourenplanung als gegeben angenommen und es findet keine Anpassung der Routen hinsichtlich deren Verkettung oder der Fahrzeugzuordnung statt. Daran anknüpfend nimmt die Studie vereinfachend an, dass ein Fahrzeug bereits dann nicht elektrifizierbar ist, wenn eine einzige Einzel- oder Tagestour nicht machbar ist. Wenige nicht machbare Touren können daher das Ergebnis dieser Studie stark beeinflussen. Eine Verschiebung einzelner Touren zwischen Fahrzeuge oder eine Optimierung der Tourenplanung könnte vor allem die technische Machbarkeit weiter verbessern. Ein Zwischenladen an öffentlichen Ladesäulen oder an ausgewählten Kundenfilialen würde die technische Machbarkeit zudem weiter erhöhen.

Die Unsicherheiten bezüglich der Gesamtnutzungskosten beziehen sich insbesondere auf die heutigen Anschaffungskosten der Fahrzeuge, die Restwerte am Ende der Haltedauer und die Preisentwicklung von Energieträgern. Annahmen zu den energiepolitischen Rahmenbedingungen enthalten die derzeit geltende 80 % Mehrkostenförderung von Fahrzeugen und Infrastruktur, die CO₂-basierte Abgaben bei Maut und Diesel. Gerade die Fahrzeugförderung und der Betriebskostenvorteil durch die CO₂-Abgabe sind wichtige Hebel für die Wirtschaftlichkeit. Wenn zukünftige Kosten für Batterie-Lkw sinken, wird auch bei geringerer Förderung ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein.

In Summe spiegeln die hier getroffenen Annahmen den aktuellen Rechtsrahmen wider und betrachten nur am Markt bereits verfügbare oder für die nahe Zukunft angekündigte Modelle. Da alle Touren von über 200 Fahrzeugen über einen ganzen Monat untersucht wurden, erscheinen die hier vorgestellten Ergebnisse als robust und realistisch für den aktuellen städtischen und regionalen Verteilverkehr.

Fazit: Lkw im städtischen Lieferverkehr vollständig elektrisch machbar. Regionaler Lieferverkehr heute bereits in nennenswerten Teilen elektrifizierbar. Insgesamt über ein Viertel der Verkehrsleistung innerhalb weniger Jahre elektrisch machbar.

Aktuelle Batterie-Lkw sind bereits ausreichend, um einen Großteil des Lieferverkehrs zu elektrifizieren. Im Fallbeispiel kann rund 42 % der betrachteten Flotte aus techno-ökonomischer Sicht elektrifiziert werden. Dies entspricht rund 21 % der Verkehrsleistung, wobei bis zu 36 % der Verkehrsleistung ohne weitere Maßnahmen alleine durch Neuordnung der Touren aus technischer Sicht möglich wären.

Handlungsempfehlungen für REWE: Ad-hoc können 58 der 224 Fahrzeuge ersetzt werden

Im Fallbeispiel können aus technischer und sollten aus wirtschaftlicher Sicht bis zu 42 % der Fahrzeugflotte (94 von 224) zügig elektrifiziert werden. Dies erscheint technisch machbar und sollte über die Fahrzeugnutzungsdauer Gesamtkosten senken.

Die Fahrzeugeinsatzplanung sollte zukünftig bei der Zuweisung von Folgetouren neben der zeitlichen Verfügbarkeit auch die Restreichweite des Fahrzeugs berücksichtigen, um die Elektrifizierung zu beschleunigen. Die Ausstattung von Warenschleusen mit Ladepunkten könnte eine potentielle Hürde aufgrund von zusätzlichen Kosten, Platz und Einschränkungen hinsichtlich der Flexibilität darstellen. Daher ergibt sich die Empfehlung zunächst Fahrzeuge zu elektrifizieren, die nicht auf die Option Zwischenladen am Depot angewiesen sind. Für die Region Nord-Ost sind dies 58 der 224 Fahrzeuge.

Handlungsempfehlungen für Logistiker und Spediteure: Umstieg bereits heute prüfen

Alle Logistiker sollten den Umstieg auf Batterie-Lkw im städtischen Lieferverkehr und im Regionalverkehr bereits heute prüfen. Zentral ist die Bereitstellung einer Depot-Ladeinfrastruktur für das Laden über Nacht. Weiterhin ergibt sich die Empfehlung einer individualisierten Fahrzeugbetrachtung, um passend zum modularen Modellangebot der Hersteller für jedes Einsatzprofil die passende Batteriegröße auszuwählen. Nutzlasteinschränkungen für Fahrzeuge mit Batteriegrößen passend für den städtischen und regionalen Lieferverkehr sind aufgrund der aktuellen Ausnahmeregelung zur Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts nicht oder nur in geringem Umfang zu erwarten. Für einen Netzausbau und eine Erhöhung der Anschlussleistung sollten Logistiker sehr eng mit dem lokalen Netzanbieter zusammenarbeiten, da Kosten und Aufwand sehr stark von Rahmenbedingungen vor Ort abhängig sind.

Handlungsempfehlungen an die Politik: Förderung, Mautsystem und Regulierung

Die 80 % Mehrkostenförderung von klimafreundlichen Nutzfahrzeugen und deren Infrastruktur stellt einen entscheidenden Hebel für die Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw während des aktuellen Markthochlaufs dar. Zu betonen ist die Bedeutung von Ladeinfrastruktur an den Depots. Gleichzeitig sind zusätzliche Maßnahmen wie Ausgestaltung von Maut und CO₂-Abgabe auf fossile Kraftstoffe entscheidend zur Absicherung der Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Diesel – insbesondere im städtischen Lieferverkehr wo zusätzlich zu beachten ist, dass geringe Fahranteile auf aktuell mautpflichtigen Straßen stattfinden.

Angesichts der ermittelten hohen technischen und teilweise auch ökonomischen Machbarkeit elektrischer Lkw im städtischen und regionalen Lieferverkehr scheint eine baldige Einführung von emissionsfreien Zonen in großen Metropolen und deren Einzugsgebiet sinnvoll. Weiterhin erscheint nach den Ergebnissen dieser Studie das nach NECP geplante elektrische Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr bis 2030 als erreichbar. Dies setzt jedoch eine entsprechende Lieferbarkeit und Verfügbarkeit der Modelle voraus. Die Ankündigungen zu Marktanteilen und Verkaufszielen von Batterie-Lkw aller Truckhersteller sind zwar vielversprechend, allerdings muss aktuell noch mit sehr hohen Lieferzeiten gerechnet werden. Um die Marktdiffusion zu beschleunigen könnten einerseits die genannten Einfahrtsbeschränkungen dienen, um die Nachfrage weiter zu erhöhen. Gleichzeitig könnten verschärfte CO₂-Flottengrenzwerte sowie auch Elektrofahrzeugquoten (engl. *ZEV mandates*) dazu beitragen, das Angebot und die Lieferbarkeit von klimafreundlichen Nutzfahrzeugen zu erhöhen sowie die Fahrzeugkosten schneller zu senken.

Summary

Motivation and scope

Heavy-duty battery-electric trucks (BET) offer tremendous potential for reducing greenhouse gas emissions in transport. However, owing to the limited electric range and high acquisition costs, their techno-economic feasibility in logistics is still under discussion. Thus, this study aims to evaluate the technical feasibility and economic viability of BET above 12 t gross vehicle weight (GVW) for city and regional delivery under current conditions in Germany. Food retail logistics serves as a case study. Based on these findings, this study provides recommendations and knowledge for policy-makers and the industry.

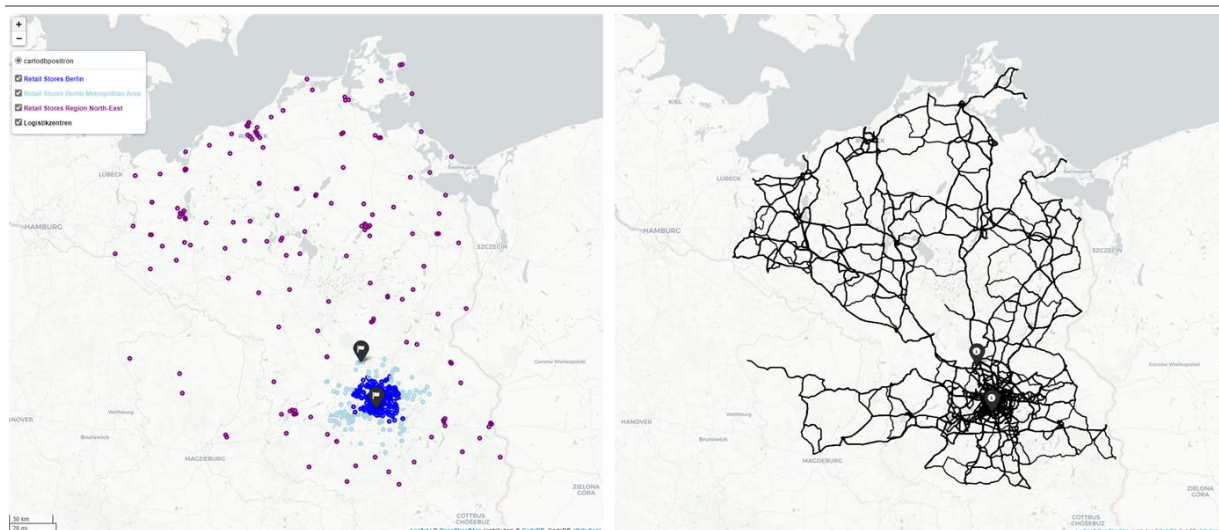
Data: 9,500 real tours to 543 retail stores by 224 trucks other one month period

This study utilizes real-world tour data from commercial tour scheduling software provided by the REWE Group for two depots in the northeast region of Germany. The smaller depot in Mariendorf is mainly used for city deliveries in Berlin and the metropolitan area. The larger depot in Oranienburg is additionally and predominantly used for regional deliveries to the entire northeast region. The tour data comprises all tours of February 2021 and provides information on, among others, chronological sequence, distance, and payload per tour and for each vehicle.

Our final data set includes 8,300 of the 9,500 total tours, with the difference filtered out as non-relevant. This covers 224 trucks and a total mileage of around 1 million km. Four different truck classes are distinguished. These are trucks with a GVW of 18 or 26 tons as solo refrigerated trucks and as truck-trailer combinations as well as tractor and refrigerated semitrailer combinations (48% of the total fleet). Solo trucks are primarily used for city logistics. Truck-trailer and tractor-trailer combinations are used in both city logistics and regional delivery. 162 of the 224 trucks are used in Oranienburg.

The northeast region comprises 543 retail stores in total. Figure 7 shows the depot locations and individual customer locations (left) as well as associated tours across the northeast region (right). Around 50% of customers are located in the Berlin zip code area (blue). Together with the metropolitan area of Berlin, this results in a local concentration of 70% (light blue). The remaining retail stores are spread across the northeast region (purple).

Figure 7: Summary - Northeast Region: Customers (Left) and Tours (Right)



Source: Own illustration with Leaflet | Data by © OpenStreetMap

Methodology: Defining the current techno-economic feasibility of BET

The technical feasibility involves an individual energy simulation for each truck and market research for currently and near-term available BET. The simulation uses a simplified mathematical-physical vehicle model to derive the specific energy consumption for each tour and accounts for additional energy requirements such as accessories or payload cooling. In total, this results in the theoretical yet specific energy demand for each truck. In addition, a possible intermediate depot charging within the depot premises - e.g., directly at the cargo terminals - is investigated to secure tours and extend vehicle coverage. Tour schedule is presumed to be exactly as of February 2021, without any potential from optimized tour scheduling or truck re-allocation. Plus, note that this study assumes that all tours of the respective truck must be feasible to confirm its technical feasibility in total. The average battery size for all trucks in the respective class is determined for each location by matching the theoretical necessary battery capacity and the available battery sizes. For convenience, a truck-specific battery choice is neglected.

The economic analysis compares the total cost of ownership (TCO) for BET versus diesel trucks over an eight-year service life and for truck acquisition in 2021. Apart from acquisition costs, truck resale, and operating costs, costs for charging infrastructure at the depots are included. Infrastructure costs for overnight charging are assessed per truck, while further charging infrastructure for intermediate depot charging is averaged over the entire potentially electrified truck fleet per depot. Current subsidies for climate-friendly commercial vehicles and the associated charging infrastructure are accounted. This study uses an equivalent CO₂ tax for diesel and the current German toll regulation rather than a CO₂-based toll charge as proposed by the Eurovignette Directive. In total, the cost-effectiveness of BET versus diesel trucks is determined individually for each truck.

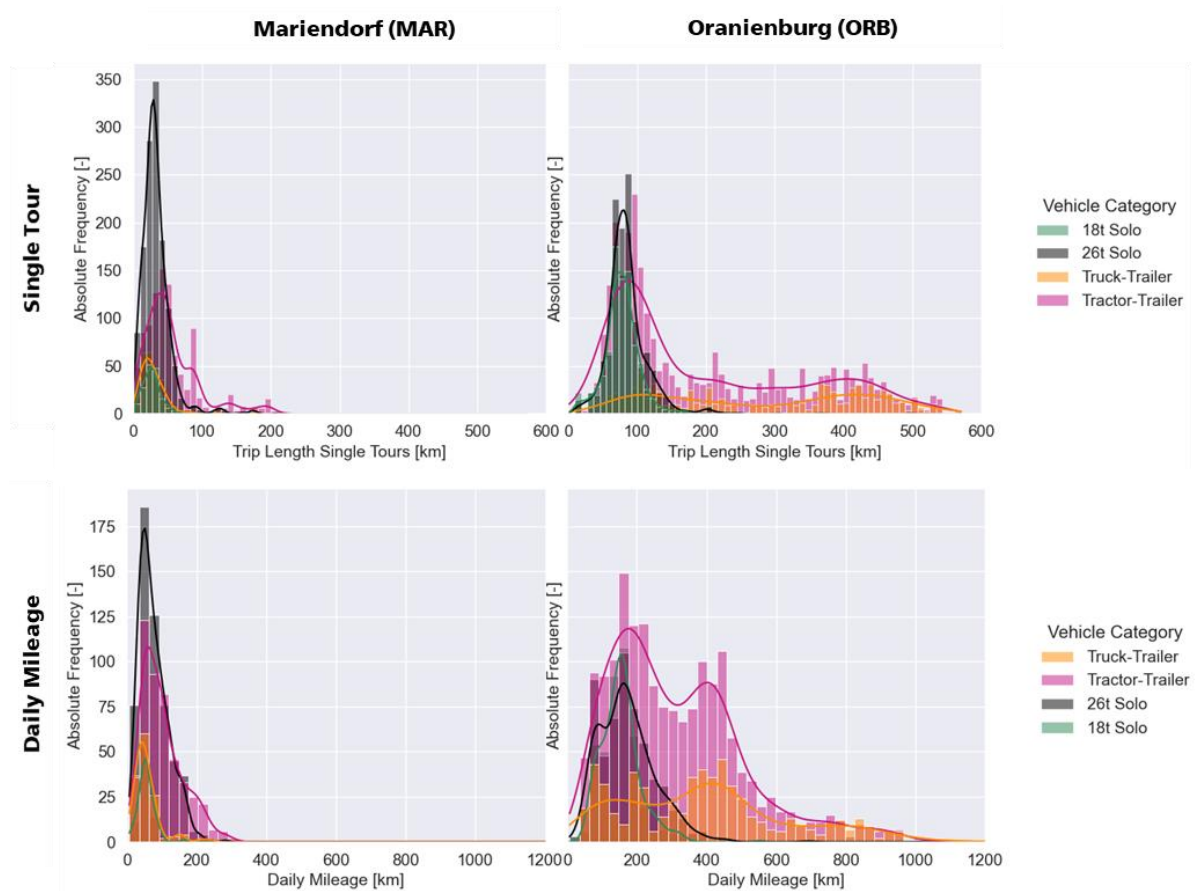
Daily mileages in city delivery generally less than 200 km and less than 500 km in regional delivery

Figure 8 shows the absolute number and estimated probability density distributions of single tours and daily mileage by truck class and depot location. The upper row shows single tours, the lower row daily mileage. The latter is composed of one to five individual tours per day and truck, whereas one and two tours per day are most common.

The analysis of **individual tours** shows that for city delivery from Mariendorf, almost all tours (99%) in all classes are under 200 km. Trucks from Oranienburg have higher overall mileages. Solo trucks are mainly used in Berlin and the metropolitan area. Accordingly, the share of tours under 200 km is 99%. Truck-trailer and tractor-semitrailer combinations are additionally and predominantly used to supply the entire northeast region. Around a quarter of all tours for the tractor-semitrailer and half of all tours for the truck-trailer are over 300 km. The longest single tour is 570 km for Oranienburg and 220 km for Mariendorf.

The analysis of **daily mileage** identifies a maximum of 320 km for Mariendorf and a high proportion (96%) with less than 200 km. In Oranienburg, this proportion is only 45 %. Similar to the individual tours, total mileage is higher. For solo trucks, the maximum daily mileage is around 400 km while a high proportion (85%) is already below 200 km per day. For truck-trailer and tractor-semitrailer combinations, only 54% (truck-trailer) and 36% (tractor-trailer) of daily mileage is under 300 km per day. For truck-trailers, about 20% of daily mileage is over 600 km per day. For tractor-trailers, this share is only 10%. In multi-shift operation, the maximum daily mileage is 1,280 km for Oranienburg.

Figure 8: Summary - Analysis of single tours and daily mileage



Source: Own illustration

Representativeness

Owing to highly varying truck applications and specifics per sector, industry, and even fleet company and due to only a few comprehensive truck datasets with sufficient observation periods available, it is difficult to assess the representativeness of this study compared to the entire German truck fleet. However, to better classify the data and generalize our findings, the following points are helpful:

- 1) By examining food retail logistics as part of the distribution logistics, this study covers up to a quarter of Germany's total road freight transport activity. Furthermore, this study covers about 15% of Germany's total area and about 9% of the total population, and the four truck classes cover about 87% of the German N3 truck stock.
- 2) The comparison to the KiD driving profiles (Wermuth et al. 2012) indicates a disproportionate share of annual mileage below 100,000 km in our data set, but overall a similar mileage distribution for tours from Oranienburg. Urban tours from Mariendorf are significantly shorter than the mean for all trucks of the same class.
- 3) Different Eurostat transport statistics suggest a similar distribution of transported payload across truck classes and a similar distribution of transport activity across different distance levels.

Overall, this study assesses urban and regional delivery as two essential parts of German road freight transport. Although a clear distinction and classification is not possible, we conclude that the Oranienburg depot, in particular, reflects urban and regional delivery traffic in Germany well. Plus, some findings may be applied to the whole road freight transport as well.

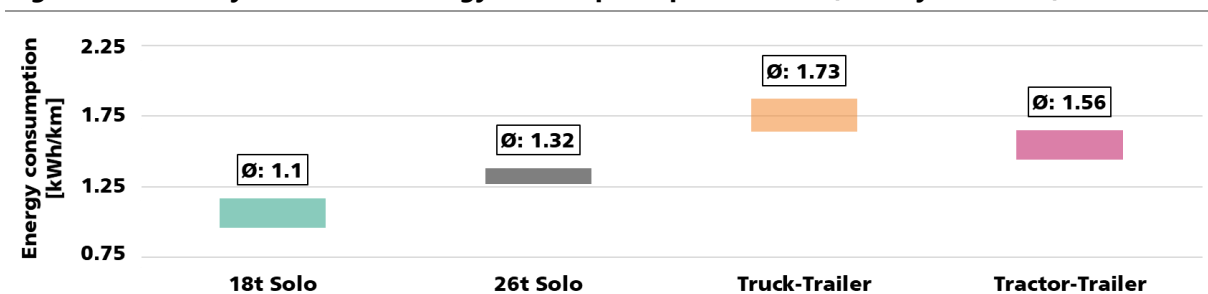
Market research: Variety of models from 250 to 550 kWh in series or pre-series production

The market research focuses on the 2021 to 2023 period and identifies a prevailing share within 250 to 400 kWh gross battery capacity for 18 t and 26 t solo trucks by major European truck manufacturers. For road tractors, this corridor ranges from 350 to 550 kWh. For all classes, initial announcements and near-market models with more than 600 kWh and up to 900 kWh battery capacity - a prerequisite for long-haul transport in the future - are already emerging. Plus, a modular system portfolio with different battery capacities for one model to fit individual customer requirements best is evident.

Vehicle simulation: Energy consumption from 1.1 to 1.7 kWh per km depending on truck class

Figure 9 shows the aggregated simulated energy consumption per segment as median with interquartile range (IQR) across all tours. Higher variation for tractor-trailer and truck-trailer combinations result, among others, from diverse operations in city and regional delivery. Overall, simulation results span from 1.1 kWh/km median for the 18 t solo truck, 1.32 kWh/km for the 26 t solo truck, 1.56 kWh/km for tractor-trailer, to 1.73 kWh/km for the truck-trailer combination. These results are consistent with other studies.

Figure 9: Summary - Simulated energy consumption per distance (battery-to-wheel)



Source: Own illustration

Technical feasibility: 58% of trucks and 25% of transport activity (ton-kilometers)

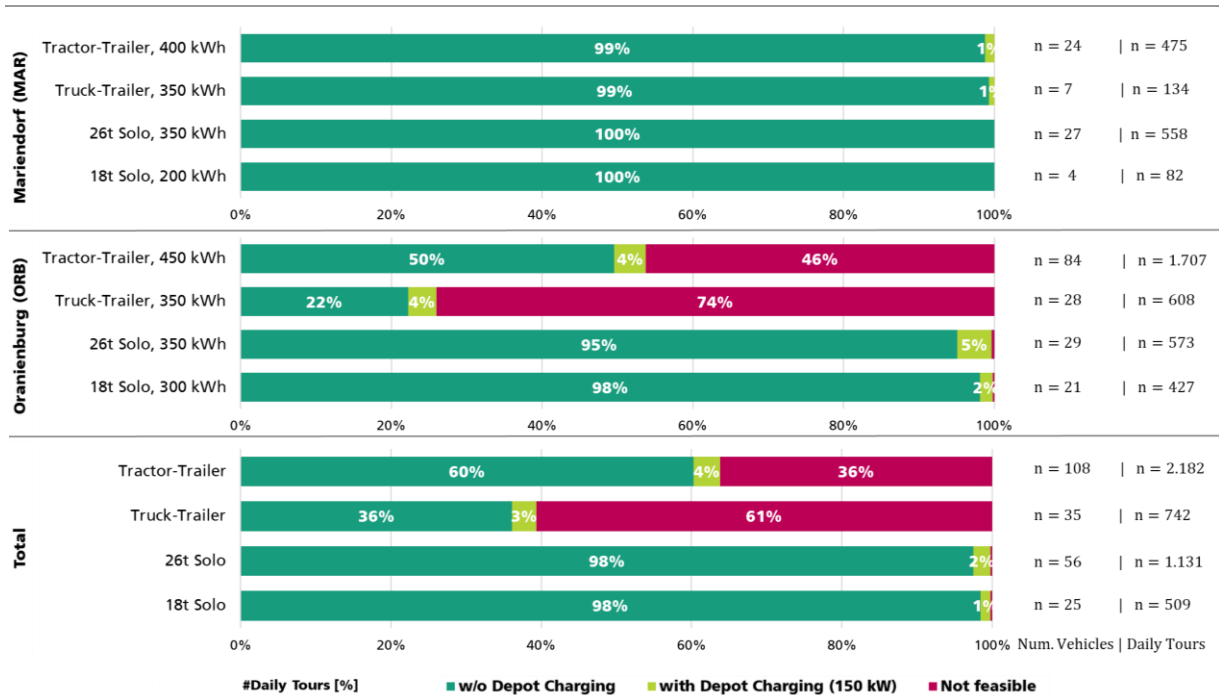
Figure 10 shows the technical feasibility as a proportion of daily trips per class and per location depending on the selected gross battery capacity.

For urban delivery in **Mariendorf**, 100% or 62 of 62 trucks can be electrified due to short single tours and daily mileage. Intermediate depot charging has a minor impact and safeguards a few daily tours.

For urban and regional delivery in **Oranienburg**, solo trucks and truck combinations operating in Berlin and the metropolitan area may be fully electrified as well. For the entire northeast region, technical feasibility is significantly lower for tractor-trailer and truck-trailer combinations as of today. Intermediate depot charging has a particular impact on this use case. However, individual non-feasible tours that are too long for a single battery charge limit this range-extending effect. Based on the truck allocation to individual tours, we deduce that 43% or 69 of 162 trucks in Oranienburg are technically feasible and, thus, replaced with BET.

This leads to technically feasible electrification of 58% or 131 of 224 trucks with currently available BET models for the **entire northeast truck fleet**. An allocation of tours to transport activity (ton-kilometers) - excluding any truck allocation - yields a technically feasible electrification of 32% without depot charging and 36% with depot charging. However, only 25% of the total transport activity may be electrified if this truck allocation is included. Note that there is no optimization, truck re-allocation, or adjusted tour schedule. Tours are presumed to be exactly as of February 2021.

Figure 10: Summary - Current technical feasibility



Source: Own illustration

Economic viability: Cost effectiveness of BET versus diesel trucks for 81% of all trucks

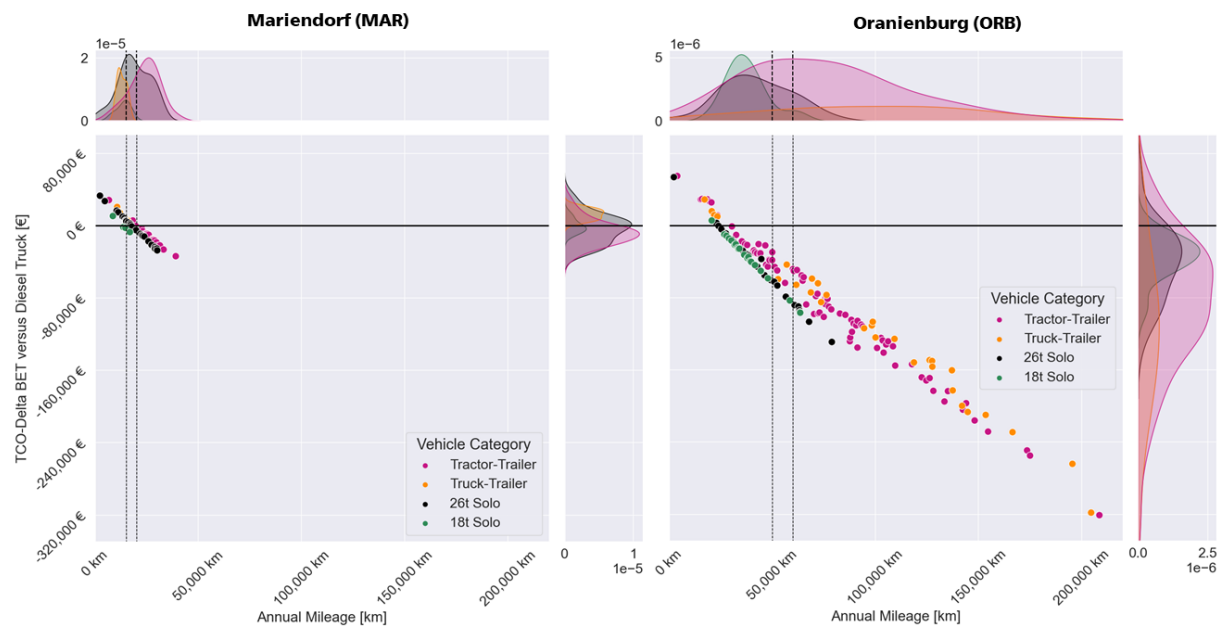
Figure 11 visualizes the TCO difference for BET versus diesel trucks for each truck by depot location and over annual mileage function. A negative cost difference means that a BET purchased in 2021 is more cost-effective than a diesel version. Annual mileage is extrapolated from monthly mileage. This results in an average annual mileage of around 18,000 km in Mariendorf and 60,000 km in Oranienburg. In addition, a mean annual mileage range according to REWE is included for both depots.

