

+



Strategie für die Elektrifizierung
des Straßengüterverkehrs



Potenzialanalyse einer regionalen Lkw-Oberleitungsstrecke im Rhein-Main-Neckar-Gebiet

Modellierung des Verkehrsflusses und des Markthochlaufs
von O-Lkw bis zum Jahr 2030

Berlin, November 2023

Vierter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens
„StratES: Strategie für die Elektrifizierung des
Straßengüterverkehrs“

Autorinnen und Autoren

Wolf Kristian Görz, Florian Hacker, Katharina Göckeler
Öko-Institut e.V.

Gregor Nebauer
Intraplan Consult GmbH

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

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

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Erneuerbar
mobil

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich herzlich bei den Expert*innen aus dem Umfeld des Forschungsprojekts ELISA für die wertvollen Informationen und Denkanstöße, die sie für die Durchführung der dargestellten Potenzialanalyse im Rhein-Main-Neckar-Gebiet geliefert haben. Hierzu zählen Vertreter*innen von Autobahn GmbH, Contargo GmbH & Co. KG, Hessen Mobil, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen und Technische Universität Darmstadt.

Zitierempfehlung

W. K. Görz, F. Hacker, K. Göckeler, G. Nebauer (2023): Potenzialanalyse einer regionalen Lkw-Oberleitungsstrecke im Rhein-Main-Neckar-Gebiet. Vierter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Berlin: Öko-Institut.

Kontakt Partner

Intraplan Consult GmbH
Dingolfinger Straße 2
81673 München
www.intraplan.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Summary	4
1 Hintergrund und Zielstellung	6
2 Verkehrliche Analysen	7
2.1 Methodik der Verkehrsmodellierung: Neuerungen gegenüber StratON	7
2.2 Schritte der Verkehrsumlegung und Strombündelanalysen (Intraplan)	10
2.3 Fahranteile im Haupt-, Vor- und Nachlauf der Oberleitungsstrecke	16
3 Markthochlauf-Modellierung	19
3.1 Grundsätzliches Vorgehen	19
3.2 Projektspezifische Anpassungen	20
3.3 Ermittlung der Neuzulassungsstruktur auf Grundlage der antriebsspezifischen Gesamtnutzungskosten (TCO)	22
3.4 Ableitung des Fahrzeugbestands	23
3.5 Einordnung der getroffenen Annahmen für die Modellierung	23
4 Szenarien und Ergebnisse	24
4.1 Betrachtete Szenarien	24
4.2 Szenarioergebnisse	25
4.2.1 Vergleich der antriebsspezifischen Gesamtnutzungskosten (TCO)	25
4.2.2 Marktpotenzial von O-Lkw und Treibhausgasminderungspotenzial im Jahr 2030	26
4.3 Einordnung der Ergebnisse	27

Zusammenfassung

Die Klimaschutzziele setzen den Straßenverkehr als größten Emittenten von Treibhausgasemissionen im Verkehr unter großen Transformationsdruck. Im Straßengüterverkehr gilt das Hauptaugenmerk den schweren Lkw, die hauptsächlich im Fernverkehr eingesetzt werden und den Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen darstellen. Neben batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Lkw werden Oberleitungs-Lkw als technische Option für einen emissionsfreien Betrieb verfolgt. Bisher sind erste Feldversuche mit wenigen Kilometern Oberleitung realisiert worden. Gleichzeitig zeigen mehrere wissenschaftliche Studien mögliche Zielzustände eines Oberleitungsnetzes auf und skizzieren mögliche Zwischenstufen.

Die vorliegende Analyse schließt mit der Betrachtung einer konkreten regionalen Oberleitungsstrecke im Rhein-Main-Neckar-Gebiet eine wichtige Lücke zwischen aktueller Erprobung und möglichem weiteren Streckenausbau. Die verkehrlichen Analysen und die daran anschließende Markthochlaufmodellierung zeigen kurzfristige Potenziale von O-Lkw bei Realisierung einer ersten längeren Oberleitungsstrecke auf.

Die betrachtete Strecke zwischen Kreuz Frankfurt und Kreuz Walldorf weist angesichts der hohen Verkehrsbelastung eine grundsätzlich hohe Eignung auf. Auch bei der Realisierung einer regionalen Strecke, sind vor allem die Last- und Sattelzüge für eine solche Strecke bedeutsam. Der Betrieb von O-Lkw ist dabei auch schon kurzfristig wirtschaftlich vorteilhaft und wird durch die Mautbefreiung emissionsfreier Antriebe abgesichert. Um einen vollständig elektrischen Betrieb sicherzustellen, ist jedoch trotz Oberleitung ein ergänzender Aufbau von Ladeinfrastruktur an Start- und Zielorten erforderlich. Angesichts der parallelen Entwicklung von batterieelektrischen Lkw und deren hohen Eignung im Regionalverkehr, ist eine Erschließung des aufgezeigten Potenzials nicht abgesichert und müsste mit weiteren Maßnahmen flankiert werden. Die Analysen zeigen, dass eine regionale Oberleitungsstrecke im Idealfall schon relevante Potenziale im Straßengüterverkehr erschließen kann und einen deutlichen Mehrwert gegenüber bisherigen Pilotvorhaben darstellt. Der Ausbau erscheint aber nur sinnvoll, wenn er sich als Zwischenschritt in einen längerfristigen Netzausbauplan einfügt, da erst mit einer **zunehmenden Netzbildung** die Vorteile der Technologie verstärkt erschlossen werden.