In **Oranienburg**, diesel trucks offer a current economic advantage for an annual mileage of less than 30,000 km across all segments. At higher mileages, lower operating and maintenance costs amortize higher purchase costs for BET. Overall, BET achieved a cost advantage in 90% or 147 of 162 of the trucks. Cost advantage cumulates to more than €10,000 over eight-year truck service life for 141 trucks, which implies a certain resilience. These are especially 18 t and 26 t solo trucks as well as the tractor-trailers. This economic analysis does not include any technical feasibility but only focuses on cost assessment based on the annual vehicle mileage.

In **Mariendorf**, higher acquisition costs amortize less frequently due to significantly lower mileage, even though infrastructure expenditures are lower as depot charging has minor relevance. For an annual mileage below 20,000 km, battery trucks achieve no or only a tiny cost advantage across all segments. In total, 58% or 36 out of 62 trucks achieve an advantage, with only 19 trucks showing a significant cost advantage of more than €10,000 over the eight-year truck service life. These are especially 26 t solo trucks and tractor-trailers. This economic analysis does not include any technical feasibility but only focuses on cost assessment based on the annual vehicle mileage.

For the **entire northeast truck fleet**, this implies economically attractive electrification of up to 82% or 183 of 224 trucks under the current subsidy for climate-friendly commercial vehicles. Note that is based on current vehicle purchase prices (2021) and current policy framework and excludes technical feasibility.

Figure 11: Summary – Current TCO difference



Source: Own illustration

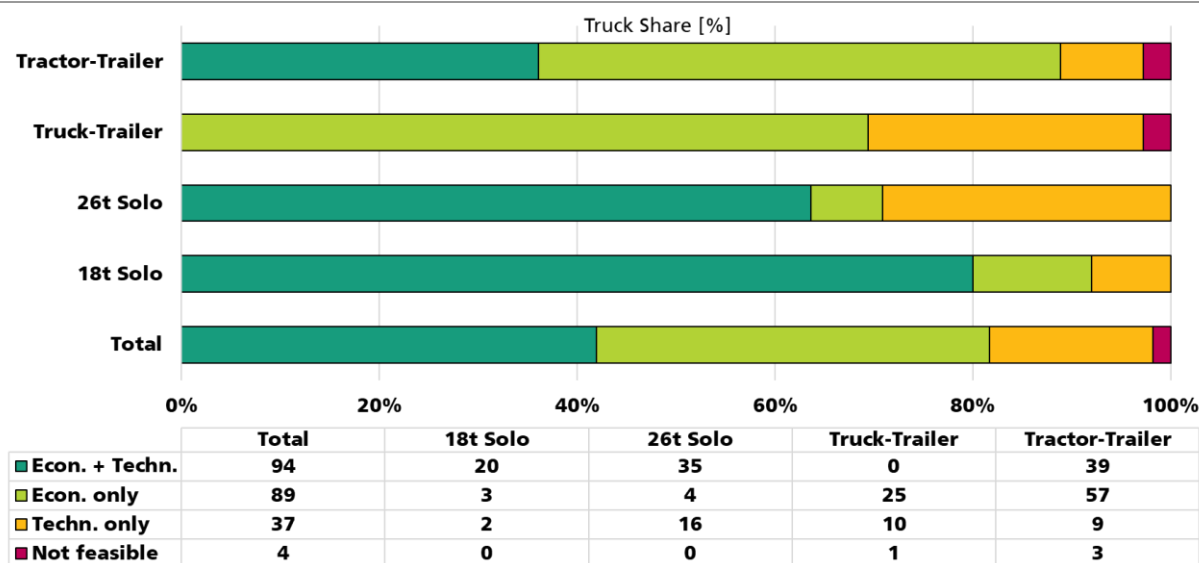
Techno-economic feasibility: 42% of the fleet and 21% of the transport activity (ton-kilometers)

The techno-economic feasibility crosses technical feasibility and economic viability per truck. Overall, a trade-off between technical feasibility and economic viability depending on annual mileage is evident. The cost advantage of BET increases with mileage, as lower operating costs amortize higher acquisition costs that remain even after current subsidy. However, the technical feasibility decreases with increased annual mileage as single or even daily tours - even with intermediate depot charging - cannot be completed i.e., electrified. Thus, the technical feasibility is often high for short trips and correspondingly low annual mileage, yet higher acquisition costs do not amortize.

Figure 12 visualizes the techno-economic electrification potential for the **entire northeast truck fleet** as the main result of this study. The bar chart reflects the relative shares per segment and is complemented by a summary in absolute figures. For the northeast region, a total of around 42% of the trucks (94 out of 224) may be electrified from a techno-economic perspective. An allocation to transport activity yields that only 21 % of the total transport activity may be electrified as of today.

In detail, techno-economic electrification potential in **Mariendorf** is 36 out of 62 trucks (58%) and in **Oranienburg** 58 out of 162 trucks (36%). This comprises 20 solo trucks of 18 t, 35 solo trucks of 26 t and 39 road tractors. This potential is significantly higher from an economic perspective, but the technical feasibility limits the potential due to excessive mileage. This share may be improved by optimized tour scheduling but is not investigated.

Figure 12: Summary - Techno-economic feasibility of BET for the entire truck fleet



Source: Own illustration

Discussion: Higher potential in city logistics and regional delivery in Germany seems reasonable

Tours and accompanying vehicle allocation are presumed to be exactly as of February 2021, without any optimization. Based on this, we simplify by assuming that all trips must be technically feasible to classify one truck as feasible in total. Thus, a few non-feasible tours have a high impact on our final result. Especially tour rescheduling or re-allocation between trucks may further improve technical feasibility. Intermediate charging at public charging stations or at selected retail stores may further increase technical feasibility.

Uncertainties for total costs of ownership arise from current acquisition costs, resale values, and energy prices. Our energy policy framework includes the current 80% subsidy for trucks and infrastructure and the CO₂-based levies. Initial truck subsidy and the operating cost benefit from the CO₂ levy have a high impact on the economic viability of BET. If future costs for battery trucks decrease, cost-effective operations will likely become feasible even with lower subsidies.

In total, our assumptions reflect the current regulatory framework and focus on series and pre-series truck models that are already available. As all tours of over 200 trucks are analyzed over one month, our results are likely robust and realistic for current city logistics and regional delivery.

Conclusion: City logistics can be fully electrified and significant proportions in regional delivery can be electrified. In total, over one-quarter of transport activity can be electrified within a few years.

Current BET are already sufficient to electrify significant parts of German road freight transport. In our case study, around 42% of the fleet can be electrified from a techno-economic perspective. This corresponds to 21% of the transport activity, whereas up to 36% seem possible from a technical perspective by tour rescheduling and re-allocating.

Recommendations for REWE: 58 of 224 trucks may be replaced by today

In our case study, up to 42% of the truck fleet (94 out of 224) can be electrified from a technical perspective and should be electrified from an economic perspective. This appears technically feasible and should reduce overall costs.

Summary

In the future, and apart from truck availability only, tour scheduling should integrate vehicle range and battery SoC when assigning subsequent tours to ease fleet electrification. Equipping cargo terminals with charging points could be a potential hurdle due to additional costs, space, and other limitations. Therefore, we recommend first electrifying trucks that do not rely on intermediate depot charging. For the Northeast region, this comprises 58 of the 224 trucks.

Recommendations for fleet owners and shippers: Start examining your transition to climate-friendly commercial vehicles

All logistics companies should already examine the transition to BET in city logistics and regional delivery today. The provision of depot infrastructure for overnight charging is crucial. Furthermore, an individualized vehicle analysis is recommended to select an appropriate battery size in line with the modular battery sizes offered by the manufacturers for each application and tour schedule. Payload restrictions for trucks with battery sizes suitable for city logistics and regional delivery are unlikely due to the current exemption for increasing the permissible GVW. Logistics companies should work closely with their local energy provider on grid network expansion, as costs and effort depend heavily on local conditions.

Policy recommendations: subsidies, toll system, and regulation

The 80% subsidy for zero-emission vehicles and their infrastructure is decisive for the economic viability of battery trucks during this early market phase. The importance of charging infrastructure at depots should be emphasized. At the same time, additional measures such as tolls and CO₂ taxes are crucial for securing the economic viability of battery-electric trucks compared to diesel - especially in city logistics.

In light of the identified technical feasibility and, in most cases, economic viability of BET for urban and regional delivery, an upcoming roll-out of zero-emission zones in large metropolitan areas seems reasonable. Furthermore, according to our results, one third of electrified road transport in 2030 according seems reachable though very ambitious. However, this requires corresponding model availability. Although the announcements on market shares and sales targets for battery trucks by all truck manufacturers are promising, current delivery times are extremely long and might even cause problems with the truck subsidy. To accelerate market diffusion, the aforementioned zero-emission zones may help to further increase customer demand for BET. Plus, stricter CO₂ fleet targets and zero-emission vehicle mandates may help to boost model offers and increase availability of climate-friendly commercial vehicles and, meanwhile, reduce vehicle costs more quickly.

1 Einleitung und Zielsetzung

Mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes gilt für das Jahr 2040 ein Minderungsziel von mindestens 88 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland ggü. 1990. In den 2030er Jahren sieht das Gesetz konkrete jährliche Minderungsziele für die verschiedenen Sektoren vor. Bis zum Jahr 2045 soll Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen.

Das höhere Ambitionsniveau bedeutet für den Verkehr, dass dessen CO₂-Emissionen von heute 146 Mio. t CO_{2äq} (UBA 2021) bis 2030 auf 85 Mio. t CO_{2äq} sinken müssen. In den letzten Jahren konnten jedoch kaum nennenswerte Senkungen der CO₂-Emissionen verzeichnet werden. Der Verkehrssektor steht damit vor einer großen Herausforderung. Hier sind schwere Nutzfahrzeuge über 3,5 t zGG für rund 35 % der verkehrsbedingten Emissionen verantwortlich, obwohl sie nur rund ein Zehntel des gesamten Fahrzeugbestands ausmachen (KBA 2021a). Gleichzeitig sind Strategien zur Verkehrsvermeidung und -Verlagerung angesichts eines steigenden Güterverkehrsaufkommens und weniger Massengüterverkehr begrenzt (Heidt et al. 2019). Die schnelle Dekarbonisierung schwerer Nutzfahrzeuge scheint damit für die Erreichung der nationalen Klimaziele unerlässlich.

Die Ankündigungen der Hersteller zu Verkaufszielen von Nullemissionsfahrzeugen (ZEV) sind vielversprechend und deuten ein Ende des Dieselmotors bis 2040 an (ACEA 2020). Nach T&E (2021b) lassen die angekündigten Verkaufsziele für das Jahr 2030 einen mittleren ZEV-Marktanteil von rund 43 % in Europa als realistisch und möglich erscheinen. Die Spanne reicht dabei von 20% bis 60% ZEV-Marktanteil. Obwohl verschiedene technische Optionen bestehen, profitieren batterie-elektrische Lkw (Batterie-Lkw) enorm von den technologischen Entwicklungen im Pkw-Segment und ihrer kurzfristigen kommerziellen Verfügbarkeit ab heute und in den nächsten Jahren (IEA 2021; NPM 2020).

Trotz der hohen Notwendigkeit und technischen Verfügbarkeit verläuft die Marktdiffusion von Batterie-Lkw aktuell schleppend. Einerseits stellen sich Spediteure und Flottenbetreiber angesichts mangelnder Reichweiten, möglicher Nutzlastverluste oder einer unzureichenden Ladeinfrastruktur zunehmend die Frage nach der technischen Machbarkeit von Batterie-Lkw für ihren individuellen Anwendungsfall. Andererseits herrscht angesichts nur geringer Margen und hohem Kostendruck ein Zweifel gegenüber dem nachhaltigen wirtschaftlichen Einsatz. Entsprechend stellen diese techno-ökonomischen Unsicherheiten eine erhebliche Hürde für die schnelle Marktdiffusion und damit für die Dekarbonisierung des Straßen-güterverkehrs dar.

Die vorliegende Studie bewertet daher die technische Ersetzbarkeit und die Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw für den deutschen Lieferverkehr aus heutiger Sicht. Als Fallbeispiel dient die urbane und regionale Distributionslogistik im Lebensmitteleinzelhandel. Auf Basis dieser Analysen sollen Handlungsempfehlungen ausgesprochen und Entscheidungswissen für Politik und Industrie sowie Spediteure und Flottenbetreiber gegeben werden.

Die Studie ist in vier weitere Kapitel unterteilt und gliedert sich wie folgt. *Kapitel 2* beschreibt die zugrundeliegenden Daten und Methodik. Hierzu zählt der Datensatz und dessen Aufbereitung (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die Marktrecherche (Abschnitt 2.2.1), die Energiesimulation (Abschnitt 2.2.2), die Ableitung der technischen Machbarkeit (Abschnitt 2.2.3) und die Wirtschaftlichkeitsberechnung (Abschnitt 2.2.4) im Methodik-Teil beschrieben. *Kapitel 3* umfasst die Ergebnisse der Studie. Dies beinhaltet die Fahrleistungen der Fahrzeuge sowie die Repräsentativität des Datensatzes (Abschnitt 3.1). Anschließend werden die Marktübersicht, der simulierte Energieverbrauch und das technische Ersetzungspotential (Abschnitt 3.2) sowie abschließend die Wirtschaftlichkeitsbewertung (Abschnitt 3.3) vorgestellt. Die Ergebnisse werden dann in der techno-ökonomischen Machbarkeit (Abschnitt 3.4) zusammengeführt. In *Kapitel 4* erfolgt eine kritische Diskussion ausgewählter Aspekte. In *Kapitel 5* wird die Studie zusammengefasst, Schlussfolgerungen gezogen sowie Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

2 Daten und Methodik

2.1 Touren und Fahrzeuge

Zur Durchführung der Studie hat die REWE Group einen Datensatz zur Touren- und Einsatzplanung aller Fahrzeuge für zwei Standorte in der Region Nord-Ost bereitgestellt. Der erste Standort ist in Mariendorf (MAR), ein südlich gelegener Ortsteil in Berlin. Dieser wird hauptsächlich für die Belieferung von Kunden in Berlin und im Berliner Umland genutzt. Der zweite Standort ist in Oranienburg (ORB), eine Stadt im Land Brandenburg und rund 30 km nördlich von Berlin. Von diesem Standort werden Berlin und das Berliner Umland aber auch die gesamte Region Nord-Ost beliefert.

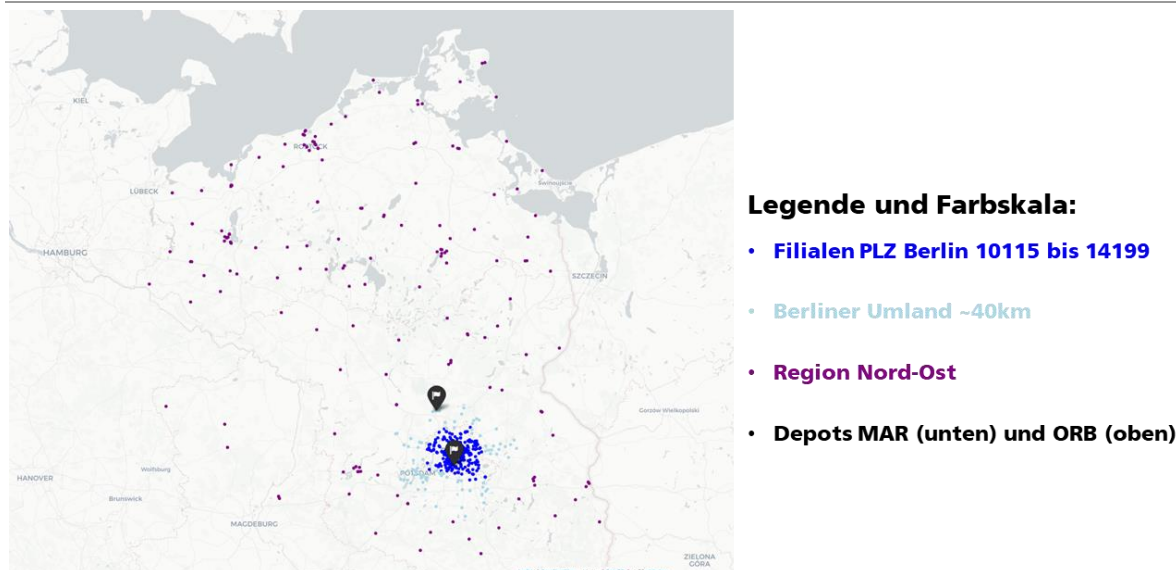
Der Datensatz enthält verschiedene Informationen zu jeder einzelnen Tour. Hierunter fallen Zeitstempel zur Identifikation von Fahrzeiten, Stopps an Kundenstandorten oder auch Standzeiten am Depot. Verschiedene Fahrzeuge sind mittels ID eindeutig zugeordnet. Zusätzlich werden die Fahrstrecke, die Beladung und der mautpflichtige Anteil je Strecke ausgewiesen. Eine Einzeltour versteht sich als Pendeltour und umfasst dabei den Start am jeweiligen Depot, eine beliebige Anzahl von Stopps bei Kunden im Verlauf der Tour und die Rückkehr zum Depot. Im Verlauf wird die frische Ware an den Kundenstandorten abgeliefert und leere Behälter oder auch Leergut aufgenommen. Weiterhin enthält der Datensatz Plan-Informationen sowie die real aufgetretenen Abweichungen (Ist-Informationen). Letztere werden nur zur Validierung genutzt. Die Studie selbst wird mit den Plan-Informationen durchgeführt.

Der Datensatz umfasst den gesamten Monat Februar 2021 und enthält insgesamt 9.416 Einzeltouren. Hiervon entfallen 6.356 Touren auf Oranienburg (68 %) und 3.060 Touren auf Mariendorf (32 %). Die Aufbereitung der Daten umfasst die Bereinigung von leeren Tourhülsen, Platzhaltern und nicht relevanten Fahrzeugen. Schlussendlich werden daher nur 8.281 Touren (88 %) für die Studie genutzt. Hiervon entfallen 5.596 Touren auf Oranienburg (68 %) und 2.685 Touren auf Mariendorf (32 %). Insgesamt können dabei 3.318 verschiedene Einzeltouren in Oranienburg (59 %) und 1.289 verschiedene Touren in Mariendorf (48 %) unterschieden werden. Die Differenz ergibt sich aus wiederkehrenden und somit identischen Einzeltouren je Standort. Die analysierte Fahrstrecke beläuft sich auf rund 1 Million Kilometer. Die berechnete Jahrestransportleistung liegt bei rund 0,13 Mrd. Tonnenkilometer.

Neben den Einzeltouren sind die Tagestouren der Fahrzeuge entscheidend. Letztere werden auf Basis der Zeitstempel und der Fahrzeug-IDs aus den jeweiligen Einzeltouren pro Tag gebildet. Anhand der Zuordnung ergeben sich somit 3.315 Tagestouren in Oranienburg und 1.249 Tagestouren in Mariendorf.

In der Region Nord-Ost werden insgesamt 543 Kunden aus den beiden Depots beliefert. Hierunter fallen REWE-Märkte sowie PENNY- und nahkauf-Märkte oder auch ARAL Shops. Abbildung 13 visualisiert die Region Nord-Ost, die beiden Depots und die einzelnen Kundenstandorte. Die Region umfasst insbesondere die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin. Rund 50 % oder 282 Kunden sind dabei im Postleitzahlbereich von Berlin lokalisiert (**Blau**). Mit der Erweiterung um das Berliner Umland - 40 km Umkreis um den Fernsehturm - ergibt sich eine lokale Konzentration von 70 % bzw. 379 Kundenstandorten (**Hellblau**). Die restlichen 30 % der Kundenstandorte verteilen sich über die Region Nord-Ost mit entsprechender Konzentration an regionalen Großstädten bzw. Einzugsgebieten wie Schwerin, Magdeburg, Rostock oder Neubrandenburg (**Violett**).

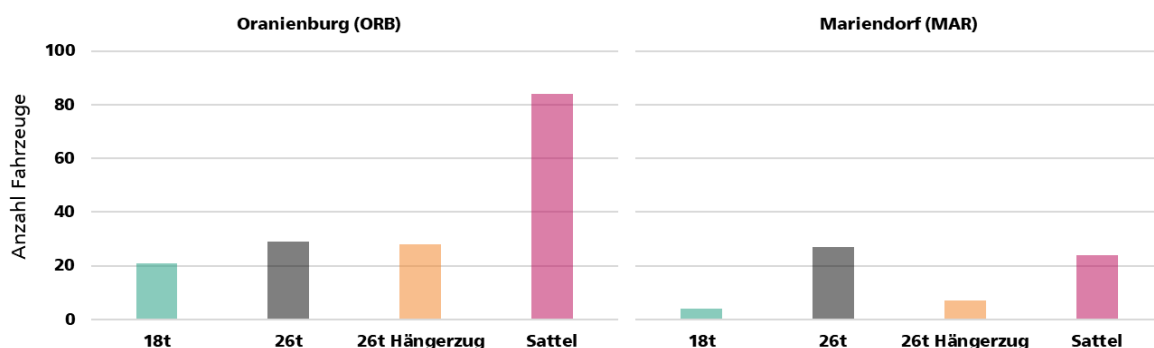
Abbildung 13: Standorte der Logistikzentren und Filialen



Quellen: Eigene Darstellung mit Leaflet | Data by © OpenStreetMap

Zur Belieferung werden 224 Lkw aus vier verschiedenen Segmenten der Fahrzeugklasse N3 (> 12t zGG) eingesetzt. Davon werden 62 Fahrzeuge in Mariendorf (28 %) und 162 Fahrzeuge in Oranienburg (72 %) genutzt. Dies umfasst neben REWE-eigenen Fahrzeugen auch Fahrzeuge von Auftragnehmern. Für die Studie erfolgt keine Unterscheidung zwischen eigener Flotte und Fremdfahrzeugen. Neben zweiachsigen Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 Tonnen (18 t) werden dreiachsige Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 25 bzw. 26 Tonnen (26 t) eingesetzt. Beide werden nachfolgenden als Solo-Lkw bezeichnet und lassen sich nach Einteilung des KBA der GK4¹ zuordnen. Die 26 t Solo-Lkw werden zusätzlich mit einem Anhänger als Fahrzeugkombination bzw. Lastzug verwendet (Hängerzug). Weiterhin werden Sattelzugmaschinen mit verschiedenen Aufliegern - Citysattel oder große dreiachsige Auflieger - verwendet. Alle Fahrzeuge bzw. Anhänger sind mit Aggregaten zur Kühlung (+4°C) der transportierten Ware und entsprechend isoliertem Aufbau ausgestattet. Tiefkühltransporte werden nicht betrachtet. Sattelzugmaschinen haben mit rund 48 % den größten Anteil an der Gesamtflotte. Dahinter folgen der 26t (25 %), der Hängerzug (16 %) und der 18t (11 %). Abbildung 14 zeigt die verschiedenen Anteile der Segmente sowie die Zuordnung auf die beiden Standorte.

Abbildung 14: Betrachtete Fahrzeuge



Quellen: Eigene Darstellung

¹ Einteilung des Kraftfahrtbundesamts (KBA) nach Gewichtsklassen (GK). GK4 umfasst Fahrzeuge zwischen 12,1 und 26t zGG.

Abbildung 15 visualisiert alle Touren in der Region Nord-Ost nach Segment sowie nach Standort. Alle Touren werden dabei mit Hilfe der Kundenstandorte und unter Verwendungen der HERE API² rekonstruiert. Für letzteres wird das Truck-Routing genutzt. Es zeigt sich einerseits die entsprechende Zuordnung der entweder überwiegenderen städtischen Touren (Mariendorf) oder städtischen und regionalen Touren (Oranienburg) auf die beiden Standorte. Andererseits zeigt sich der überwiegend geringe Einsatzradius bei den Solo-Lkw (18 t und 26 t) und das weitläufige Einsatzgebiet von Hängerzug und Sattelzug.

Abbildung 15: Visualisierung der Touren je Segment oder je Standort



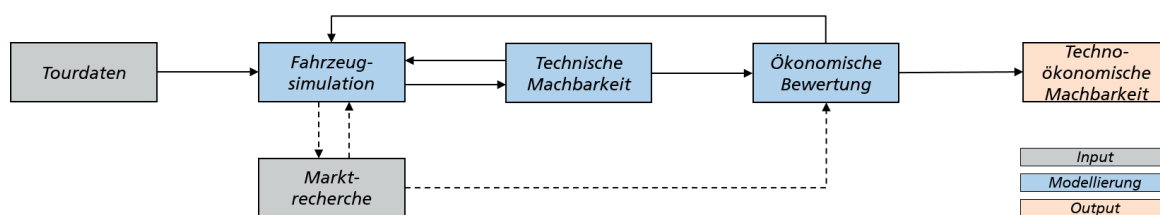
Quellen: Eigene Darstellung mit Leaflet | Data by © OpenStreetMap

² <https://developer.here.com/>

2.2 Methodik

Die Berechnung der techno-ökonomischen Machbarkeit enthält sechs wesentliche Schritte. Abbildung 16 visualisiert das Vorgehen. Im Kern steht das Zusammenspiel aus Energiesimulation, Analyse der technischen Machbarkeit und die Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Unter Verwendung der Tourdaten untersucht die Energiesimulation für jedes einzelne Fahrzeug, welche Kombinationen aus installierter Batteriekapazität und potentieller Leistung für das Zwischenladen am Depot notwendig wären, um alle Touren erfolgreich zu absolvieren. Durch die Gegenüberstellung der theoretisch notwendigen Bruttobatteriekapazität und der aktuell am Markt verfügbaren Brutto-Batteriekapazität wird die technische Machbarkeit für jedes einzelne Fahrzeug abgeleitet und somit auch die reale Umsetzbarkeit gewährleistet. Aufbauend auf der technischen Machbarkeit wird eine ökonomische Bewertung im Sinne der Gesamtnutzungskosten (Total Cost of Ownership - TCO) je Fahrzeug durchgeführt. Die Schnittmenge aus technischer Machbarkeit und ökonomischer Bewertung bildet das Gesamtergebnis dieser Studie. Dieses spiegelt das techno-ökonomische Ersetzungspotential von Batterie-Lkw gegenüber Dieselnutzfahrzeugen für den urbanen und regionalen Lieferverkehr aus heutiger Sicht wider.

Abbildung 16: Methodisches Vorgehen



Quellen: Eigene Darstellung

2.2.1 Marktrecherche E-Lkw

Die Marktrecherche nutzt öffentliche verfügbare Quellen, um eine Übersicht an verfügbaren und angekündigten Lkw-Modellen in den relevanten Gewichtsklassen zu erstellen. Der Fokus liegt auf heutigen Serienmodellen sowie seriennahen Modellen. Letztere sind bereits öffentlich vorgestellt sowie in Teilen vorbestellbar, werden jedoch noch nicht ausgeliefert. Damit fokussiert die Studie den Zeitraum von heute bis 2022/23. Die Anschaffung der Fahrzeuge soll für das Jahr 2021 betrachtet werden, wobei von etwaigen Lieferzeiten der Fahrzeuge abgesehen wird. Das Kernergebnis der Marktrecherche bilden die verfügbaren und angekündigten Brutto-Batteriekapazitäten. Sofern keine eindeutige Kennzeichnung als Nettogröße erfolgt, werden alle gefundenen Angaben als Bruttogrößen definiert.

Unter den genutzten Quellen - alle zum Stand Ende August 2021 - finden sich Newsletter, Fachportale, Herstellerankündigungen, Fachzeitschriften, oder auch wissenschaftliche Publikationen. Insbesondere wird auch das CALSTART ZETI Tool (Zero-Emission Technology Inventory - Version 5.9) genutzt (CALSTART 2020). Einzelne Quellen und weitere Links sind auf Anfrage erhältlich und nicht im Umfang dieser Studie enthalten.

Auf Wunsch der REWE Group liegt der Fokus auf großen europäischen Herstellern und deren Modelle, um Serientechnologie in hoher Stückzahl und inklusive flächendeckendem Service zu gewährleisten. Internationale angebotene Modelle sowie Modelle von Start-Ups und Umrüstern sind für eine umfassende Betrachtung des Status Quo und der nahen Zukunft dennoch abgebildet. Hierdurch kann einerseits eine höhere Vollständigkeit der Marktübersicht gewährleistet werden. Andererseits können so auch Modell-Entwicklungen antizipiert werden, die bei den großen europäischen Herstellern noch nicht angekündigt sind, jedoch aus technischer Sicht bereits möglich erscheinen.

2.2.2 Fahrzeug- und Energiesimulation

Ansatz

Die Fahrzeugsimulation nutzt ein vereinfachtes mathematisch-physikalisches Fahrzeugmodell nach Sripad et al. (2017), um die notwendige Brutto-Batteriekapazität abzuleiten. Dieser Ansatz berücksichtigt die Fahrzeuglängsdynamik und fasst die notwendige Energie zum Überwinden der Fahrwiderstände - Luftwiderstand, Rollreibung, Steigungswiderstand und Trägheitskräfte - mit Hilfe vereinfachender Annahmen und empirischer Erkenntnisse in einer Gleichung zusammen. Diese Gleichung ist in Eq. 1 dargestellt:

$$E_F = \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v_{rms}^3 + c_{rr} \cdot m \cdot g \cdot v + t_f \cdot m \cdot g \cdot v \cdot Z \right)}{\eta_{bw}} + \frac{1}{2} \cdot m \cdot a \cdot v \cdot \left(\frac{1}{\eta_{bw}} - \eta_{bw} \cdot \eta_{brk} \right) \right] \cdot \frac{D}{v} \quad (Eq. 1)$$

E_F repräsentiert die notwendige Netto-Batteriekapazität zum Überwinden aller Fahrwiderstände in kWh. ρ ist die Luftdichte. C_D ist der Luftwiderstandsbeiwert und A die Stirnfläche des Fahrzeugs. v_{rms} bezeichnet die mittlere quadratische Geschwindigkeit (engl. *root mean square* - RMS) und c_{rr} den Rollwiderstandskoeffizienten der Reifen. m bezeichnet die Gesamtmasse des Fahrzeugs und fasst das Leergewicht des Trucks, die Zuladung je Route und das mögliche Leergewicht des Anhängers bzw. Aufliegers zusammen. v ist die mittlere Geschwindigkeit über die Tour auf Basis von Fahrstrecke und Fahrzeit. g ist die Gravitationskonstante. t_f und Z repräsentieren in Kombination den Steigungswiderstand und sind empirische Näherungen. a bezeichnet die mittlere Beschleunigung über die Fahrstrecke. η_{bw} bezeichnet die Effizienz von der Batterie zum Rad und fasst Lade- bzw. Entladeverluste in der Batterie sowie die Verluste im Antriebsstrang zusammen. η_{brk} berücksichtigt zusätzliche Bremsverluste während der Rekuperation. D bezeichnet die Fahrstrecke je Tour.

In anderen Arbeiten wie Hildermeier et al. (2020) oder Mareev et al. (2018) sowie in digitalen Simulationstool zur Zertifizierung wie VECTO und GEM werden anstatt dieses vereinfachten Ansatzes oft detaillierte komponentenbasierte Fahrzeugmodelle verwendet. Diese erfordern jedoch entsprechende zeit- oder streckenbasierte Geschwindigkeitsprofile für jede einzelne Tour oder Nutzen entsprechende standardisierte Fahrzyklen als detaillierten Input. Der verwendete Datensatz mit den aggregierten Touren Daten aller Fahrzeuge bildet diesen Detaillierungsgrad jedoch nicht ab. Dennoch bietet das Modell die Möglichkeit, Parameter wie Fahrstrecke, Durchschnittsgeschwindigkeit oder Beladung je Lkw und je Einzeltour hinreichend detailliert abzubilden.

Ergänzend wird das Fahrzeugmodell aus Eq. 1 um weitere Verbraucher und Einschränkungen erweitert, um die in Summe notwendige Brutto-Batteriekapazität abzuleiten. Eq. 2 fasst die Formel zusammen:

$$E_{Total} = \frac{E_F + P_{Aux} \cdot t_{FZ} + P_{Cool} \cdot (t_{FZ} + t_{SZ}) + E_{SP}}{\eta_{Brutto}} \quad (Eq. 2)$$

Hierunter fällt der Energiebedarf durch Nebenverbraucher, welche anhand der mittleren Leistungsaufnahme P_{Aux} während der Fahrzeit t_{FZ} berechnet wird. Zusätzlich wird Energie für die Kühlung der transportierten Waren benötigt, welche anhand der durchschnittlichen Leistungsaufnahme der Kühlaggregate P_{Cool} während der Fahrzeit und zuzüglich der Standzeit t_{SZ} berechnet wird. E_{SP} repräsentiert einen distanzbasierten Sicherheitspuffer von 20 km. Zur Bestimmung der dafür notwendigen zusätzlichen Ka-

pazität wird der durchschnittliche Energiebedarf je Segment pro Kilometer herangezogen. η_{Brutto} bezeichnet das Verhältnis aus Brutto- versus Netto-Batteriekapazität auf Basis empirischer Daten aus dem Pkw-Segment. Entsprechend liegt die maximale Entladetiefe bei rund 90%. Die Alterung der Batterien - bis zu einem State-of-Health (SoH) zwischen 70 bis 80% - wird nachgelagert bei der technischen Machbarkeit und Auswahl der initialen Batteriekapazität antizipiert. Als Ergebnis ergibt sich die notwendige Brutto-Batteriekapazität für jeden einzelnen Lkw und dessen Einzel- bzw. Tagestouren. Im Gegensatz dazu werden für die Dieselfahrzeuge die REWE-internen Standardverbräuche je Segment und ohne Unterscheidung zwischen Einzeltouren angenommen.

Bestimmung der technischen Parameter

Nach Sripad et al. (2017) werden empirische Näherungen und zyklus-spezifische Durchschnittswerte verwendet, um den Umstand von fehlenden Informationen auf den Einzeltouren - wie einzelne Geschwindigkeitspunkte im Streckenverlauf - auszugleichen.

Die mittlere quadratische Geschwindigkeit, v_{rms} , wird auf Basis der mittleren Geschwindigkeit gemäß der Tourdaten und unter Verwendung des Steiner-König-Huygens-Theorems berechnet. Hierfür wird die Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit über alle Touren je Segment herangezogen. Zusätzlich wird - analog zu VECTO - eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3 m/s berücksichtigt. Für mittlere Geschwindigkeiten zwischen 50 und 70 km/h ergibt sich eine entsprechende Steigerung von v_{rms} gegenüber v von 15 bis 22 %.

Analog sind einzelne Beschleunigungswerte im Streckenverlauf unbekannt. Daher werden zyklus-spezifische Durchschnittswerte verwendet. NREL DriveCAT (2021) listet 18 verschiedene amerikanische Fahrzyklen für schwere Nutzfahrzeuge auf und ermöglicht basierend auf Kennzahlen einen umfassenden Vergleich. Urbane Fahrzyklen weisen dabei aufgrund von Stop-and-go-Verkehr, Ampeln oder mehr Stopps pro Fahrstrecke eine höhere Dynamik auf. Für Touren in Berlin und im Berliner Umland wird das 75 % Quantil über alle Fahrzyklen verwendet. Für regionale Touren dagegen das 25 % Quantil. Dies führt zu einer mittleren Beschleunigung von $0,16 \text{ m/s}^2$ für regionale und $0,33 \text{ m/s}^2$ für urbane Touren. Vergleichsweise liegt die zeitlich gemittelte absolute Beschleunigung im WLTP-Zyklus Klasse 1 bis Klasse 3 zwischen $0,17$ bis $0,35 \text{ m/s}^2$ und damit in einer ähnlichen Größenordnung.

Die Modellierung der Nebenverbraucher erfolgt anhand einer mittleren elektrischen Leistung je Segment und in Anlehnung an den Literaturvergleich nach Delgado et al. (2017). Dies umfasst die Fahrzeugpneumatik, die Fahrzeughydraulik wie insbesondere die Servopumpe für die Lenkung, Heizung und Klima sowie das Bordstromnetz. Demnach liegt die mittlere Leistung für eine 40 t Sattelzugmaschine bei 4,11 kW und für einen 12 t Fahrzeug bei 2,66 kW. Auf dieser Basis wird die mittlere Leistung für die in dieser Studie relevanten Fahrzeuge auf Basis des zulässigen Gesamtgewichts skaliert. Für einen 18 t Solo-Lkw ergibt dies 2,97 kW, 3,39 kW für einen 26 t Solo-Lkw und 4,31 kW für einen Hängerzug.

Der Energieverbrauch für die Kühlung der Ware wird durch eine Kühlleistungsabschätzung nach ATP/DIN 8959 modelliert. Die Berechnung nach ATP/DIN 8959 erlaubt es, die theoretische Kühlleistung zum Ausgleichen des äußeren Wärmeeintrags zu berechnen und nachzuvollziehen. Die Kühlleistung ist generell in hohem Maße abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Laderaum und Außentemperatur, dem Gesamt-Kühlvolumen, der Häufigkeit des Öffnens und Schließens sowie dem Betriebsmodus der Aggregate. Literaturwerte weisen hier entsprechend eine hohe Streuung auf und sind daher mit hoher Unsicherheit verbunden. Nach Delft (2015) liegen 80 % der gemessenen Werte zwischen 0,6 und 4,5 kW. Nach AK-Umwelt (2016) liegt die Last im elektrischen Kühlbetrieb via Drehstromanschluss bei 4 bis 12 kW. Für die Berechnung nach ATP/DIN 8959 wird ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ein Sicherheitsfaktor von 2 sowie die Faktoren C1 und C2 mit 1,5 und 1,3 verwendet. Diese beiden Faktoren erlauben es, den Betrieb im Verteilerverkehr inklusive des zusätzlichen Kühlbedarfs infolge des Luftaustausches bei Türöffnungen anzunähern. Das Gesamtkühlvolumen wird auf Basis von Standardaußenmaßen berechnet und liegt für eine Sattelzugmaschine mit großem Auflieger bei rund 89 m^3 , 50 m^3 für einen 18t oder 26t Solo-Lkw sowie 94 m^3 für einen Hängerzug. Als Temperaturdifferenz

werden 25°C angenommen. Angesichts der Kühlungen (+4°C) entspricht dies einer angenommenen Außen-temperatur von rund 30°C. Insgesamt liegt die so berechnete mittlere Kühlleistung für einen 18 t und 26 t Solo-Lkw bei 3,11 kW, für eine Sattelzugmaschine bei 5,13 kW und für einen Hängerzug bei 5,89 kW.

Tabelle 1 und Tabelle 2 listen die verwendeten Parameter für Eq. 1 und Eq. 2 auf und zeigen die verwendeten Werte sowie dazugehörige Referenzen.

Tabelle 1: Fahrzeugparameter für die Energiesimulation

Parameter	Einheit	18 t	26 t	Hängerzug	Sattelzug	Quelle
$C_D \cdot A$	[m ²]	5,55	5,56	6,63	5,69	[1]
C_{rr}	[N/kN]	5,5				[2]
m_{Truck}	[kg]	10.500	11.300	11.300	5.600	[2]
$m_{Trailer}$	[kg]			6.500	8.500	[2]
P_{Motor}	[kW]	250	300	300	330	[1]
η_{bw}	[%]	85 % (Batterie: 95 %, Antriebsstrang: 90 %)				[3]
η_{brk}	[%]	97 %				[3]
P_{Aux}	[kW]	2,97	3,39	4,32	4,11	[2]
P_{Cool}	[kW]	3,11	3,11	5,90	5,14	[2]
η_{Brutto}	[%]	92 %				[4]
f_{EOL}	[%]	70-80 %				[*]
$m_{ELAntrieb}$	[kg]	450				[5]
$\rho_{Batterie}$	[Wh/kg]	200 (Pack-Level)				[*]

Quellen: Eigene Darstellung | [1] Eigene Auswertung EEA (2021) Datensatz | [2] Eigene Berechnung | [3] nach Sripad et al. (2017) | [4] Jander et al. (2021) | [5] Mareev et al. (2018) | [*] Eigene Annahme

Tabelle 2: Zyklus-spezifische Durchschnittswerte und weitere Simulationsparameter

Parameter	Einheit	18 t	26 t	Hängerzug	Sattelzug	Quelle
a	[m/s ²]			Städtisch: 0,331 Regional: 0,160		[1]
σ_V	[m/s]	1,49	1,50	2,68	2,44	[1]
v_{wind}	[m/s]	3				[2]
g	[N/kg]	9,81				[-]
ρ	[kg/m ³]	1,2				[-]
$t_f \cdot Z$	[-]	0,000015				[3]

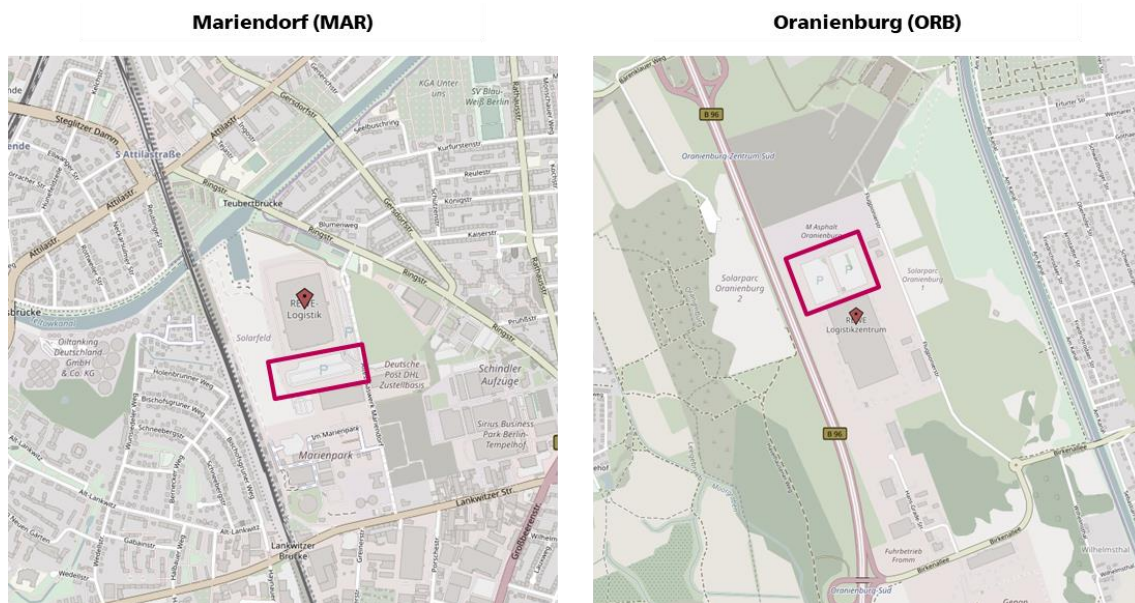
Quellen: Eigene Darstellung | [1] Eigene Berechnung | [2] VECTO Zertifizierungstool | [3] nach Sripad et al. 2017

2.2.3 Analyse der technischen Machbarkeit

Einführung

Die Analyse der technischen Machbarkeit umfasst das Zusammenspiel aus Energiesimulation, den Ergebnissen der Marktrecherche und der Option zum Zwischenladen der Batterie. Letzteres erlaubt es, die Tagesreichweite auch mit kleineren Batterien zu verlängern. Es ist wichtig zu beachten, dass das Zwischenladen in Abstimmung mit der REWE Group ausschließlich am Depot untersucht werden soll. Zwischenladen während der Entladung von Ware bei den Kunden oder auch öffentliches Zwischenladen an Parkplätzen entlang der Touren - bspw. im Rahmen der vorgeschriebenen Lenkzeitpausen - werden nicht betrachtet. Ersteres hat den Grund, dass viele der einzelnen Filialen dezentral organisiert sind und örtlich stark heterogene Voraussetzungen (Infrastruktur, Platz, Netz, ...) aufweisen. Abbildung 17 zeigt die beiden Depots sowie insbesondere den angebundenen Parkplatz, der als Wartebereiche und zum nächtlichen Parken dient. An diesem können die Lkw auch zukünftig über Nacht laden. Das Zwischenladen könnte ebenfalls dort oder innerhalb des Depots an umgerüsteten Warenschleusen sowie separaten Ladestationen stattfinden.

Abbildung 17: Karte der Depots zur Visualisierung von Ladeinfrastruktur-Optionen



Quellen: Eigene Darstellung unter Verwendung von OpenStreetMaps (OSM)

Methodik

Die technische Machbarkeit konzentriert sich auf Tagestouren und nutzt den Energieverbrauch der Fahrzeuge auf den jeweiligen Einzeltouren. Zwischen den einzelnen Pendeltouren kann der Ladevorgang stattfinden, insofern notwendig. Hierfür dockt der Lkw an den Ladepunkt an und lädt vereinfachend mit der entsprechenden Ladeleistung (Annahme: linearer Verlauf) während der Beladung mit Ware. Als Basis dient die Zeitangabe in der Tourenplanung für die neue Beladung der Fahrzeuge abzüglich eines Faktors zur Ermittlung der mit hoher Sicherheit zur Verfügung stehenden Netto-Ladezeit. Der Faktor wurde anhand eines Vergleichs von Plan-Informationen und Ist-Informationen abgeleitet und soll gleichzeitig den Zeitverlust während dem Anschließen abdecken. Dieser Faktor liegt bei 65 %. Wie viel Energie unter Berücksichtigung von Zeit und Ladeleistung nachgetankt werden kann, ist zusätzlich vom Ladezustand der Batterie (engl. State of Charge - SoC) nach der vorherigen Tour und der Maximalkapazität der Batterie abhängig.

2.2.4 Gesamtnutzungskosten

TCO Ansatz

Für die ökonomische Bewertung von Batterie-Lkw versus Diesel werden die Gesamtnutzungskosten (im Englischen Total Cost of Ownership – TCO) herangezogen. Die TCO umfassen alle Kosten, die für den Erwerb, die Nutzung und den Wiederverkauf des Lkw über dessen gesamte Haltedauer aufzubringen sind. Diese umfassende Vollkostenrechnung ist für einen adäquaten Vergleich erforderlich, da sich bspw. Anschaffungskosten und laufende Kosten von Batterie-Lkw und Diesel deutlich unterscheiden. Folglich ermöglicht eine TCO-Berechnung einen ganzheitlichen Kostenvergleich, um Endkunden einen transparenten Vergleich zu ermöglichen.

Für die formale Berechnung wird die Kapitalwertmethode verwendet, welche zwischen investitionsbedingten Ausgaben (CAPEX) inklusive kalkulatorischer Zinsen und den laufenden Betriebskosten (OPEX) unterscheidet. Durch die Diskontierung zukünftiger Zahlungen mit dem Zinssatz i ($i = 4\%$) wird der Barwert aller anfallenden Kosten über die Haltedauer bestimmt. Die Berechnung geht von einem Kauf der Fahrzeuge im Jahr 2021 und einer Haltedauer über acht Jahre aus. Eine Restwertbetrachtung und die Kosten für den privaten Ausbau von Ladeinfrastruktur an den Depots sind ebenfalls berücksichtigt. Eq. 3 zeigt die Berechnungsformel für den Batterie-Lkw. Die Berechnung für die Dieselfahrzeuge erfolgt analog. Die Berechnung wird spezifisch für jedes einzelne Fahrzeug und dessen Tourenprofil durchgeführt:

$$TCO = F_{CX} - \frac{RW_F}{(1+i)^t} + I_{CX} - \frac{RW_I}{(1+i)^t} + \frac{F_{CX} + RW_F + I_{CX} + RW_I}{2} * i + \sum_{t=1}^T \frac{(EP_t * EV * LV + WK + s_M * MK) * JFL + VK + KS + I_{OX}}{(1+i)^t} \quad (Eq. 3)$$

Die CAPEX setzen sich zusammen aus Anschaffungskosten, Restwert und kalkulatorischen Zinsen für Fahrzeug und Ladeinfrastruktur. Darin bezeichnen F_{CX} die Anschaffungskosten des Fahrzeugs, RW_F den Restwert der Fahrzeuge am Ende der Haltedauer, I_{CX} die Anschaffungskosten für Ladeinfrastruktur sowie RW_I die dazugehörigen Restwerte. Die variablen OPEX setzen sich aus Energiekosten, Wartungskosten WK und zu entrichtender Mautgebühren zusammen. Die Energiekosten ergeben sich aus den zu zahlenden Energiepreisen EP_t , welche im zeitlichen Verlauf variieren, und dem Energieverbrauch des Fahrzeugs EV . Beim Batterie-Lkw werden zusätzlich Ladeverluste LV berücksichtigt. Die Mautgebühren setzen sich zusammen aus dem Mautsatz je Fahrzeugkategorie MK und dem Anteil an mautpflichtiger Strecke gemäß Tourenplanung s_M . JFL bezeichnet die Jahresfahrleistung des Fahrzeugs. Die fixen OPEX pro Jahr setzen sich zusammen aus Kfz-Steuer KS , Versicherungskosten VK und Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur I_{OX} . Alle Kostenparameter werden im Verlauf des Kapitels eingeführt.

Als Ergebnis liegen die Gesamtkosten über acht Jahre Haltedauer je Fahrzeug und in Abhängigkeit eines Diesel- oder batterieelektrischen Antriebs vor. Entsprechend kann je Fahrzeug und dessen Tourenprofil das TCO-Delta zwischen Diesel und Batterie-Lkw ausgewiesen werden.

Rahmenbedingungen

Für die Gesamtnutzungskosten wird der Förderaufruf zur Förderung von klimaschonenden Nutzfahrzeugen und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur berücksichtigt (BMVI 2021a, 2021b). Dieser sieht für die vorliegenden Batterie-Lkw eine Förderung in Höhe von 80 % der Investitionsmehrausgaben gegenüber einem Dieselfahrzeug vor. Dies gilt pro Fahrzeug und bis zu einer insgesamt festgelegten Kapazitätsgrenze je Fahrzeug sowie einer Obergrenze je Förderaufruf in Summe. Für betriebsnotwendige Ladeinfrastruktur - an privaten Standorten und an Betriebshöfen - sind 80 % der zuwendungsfähigen

projektbezogenen Gesamtausgaben förderfähig. Dies umfasst die Errichtung der für den Betrieb notwendigen Normal- (≤ 22 kW) und Schnellladeeinrichtungen (> 22 kW) sowie weitere Kosten für Installation, Bau und Netzanschluss.

Anschaffungskosten der Lkw

Die Berechnung der aktuellen Anschaffungskosten für Diesel und Batterie-Lkw erfolgt auf Basis von literaturbasierten spezifischen Kostenparametern der wichtigsten Komponenten im Antriebsstrang. Hinzu kommt je Lkw-Segment ein entsprechendes Einheitschassis sowie ein entsprechender Trailer bzw. Anhänger. Alle Kosten gelten für eine Anschaffung in 2021 und berücksichtigen keine zukünftige Kostendegression.

Die spezifischen Komponentenkosten sind als Gesamtkosten definiert und das Ergebnis einer umfassenden Meta-Analyse nach Link et al. (2021). Die Gesamtkosten umfassen einerseits direkte Herstellkosten (engl. Direct Manufacturing Costs - DMC) und somit die direkt zurechenbaren Aufwendungen. Andererseits werden weitere Fertigungsgemeinkosten, indirekte Kosten wie für Vertrieb und Marketing, Verkaufsmargen sowie mögliche Risikoprämien ergänzt, um den Verkaufspreis zu erhalten (Meszler et al. 2018). Hier wird ein Faktor von 1,425 für alle Komponenten verwendet. Für den verbrennungsmotorischen Antriebsstrang werden Motor und Getriebe, der Tank und die Abgasnachbehandlung berücksichtigt. Im elektrischen Antriebsstrang werden die HV-Batterie, die Elektromotoren sowie die Leistungselektronik und das HV-System als Komponenten definiert. Tabelle 3 listet die spezifischen Kostenparameter der Lkw-Komponenten auf. Die späteren Anschaffungskosten der Batterie-Lkw ergeben sich somit in Abhängigkeit der Antriebsleistung und der Brutto-Batteriekapazität.

Tabelle 3: Spezifische Kostenparameter (DMC)

Gesamtkostenparameter (gerundet, zuzüglich Faktor 1,425). Alle Angaben als Realpreis €₂₀₂₀

Komponente	Einheit	Wert	Quelle
Motor + Getriebe	[€/kW]	71,0	[1]
Dieseltank	[€/L]	2,0	[1]
Abgasnachbehandlung	[€/kW]	19,8	[1]
Batterie	[€/kWh]	261,0	[1]
Elektromotor	[€/kW]	19,8	[1]
LE und HV-System	[€/kW]	29,0	[1]

Quelle: Eigene Darstellung | [1] Link et al. (2021)

Die Kosten für das Einheitschassis werden auf Basis von verschiedenen Online-Vergleichsportalen wie mobile.de und truckscout24.de, den oben aufgeführten Kostenparametern und literaturbasierten Abschätzungen für Sattelzugmaschinen wie Boer et al. (2013) abgeleitet. Für das Chassis einer Sattelzugmaschine liegen die abgeleiteten Kosten bei 58.000 €, für einen 18 t Solo-Lkw bei 105.000 € und für den 26 t Solo-Lkw bei 115.000 €. Für die beiden letztgenannten Fahrzeuge ist der Kühlaufbau bereits berücksichtigt.