Summary

The climate protection goals put road transport, as the largest emitter of greenhouse gas emissions in transport, under great transformation pressure. In road freight transport, the focus is on heavy duty trucks, which are mainly used in long-distance transport and are the main source of greenhouse gas emissions. In addition to battery electric and fuel cell trucks, overhead line trucks are being pursued as a technical option for emission-free operation. So far, first field trials with a few kilometers of overhead line have been realized. At the same time, several scientific studies show possible target states of an overhead line network and outline possible intermediate stages.

The present analysis closes an important gap between current testing and possible further line expansion by looking at a concrete regional overhead line route in the Rhine-Main-Neckar region. The traffic analyses and the subsequent market ramp-up modelling show short-term potentials of overhead catenary (OC) trucks with the realization of a first longer overhead line route.

In view of the high traffic load, the route under consideration between the Frankfurt interchange and the Walldorf interchange is fundamentally highly suitable. Even with the realization of a regional

route, it is above all the heavy goods vehicles and articulated lorries that are significant for such a route. The operation of OC-trucks is economically advantageous even in the short term and is secured by the toll exemption for emission-free trucks. However, to ensure fully electric operation, a supplementary charging infrastructure must be built at the starting and destination points, despite the overhead line. In view of the parallel development of battery-electric trucks and their high suitability in regional transport, a development of the potential shown is not assured and would have to be flanked with further measures. The analyses show that a regional overhead line route can ideally already tap relevant potential in road freight transport and represents a clear added value compared to previous pilot projects. However, the expansion only appears to make sense if it is integrated as an intermediate step in a longer-term network expansion plan, as the advantages of the technology can only be tapped to a greater extent with an increasing network formation.

1 Hintergrund und Zielstellung

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung erfordern bis zum Jahr 2030 eine Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen um 48 % gegenüber dem Niveau im Jahr 1990 (Bundesregierung 2021). Angesichts eines prognostizierten weiteren Anstiegs der Verkehrsleistung und der bisherigen Dominanz des Verbrennungsmotors im Straßenverkehr, steht der Verkehrssektor in den nächsten Jahren unter einem besonderen Transformationsdruck. Der Straßengüterverkehr ist für mehr als ein Drittel der Treibhausgasemissionen des Verkehrs verantwortlich (BReg 2023). Hauptverursacher sind die Last- und Sattelzüge, die sich durch besonders hohe Fahrleistungen und Energieverbräuche hervorheben.

Laut Klimaschutzprogramm soll bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr elektrisch erbracht werden (BMU 2019). Heute spielen elektrische Antriebe bei der Zulassung von schweren Nutzfahrzeugen noch eine sehr geringe Rolle. In den kommenden Jahren ist aber eine deutlich größere Marktdynamik zu erwarten. Der strategische Fahrplan des Bundesverkehrsministeriums gemäß des „Gesamtkonzepts klimafreundliche Nutzfahrzeuge“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020) sieht für den schweren Straßengüterverkehr in den kommenden Jahren eine technologieoffene Förderung und einen Wettbewerb zwischen verschiedenen elektrischen Antriebstechnologien vor. Während im Nah- und Regionalverkehr, wie auch bei Pkw, der batterieelektrische Antrieb bei schweren Nutzfahrzeugen als Standardlösung erwartet wird, werden im Fernverkehr drei technologische Lösungsoptionen verfolgt. Neben Batterie-Lkw in Kombination mit Hochleistungsschnellladern werden dort auch Oberleitungs-Lkw und Wasserstoff-Lkw als mögliche Umsetzungsvarianten gesehen. Die Technologiereife und Erprobung der Technologien weist einen unterschiedlichen Umsetzungsgrad auf. So wird die Oberleitungstechnologie aktuell in drei Feldversuchen auf deutschen Fernstraßen erprobt (Projekte ELISA¹, FESH², eWayBW^{3,4,5}). Der Betrieb von batterieelektrischen Fern-Lkw in Kombination mit Hochleistungsstationen wird an einem Fernstraßenkorridor gerade im Rahmen eines Forschungsprojekts (HoLa⁶) aufgebaut und erprobt.