Der zusätzliche Kühlaufleger bzw. -Anhänger werden ebenfalls auf Basis von verschiedenen Online-Vergleichsportalen wie mobile.de und truckscout24.de abgeleitet. Ein Kühlaufleger für eine Sattelzugmaschine liegt demnach bei rund 79.000€, der Anhänger für den Hängerzug bei 45.000 €.

Betriebskosten der Lkw

Für die Betriebskosten stellt die REWE Group die internen Verrechnungssätze für die aktuellen Dieselfahrzeuge zur Verfügung. Dies umfasst Wartungssätze, Versicherungskosten und den Dieserverbrauch

je Segment. Der durchschnittliche Strompreis wird auf 18 ct pro kWh beziffert. Die Haltedauer der Fahrzeuge beträgt mindestens acht Jahre.

Für die Jahresfahrleistung wird die Monatsfahrleistung auf ein Jahr hochgerechnet und als konstant über die Haltedauer angenommen. Von einer sinkenden Jahresfahrleistung mit steigendem Fahrzeugalter - wie bspw. erkennbar in KBA (2021b) - wird damit abgesehen. Zusätzlich gibt REWE eine mittlere Jahresfahrleistung von 15.000 bis 20.000 km in Mariendorf und 50.000 bis 60.000 km in Oranienburg an. Neben der bereits genannten Berechnung der TCO spezifisch für jedes einzelne Fahrzeug, wird die mittlere Fahrleistung gesondert untersucht.

Die Annahmen zur variablen Entwicklung von Diesel- und Strompreis werden gemäß der Langfristszenarien III (TN-Strom Szenario) des BMWi übernommen (Sensfuß et al. 2021). Demnach steigt der reale Dieselpreis von 1,25 €₂₀₂₀ pro Liter im Jahr 2021 auf 1,87 €₂₀₂₀ pro Liter im Jahr 2030, beides inklusive Mehrwertsteuer und entsprechend ohne Berücksichtigung der Inflation. Der Anstieg ist unter anderem auf einen Anstieg der CO₂-Abgabe auf 200 €/t CO₂ in 2030 zurückzuführen bei gleichzeitig nur moderat unterstelltem Rückgang des Ölpreises. Ansonsten werden das aktuell gültige Umlagen- und Besteuerungssystem inkl. der derzeit gültigen Dieselbesteuerung berücksichtigt. Der reale Strompreis startet bei 18 ct₂₀₂₀ pro kWh im Jahr 2021 gemäß der REWE-internen Angaben, steigt dann bis 2025 an (18,15 ct₂₀₂₀ pro kWh) und sinkt anschließend bis 2030 auf 17,63 ct₂₀₂₀ pro kWh. Das langfristige Absinken ist auf ein Auslaufen der EEG-Umlage zurückzuführen. Tabelle 4 fasst die Diesel- und Strompreise zusammen.

Tabelle 4: Energiekosten

Angaben als Realpreis €₂₀₂₀. Beachtung Dieselpreis inkl. MwSt.

Parameter	Einheit	2021	2025	2030
Dieselpreis	€ ₂₀₂₀ pro Liter	1,25	1,56	1,87
Stromkosten	ct ₂₀₂₀ pro kWh	18	18,15	17,63

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Berechnung der Mautabgaben werden das aktuelle Abgabensystem sowie die Befreiung von Batterie-Lkw bis einschließlich 2025 berücksichtigt. Die Einführung einer CO₂-Maut ab voraussichtlich 2023 im Sinne der Eurovignetten-Richtlinie wird nicht modelliert, da die konkrete Ausgestaltung zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bekannt ist. Eine Doppelbesteuerung mit der CO₂-Abgabe auf den Diesel soll nach aktuellem Stand jedoch vermieden werden. Weiterhin soll die Lenkungswirkung beider Maßnahmen einen vergleichbaren Effekt erzielen. Daher wird in dieser Studie auf den CO₂-Preis im Diesel zurückgegriffen. Der Effekt einer CO₂-Mautabgabe wird jedoch im Rahmen einer Szenario-Berechnung untersucht. Für die Dieselfahrzeuge werden die aktuellen Mautsätze - 0,173 €/km für 18 t Solo-Lkw und 0,187 €/km für die anderen Segmente - verwendet und als konstant angenommen (TC 2021)³. Vereinfachend werden ab 2026 der volle Mautteilsatz für Infrastrukturkosten für Batterie-Lkw veranschlagt, womit eine entsprechende geringe anteilige Abgabe (50 bis 75% im Vergleich zum Diesel) nicht berücksichtigt wird. Der Anteil an mautpflichtiger Strecke wird der Tourenplanung je Fahrzeug entnommen und analog zur Jahresfahrleistung auf das Jahr hochgerechnet.

Für die Berechnung der Kfz-Steuer wird das aktuell gültige Kalkulationsschema, inklusive einer Steuerbefreiung für Kraftfahrzeuge mit alternativen Antrieben, genutzt. Die Befreiung ist über die gesamte Haltedauer der Fahrzeuge gültig. Für konventionelle Fahrzeuge ist eine Abgabe in Höhe von 556 € pro Jahr fällig. Für den Auflieger und Anhänger sind weitere 373 € pro Jahr zu entrichten. Letztere ist unabhängig vom Zugfahrzeug und daher auch für Fahrzeuge mit alternativem Antrieb zu entrichten (BMF 2021).

³ Die Absenkung der Infrastrukturabgabe um 0,5 ct/km mit den neuen Tarifen seit 01.10.2021 ist nicht berücksichtigt. Gegenüber mittleren Kraftstoffkosten von 45 ct/km (30 L/100km bei 1,5€/L) liegt der Effekt der Absenkung bei rund 1% und damit sehr gering sowie im Rahmen der allgemeinen Unsicherheit gegenüber zukünftigen Kosten- und Preisentwicklungen. Weiterhin wären Batterie-Lkw und Diesel-Lkw betroffen.

Die jährlichen Versicherungskosten in Höhe von rund 4.500 € je Fahrzeug mit Dieselmotor werden analog auch für die Batterie-Lkw angesetzt. Dieses Vorgehen ist in vielen Studien üblich – bspw. Jöhrens et al. (2018). Von höheren Versicherungsprämien für den Batterie-Lkw aufgrund des höheren Fahrzeugwertes wird an dieser Stelle abgesehen. Eine Übertragung der relativen Versicherungsprämie, d.h. Versicherungskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten, könnte hier dienlich sein. Andererseits zeigen Erfahrungen aus dem Pkw, dass Fahrzeuge mit alternativen Antrieben bessere relative Prämien aufweisen und entsprechend niedriger eingestuft sind (Jander et al. 2021). Gleichzeitig senkt die 80 % Mehrkostenförderung auf absehbare Zeit den zu zahlenden Betrag im Schadensfall im Sinne eines Wiederbeschaffungswertes und damit auch das Risiko für die Versicherung.

Die Wartungskosten liegen bei 7 Cent je km für alle Diesel-Lkw. Für den Batterie-Lkw werden nach Wietschel et al. (2017) nur 85 % d.h. 5,95 Cent je km angesetzt. Studien im Pkw-Bereich liegen zwischen 50 % (Kasten et al. 2018) und 81 % (Propfe et al. 2012). In Florian Hacker et al. (2015) werden 80 % für Lkw angenommen. Die amerikanische Studie Burnham et al. (2021) geht für mittelschwere Nutzfahrzeuge von einer Spannweite zwischen 41 bis 79 % aus und liegt im Mittel bei 60 %. Boer et al. (2013) gehen von 67 % für Sattelzugmaschinen aus. Vor diesem Hintergrund sind die für diese Studie gewählten 85 % als eher konservativ einzustufen. Gleichzeitig kann festgehalten werden, dass die hier verwendeten Wartungskosten im Vergleich zu anderen Studien sehr niedrig liegen.

Zusammenfassend enthält Tabelle 5 die gewählten Betriebskostenparameter für Dieselfahrzeuge.

Tabelle 5: Betriebskostenparameter für Dieselfahrzeuge

Kostenparameter für Dieselfahrzeuge. Angaben als Realpreis €2020 oder Nominalpreis €

Parameter	Einheit	18t	26t	Hängerzug	Sattelzug	Quelle
Haltedauer	[a]	8	8	8	8	[1]
Dieselvebrauch	[L/100km]	28,74	29,47	33,36	31,21	[1]
Wartungskosten	[€ ₂₀₂₀ /km]	0,07	0,07	0,007	0,07	[1]
Versicherung	[€ ₂₀₂₀ /a]	4.500	4.500	4.500	4.500	[1]
Mautsatz	[€/km]	0,173	0,187	0,187	0,187	[2]
Kfz-Steuer	[€/a]	556	556	929	929	[3]

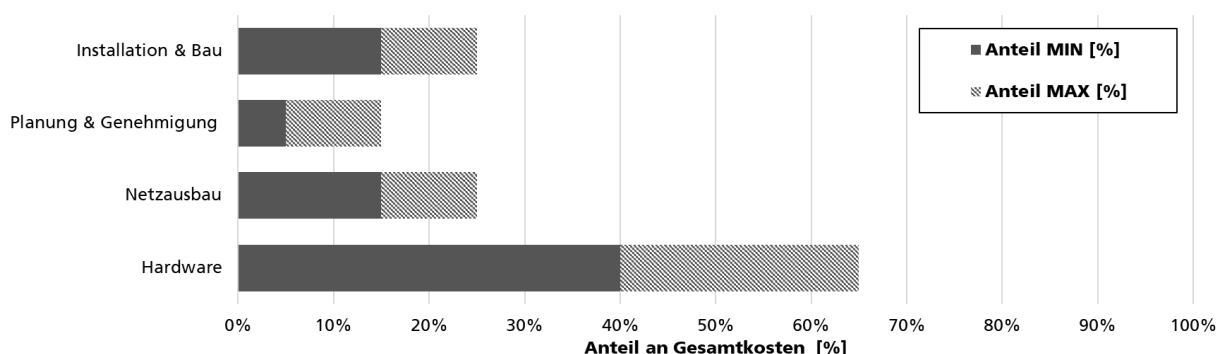
Quelle: Eigene Darstellung | [1] REWE Angaben | [2] TC (2021) | [3] BMF (2021)

Ladeinfrastrukturkosten für Batterie-Lkw am Depot

Die Anschaffungskosten pro Ladepunkt werden anhand einer Metaanalyse verschiedener Studien und wissenschaftlicher Arbeiten bestimmt, da die Spannweite der Literaturangaben sehr hoch liegt. Einschränkung muss erwähnt werden, dass zum Zeitpunkt der Berechnungen noch keine realen Kostenabschätzungen von Ladesäulenanbieter und lokalen Netzbetreibern vorlagen. Die Kosten werden für DC-Schnelllader mit einer Anschlussleistung von 50, 150 und 350 kW bestimmt.

Die Kosten für die Anschaffung und die Errichtung der Ladepunkte werden typischerweise in Kosten für die Hardware, Netzanschluss sowie Ausbau und Arbeiten am Transformator, Planung und Genehmigung sowie Installation und Bau gegliedert. Es ist zu beachten, dass die Kostenbestandteile sehr stark von örtlichen Gegebenheiten und der Leistung der Ladestation abhängig sind. Eine Verallgemeinerung ist daher schwierig. Zusätzlich sollten individuelle Skalierungseffekte sowie Rabatte beim Errichten von einem Ladepunkt versus einer Vielzahl an Ladepunkten berücksichtigt werden. Abbildung 18 zeigt ein Ergebnis des Studienvergleichs am Beispiel des 50 kW DC-Schnellladers und ordnet den einzelnen Kostenposten einen relativen Anteil an den Gesamtkosten zu. Die eigentliche Hardware liegt bei einem Anteil von 40 bis 60 %, Kosten für Netzausbau bei 15 bis 25 %, Planungskosten bei rund 10 % sowie Kosten für Installation und Bau bei 15 bis 35 %.

Abbildung 18: Relative Kostenbestandteile am Beispiel 50 kW DC-Schnelllader



Quellen: Eigene Darstellung nach VW (2018), Maur et al. (2020), Nelder et al. (2020), Deloitte (2018) und NPM (2015)

Tabelle 6 zeigt nachfolgend das Ergebnis des Literaturvergleichs für die Gesamtkosten in Abhängigkeit der Ladeleistung. Insofern keine Angabe zu den Gesamtkosten erfolgt, werden ausschließlich die Hardwarekosten aufgeführt. Je höher die Anschlussleistung, desto höher zeigt sich die Unsicherheit. Für die 50 kW DC-Schnelllader zeigt der Vergleich eine Spannweite der Gesamtkosten von rund 25.000 € bis über 60.000 € pro Ladepunkte. Für die 150 kW DC-Schnelllader liegt die Spannweite zwischen 60.000 € bis über 100.000 € pro Ladepunkte. Für die 350 kW DC-Schnelllader liegen die Gesamtkosten tendenziell über 150.000 € und bis zu 250.000 € pro Ladepunkt.

Tabelle 6: Kosten Ladeinfrastruktur pro Ladepunkt

Name / Quelle	Typ	50 kW	150 kW	350 kW
NPM (2015)	Gesamtkosten	25.000 €	-	-
Mareev et al. (2018)	Hardware	21.200 €	-	-
VW (2018)	Gesamtkosten	> 36.000 €	< 115.000 €	-
Deloitte (2018)	Gesamtkosten	25.000 €	-	-
Funke (2018)	Gesamtkosten	41.200 €	64.000 €	-
Nicholas et al. (2018)	Hardware	24.000 €	-	120.000 €
Schwarzer (2018)	Hardware	-	80.000 €	-
Bünger et al. (2019)	Gesamtkosten	52.500 €	-	160.000 €
Hall et al. (2019)	Hardware	21.000 €	-	190.000 €
Nelder et al. (2020)	Gesamtkosten	45.000 - 75.000 €	93.500 - 129.500 €	145.000 - 186.000 €
Maur et al. (2020)	Gesamtkosten	25.000 - 40.000 €	62.250 - 81.250 €	-
NPM (2020)	Gesamtkosten	41.900 €	79.100 €	223.000 €
Burgers et al. (2021)	Gesamtkosten	45.000 €	65.000 €	150.000 €
ABB Terra 54 DC	Hardware	25.500 €	-	-
Hypercharger 50/150	Hardware	30.000 €	45.000 €	-

Quelle: Eigene Darstellung

Für eine konsistente Übernahme werden die CAPEX gemäß NPM (2020) für das Installationsjahr 2021 übernommen. Die Größenordnung liegt im mittleren bis oberen Bereich gegenüber den identifizierten Spannweiten. Von Skaleneffekten, Rabattierung und Kostendegressionen bei mehreren Ladepunkten wird abgesehen. Nach Aussagen des Netzbetreibers sind insbesondere in Mariendorf sehr gute lokale

Voraussetzungen für die Elektrifizierung gegeben, weshalb mit deutlich geringeren Kosten zu rechnen wäre. In Summe sind die angenommenen Kosten für Ladeinfrastruktur als eher konservativ einzuordnen.

Die Betriebskosten (OPEX) der Ladeinfrastruktur umfassen typischerweise den Service, Ersatzteile, Back-End, eine halbjährliche Wartung vor Ort und die Verwaltung der Ladesäulen. Zusätzlich sind Kosten für den Bezahlendienstleistung zu bedenken sowie eine eichrechtliche Prüfung alle acht Jahre. Ähnlich zu den CAPEX findet sich auch bei den OPEX eine hohe Streuung oder es wird keine Aussage zu den Betriebskosten getätigt. In Burgers et al. (2021) werden die mittleren Betriebskosten mit 1 % der Anschaffungskosten angegeben, wobei die Spannweite zwischen 0,6 % und 2 % liegt. In VW (2018) liegt der Anteil bei rund 2 %. In Bünger et al. (2019) werden rund 1,4 % für einen 50 kW Ladepunkt genannt. In Deloitte (2018) werden rund 6 % aufgeführt. Nach Rücksprache in der Projektgruppe werden für diese Studie die Betriebskosten der Ladeinfrastruktur mit 3 % veranschlagt.

Weitere Annahmen betreffen die Lebensdauer und die Verfügbarkeit der Ladesäulen. Nach Mareev et al. (2018) wird eine Lebensdauer der Ladesäulen von 12 Jahren angenommen und die Abschreibung erfolgt linear ohne Restwert. Für die Verfügbarkeit der Ladesäulen werden nach Rücksprache in der Projektgruppe 95 % angenommen. Dies führt zu einer entsprechenden Vorhaltung von Reservestationen. Deren Kosten werden anteilig auf die Fahrzeugflotte umgerechnet. Zuletzt wird vereinfachend angenommen, dass jedes Fahrzeug, das Depot-Zwischenladen benötigt, eine eigne Schnellladesäule bekommt. Auf eine mögliche sequentielle Nutzung und Planbelegung der Ladepunkte wird damit verzichtet und die Kosten für Ladeinfrastruktur steigen entsprechend stark an. Dies stellt eine großzügige und sehr konservative Annahme dar.

Restwertentwicklung der Lkw

Die Berechnung der Restwerte erfolgt in Anlehnung an Kleiner et al. (2017) und unter der Annahme einer gleichen relativen Restwertentwicklung für Batterie-Lkw wie konventionelle Fahrzeuge. Dabei wird zwischen den Restwerten für 18 t Solo-Lkw, 26 t Solo-Lkw und Hängerzug sowie Sattelzugmaschinen unterschieden. Die Formel berücksichtigt jedoch lediglich einen Zusammenhang zwischen Restwert und Gesamtfahrleistung. In Anbetracht teilweise sehr kurzer Touren und geringer Jahresfahrleistungen hätte dies eine mögliche Fehleinschätzung der realen Restwerte nach acht Jahren Haltedauer zur Folge. Ein Zusammenhang zwischen Fahrzeugalter, Fahrleistung und Restwert ist in der Literatur für Nutzfahrzeuge - anders als beispielsweise für Pkw nach Plötz et al. (2014) - nicht bekannt. Vereinfachend, und nach Rücksprache in der Projektgruppe, wird daher eine Obergrenze von 30 % des ursprünglichen Wertes für Batterie-Lkw und Diesel-Lkw angenommen. Liegt der nach Kleiner et al. (2017) berechnete Restwert darunter, so wird dieser verwendet. Diese Gleichung ist in Eq. 4 dargestellt:

$$\text{Restwert} = \min\left\{a_i \cdot e^{b_{i/k} \cdot \text{Gesamtfahrleistung}}, \frac{30}{100}\right\} [\%] \quad (\text{Eq. 4})$$
$$a_{18t} = 0,833; a_{26t \text{ \& H\ddot{a}n\text{g}erzug} } = 0,88; a_{\text{Sattelzug}} = 0,951$$
$$b_{18t} = -0,004; b_{26t \text{ \& H\ddot{a}n\text{g}erzug} } = -0,003; b_{\text{Sattelzug}} = -0,002$$

3 Ergebnisse

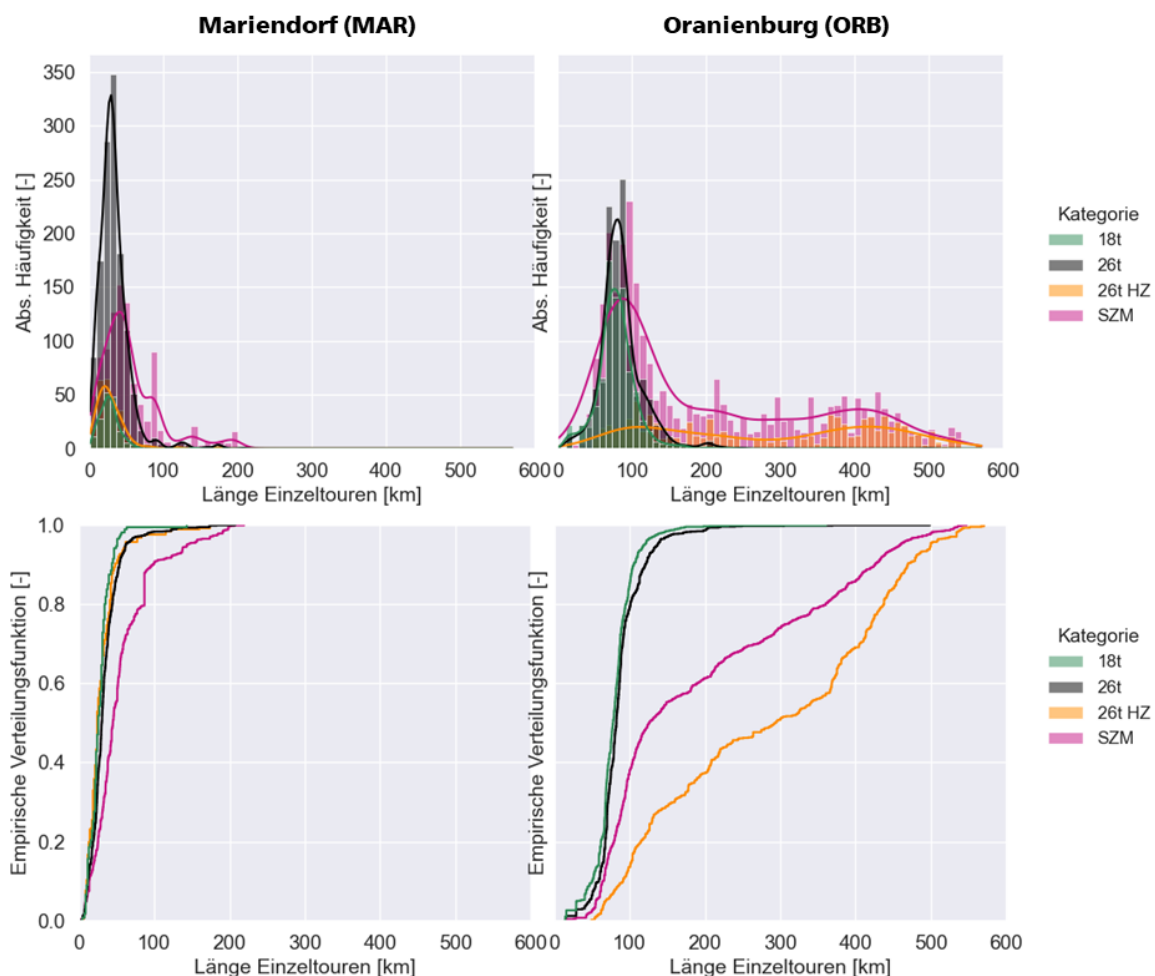
3.1 Tourenlängen und Fahrleistungen

Ergebnisse Einzeltouren

In Abbildung 19 sind zwei Auswertungen über die Länge der Einzeltouren nach Fahrzeugsegmenten und je Standort abgebildet. Die oberen Analysen zeigen die absoluten Häufigkeiten sowie die geschätzten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (KDE). Die unteren Analysen zeigen die kumulierte empirische Verteilungsfunktion über die Länge der Einzeltouren je Standort, d.h. es ist jeweils gezeigt welcher Anteil der Touren kleiner als die auf der Abszisse aufgetragene Länge ist.

Für den städtischen Lieferverkehr ab Mariendorf liegen nahezu alle Einzeltouren unter 200 km (99 %). Innerhalb der Segmente weisen Sattelzüge im Verhältnis die längeren Touren auf. Fahrzeuge ab Oranienburg weisen in Summe höhere Fahrleistungen auf. Solo-Lkw, also 18 t und 26 t, werden vorwiegend in Berlin und im Berliner Umland eingesetzt werden und entsprechend liegt der Anteil an Touren unter 200 km Länge bei 99 %. Hängerzug und Sattelzug werden zusätzlich und überwiegend zur Belieferung der gesamten Region eingesetzt. Rund ein Viertel aller Touren für den Sattelzug und gut die Hälfte aller Touren für den Hängerzug sind über 300 km Länge. Die längste Einzeltour liegt bei 570 km für Oranienburg und 220 km für Mariendorf.

Abbildung 19: Analyse der Einzeltouren



Quellen: Eigene Darstellung

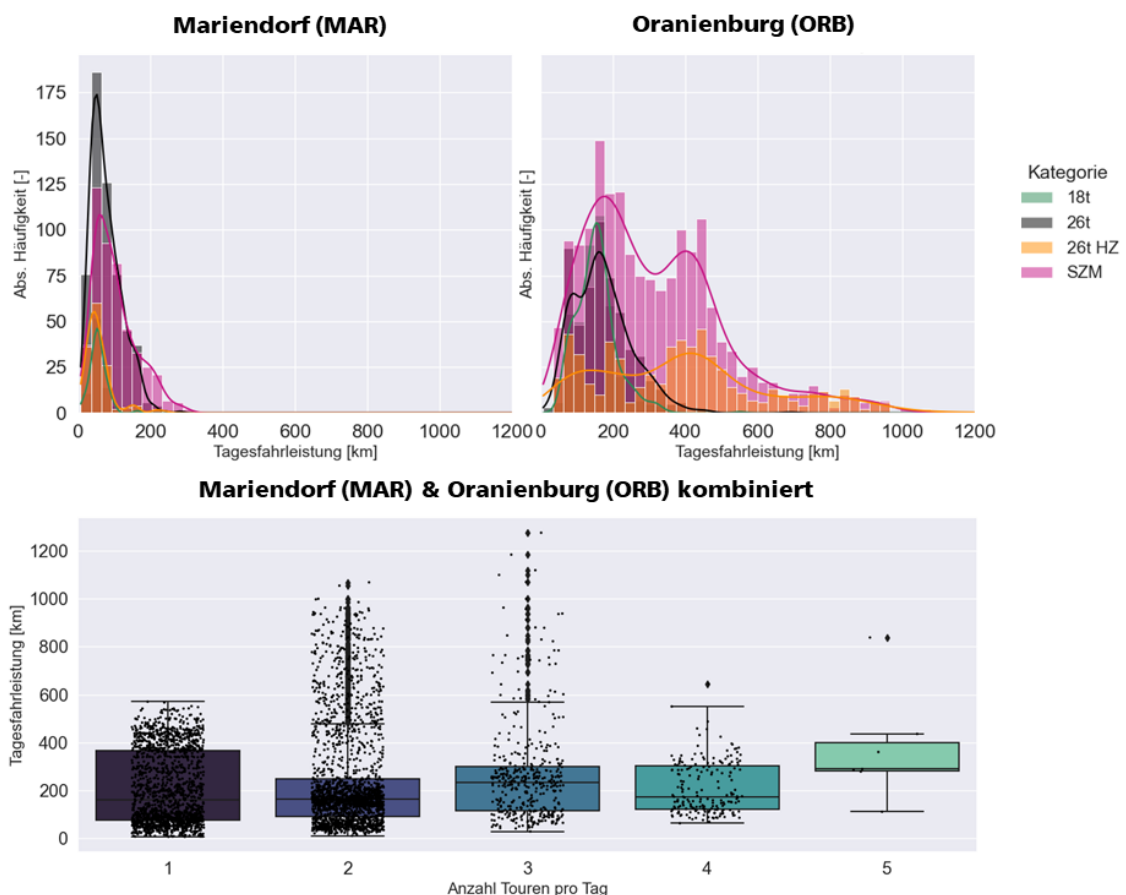
Ergebnisse Tagestouren

In Abbildung 20 sind zwei Auswertungen zu den Tagestouren dargestellt. Die oberen Darstellungen zeigen die empirische Verteilungsfunktion über die Länge der Tagestouren je Standort. Die untere Darstellung zeigt die Gegenüberstellung von Tagesfahrleistung und Anzahl an Einzeltouren kombiniert über beide Standorte.

Die Analyse Tagestouren zeigt für den Standort Mariendorf eine maximale Tagesfahrleistung von 320 km sowie einen hohen Anteil (96 %) von unter 200 km Tagesfahrleistung in der Gesamtflotte für den vorwiegend städtischen Einsatz. In der Einzelbetrachtung weist der Sattelzug mit 8 % den höchsten Anteil an Tagestouren über 200 km auf. Bei den Solo-Lkw liegt der Anteil von unter 200 km Tagesfahrleistung bei 99 %. Für den städtischen und regionalen Lieferverkehr ab Oranienburg liegt der Anteil von unter 200 km Tagesfahrleistung in der Gesamtflotte bei lediglich 45 %. Rund 37 % der Tagestouren weisen eine Fahrleistung von über 300 km und gut ein Viertel von über 400 km auf. Für die Solo-Lkw liegt die maximale Tagesfahrleistung bei rund 400 km, wobei ein hoher Anteil der Touren (85 %) bereits bei unter 200 km pro Tag liegt. Anhängerzug und Sattelzug weisen noch höhere Fahrleistungen auf. Hier liegen nur rund 54 % (Sattelzug) bzw. 36 % (Anhängerzug) der Touren unter 300 km pro Tag. Beim Anhängerzug sind sogar 20 % aller Touren über 600 km pro Tag. Beim Sattelzug liegt dieser Anteil bei lediglich 10 %. Im Mehrschichtbetrieb liegt die längste Tagestour für Oranienburg bei 1.280 km.

Die untere Abbildung zeigt die Spannweite der Tagesfahrleistungen in Abhängigkeit der Anzahl an Einzeltouren pro Tag. Ein direkter Zusammenhang zwischen Anzahl der Touren und Höhe der Tagesfahrleistung besteht nicht. Am häufigsten werden ein und zwei Touren pro Tag gefahren. Drei und mehr Touren machen lediglich einen Anteil von 14 % aus.

Abbildung 20: Analyse der Tagestouren



Quellen: Eigene Darstellung

Jahresfahrleistung und Mautanteil

Tabelle 7 zeigt die Auswertung für die Jahresfahrleistung je Standort. Diese wird auf Basis der Monatsfahrleistung Februar hochgerechnet. Links wird Mariendorf gezeigt und auf der rechten Seite Oranienburg. Die Auswertung umfasst den Median, sowie das 25 % und 75 % Quantil, die Standardabweichung und den Variationskoeffizienten als statistische Kenngrößen. An beiden Standorten ist die Verteilung leicht rechtsschief.

Ab Mariendorf liegt der mittlere Jahresfahrleistung bei rund 18.000 km. REWE selbst gibt einen mittleren Korridor von 15.000 bis 20.000 km pro Jahr an. Ab Oranienburg liegt die mittlere Jahresfahrleistung bei rund 60.200 km während REWE einen Korridor von 50.000 bis 60.000 km angibt. Für beiden Standorten stimmen die hochgerechneten Jahresfahrleistungen im Schnitt mit den von REWE angegebenen Korridoren überein. Durch den Mix aus städtischen und regionalen Touren ist die Streuung der Jahresfahrleistung in Oranienburg größer.

Für Sattelzugmaschinen liegt die Fahrleistung an beiden Standorten zwischen 20 und 40 % höher. Am Beispiel Oranienburg ergibt sich entsprechend eine mittlere Jahresfahrleistung von 72.000 km für Sattelzugmaschinen und nur rund 45.500 km für die anderen drei Segmente. Ab Mariendorf liegt die Fahrleistung von Sattelzugmaschinen bei 25.000 km und rund 16.000 km für die anderen drei Segmente.

Tabelle 7: Fahrleistungen je Standort in der Gesamtflotte

Parameter	Einheit	Mariendorf	Oranienburg
25 % Quantil	[km/a]	14.400	38.100
Median	[km/a]	18.000	60.200
75 % Quantil	[km/a]	26.000	93.000
Standardabweichung	[km/a]	7.700	42.000
Variationskoeffizient	[-]	0,389	0,610

Quelle: Eigene Darstellung

Unterschiedliche Mautanteile an der Fahrstrecke ergeben sich entsprechend der unterschiedlichen Einsatzradien der Fahrzeuge. Diese wiederum beeinflussen die späteren Gesamtnutzungskosten durch die zu zahlenden Mautabgaben. Zwischen jährlicher Fahrleistung und Mautanteil besteht dabei eine positive Korrelation. In Oranienburg liegt der Median bei 85 %. Das untere Quartil liegt bei 82 % während das obere Quartil bei 92 % liegt. Für den städtischen Lieferverkehr ab Mariendorf ist der Mautanteil geringer. Hier ergibt sich ein Median von 67 %. Die Quartile liegen entsprechend bei 60 % bzw. 74 %.

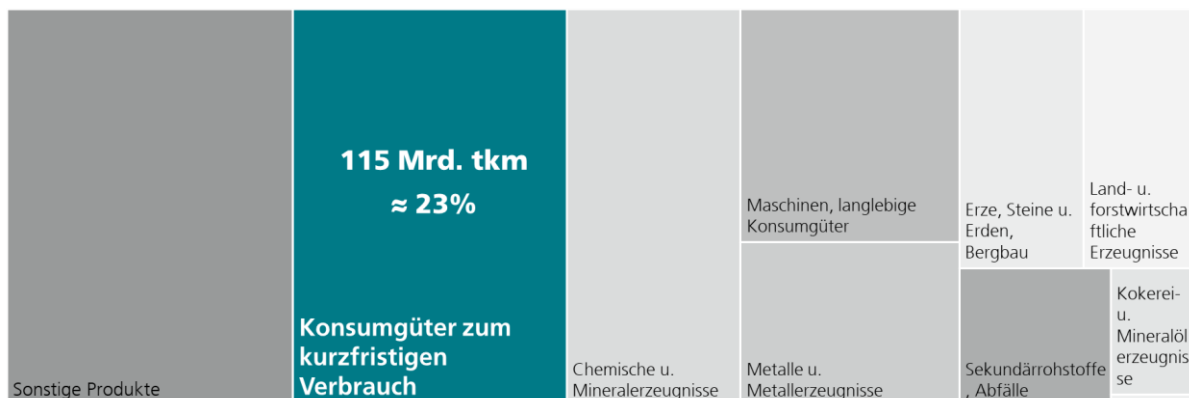
Repräsentativität

Aufgrund der stark unterschiedlichen Einsatzzwecke von Lkw und Besonderheiten je nach Branche und Industrie sowie nur weniger Lkw-Datensätze mit längerer Beobachtungsdauer ist die Beurteilung der Repräsentativität der vorliegenden Daten schwierig. Zur besseren Einordnung der Daten und der Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse sind folgende Punkte nützlich. Dies umfasst die Einordnung der betrachteten Segmente, deren Fahrleistungen und Transportleistung sowie eine Einordnung der Region Nord-Ost.

Die gesamte Transportleistung im deutschen Straßengüterverkehr beläuft sich auf 498 Mrd. Tonnenkilometer für das Jahr 2019 (Göckeler et al. 2020). Nach der NST-Güterklassifikation, visualisiert in Abbildung 21, haben Konsumgütern zum kurzfristigen Verbrauch einen Anteil von rund 23 % und stellen gleichzeitig die größte definierte Einzelgruppe dar. Anschließend folgen Chemische u. Mineralerzeugnisse mit 15 %, Maschinen mit 11 % sowie Metalle u. Metallerzeugnisse mit 8 %. Das Fallbeispiel Distributionslogistik im Lebensmitteleinzelhandel deckt also bis zu ein Viertel der Verkehrsleistung in Deutschland ab.

Abbildung 21: Transportleistung im deutschen Straßengüterverkehr

Straßengüterverkehr nach Güterklassen (NST-2007) – Transportleistung in Mrd. tkm – Jahr 2019

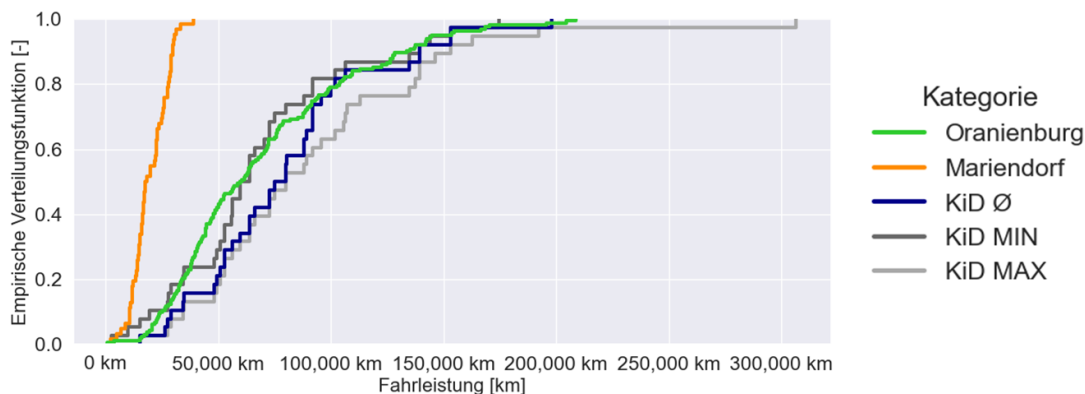


Quellen: Eigene Darstellung nach (Göckeler et al. 2020)

Mit den Bundesländern Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, und Brandenburg deckt die Region Nord-Ost rund 15 % der Gesamtfläche Deutschlands ab. Gleichzeitig umfasst das Einzugsgebiet rund 9 % der Gesamtbevölkerung. Die Einwohnerdichte der Region Nord-Ost liegt bei rund 145 Einwohnern je km² und damit deutlich unter dem deutschen Mittel (233 Einwohner je km²).

Der KiD-Datensatz nach Wermuth et al. (2012) soll die Erkenntnisse über den Einsatz und Nutzung der in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge steigern. Der Datensatz enthält über 600 Einzelfahrprofile von rund 400 schwere Lkw und Sattelzugmaschinen. Zur Vergleichbarkeit wird der Datensatz gefiltert. Daher werden nur Fahrten berücksichtigt, die dem Wirtschaftszweig Handel zugeordnet werden können. Ergänzend findet eine manuelle Klassifikation nach Waren des Lebensmitteleinzelhandels wie Eier, Wurst oder Getränke statt. Der so aufbereitete Datensatz enthält 38 Einzelfahrten, welche wiederum auf eine Jahresfahrleistung hochgerechnet werden (**blau bis schwarz**). Abbildung 22 zeigt die empirischen Verteilungsfunktionen der Jahresfahrleistungen. Die städtischen Touren ab Mariendorf (**orange**) sind kürzer als im Mittel aller Fahrzeuge gleicher Größe. Diese hohe Abweichung legt den Schluss nahe, dass die städtischen und sehr kurzen Touren ab Mariendorf wenig repräsentativ für die Distributionslogistik sind. Dagegen zeigt sich für Oranienburg (**grün**) eine bessere Übereinstimmung. Insbesondere ab einer Jahresfahrleistung von 100.000 km ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Insgesamt ist aber ein überproportionaler Anteil an Fahrleistungen unter 100.000 km pro Jahr in Region Nord-Ost gegenüber dem KiD-Datensatz zu beobachten.

Abbildung 22: Vergleich Datensatz und KiD-Fahrprofile



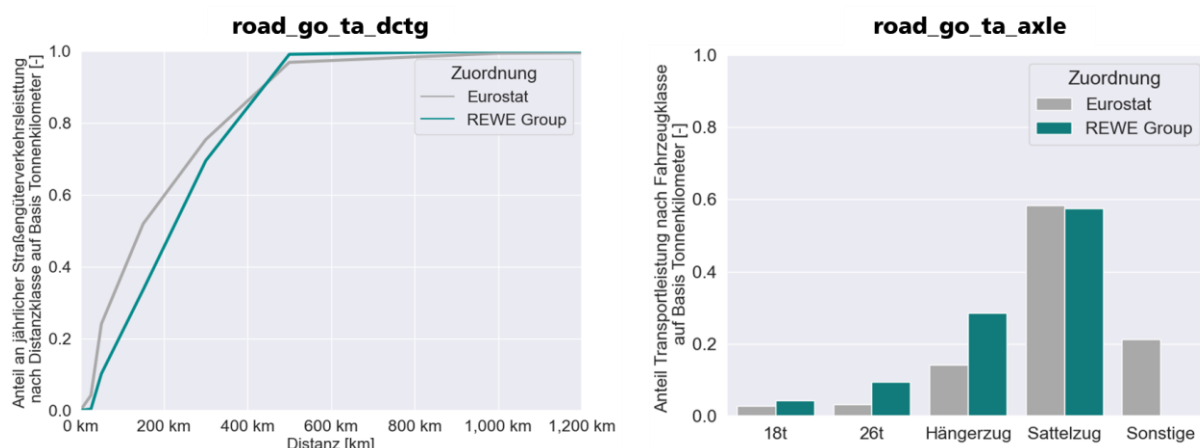
Quellen: Eigene Darstellung auf Basis Wermuth et al. (2012)

Die Studie betrachtet mit den Solo-Lkw der GK4 und den Sattelzugmaschinen zwei wesentliche Gewichtsklassen in der deutschen Nutzfahrzeugflotte. Nach der Einteilung in Wietschel et al. (2017) liegt der Anteil der in dieser Studie betrachteten Fahrzeuge am Bestand für das Jahr 2020 bei 87 %, insofern nur Fahrzeuge mit einem zGG. von mehr als 12 Tonnen (Klasse N3) als Referenz betrachtet werden. Wird die Betrachtung auf Fahrzeuge mit einem zGG. von mehr als 7,5 Tonnen erweitert, so liegt dieser Anteil bei 74 % (KBA 2021a). Entsprechend deckt diese Studie einen nennenswerten Anteil des Nutzfahrzeugbestands in Deutschland ab.

Die Erhebung Verkehr in Kilometern des Kraftfahrtbundesamts, KBA (2021b), gibt eine Indikation über die mittlere Jahresfahrleistung von Lkw in Deutschland an. Die Erhebung unterscheidet jedoch nicht nach Einsatzzweck der Lkw und enthält entsprechend auch Lkw im Langstreckenbetrieb, für welchen insbesondere Sattelzugmaschinen eingesetzt werden. Für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 7,5 Tonnen liegt die mittlere Jahresfahrleistung im Jahr 2019 insgesamt bei rund 38.000 Kilometern und bei rund 45.000 km über die ersten acht Jahre Haltedauer. Für Sattelzugmaschinen liegt die Fahrleistung entsprechend bei 93.000 km respektive 96.000 km. Gerade für die Solo-Lkw ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Fahrleistungen im Fallbeispiel Oranienburg und der Erhebung des KBA. Für Sattelzugmaschinen lässt sich aufgrund der Verzerrung durch den Langstreckenverkehr keine eindeutige Aussage treffen.

Zuletzt werden zwei Eurostat-Transportstatistiken herangezogen (Eurostat 2021). Abbildung 23 visualisiert die Gegenüberstellung der gesamten Tagestouren im REWE-Datensatz (**grün**) gegenüber den Eurostat-Daten (**grau**). Der *road_go_ta_dctg* Datensatz für Deutschland listet die Fahrleistung in Tonnenkilometern in sechs verschiedenen Distanzklassen für den nationalen und internationalen Verkehr auf. Analog zur Transportleistung werden lediglich Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch berücksichtigt (NST-2007). Insgesamt lassen die Eurostat-Daten einen höheren Anteil der Fahrleistung bis 500 km vermuten. Das höchste Delta liegt mit 18 % in der Distanzklasse zwischen 50 und 149 km. Fahrten über 1.000 km Länge liegen in Eurostat bei 3,2 % und in den REWE-Daten bei 0,9 %. Insgesamt zeigt sich jedoch ein ähnlicher Verlauf. Der *road_go_ta_axle* Datensatz für Deutschland listet die Transportleistung nach Radachsenkonfiguration für den nationalen und internationalen Verkehr auf. Insgesamt decken die vier betrachteten Segmente rund 79 % der gesamten Fahrleistung im Straßengüterverkehr (Tonnenkilometer) ab. Die Analyse für das Jahr 2019 zeigt, dass Sattelzugmaschinen mit 74 % vor dem Hängerzug mit 18 % sowie 18t und 26t mit jeweils 4 % liegen. Im REWE-Datensatz weisen Sattelzugmaschinen mit 58 % ebenfalls den größten Anteil auf. Dahinter folgen der Hängerzug mit 28 % sowie der 26t mit 10 % und der 18t mit 4 %. Die geringere Repräsentanz der Sattelzugmaschinen kann unter anderem durch den Langstreckenverkehr hervorgerufen werden.

Abbildung 23: Vergleich REWE-Datensatz und Eurostat-Transportstatistiken



Quellen: Eigene Darstellung auf Basis Eurostat (2021)

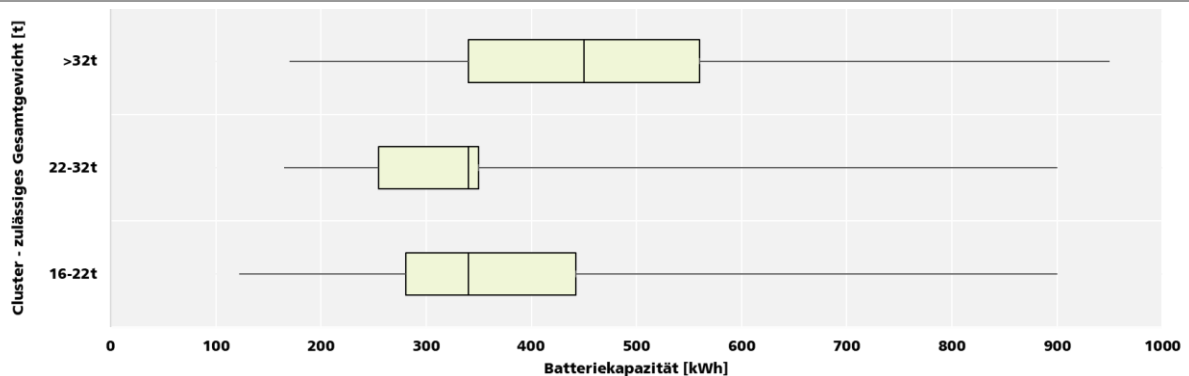
Insgesamt betrachtet diese Studie einen bedeutenden Anteil des deutschen Straßengüterverkehrs. Obgleich eine eindeutige Einordnung nicht möglich ist, liegt der Schluss nahe, dass insbesondere der Standort Oranienburg den urbanen und regionalen Lieferverkehr in Deutschland gut abbilden kann und Erkenntnisse in Teilen auch auf den gesamten deutschen Straßengüterverkehr übertragen werden können.

3.2 Energieverbrauch und technische Machbarkeit von Elektro-Lkw

Marktrecherche

Abbildung 24 zeigt das Ergebnis der Marktrecherche mit aktuellen sowie angekündigten Modellen im Zeithorizont bis 2022/23. Insgesamt sind rund 60 Modelle und Modell-Konfigurationen enthalten. Letzteres zeigt auch das modulare Angebot der Hersteller mit verschiedenen Batteriegrößen für die Modelle, passend für den individuellen Reichweitenbedarf der Kunden. In der Abbildung sind Einzelmodelle abstrahiert und in einem Boxplot zusammengefasst. Die Ränder der Box kennzeichnen das 25 % sowie 75 % Quantil. In der Mitte liegt der Median. Die Whisker kennzeichnen die Spannweite. Für Solo-Lkw liegt der überwiegende Anteil an Ankündigungen zwischen 250 und 400 kWh. Für Sattelzugmaschinen ergibt sich ein Korridor von rund 350 bis 550 kWh. In allen Kategorien zeigen sich bereits heute erste Ankündigungen mit über 600 kWh und bis 900 kWh Batteriekapazität, die perspektivisch insbesondere im Fernverkehr benötigt werden.

Abbildung 24: Übersicht verfügbare und angekündigte Batterie-Lkw Modelle



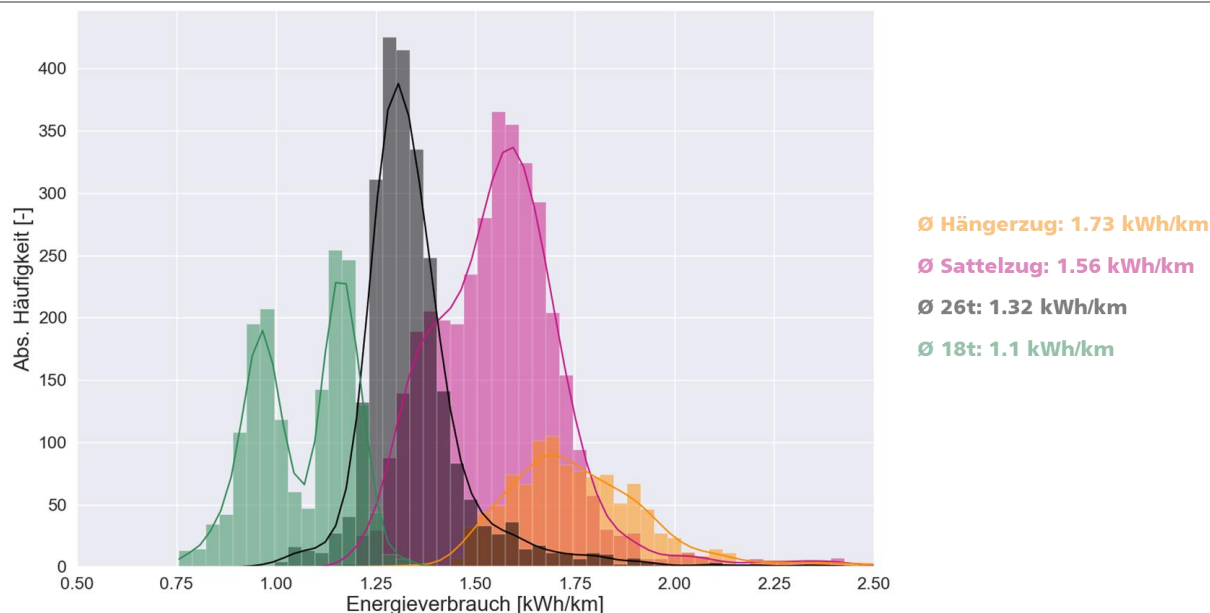
Quellen: Eigene Darstellung

Simulierte Energieverbräuche

Abbildung 25 visualisiert die Ergebnisse der Energiesimulation als Histogramm je Segment. Die Ergebnisse beziehen sich dabei auf Einzeltouren in der gesamten Stichprobe. Tabelle 8 gibt dazu entsprechende Kennzahlen wie den Median, die Quartile und die Standardabweichung an. Alle Angaben sind dabei kilometerbezogen in kWh je km und ohne Ladeverluste.

Demnach reicht der mittlere Energieverbrauch von 1,1 kWh/km für einen 18 t Solo-Lkw bis zu 1,73 kWh/km für einen Hängerzug. Der 26 t Solo-Lkw liegt mit 1,32 kWh/km ebenso wie die Sattelzugmaschinen mit 1,56 kWh/km dazwischen. Die größere Streuung bei Hängerzug und Sattelzugmaschinen ist unter anderem auf die größere Variation im Einsatzgebiet zurückzuführen. Die Streuung ist insgesamt auf unterschiedliche Geschwindigkeiten, Zeitauern und Beladung zurückzuführen. Außerdem ergibt sich zusätzlich durch die unterschiedlichen Beschleunigungen nach städtischen und regionalen Touren je Segment eine entsprechende Variation, was insbesondere beim 18 t Solo-Lkw ausgeprägt ist.

Abbildung 25: Histogramme der simulierten Energieverbräuche (battery-to-wheel) je Segment



Quellen: Eigene Darstellung

Tabelle 8: Kennzahlen der Simulation

Parameter	Einheit	18t	26t	Hängerzug	Sattelzug
25 % Quantil	[kWh/km]	0,96	1,27	1,64	1,44
Median	[kWh/km]	1,10	1,32	1,73	1,56
75 % Quantil	[kWh/km]	1,17	1,38	1,87	1,65
STD	[kWh/km]	0,12	0,17	0,20	0,21

Quelle: Eigene Darstellung

Die Simulationsergebnisse zum Energieverbrauch in anderen Studien stimmen mit den Ergebnissen dieser Studie überein. Einschränkend muss ergänzt werden, dass der zusätzliche Energieverbrauch durch Kühlung die Ergebnisse gegenüber anderen Studien oder Herstellerangaben verzerrt. Weiterhin ist auf den Unterschied zwischen städtischen sowie regionalen Fahrten gegenüber Langstreckenfahrten auf der Autobahn hinzuweisen. Im Folgenden werden Solo-Lkw sowie Sattelzugmaschinen diskutiert.

Für Sattelzugmaschinen liegt das Ergebnis dieser Studie im Mittel bei 1,57 kWh/km. In Hildermeier et al. (2020) wird ein Korridor von 1,3 bis 1,9 kWh/km für eine Sattelzugmaschinen im städtischen und regionalen Lieferverkehr angegeben. In Phadke et al. (2021) wird ein Verbrauch von 1,32 kWh/km auf Highways angegeben, wobei entsprechende Leichtbaumaßnahmen berücksichtigt sind. In Earl et al. (2018) werden 1,44 kWh/km im Autobahnbetrieb und ohne Optimierung angegeben. Mareev et al. (2018) geben einen Verbrauchskorridor von 1,09 bis 2,04 kWh/km für synthetische Autobahnfahrten an und schließen anhand der synthetischen Routen auf einen tatsächlichen Verbrauch zwischen 1,23 und 1,94 kWh/km. In Song (2020) liegt der simulierte Verbrauch über verschiedene Fahrzyklen ohne Zuladung zwischen 0,97 und 2,2 kWh/km und zwischen 1,78 kWh und 4,5 kWh/km bei maximaler Beladung. Hall et al. (2019) geben rund 1,2 kWh/km an. Die Studienreihe T&E (2021a) geht von durchschnittlich 1,52 kWh/km für das Jahr 2020 aus. Die Herstellerangaben des Volvo FH Electric mit einer Bruttokapazität von 540 kWh und einer Nennreichweite von 300 km lassen auf einen Energieverbrauch von rund 1,7 kWh/km schließen. Der DAF CF FT (350 kWh, 220 km) liegt entsprechend bei rund 1,5 kWh/km.