In zahlreichen Studien wurde die Bedeutung der Verfügbarkeit von Energieversorgungsinfrastruktur für den Markthochlauf von alternativen Lkw-Antrieben analysiert und betont. So zeigen aktuelle Analysen, dass wirtschaftliche Vorteile im Betrieb von elektrischen Lkw bereits kurzfristig bestehen und der Markthochlauf vor allem durch die Geschwindigkeit des Aufbaus der notwendigen Energieversorgungsinfrastruktur bestimmt wird. Um konform mit dem Treibhausgasreduzierungspfad für den Verkehr zu sein, müsste bereits bis zum Jahr 2030 eine bedarfsgerechte Infrastruktur flächendeckend verfügbar sein (Göckeler et al. (2023)). Für den Aufbau eines Oberleitungsnetzes in Deutschland wird in mehreren datengestützten Analysen ein mögliches Zielnetz als auch Zwischenschritte des Netzausbaus hergeleitet (Hacker et al. 2020b). Es liegen ebenfalls erste Überlegungen zu einem möglichen europäischen Ausbau eines Oberleitungsnetzes vor (Hacker et al. 2023). Wie jedoch – ausgehend von den aktuellen O-Lkw-Pilotversuchen von wenigen Kilometern Länge – konkrete nächste Schritte für den Ausbau von Oberleitungsinfrastruktur aussehen könnten

¹ <https://www.autobahn.de/ehighway-elisa>

² <https://www.ehighway-sh.de/de/projektbeschreibung.html>

³ <https://www.autobahn.de/ehighway-elisa>

⁴ <https://www.ehighway-sh.de/de/projektbeschreibung.html>

⁵ <https://ewaybw.de/de/ewaybw/>

⁶ <https://hochleistungsladen-lkw.de/hola-de/>

und welche Marktpotenziale damit bereits regional erschlossen werden könnten, wurde bisher nicht datengestützt untersucht und modelliert.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es daher, im Umfeld einer bereits realisierten O-Lkw-Teststrecke mögliche Verlängerungsoptionen in der Größenordnung von 100 Kilometern Länge zu identifizieren und hinsichtlich ihres Marktpotenzials zu untersuchen. Im Folgenden wird eine Verlängerung der ELISA-Teststrecke im Raum Frankfurt am Main diskutiert. Dabei wird neben dem Fern- auch der Regionalverkehr als möglicher Adressat der Oberleitungsinfrastruktur berücksichtigt und die Marktpotenziale bis zum Jahr 2030 bei einer zeitnahen Elektrifizierung der Strecke modelliert. Auch wenn die Technologie v.a. im Fernverkehr ihre größten Stärken hat und von einer zunehmenden Netzbildung profitiert, soll damit beispielhaft gezeigt werden, welche Potenziale auch bereits kurzfristig bei der Realisierung von ersten regionalen Korridoren denkbar wären.

Die Konkretisierung der Streckenauswahl erfolgte unter Einbindung von Expert*innen aus Wissenschaft, Politik, Verwaltung und Praxis. Die möglichen Optionen wurde auf Basis von verkehrlichen Vorabanalysen und mit Blick auf weitere Einflussparameter, u. a. in einem gemeinsamen Projektworkshop, diskutiert. Im Ergebnis wurde die Strecke zwischen den BAB-Kreuzen Frankfurt und Walldorf als besonders geeignet identifiziert und für die vorliegende Untersuchung ausgewählt. Die Strecke hat eine Gesamtlänge von 89 Kilometern und weist als Besonderheit den parallelen Verlauf von A5 und A6/67 auf. In der Betrachtung wurde die Elektrifizierung von lediglich einer der beiden Parallelstrecken modelliert, dabei wurden mögliche Verlagerungseffekte durch den Aufbau der Infrastruktur zwischen den beiden Autobahnen berücksichtigt.

Die Analysen bauen auf dem im Vorläuferprojekt StratON (Hacker et al. 2020a) entwickelten methodischen Vorgehen auf. Gleichzeitig wurden – jenseits von der betrachteten Gesamtnetzlänge – weitere relevante Anpassungen vorgenommen (u. a. verändertes Betrachtungsjahr, Berücksichtigung von Regionalverkehren, ergänzende stationäre Ladeoption für O-Lkw), die eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse der beiden Studien ausschließen.

Im folgenden Kapitel 2 werden zunächst die Methodik und die Ergebnisse der verkehrlichen Analysen für die ausgewählte Strecke dargestellt. Diese bilden die empirische Grundlage für die anschließende Modellierung des Markthochlaufs von O-Lkw im Falle einer Elektrifizierung der regionalen Auswahlstrecke und unter Berücksichtigung weiterer Szenarioannahmen. In Kapitel 3 werden das methodische Vorgehen und die getroffenen Annahmen diskutiert. In Kapitel 4 werden die betrachteten Szenarien und Ergebnisse vorgestellt und abschließend in den Gesamtkontext der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs eingeordnet.