Für 18 t Solo-Lkw liegen die Ergebnisse dieser Studie bei 1,1 kWh/km und für einen 26t Solo-Lkw bei 1,32 kWh/km. In Hildermeier et al. (2020) wird ein Korridor von 0,9 bis 1,3 kWh/km für Solo-Lkw im städtischen und regionalen Lieferverkehr angegeben. In Song (2020) liegt der simulierte Verbrauch über verschiedene Fahrzyklen ohne Zuladung zwischen 0,9 und 1,4 kWh/km und zwischen 1,1 kWh und 2,4 kWh/km bei maximaler Beladung. Die Herstellerangaben des Volvo FL Electric (320 kWh, 300 km) liegt bei rund 1 kWh/km. Der Daimler eActros (240 kWh, 200 km) liegt bei rund 1,1 kWh/km.

Für die Betrachtung des Status Quo mit einer Fahrzeuganschaffung in 2021 verzichtet die Studie bewusst auf die Berücksichtigung von technologischen Weiterentwicklungen und Effizienzsteigerungen bis 2025 oder 2030. Dies umfasst einerseits Verbesserungen in der Aerodynamik, um den Luftwiderstand des Fahrzeugs zu reduzieren, die Reduktion des Rollwiderstands durch entsprechende Reifenmischungen und Laufflächen sowie Leichtbaumaßnahmen zur Reduktion des Fahrzeuggewichts (engl. road-load reductions). Letzterer umfasst dabei den Materialeichtbau, den Strukturleichtbau und den Systemleichtbau. Von den genannten Maßnahmen können batterieelektrische wie auch dieselbetriebene Fahrzeuge sowie verschiedene Segmente gleichermaßen profitieren. In Delgado et al. (2017) sind einige Maßnahmen aufgeführt. Daneben legt die technologische Weiterentwicklung des elektrischen Antriebsstrangs eine weitere Reduktion von Verlusten beim Laden und Entladen der Batterie, in der Leistungselektronik oder im Elektromotor nahe (engl. battery-to-wheel efficiency). Zusätzlich könnte durch die verbesserte Nutzung von regenerativem Bremsen mehr Energie zurückgewonnen werden. In Summe sinkt die im Fahrzeug verbaute notwendige Batteriekapazität bei gleicher Zielreichweite oder ermöglicht längere Reichweiten bei gleicher Batteriekapazität. Unter Berücksichtigung solcher Maßnahmen werden für Sattelzugmaschinen in T&E (2021a) 1,15 kWh/km für das Jahr 2030 angegeben. Basma et al. (2021) geben ebenfalls für das Jahr 2030 einen Verbrauch von rund 1 kWh/km für Sattelzugmaschinen an. Der aktuelle Weltrekord des Futuricum Logistics 18E mit 1.099 km bei 680 kWh Brutto-Batteriekapazität (rund 0,57 kWh/km) zeigt das Potential für Solo-Lkw, obgleich diese idealisierten Testbedingungen (Leerfahrt, 50 km/h) keinem realen Einsatzfall entsprechen dürften (ELECTRIVE 2021).

Technische Ersetzbarkeit / Machbarkeit

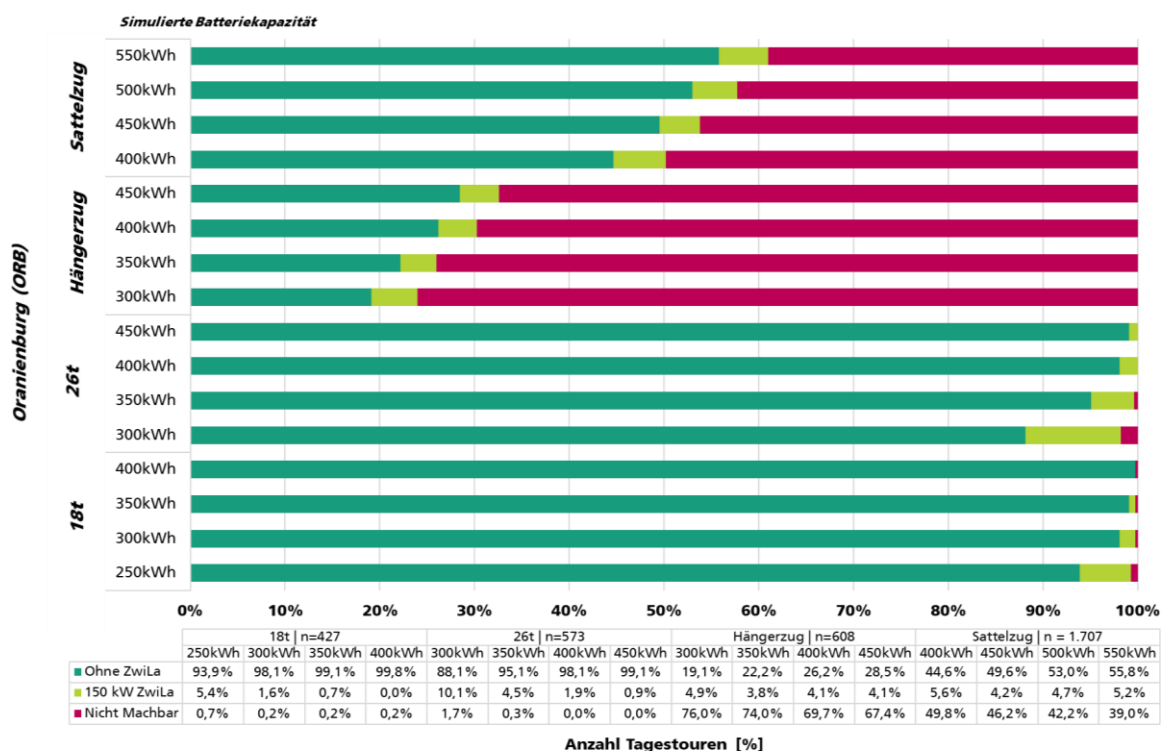
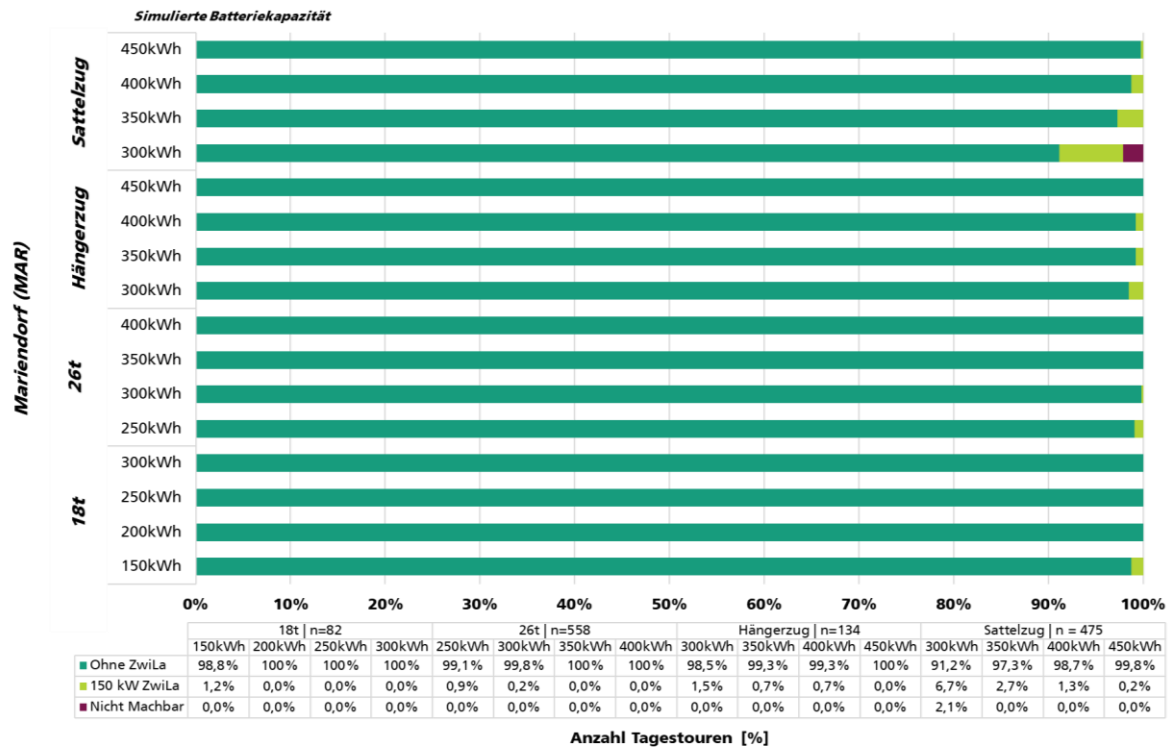
Abbildung 26 zeigt die technische Machbarkeit als Anteil der elektrifizierbaren Tagestouren je Segment und in Abhängigkeit von der Brutto-Batteriekapazität des Fahrzeugs. Die oberste Abbildung zeigt alle Tagestouren für Mariendorf. Die untere Abbildung zeigt alle Tagestouren für Oranienburg.

Neben dem Basisfall ohne Zwischenladen wird das Zwischenladen mit einer Netto-Ladeleistung von 150 kW betrachtet. Die gewählte Ladeleistung von 150 kW netto entspricht dabei - nach empirischen Erkenntnissen der P3 automotive GmbH (2021) - einer derzeit erzielbaren durchschnittlichen Ladeleistung mit 350 kW Ladesäulen bei Pkw. Die Marktübersicht zeigt maximale Ladeleistungen bis 350 kW für angekündigte Lkw-Modelle, wobei der überwiegende Anteil bei 150 bis 250 kW liegt oder keine Aussage bekannt ist. Die Berücksichtigung von 350 kW Ladepunkten zum Depot-Zwischenladen anstatt geringeren Ladeleistungen soll insbesondere die Zukunftsfähigkeit der Infrastruktur gewährleisten. Weitere Rechnungen mit 50 kW, 350 kW und 700 kW Netto-Ladeleistung wurden parallel durchgeführt, sind aber nicht im Umfang dieses Berichts enthalten.

Es gilt weiterhin die Annahme, dass Fahrzeuge über Nacht vollgeladen werden können und ihre Touren am Morgen vollgeladen (100 % SoC) starten. Eine Analyse der nächtlichen Standzeiten in Abhängigkeiten von Einschicht- oder Mehrschichtbetrieb⁴ der einzelnen elektrifizierbaren Fahrzeuge zeigt, dass hierfür überwiegend 50 kW Ladesäulen ausreichend sind.

⁴ Im Einschichtbetrieb liegt die durchschnittliche Verweildauer zwischen 10 und 14 h. Im Mehrschichtbetrieb zwischen 5 und 9 h.

Abbildung 26: Detailbetrachtung - Elektrifizierungspotential in Abhängigkeit der Batteriegröße



■ ohne Depot-Zwischenladen ■ mit Depot-Zwischenladen (150kW) ■ Techn. nicht machbar

Quellen: Eigene Darstellung

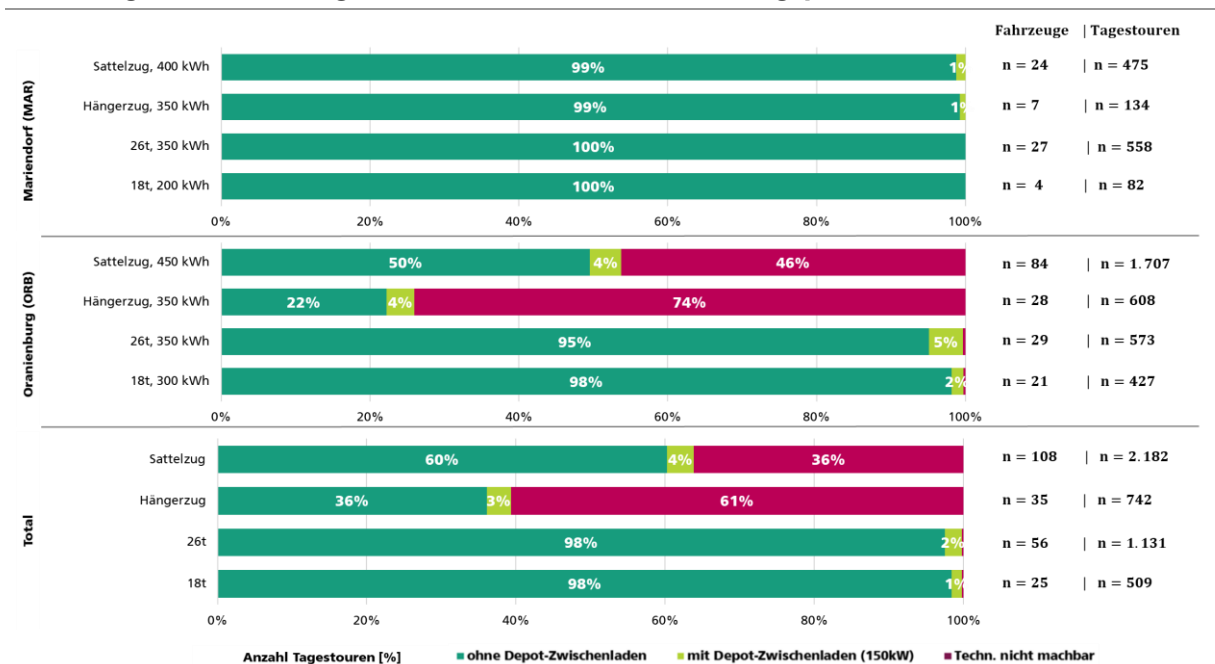
Die Analyse zeigt, dass alle Touren ab Mariendorf aufgrund der kurzen Einzeltouren (max. 220 km) wie auch Tagestouren (max. 320 km) elektrifizierbar sind. Damit folgt, dass die gesamte Flotte technisch elektrifizierbar ist. Der Vergleich zwischen den Batteriekapazitäten ermöglicht gleichzeitig die etwaige

Abschätzung von alterungsbedingten Kapazitätsverlusten der Batterie ohne den Gewichtsnachteil zu berücksichtigen. Am Beispiel eines 26 t Solo-Lkw in Mariendorf bedeutet dies, dass mit einer Restkapazität von 250 kWh (83 %) gegenüber einer Ausgangskapazität von 300 kWh noch immer alle Touren mit hoher Sicherheit elektrifizierbar sind. Das Zwischenladen am Depot hat eine geringe Bedeutung und sichert einige wenige Tagestouren ab.

Für den städtischen und regionalen Lieferverkehr ab Oranienburg sind in Berlin und im Berliner Umland eingesetzten Solo-Lkw aber auch die wenigen großen Gespanne elektrifizierbar. In der gesamten Region Nord-Ost sind insbesondere bei Sattelzug und Hängerzug die Elektrifizierungspotentiale deutlich geringer. Hier ist auch das Depot-Zwischenladen von höherer Bedeutung. Dennoch sind viele lange Einzeltouren mit der einmaligen Batterieladung nicht zu absolvieren, wodurch auch der Effekt des Zwischenladens am Depot geschmälert wird.

Für die weitere Studie wird der Betrachtungshorizont reduziert. Die Batteriegrößen werden auf eine verfügbare Batteriekapazität je Segment und je Standort reduziert. Die Auswahl erfolgt so, dass auch unter Berücksichtigung von Alterungseffekten die Fahrzeuge elektrifizierbar bleiben. Teilweise wird jedoch Zwischenladen notwendig. Auf einen optimierenden Ansatz für die Bestimmung der idealen Batteriekapazität je Tourenprofil oder eine techno-ökonomischen Optimierung des Zusammenspiels aus Ladeleistung und installierter Batteriekapazität wird verzichtet. Für den weiteren Verlauf der Studie ergeben sich so folgende Brutto-Batteriegrößen für den städtischen Lieferverkehr ab Mariendorf: 18 t Solo-Lkw (200 kWh), 26 t Solo-Lkw (350 kWh), Hängerzug (350 kWh), Sattelzugmaschine (400 kWh). Für den städtischen und regionalen Lieferverkehr ab Oranienburg werden folgende Brutto-Batteriegrößen verwendet: 18 t Solo-Lkw (300 kWh), 26 t Solo-Lkw (350 kWh), Hängerzug (350 kWh), Sattelzugmaschine (450 kWh). Abbildung 27 fasst dieses Ergebnis zusammen und ordnet zudem die Anzahl der Fahrzeuge sowie der dahinterliegenden Tagestouren ein.

Abbildung 27: Zwischenergebnis - Technisches Elektrifizierungspotential



Quellen: Eigene Darstellung

Für den reduzierten Betrachtungshorizont lässt sich anhand der Zurechnung von Tagestouren auf die Fahrzeuge ableiten, dass 43 % bzw. 69 der 162 Fahrzeuge in Oranienburg aus technischer Sicht elektrifizierbar sind. 30 Fahrzeuge benötigen jedoch Depot-Zwischenladen. Für den Standort Mariendorf sind

entsprechend 100% bzw. 62 der 62 Fahrzeuge elektrifizierbar und nur 4 Fahrzeuge benötigen Zwischenladen. Für die Gesamtflotte in der Region Nord-Ost bedeutet dies eine technisch mögliche Flottenelektrifizierung von 58 % bzw. 131 von 224 Fahrzeugen. Eine Zurechnung der Touren auf die Transportleistung in Tonnenkilometer führt auf eine technisch-machbare Elektrifizierung von 32 % ohne Zwischenladen und 36 % mit Depot-Zwischenladen. Werden die Tagestouren wiederum auf Fahrzeuge gemäß der Tourenplan zugerechnet und anschließend die Transportleistung in Tonnenkilometer bestimmt, so liegt die elektrifizierbare Transportleistung bei nur 25 %.

3.3 Gesamtnutzungskosten

Tabelle 9 zeigt zunächst die berechneten Anschaffungskosten für Batterie-Lkw vor der 80% Mehrkostenförderung und für die Diesel-Lkw anhand der spezifischen Komponentenkosten und inklusive Trailer. Die Kosten gelten für eine aktuelle Anschaffung der Fahrzeuge in 2021 und berücksichtigen keine zukünftige Kostendegression der Fahrzeuge. Demnach liegen für das Fallbeispiel die batterie-elektrischen 18 t Solo-Lkw bei 195.000 bis 236.000 €, 26 t Solo-Lkw bei 270.000 €, Hängerzüge bei 312.000 € und Sattelzüge bei 312.000 bis 332.000 €. Damit liegen die Aufpreise zwischen 40% und 84% gegenüber dem jeweiligen Diesel-Pendant.

Tabelle 9: Anschaffungskosten der Fahrzeuge

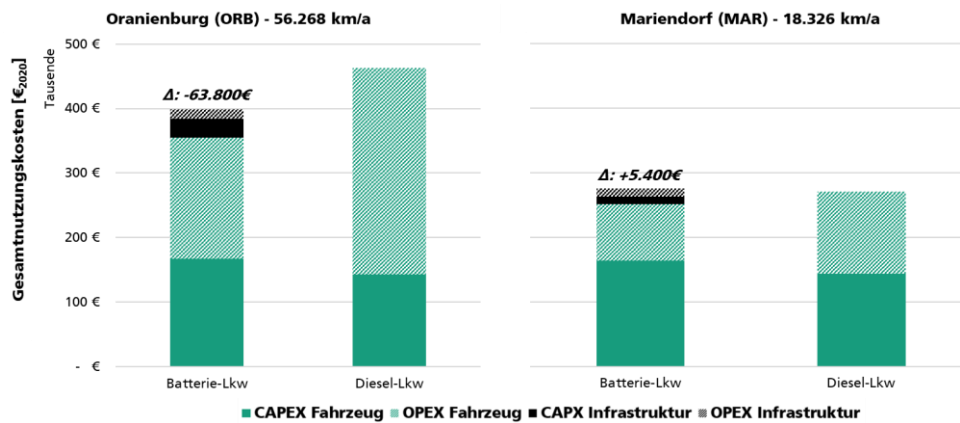
Parameter	Einheit	18t	26t	Hängerzug	Sattelzug
Batterie-Lkw Mariendorf	[€ ₂₀₂₀]	195.000 €	269.000 €	312.000 €	312.000 €
Batterie-Lkw Oranienburg	[€ ₂₀₂₀]	236.000 €	269.000 €	312.000 €	332.000 €
Diesel-Lkw	[€ ₂₀₂₀]	139.000 €	155.000 €	199.000 €	181.000 €

Quellen: Eigene Darstellung

Abbildung 28 zeigt exemplarisch die Gesamtnutzungskosten als Balkendiagramm am Beispiel zweier Sattelzugmaschinen für den Standort Oranienburg und Mariendorf. Entsprechend der Berechnung in Kapitel 2.2.4 setzen sich diese aus den CAPEX und OPEX für jeweils Fahrzeug und Infrastruktur zusammen. Letztere umfassen die Kosten für das 50 kW Ladesäulen (Nachladen) sowie die Kosten für 350 kW Ladesäulen (Depot-Zwischenladen), wobei letztere anteilig auf die Gesamtflotte umgerechnet werden. Die Anzahl an Ladepunkten ergibt sich anhand der Anzahl elektrifizierter Fahrzeuge je Standort, der Verfügbarkeit der Ladesäulen und der notwendigen Ladepunkte zum Zwischenladen⁵. Die unterschiedliche Höhe der TCO zwischen Fahrzeugen ergibt sich aufgrund von individuellen Energieverbräuchen, spezifischen Mautanteilen, Jahresfahrleistungen, Batteriekapazitäten und Restwerten. Zwischen den Standorten ergibt sich der größte Unterschied durch die unterschiedliche Höhe der Infrastrukturkosten aufgrund der unterschiedlichen Bedeutung des Depot-Zwischenladens. Neben den Gesamtnutzungskosten ist zusätzlich das TCO-Delta gegenüber dem Diesel-Pendant angegeben. Für die Fahrleistung von rund 56.000 km erzielt die batterie-elektrische Sattelzugmaschine in Oranienburg einen Kostenvorteil von rund 64.000 €, womit sich aus wirtschaftlicher Sicht eine Ersetzungsempfehlung ergibt. In Mariendorf erzielt die batterie-elektrische Sattelzugmaschine bei nur 18.000 km pro geringfügig höhere Kosten von rund 5.400 € als das Diesel-Pendant und es ergibt sich entsprechend keine Ersetzungsempfehlung. Für alle anderen Fahrzeuge sowie die anderen Segmente an den beiden Standorten erfolgt die Berechnung analog.

⁵ Für Mariendorf werden 65 50 kW Ladesäulen zum Nachladen (62 + 3 Reserve) und vier 350 kW Ladesäulen kostenseitig berücksichtigt. Für Oranienburg werden 73 50 kW Ladesäulen (69 +4 Reserve) und 32 350 kW Ladesäulen (30 + 2 Reserve) kostenseitig berücksichtigt.

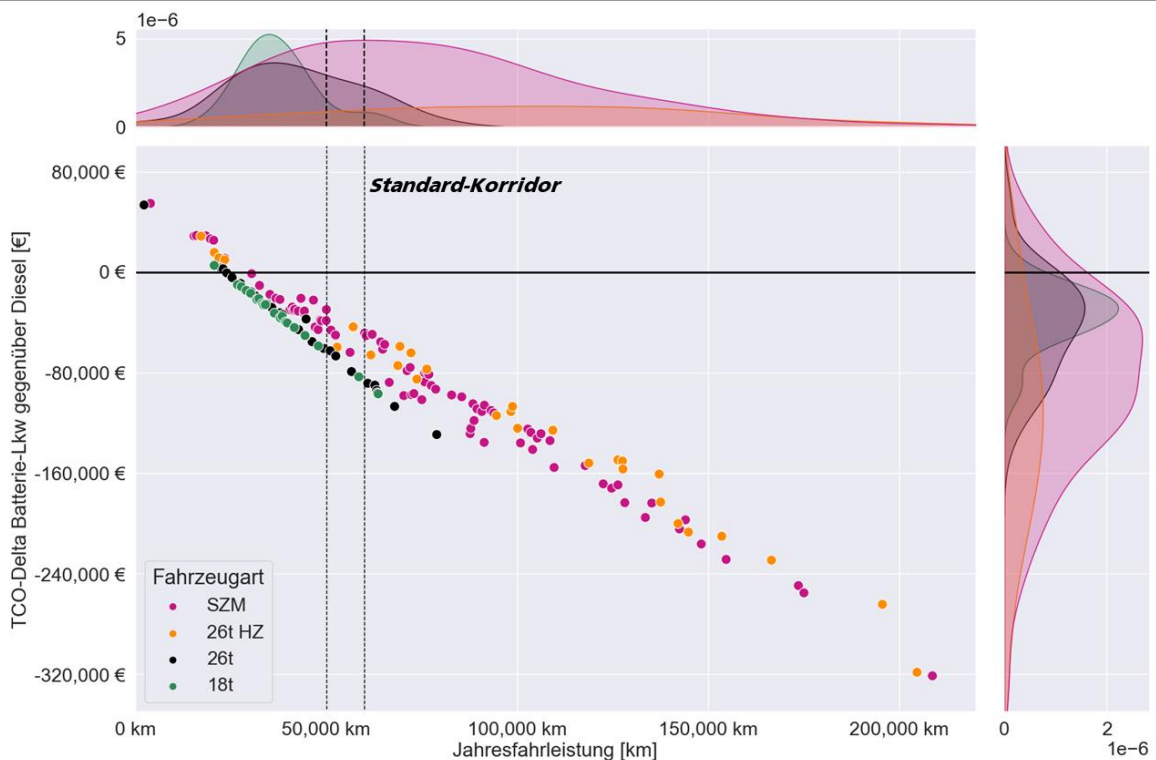
Abbildung 28: Gesamtnutzungskosten über acht Jahre Haltedauer und Anschaffung in 2021 am Beispiel Sattelzugmaschine



Quellen: Eigene Darstellung

Abbildung 29 visualisiert das TCO-Delta für alle Fahrzeuge in Oranienburg als Punktediagramm gegenüber der Jahresfahrleistung. Zusätzlich sind die geschätzten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen je Achse aufgetragen. Die gestrichelten Linien zeigen den Standardkorridor der Jahresfahrleistung nach REWE. Insgesamt erzielen über 90 % der Fahrzeuge (147 von 162) einen TCO Vorteil. Durch alle Segmente hinweg lohnt sich der Einsatz von Batterie-Lkw aber einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von über 30.000 km. Für eine mittlere Jahresfahrleistung von 50.000 bis 60.000 km liegt der TCO-Vorteil von Batterie-Lkw gegenüber dem Diesel-Lkw für den 18 t Solo-Lkw bei -88.000 bis -64.000 €, für den 26 t Solo-Lkw bei -87.000 bis -63.000 €, für den Hängerzug bei -46.000 bis -30.000 € und für eine Sattelzugmaschine bei -55.000 bis -30.000 €. Bei 141 Fahrzeugen liegt der Kostenvorteil über 10.000 € über die gesamte Haltedauer. Dies unterstreicht die Robustheit des wirtschaftlichen Vorteils von Batterie-Lkw.

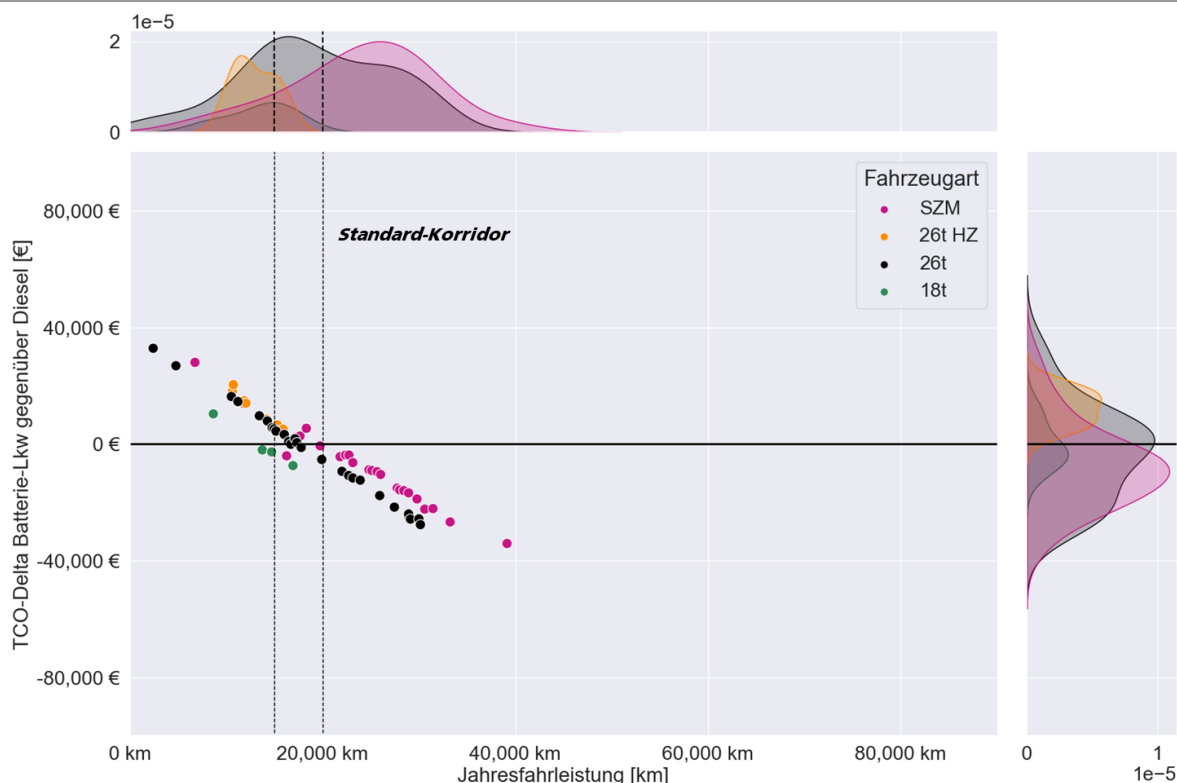
Abbildung 29: TCO-Delta für alle Fahrzeuge ab Oranienburg



Quellen: Eigene Darstellung

Analog visualisiert Abbildung 30 das TCO-Delta für alle Fahrzeuge ab Mariendorf. Insgesamt erzielen nur 58 % der Fahrzeuge (36 von 62) einen TCO Vorteil. Für die am Standort typische mittlere Jahresfahrleistung von 15.000 bis 20.000 km ist das TCO-Delta sehr gering und nicht eindeutig. Beim 18 t Solo-Lkw liegt das TCO-Delta zwischen -14.100 bis -3.400 €, für den 26 t Solo-Lkw bei -4.700 bis +6.100 €, für den Hängerzug bei -2.000 bis 8.000 € und für eine Sattelzugmaschine bei +100 bis +10.300 €. Bei nur 19 Fahrzeugen liegt der Kostenvorteil über 10.000 € über die gesamte Haltedauer. Dies betont die Unsicherheit des wirtschaftlichen Vorteils von Batterie-Lkw.

Abbildung 30: TCO-Delta für alle Fahrzeuge ab Mariendorf



Quellen: Eigene Darstellung

Als Zwischenfazit fasst Tabelle 10 die Break-Even Jahresfahrleistung an, ab derer sich ein Einsatz von Batterie-Lkw in den beiden Standorten je Fahrzeugsegment lohnt. Die Ableitung erfolgt anhand der gemittelten Verbräuche und Mautanteile. Diese liegt für Mariendorf zwischen einer mittleren Fahrleistung von 14.000 und 21.000 km pro Jahr. Für den Standort Oranienburg ergibt sich analog eine mittlere Fahrleistung zwischen 24.000 km und 35.000 km. Zu Bedenken ist weiterhin ein entsprechender Sicherheitspuffer auf diese Break-Even Fahrleistungen, um die Robustheit des wirtschaftlichen Vorteils gegenüber sich verändernden Rahmenbedingungen abzusichern.

Tabelle 10: Break-Even Fahrleistungen je Segment und Standort

Parameter	Einheit	Mariendorf	Oranienburg
18t	[km/a]	14.000 km	23.000 km
26t	[km/a]	18.000 km	24.000 km
Hängerzug	[km/a]	19.000 km	33.000 km
SZM	[km/a]	21.000 km	35.000 km

Quelle: Eigene Darstellung

Sensitivitätsrechnungen

Abbildung 26 Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse einer Sensitivitätsrechnung für die Parameter Dieselpreis, Strompreis, anteilige Infrastrukturkosten in der Maut sowie ohne eine 80 % Mehrkostenförderung für Fahrzeuge und Infrastruktur. Analog zu Tabelle 10 werden die Break-Even Fahrleistungen je Standort angegeben. Als Beispielsegment dient die Sattelzugmaschine. Es wird jeweils nur der betrachtete Parameter variiert und statt individueller Werte werden gemittelte Werte für Verbrauch und Mautanteil herangezogen. Gegenüber Tabelle 4 bleibt der Dieselpreis konstant auf 1,25 €₂₀₂₀/l. Beim Strompreis wird der Effekt eines jährlichen Anstiegs um real 2 % untersucht. Für die Infrastrukturkosten in der Maut werden anstatt der 100% Abgabe nur anteilige Abgaben von 50% sowie 75% für den Zeitraum nach 2025 untersucht, wie es im Sinne der Eurovignettenrichtlinie diskutiert wird.

Ein ansteigender Strompreis hat den geringsten Einfluss auf die Break-Even Fahrleistung mit weniger als +10 %. Dagegen zeigt die Annahme eines konstanten Dieselpreises einen höheren Einfluss und führt zu einer rund 40 % höheren Break-Even Fahrleistung der Fahrzeuge. Diese bestätigt einerseits den Einfluss der Kraftstoffkosten im Betrieb des Dieselfahrzeugs aber zusätzlich verdeutlicht sich die Lenkungswirkung durch die Einführung des CO₂-Preises. Die größte Sensitivität zeigt sich bei einer ausbleibenden Förderung der Fahrzeuge und der Infrastruktur. In diesem Szenario müssten die Fahrzeuge nahezu fünfmal höhere Fahrleistungen aufweisen. Eine derartige Jahresfahrleistung ist dabei eher im internationalen Fernverkehr üblich, wodurch ein Einsatz im städtischen und regionalen Verteilerverkehr bei ausbleibender Förderung als nichts erstrebenswert erachtet werden kann. Für die Infrastrukturabgabe zeigt sich in Oranienburg aufgrund der höheren Mautanteile eine stärkere Sensitivität. Wird der Effekt einer 50 % Abgabe auf die Fahrzeuge umgelegt, so wären in Mariendorf nun 40 von 62 Fahrzeugen (65 %) und in Oranienburg 149 von 162 Fahrzeugen (92 %) aus ökonomischer Sicht ersetzbar.

Tabelle 11: Break-Even Fahrleistungen - Sensitivitätsrechnungen Sattelzugmaschine

Parameter	Einheit	Mariendorf	Oranienburg
Dieselpreis	[km/a]	29.000 km (+38 %)	47.000 km (+34 %)
Strompreis	[km/a]	22.000 km (+5 %)	36.000 km (+3 %)
80 % Förderung	[km/a]	89.000 km (+424 %)	157.000 km (+449 %)
75% Infrastruktur Mautabgabe	[km/a]	19.500 km (-7 %)	31.000 km (-11 %)
50% Infrastruktur Mautabgabe	[km/a]	19.000 km (-10 %)	30.000 km (-14 %)

Quelle: Eigene Darstellung

Zuletzt wird eine Sensitivität zur Höhe einer CO₂-abhängigen Abgabe im Sinne der Eurovignettenrichtlinie ab 2023 berechnet. Die Abgabe wird unter der Annahme eines Äquivalenzpreises so berechnet, dass die Betriebskosten der Dieselfahrzeuge konstant gegenüber dem festen CO₂-Preis bleiben. Um eine Doppelbesteuerung zu vermeiden, wird die CO₂-Abgabe im Dieselpreis exkludiert. Entsprechend den jährlichen Fahrleistungen und individuellen Mautanteilen der Fahrzeuge wird dann für jedes Fahrzeug die kilometer-abhängige Abgabe berechnet, welche die dann geringeren Kraftstoffkosten äquivalent ausgleichen würde. Durch unterschiedliche Mautanteile für städtische und regionale Touren ergeben sich unterschiedliche CO₂-Abgaben für einzelne Fahrzeuge und je nach Standort. Gewichtet nach der Jahresfahrleistung ergibt sich in Mariendorf (67 % Mautanteil im Median) eine CO₂-Abgabe von 12,1 ct/km im Jahr 2023 und ansteigend auf 23,1 ct/km bis 2028 (alle Preise sind Nominalpreise). In Oranienburg (85 % Mautanteil im Median) ergebe sich eine Abgabe von 9,8 ct/km im Jahr 2023 und von 18,5 ct/km im Jahr 2028, d.h. rund 20 % geringer als in Mariendorf da der Mautanteil in Oranienburg höher ist. Da die CO₂-Abgabe im Diesel gegenüber einer Mautabgabe auf 100 % aller km anfällt, liegt es nahe,

dass der so bestimmte CO₂-Preis in der Mautabgabe im Jahr 2030 über 200 €/tCO₂ liegen müsste, insbesondere für den städtischen Lieferverkehr mit seinen geringeren Anteilen an Fahrten auf Mautpflichtigen Strecken.

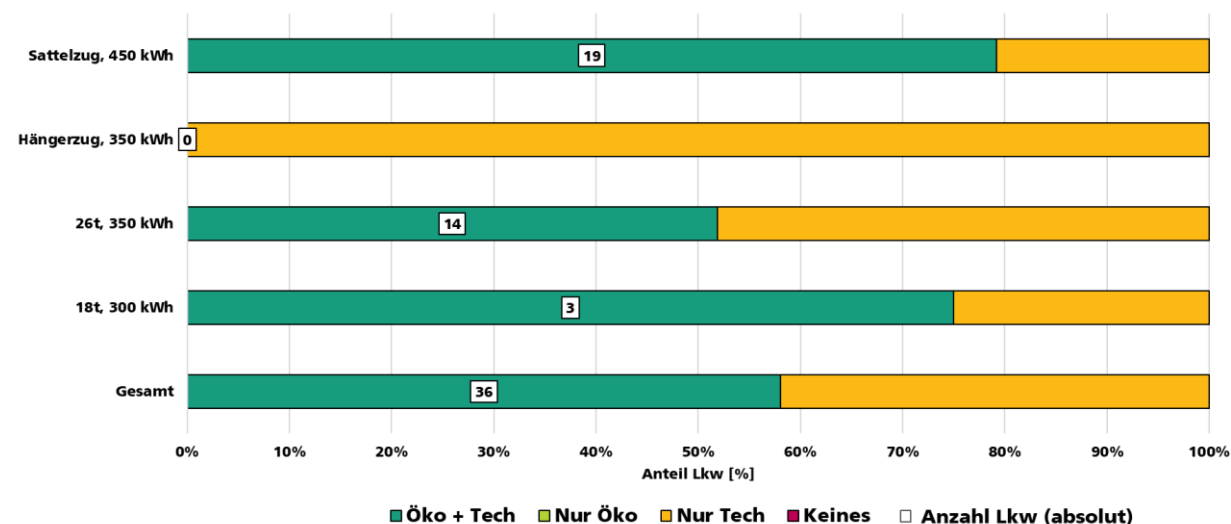
3.4 Techno-ökonomisches Ersetzungspotential

Bei der Berechnung der techno-ökonomischen Machbarkeit wird die Machbarkeit der Touren auf die Fahrzeuge zurückgespiegelt. Sind alle Touren gemäß der Tourenplanung und in genau der vorgesehen Reihenfolge machbar, so wird das Fahrzeug als "elektrifizierbar" gekennzeichnet.

Insgesamt zeigt sich eine Wechselwirkung aus Jahresfahrleistung und ökonomischer Bewertung. Der TCO Vorteil des Batterie-Lkw steigt mit der Fahrleistung an, da sich die höheren Anschaffungskosten durch geringere Betriebskosten amortisieren können. Gleichzeitig sinkt die technische Machbarkeit mit steigender Jahresfahrleistung da Einzel- oder auch Tagesfahrprofile – auch mit Zwischenladen am Depot – nicht erfolgreich absolviert werden können. Bei geringen Jahresfahrleistungen und entsprechend kurzen Touren steigt die technische Machbarkeit, jedoch können sich höhere Anschaffungskosten des Batterie-Lkw nicht amortisieren.

Abbildung 31 zeigt das aktuelle techno-ökonomisches Ersetzungspotential am Standort Mariendorf je Segment. Die absolute Anzahl an elektrifizierbaren Fahrzeugen ist in den weißen Boxen angegeben. Die geringe Jahresfahrleistung limitiert die Elektrifizierung in allen Segmenten. Daher erzielen nur rund 58 % aller Fahrzeuge (36 von 62 Fahrzeugen) einen ökonomischen Vorteil gegenüber dem Diesel-Pendant während aus technischer Sicht alle Fahrzeuge am Standort elektrifizierbar sind. Das Elektrifizierungspotential ist dabei bei Sattelzügen und 26 t Solo-Lkw am größten.

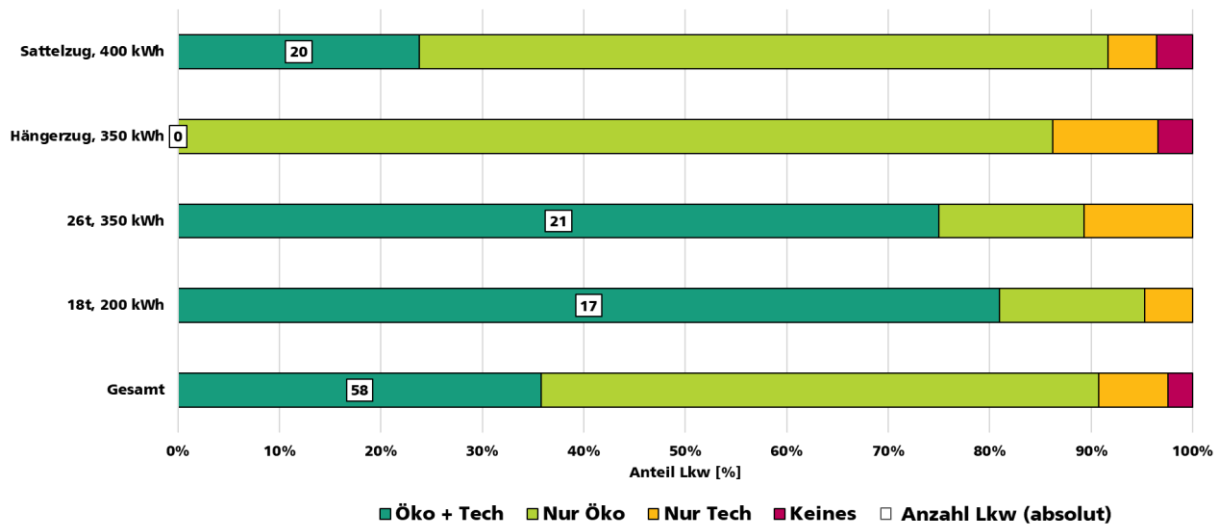
Abbildung 31: Techno-ökonomisches Elektrifizierungspotential Mariendorf



Quellen: Eigene Darstellung

Analog zeigt Abbildung 32 das aktuelle techno-ökonomisches Ersetzungspotential am Standort Oranienburg je Segment. Hier limitiert die hohe Jahresfahrleistung die Elektrifizierung in allen Segmenten da aus technischer Sicht nur 36 % der Fahrzeuge (58 von 162) elektrifizierbar sind. Andererseits erzielen über 90 % oder 146 von 162 Fahrzeugen einen TCO Vorteil. Das Elektrifizierungspotential ist bei 18 t und 26 t Solo-Lkw am höchsten. Dahinter folgen gut ein Viertel der am Standort eingesetzten Sattelzugmaschinen.

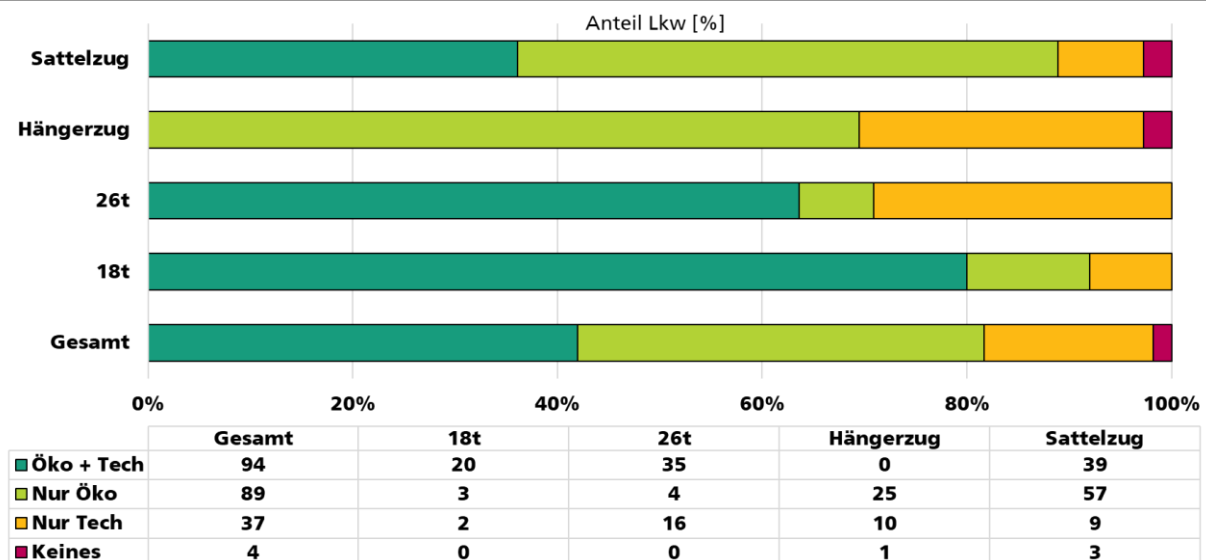
Abbildung 32: Techno-ökonomisches Elektrifizierungspotential Oranienburg



Quellen: Eigene Darstellung

Als finales Ergebnis dieser Studie visualisiert Abbildung 33 das techno-ökonomische Ersetzungspotential über beide Standorte und damit für die gesamte Region Nord-Ost. Die Abbildung ist analog aufgebaut und wird von einer Übersichtstabelle in absoluten Zahlen ergänzt. In Summe sind rund 42 % der Fahrzeuge (94 von 224) aus techno-ökonomischer Sicht elektrifizierbar. Dies setzt sich zusammen aus 20 18 t Solo-Lkw, 35 26 t Solo-Lkw sowie 39 Sattelzugmaschinen. Aus ökonomischer Sicht liegt das Elektrifizierungspotential bei rund 80 %, die technische Machbarkeit aufgrund von zu hohen Fahrleistungen limitiert das Potential. Eine Umrechnung der Fahrzeuge auf die Transportleistung in Tonnenkilometer führt auf eine techno-ökonomische Elektrifizierung von 21 %⁶.

Abbildung 33: Techno-ökonomisches Elektrifizierungspotential Region Nord-Ost



Quellen: Eigene Darstellung

⁶ Unter Annahme einer anteiligen Infrastrukturabgabe im Mautsystem von 75 bzw. 50 % für Batterie-Lkw läge das techno-ökonomische Elektrifizierungspotential der Transportleistung bei 21,7 bzw. 22,1% anstatt 21,4 % im Referenzfall.

4 Diskussion

Die folgende Diskussion umfasst die Tourendaten, das technische Elektrifizierungspotential, die angenommenen Batteriekapazitäten, Unsicherheiten im Energieverbrauch, Unsicherheiten in den Gesamtnutzungskosten, mögliche Verlängerungen der Reichweiten sowie mögliche Nutzlasteinschränkungen.

Im Rahmen dieser Studie wird das Einsatzprofil der Fahrzeuge als gegeben angenommen. Es findet keine Anpassung oder Optimierung der Routen statt. Durch eine entsprechende Einsatzplanung mit angepasster Verkettung der Einzeltouren und Zuordnung auf Fahrzeuge könnten beispielsweise mehrere lange Einzeltouren hintereinander für ein Fahrzeug vermieden werden. In ähnlicher Weise könnte eine SoC- bzw. Restreichweiten-basierte Einsatzplanung lange Einzeltouren an Fahrzeuge zuweisen, die den höchsten SoC im benötigten Segment aufweisen und zum Zeitpunkt zur Verfügung stehen.

Die Studie nimmt vereinfachend an, dass im Fallbeispiel ein Fahrzeug nur dann elektrifizierbar ist, wenn alle Tagestouren machbar sind. Eine nicht-machbare Tagestour falsifiziert bereits eine erfolgreiche Elektrifizierung, auch wenn alle anderen Tagestouren machbar wären. Besonders deutlich wird dies am Beispiel des Hängerzugs oder der Sattelzüge ab Oranienburg. Zwar sind bei Ersterem über 20 % aller Tagestouren technisch möglich, im Gesamtergebnis können aber nur 3 der 29 Lkw (10 %) als ersetzbar gekennzeichnet werden. Bei letzterem sind sogar 50 % aller Tagestouren technisch möglich, im Gesamtergebnis sind aber nur 20 der 84 Lkw (24 %) als ersetzbar gekennzeichnet. Dies lässt den Schluss zu, dass das Ergebnis dieser Studie als eher konservativ zu erachten ist und zeigt gleichzeitig den enormen Hebel, welcher sich durch eine angepasste Fahrzeugeinsatzplanung ergeben könnte. So könnte beispielsweise das Vorhalten weniger Diesel-Lkw eine mögliche Strategie sein. Diese könnten die Einsatzprofile mit geringer Fahrleistung übernehmen, als Backup für Unregelmäßigkeiten bereitstehen und die wenigen nicht-elektrifizierbaren Touren übernehmen, während der Großteil der Flotte emissionsfrei fährt. Zuletzt muss einschränkend erwähnt werden, dass das reale Alter der 224 Lkw und die entsprechende zyklische sowie kontinuierliche Flottenerneuerung in dieser Studie nicht betrachtet werden.

Die Batteriekapazitäten je Segment werden an beiden Standorten unterschieden. Dies wiederum ist in etwas gleich zu setzen mit einer Zuordnung nach städtischem und regionalem Einsatz. Eine Optimierung je Fahrzeug hinsichtlich technischer Machbarkeit und Minimierung der Gesamtnutzungskosten erfolgt nicht. Unter der Nebenbedingung von Marktverfügbarkeit, Ladeoptionen und technischer Machbarkeit könnte ein Optimierungsproblem je Fahrzeug mit gegebenem Einsatzprofil die kostengünstigste Batteriekapazität über die Haltedauer ermitteln. Hiermit können Spediteure und Flottenbesitzer das modulare Modellangebot der Hersteller besser wahrnehmen und für jeden Einsatz die passende Batterie ermitteln. Einschränkend ergibt sich jedoch eine geringe Flexibilität bei der Fahrzeugeinsatzplanung.

Die Unsicherheiten bezüglich der Gesamtnutzungskosten beziehen sich insbesondere auf die heutigen Anschaffungskosten der Fahrzeuge, die Batterielebensdauer und die Kosten für Infrastruktur. Angesichts von kommerziell verfügbaren Zellen, wie der Kokam SLPB130255255G1 Pouch-Zelle mit 103 Ah (211 Wh/kg und 503 Wh/l) bei einer zyklischen Lebensdauer von über 6.000 Zyklen mit 1C/1C sowie über 15 Jahren kalendarischer Lebensdauer, erscheint letzteres jedoch unwahrscheinlich (Kokam 2021). Weiterhin beruhen Annahmen wie die Wartungskosten bislang auf Abschätzungen, da insbesondere große elektrische Nutzfahrzeuge erst am Anfang einer großflächigen Marktverfügbarkeit mit Serienfahrzeugen statt wie bisher Prototypen und Nachrüstlösungen stehen. Entsprechend fehlen empirische Erfahrungswerte. Unabhängig von den heutigen Lkw-Batteriekosten legt die realisierte Kostendegression für Batteriesysteme bei Pkw (BloombergNEF' 2020) nahe, dass auch die Kosten im Lkw-Segment signifikant sinken werden und dadurch attraktiver werden. Hinzu kommt der weitere technologische Fortschritt.

Unsicherheiten im simulierten Energieverbrauch ergeben sich durch den vereinfachten Simulationsansatz gegenüber einer detaillierten komponentenbasierten Simulation und die dahinterliegenden Annahmen. Entsprechend wären Parameter wie die Rekuperation, Effizienzen im Antriebsstrang, die Topographie der Route, Leistungsaufnahmen von Nebenverbrauchern und der Warenkühlung sowie dynamische

Parameter wie Geschwindigkeit und Beschleunigung je Zeiteinheit, je Route und je Fahrzeug zu bestimmen. Eine möglichst reale Betrachtung würde dann auch eine Unterscheidung nach Hersteller und dessen Antriebsstrangtopologie sowie dessen verwendete Komponenten erfordern. Diese Daten sind einerseits nicht öffentlich verfügbar und andererseits wird der Komplexitätsgrad enorm vergrößert. Generische Fahrzeug- und Komponentenmodelle bieten zwar Abhilfe, sind aber so in der Realität nicht anzutreffen. Durch diese Vereinfachung könnten sich die streckenspezifischen Energieverbräuche in dieser Studie ändern. Dennoch zeigt sich, dass die in anderen Studien angegebenen Energieverbräuche mit den in diesem Bericht angegebenen Werten übereinstimmen. Ähnlich zu den Gesamtnutzungskosten muss auch hier erwähnt werden, dass Realverbräuche von Serien-Lkw heute noch größtenteils unbekannt sind und großflächige Messreihen sowie Tests fehlen. Für andere Spediteure und Flottenbesitzer sei an dieser Stelle der Hinweis gegeben, dass der kontinuierliche und zusätzliche Energieverbrauch für die Warenkühlung in der Größenordnung zwischen 0,1 bis 0,3 kWh/km in anderen Anwendungsfällen nicht berücksichtigt werden muss. Auch gibt es erste Hersteller, die Trailer mit eigener Batterie anbieten. Allerdings können in anderen Anwendungsfällen aber auch weitere Zusatzverbräuche wie bspw. hydraulische Systeme beim Schüttguttransport eine Rolle spielen.

Die politischen Rahmenbedingungen sind maßgebend für die Wirtschaftlichkeit und den weiteren Markthochlauf von Batterie-Lkw. Das Mautsystem, die Entwicklung der CO₂-Abgabe, die Energiekosten und insbesondere die 80 % Mehrkostenförderung von Fahrzeugen und Infrastruktur haben einen entscheidenden Einfluss auf einen wirtschaftlichen Betrieb bei einer Anschaffung 2021. Ohne die Förderung wäre die Wirtschaftlichkeit in der stark kostenorientierten Logistik mit nur geringen Margen heute noch kaum möglich. Bei den geringeren Betriebskosten, um die noch vorhandene Lücke in den Anschaffungskosten zu schließen, haben neben der Maut die Stromkosten und die Wartungskosten einen hohen Einfluss. Gerade bei geringen Jahresfahrleistungen, gepaart mit oft geringeren Mautanteilen, reichen die aktuellen Maßnahmen nicht aus, um die höheren Anschaffungskosten zu amortisieren. Gleichzeitig wird die Wirtschaftlichkeit eines im Jahr 2021 gekauften und bis 2028 gehaltenen Batterie-Lkw auch durch die hier angenommene steigende CO₂-Abgabe auf fossile Kraftstoffe wesentlich beeinflusst.

Die Studie betrachtet lediglich die Option des Zwischenladens am Depot. Auf die Betrachtung von Zwischenladen während einer Tour zur Verlängerung der Reichweite wird verzichtet. Einerseits kann dies an den Kundenstandorten, in diesem Fall einzelnen Filialen, ohne zusätzlichen Zeitbedarf während des Abladens erfolgen. Diese lokale Infrastruktur an einzelnen Standorten könnte helfen die technische Machbarkeit auf langen Einzeltouren zu gewährleisten. Die Kosten müssten entsprechend in die Gesamtnutzungskosten verrechnet werden. Weiterhin könnte öffentliche Ladeinfrastruktur genutzt werden. Entsprechend wäre der zu zahlende Preis je kWh Strom an der Ladesäule gegenüber zusätzlichen Batteriealterungseffekten durch das Schnellladen abzuwägen. Ohne zusätzlichen Zeitbedarf wäre zudem das Kombinieren von Ladepausen mit der in Deutschland vorgeschriebenen Pause zwischen den Lenkzeiten (30 bis 45min Bruttoladezeit je nach Szenario). Zuletzt wäre erneuerbarer Wasserstoff eine potenzielle Lösung für den emissionsfreien Lieferverkehr auf längeren Strecken und für gewisse Nischensegmente. Nach aktuellen Planungen seitens der OEMs wird diese Technologie voraussichtlich erst gegen Ende der 2020er Jahre in größeren Stückzahlen zur Verfügung stehen (NPM 2020). Zudem erfordert auch diese Technologie eine entsprechende Infrastruktur mit Wasserstofftankstellen. Angesichts potenzieller technologischer Verbesserungen, höherer angekündigter Batteriekapazitäten durch die Hersteller, möglicher Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge und mehr verfügbaren Ladepunkten erscheint die Machbarkeit eines urbanen und regionalen Lieferverkehrs mit 100% batterieelektrischen Lkw zeitnah realistisch.

Mit der aktuellen Ausnahmeregelung in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung darf "das zulässige Gesamtgewicht [...] unter Beachtung der Achslasten um bis zu 2,00 t überschritten werden, wenn das Mehrgewicht durch die emissionsfreie Technologie begründet ist". Durch den Wegfall des verbrennungsmotorischen Antriebs kann ein Teil des Mehrgewichts von HV-Batterie, Elektromotoren, HV-Verkabelung, Kühlung und Leistungselektronik kompensiert werden. Die Studie berücksichtigt jedoch nur die ersten beiden Kernkomponenten. Der antizipierte Nutzlastverlust liegt in allen simulierten Varianten bis 600 kWh Batteriespeicher unter 1,8 Tonnen. Für den urbanen und regionalen Lieferverkehr ist entsprechend von keinem oder keinem nennenswerten Nutzlastverlust auszugehen.

5 Fazit und Handlungsempfehlungen

Die vorliegende Studie untersucht die Elektrifizierung des deutschen Lieferverkehrs anhand von realen Tourendaten mit Hilfe einer techno-ökonomischen Betrachtung. Der Datensatz umfasst über 9.000 einzelne Pendeltouren und über 540 Kunden in der Region Nord-Ost Deutschland, die aus zwei Depots beliefert werden. Zur Belieferung selbst werden über 220 Fahrzeuge verschiedener Segmente der Gewichtsklasse N3 eingesetzt.

Entscheidend zeigt sich die Wechselwirkung aus technischer Machbarkeit und ökonomischer Bewertung. So stellt der städtische Lieferverkehr zwar aus technischer Sicht den einfachsten Elektrifizierungsfall dar, jedoch zeigt sich ein wirtschaftlicher Betrieb trotz 80 % Mehrkostenförderung aufgrund der geringen Fahrleistungen als Kernherausforderung. Bereits heute ist aus technischer Sicht eine 100 % Elektrifizierung der Flotte möglich. Dagegen limitiert die technische Machbarkeit die weitere Elektrifizierung auf längeren Einsatzrouten im Regionalverkehr, obwohl der Betrieb wirtschaftlich sehr attraktiv ist. Bei regionaler Belieferung auf längeren Fahrstrecken sind heute bereits mehr als 50 % aller Tagestouren mit Batterie-Lkw möglich. Perspektivisch wird auch der Regionalverkehr unter Berücksichtigung verschiedener Maßnahmen zur Reichweitenverlängerung mit Batterie-Lkw technisch machbar sein. Während im städtischen Lieferverkehr das Depot-Zwischenladen geringen Mehrwert bietet, ist der Effekt bei Pendelrouten im regionalen Lieferverkehr größer und sollte mitgeplant werden. Aufgrund der langen Einzelfahrten zeigt sich jedoch eine insgesamt höhere Sensitivität der Machbarkeit gegenüber höheren Batteriekapazitäten als Depot-Zwischenladen mit verschiedenen Ladeleistungen. In beiden Anwendungsfällen ist die Depot-Ladeinfrastruktur für Laden über Nacht entscheidend.

Als Gesamtfazit zeigt sich, dass aktuell verfügbare und angekündigte Batterie-Lkw Modelle bereits ausreichend sind, um ad-hoc einen Großteil des Lieferverkehrs zu elektrifizieren. Im Fallbeispiel können rund 42 % bzw. 94 von 224 Fahrzeugen aus techno-ökonomischer Sicht elektrifiziert werden. Dies entspricht 21 % der Transportleistung. Durch eine Neuuzuordnung der Touren könnten perspektivisch bis zu 36 % der Transportleistung möglich werden.

Handlungsempfehlungen an REWE

Im Fallbeispiel können aus heutiger Sicht rund 42 % der Fahrzeugflotte (94 von 224) auf Batterie-Lkw umgestellt werden können. Die Fahrzeugeinsatzplanung sollte zukünftig bei der Zuweisung von Folgetouren neben der zeitlichen Verfügbarkeit auch die Restreichweite des Fahrzeugs berücksichtigen, um die Elektrifizierung zu beschleunigen. Ökonomisch sinnvoll wäre die Umstellung bei rund 80 % der Fahrzeugflotte. Der Erhalt der 80 %-Förderung ist entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge. Die Ausstattung von Warenschleusen mit Ladepunkte könnte eine potentielle Hürde aufgrund von zusätzlichen Kosten, Platz und Einschränkungen Flexibilität darstellen. Daher ergibt sich die Empfehlung zunächst Fahrzeuge zu elektrifizieren, die nicht auf die Option Zwischenladen am Depot angewiesen sind. Hieraus ergeben sich über alle Segmente 31 Batterie-Lkw in Mariendorf und 29 Batterie-Lkw in Oranienburg. Dies entspricht einer ad-hoc Flotten-Elektrifizierung von 27 %. Beim Infrastrukturausbau sollte bereits heute eine höhere Flotten-Elektrifizierung bedacht werden, um Ertüchtigungen am Transformator, Erdbauarbeiten und Kabelverlegung, nur einmal durchführen zu müssen.

Handlungsempfehlungen an andere Logistiker

Alle Logistiker sollten den Umstieg auf Batterie-Lkw im städtischen Lieferverkehr und im Regionalverkehr zeitnah prüfen. Zentral ist die Bereitstellung einer Depot-Ladeinfrastruktur für das Laden über Nacht. Gleichzeitig stellt das Zwischenladen am Zielort einen wichtigen Stellhebel für die Reichweitenverlängerung im Regional- und Langstreckenverkehr dar (Burgers et al. 2021). Weiterhin ergibt sich die Empfeh-

lung einer individualisierten Fahrzeugbetrachtung, um passend zum modularen Modellangebot der Hersteller für jedes Einsatzprofil die passende Batteriegröße auszuwählen. Nutzlasteinschränkungen für Fahrzeuge mit Batteriegrößen passend für den städtischen und regionalen Lieferverkehr sind aufgrund der aktuellen Ausnahmeregelung nicht oder nur in geringem Umfang, je nach möglicher technischer Ausstattung des Fahrzeugs, zu erwarten. Bei einem möglichen Netzausbau und einer Erhöhung der Anschlussleistung an den Depots sollte ein Einmalausbau geplant werden und entsprechend langfristig die volle Elektrifizierung der gesamten Flotte antizipiert werden. Hier sollten Logistiker sehr eng mit dem lokalen Netzanbieter zusammenarbeiten, da Kosten und Aufwand sehr stark von Rahmenbedingungen vor Ort abhängig sind. Eine Notwendigkeit für andere Technologien, wie beispielsweise Wasserstoff, ergibt sich aus technischer Sicht für den vorliegenden Anwendungsfall nicht.

Handlungsempfehlungen an die Politik

Für politische Entscheidungsträger ergeben sich folgende Empfehlungen hinsichtlich Förderung und Abgabensystem, technische Lösungsoptionen und Regulierung.

Aufgrund der noch frühen Marktphase ist die 80 % Mehrkostenförderung von Fahrzeugen und deren Infrastruktur ein entscheidender Hebel für die Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw. Auch ist die Bedeutung von Ladeinfrastruktur an den Depots zu betonen. Gleichzeitig sind zusätzliche Maßnahmen wie Ausgestaltung von Maut und CO₂-Abgabe entscheidend zur Absicherung der Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Diesel – insbesondere im städtischen Lieferverkehr. Bei der Ausgestaltung einer potentiellen CO₂-abhängigen Mautabgabe ist zu beachten, dass im städtischen Lieferverkehr geringe Fahranteile auf aktuell mautpflichtigen Straßen stattfinden und ein entsprechender Anstieg der Abgabe im zeitlichen Verlauf zu betonen ist.

Entsprechend der technischen wie auch techno-ökonomischen Machbarkeit ab heute könnte bereits zeitnah die Option von emissionsfreien Zonen in großen Metropolen und deren Einzugsgebiet geprüft werden. Im Fallbeispiel können bereits 100% der Fahrzeuge zur Belieferung in der Stadt und 40 % der Flotte im regionalen Einsatz ohne Routenoptimierung elektrifiziert werden. Dies entspricht einer techno-ökonomischen Elektrifizierung der Transportleistung von 21 %. Technisch möglich wären dagegen bis zu 36 % mit Zwischenladen. Dieses Potential wird noch größer wenn Schnellladen in den Filialen oder entlang der Autobahn zusätzlich betrachtet werden.

Demnach erscheint das nach NECP geplante elektrische Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr bis 2030 möglich. Dennoch setzt dies eine entsprechende breite Verfügbarkeit der Modelle voraus. Die Ankündigungen zu Marktanteilen und Verkaufszielen von Batterie-Lkw sind vielversprechend. Gleichzeitig werden aktuell noch kaum Fahrzeuge in großen Stückzahlen am Markt angeboten. Entsprechend müssen zunächst die Truckhersteller die breite Verfügbarkeit und Angebot gewährleisten, individuellen Service und Beratung anbieten, oder auch attraktive Leasingangebote inklusive Absicherung anbieten.

Um diese Lieferbarkeit zu forcieren und die Kostensenkung der Fahrzeuge zu beschleunigen könnten neben Einfahrtsbeschränkungen auch ZEV-Mandate sowie eine Verschärfung der europäischen CO₂-Flottenziele im Zuge des geplanten Reviews helfen. Nach Breed et al. (2021) sind lediglich 4 bis 22 % ZEV-Neuzulassungen notwendig, um die aktuellen CO₂-Flottenziele einzuhalten. Demgegenüber stehen bereits heute Herstellerankündigungen für ZEV-Marktanteile für das Jahr 2030 von im Mittel 43 % (T&E 2021b). Um jedoch die Einhaltung des verbleibenden CO₂-Budgets für das 1.5°C Ziel und das Ziel der Klimaneutralität in 2045 vor dem Hintergrund von Haltedauern, Fahrzeugalter und Flottenerneuerung einzuhalten, könnten bereits Mitte-Ende der 2030er Jahre 100 % ZEV-Neuzulassungen notwendig werden. Entsprechend müsste der Anteil der ZEV-Neuzulassungen bereits 2030 bei über 60 % liegen (Plötz et al. 2021).

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Zusammenfassung - Region Nord-Ost: Kunden (Links) und Touren (Rechts).....	6
Abbildung 2: Zusammenfassung - Analyse der Einzel- und Tagestouren.....	8
Abbildung 3: Zusammenfassung - Simulierter Energieverbrauch (battery-to-wheel).....	9
Abbildung 4: Zusammenfassung - Technisches Elektrifizierungspotential aus heutiger Sicht.....	10
Abbildung 5: Zusammenfassung – Differenz der Gesamtnutzungskosten aus heutiger Sicht.....	11
Abbildung 6: Zusammenfassung - Techno-ökonomisches Ersetzungspotential Region Nord-Ost aus heutiger Sicht	12
Figure 7: Summary - Northeast Region: Customers (Left) and Tours (Right).....	14
Figure 8: Summary - Analysis of single tours and daily mileage	16
Figure 9: Summary - Simulated energy consumption per distance (battery-to-wheel).....	17
Figure 10: Summary - Current technical feasibility.....	18
Figure 11: Summary – Current TCO difference	19
Figure 12: Summary - Techno-economic feasibility of BET for the entire truck fleet.....	20
Abbildung 13: Standorte der Logistikzentren und Filialen.....	24
Abbildung 14: Betrachtete Fahrzeuge.....	24
Abbildung 15: Visualisierung der Touren je Segment oder je Standort.....	25
Abbildung 16: Methodisches Vorgehen	26
Abbildung 17: Karte der Depots zur Visualisierung von Ladeinfrastruktur-Optionen	30
Abbildung 18: Relative Kostenbestandteile am Beispiel 50 kW DC-Schnelllader.....	35
Abbildung 19: Analyse der Einzeltouren.....	37
Abbildung 20: Analyse der Tagestouren	38
Abbildung 21: Transportleistung im deutschen Straßengüterverkehr	40
Abbildung 22: Vergleich Datensatz und KiD-Fahrprofile.....	40
Abbildung 23: Vergleich REWE-Datensatz und Eurostat-Transportstatistiken	41
Abbildung 24: Übersicht verfügbare und angekündigte Batterie-Lkw Modelle.....	42
Abbildung 25: Histogramme der simulierten Energieverbräuche (battery-to-wheel) je Segment	43
Abbildung 26: Detailbetrachtung - Elektrifizierungspotential in Abhängigkeit der Batteriegröße.....	45
Abbildung 27: Zwischenergebnis - Technisches Elektrifizierungspotential.....	46
Abbildung 28: Gesamtnutzungskosten über acht Jahre Haltedauer und Anschaffung in 2021 am Beispiel Sattelzugmaschine.....	48
Abbildung 29: TCO-Delta für alle Fahrzeuge ab Oranienburg	48
Abbildung 30: TCO-Delta für alle Fahrzeuge ab Mariendorf	49
Abbildung 31: Techno-ökonomisches Elektrifizierungspotential Mariendorf.....	51
Abbildung 32: Techno-ökonomisches Elektrifizierungspotential Oranienburg.....	52

Abbildung 33: Techno-ökonomisches Elektrifizierungspotential Region Nord-Ost..... 52

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fahrzeugparameter für die Energiesimulation.....	29
Tabelle 2:	Zyklus-spezifische Durchschnittswerte und weitere Simulationsparameter	29
Tabelle 3:	Spezifische Kostenparameter (DMC)	32
Tabelle 4:	Energiekosten.....	33
Tabelle 5:	Betriebskostenparameter für Dieselfahrzeuge.....	34
Tabelle 6:	Kosten Ladeinfrastruktur pro Ladepunkt.....	35
Tabelle 7:	Fahrleistungen je Standort in der Gesamtflotte	39
Tabelle 8:	Kennzahlen der Simulation	43
Tabelle 9:	Anschaffungskosten der Fahrzeuge	47
Tabelle 10:	Break-Even Fahrleistungen je Segment und Standort	49
Tabelle 11:	Break-Even Fahrleistungen - Sensitivitätsrechnungen Sattelzugmaschine	50

8 Literatur

- Basma, H.; Beys, Y.; Rodriguez, F. (2021): Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis. International Council on Clean Transportation.
- BloombergNEF' (2020): Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. Online verfügbar unter <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
- Boer, E. den; Aarnink, S.; Kleiner, F.; Pagenkopf, J. (2013): Zero emissions trucks. An overview of state-of-the-art technologies and their potential. Delft: TU Delft.
- Breed, A. K.; Speth, D.; Plötz, P. (2021): CO2 fleet regulation and the future market diffusion of zero-emission trucks in Europe. In: Energy Policy, 159, S. 112640.
- Bundesministerium der Finanzen (2021): Kfz-Steuer-Rechner. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html, zuletzt geprüft am 27.09.2021.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021a): Erster Aufruf zur Antragseinreichung (Teil 1) zur Förderung von klimaschonenden Nutzfahrzeugen und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur (08/2021). Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; NOW GmbH; Bundesamt für Güterverkehr.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021b): Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur. Richtlinie KsNI. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U. (2019): Infrastrukturbedarf E-Mobilität. Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ludwig-Bölkow-Stiftung; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Fraunhofer IOSB.
- Burgers, K.; Kippel, S. (2021): Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for battery electric long-haul trucks. study on behalf of Transport & Environment. Transport and Environment.
- Burnham, A.; Gohlke, D.; Rush, L.; Stephens, T.; Zhou, Y.; Delucchi, M.; Birky, A.; Hunter, C.; Lin, Z.; Ou, S.; Xie, F.; Proctor, C.; Wiryadinata, S.; Liu, N.; Bloor, M. (2021): Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. Argonne National Lab.
- CALSTART (2020): Drive to Zero's Zero-emission Technology Inventory (ZETI) Tool Version 5.9. Online verfügbar unter <https://globaldrivetozero.org/tools/zero-emission-technology-inventory/>.
- Delgado, O.; Rodriguez, F.; Muncrief, R. (2017): Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe. Berlin: International Council on Clean Transportation.
- Deloitte (2018): E-Mobility - Ladeinfrastruktur als Geschäftsfeld. Berlin.
- electrive.net (2021): 1.099 Kilometer mit einer Akkuladung: E-Lkw von Futuricum stellt neuen Weltrekord auf. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2021/08/31/1-099-kilometer-mit-einer-akkuladung-e-lkw-von-futuricum-stellt-neuen-weltrekord-auf/>, zuletzt geprüft am 29.09.2021.
- European Environment Agency (2021): Monitoring of CO2 emissions from heavy-duty vehicles. Flat-tened HDV 2019-20 data.

- Eurostat (2021): road_go_ta_axle Datensatz;road_go_ta_dctg Datensatz. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
- Florian Hacker; Rut von Waldenfels; Moritz Mottschall (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung. Berlin: Öko-Institut e.V.
- Franz Greil (2016): Stromgekühlter Schlaf im Lkw. Online verfügbar unter <https://www.ak-um-welt.at/betrieb/?issue=2016-02>, zuletzt geprüft am 29.09.2021.
- Funke, S. Á. (2018): Techno-ökonomische Gesamtbewertung heterogener Maßnahmen zur Verlängerung der Tagesreichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen. Kassel: Universitätsbibliothek Kassel.
- Göckeler, K.; Hacker, F.; Mottschall, M.; Blanck, R.; Görz, W.; Kasten, P.; Bernecker, T.; Heinzemann, J. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr. Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Berlin.
- Hall, D.; Lutsey, N. (2019): Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. Projects: U.S. charging infrastructure needsTransitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles.
- Heidt, C.; Biemann, K.; Dünnebeil, F. (2019): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Abschlussbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- Hildermeier, J.; Jahn, A.; Rodriguez, F. (2020): Electrifying EU city logistics. An analysis of energy demand and charging cost. Washington: Regulatory Assistance Project; International Council on Clean Transportation.
- International Energy Agency (2021): Global EV Outlook 2021. Accelerating ambitions despite the pandemic. International Energy Agency.
- Jander, B.; Said El Nakschabandi, M.; Embia Yesilyurt, E.; Moll, C.; Link, S.; Schneider, L. (2021): Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich. Studie im Auftrag des BMWi.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Jamet, M.; Keller, M.; Lambrecht, U.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Veres-Hommes, U.; Schwemmer, M. (2018): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw. Analyse im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg.
- Kasten, P.; Maier, U. (2018): Ein Kostenvergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw als Klimaschutzoption für das Jahr 2030. Agora Verkehrswende; Öko-Institut e.V.
- Kleiner, F.; Friedrich, H. (2017): Maintenance & Repair Cost Calculation and Assessment of Resale Value for Different Alternative Commercial Vehicle Powertrain Technologies. In: EVS30 Symposium, October 9 - 11, 2017, Stuttgart.
- Kokam (2021): Datenblatt: Lithium-Ionen Batterie SLPB130255255G1. Kokam.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2021a): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2021 nach Bundesländern und Fahrzeugklassen absolut. FZ 27. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2021b): Verkehr in Kilometern (VK). Zeitreihe Jahre 2014 bis 2020. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_node.html.
- Link, S.; Speth, D.; Griener, J.; George, J. (2021): H₂ mobility via fuel cell or IC engine: Alternatives for heavy-duty vehicles in Germany and India?

- Mareev, I.; Becker, J.; Sauer, D. (2018): Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation. In: *Energies*, 11 (1), S. 55.
- Maur, A. auf der; Brüggeshemke, N.; Kutschera, M. (2020): Lade-Report. Entwicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität sowie Vergleich der Ladetarife in Deutschland. Prognos AG.
- Meszler, D.; Delgado, O.; Rodriguez, F.; Muncrief, R. (2018): European Heavy Duty Vehicles: Cost-effectiveness of fuel-efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025–2030 timeframe. White Paper. Washington: The International Council on Clean Transportation.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2015): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland - Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015. Berlin.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2020): Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge. Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung. Arbeitsgruppe 1 - Klimaschutz im Verkehr. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität.
- Nelder, C.; Rogers, E. (2020): Reducing EV Charging Infrastructure Costs. Project: EV-Grid Integration.
- Nicholas, M.; Hall, D. (2018): Lessons learned on early electric vehicle fast-charging deployments. White Paper.
- NREL DriveCAT (2021): Chassis Dynamometer Drive Cycles. Online verfügbar unter www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool, zuletzt geprüft am 30.09.2021.
- P3 automotive GmbH (2021): P3 Charging Index - Update 2021. COMPARISON OF THE FAST CHARGING CAPABILITY OF DIFFERENT ELECTRIC VEHICLES FROM AN USER PERSPECTIVE. Stuttgart.
- Phadke, A.; Khandekar, A.; Abhyankar, N.; Wooley, D.; Rajagopal, D. (2021): Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2014): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Plötz, P.; Jakob, W.; Gnann, T.; Neuner, F.; Speth, D.; Link, S. (2021): Net-zero-carbon transport in Europe until 2050 – Targets, technologies and policies for a long-term EU strategy. Targets, technologies and policies for a long-term EU strategy. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Propfe, B.; Redelbach, M.; Santini, D.; Friedrich, H. (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values.
- Schwarzer, C. (2018): Ladeinfrastruktur: So lädt Deutschland bis 2025 - Eine interne Prognose des VDA nennt konkrete Zahlen zum Hochlauf der Infrastruktur,“.
- Sensfuß, F.; Lux, B.; Bernath, C.; Kiefer, C.; Pfluger, B.; Kleinschmitt, C.; Franke, K.; Deac, G.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Rehfeldt, Matthias, Herbst, Andrea; Pia, M.; Neuwirth, M.; Wietschel, M.; Gnann, T.; Speth, D.; Krail, M.; Mellwig, P.; Blöhmer, S.; Tersteegen, B.; Maurer, C.; Ladermann, A.; Dröscher, T.; Willemssen, S.; Müller-Kirchenbauer, J.; Giehl, J.; Hilaire, M.; Schöngart, S.; Kurre, A.; Hollnagel, J.; Mikulicz-Radecki, F. von (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Fraunhofer ISI; Consentec GmbH; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Technische Universität Berlin.
- Song, G. (2020): Analysis of the Energy Consumption of the Powertrain and the Auxiliary Systems for Battery-Electric Trucks. Masterarbeit, KTH Royal Institute of Technology (Hrsg.), Sweden.
- Sripad, S.; Viswanathan, V. (2017): Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Make a Practical Electric Semi Truck. In: *ACS Energy Letters*, 2 (7), S. 1669–1673.
- Toll Collect GmbH (2021): Mauttarife. Online verfügbar unter https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html.

- Transport and Environment (2021a): Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland. Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten. Brüssel: Transport and Environment.
- Transport and Environment (2021b): Easy Ride: why the EU truck CO2 targets are unfit for the 2020s. Brüssel: Transport and Environment.
- Umweltbundesamt (2021): Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent>, zuletzt geprüft am 30.09.2021.
- VW (2018): Electric charging for fleets. A compendium for building an electric charging infrastructures within the company.
- Wermuth, M.; Neef, C.; Wirth, R.; Hanitz, I.; Löhner, H.; Hautzinger, H.; Stock, W.; Pfeiffer, M.; Fuchs, M.; Lenz, B.; Ehrler, V.; Schneider, S.; Heinzmann, H.-J. (2012): Mobilitätstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010). Braunschweig: Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH; Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V.; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Kraftfahrt-Bundesamt.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J.; Boßmann, T.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, H.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W.; Mader, S. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI; Fraunhofer IML; PTV Transport Consult GmbH; TU Hamburg-Harburg - IUE; M-Five.