2 Verkehrliche Analysen

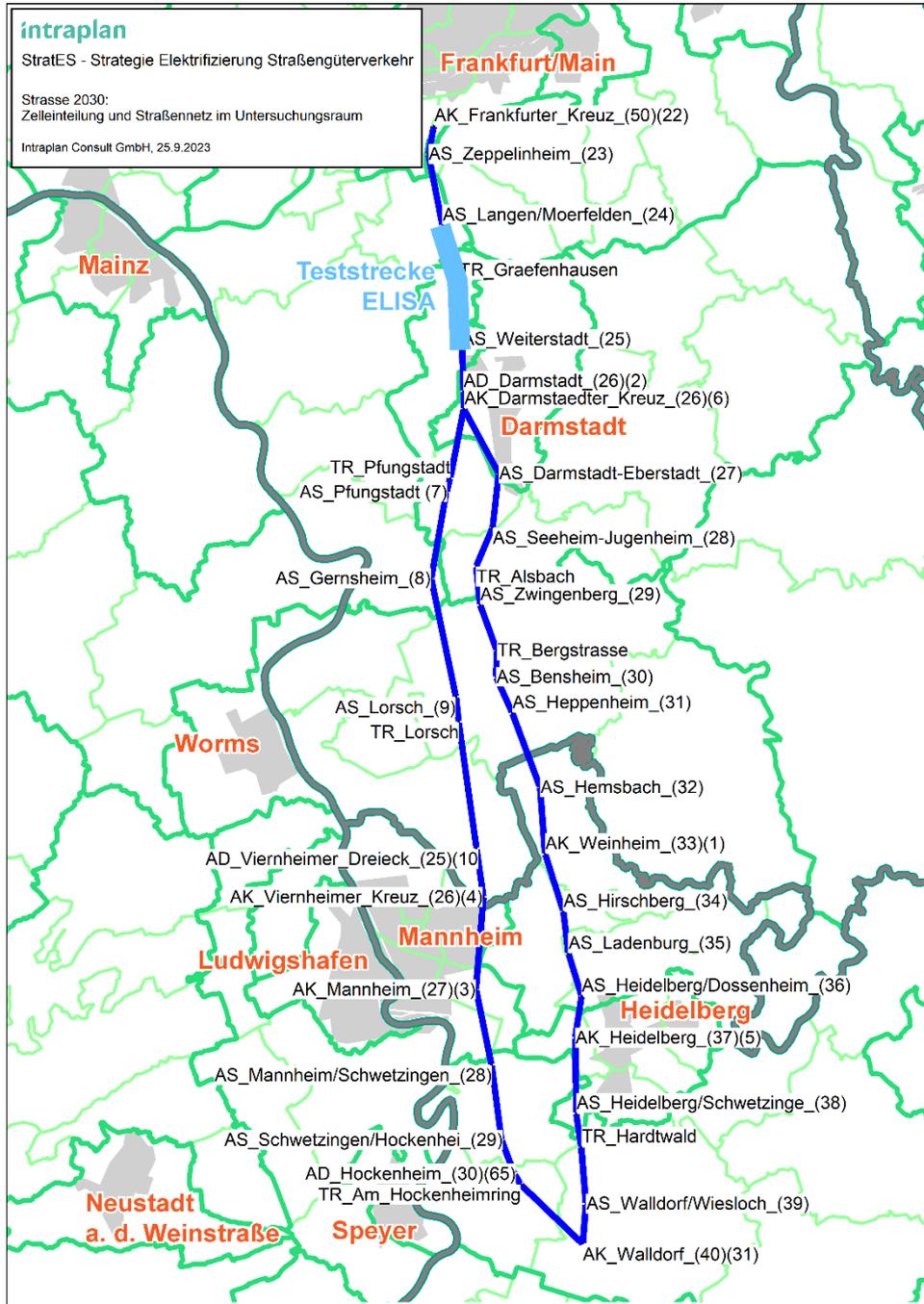
2.1 Methodik der Verkehrsmodellierung: Neuerungen gegenüber StratON

Die Analyse der Verkehrsflüsse auf den betrachteten Bundesautobahnen A5, A6 und A67 beruht auf demselben Verkehrsmodell, das bei Intraplan für die Verkehrsflussanalysen im Rahmen des Projektes StratON auf Basis der Verkehrsverflechtungen und Mengengerüste der Bundesverkehrswegeplanung 2030 (BVU Beratergruppe et al. 2014) entwickelt und für StratON mit damals schon aktuelleren Erkenntnissen zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung sowie weiterer sozioökonomischer Strukturgrößen auf die Prognosehorizonte 2030 und 2050 fortgeschrieben wurde (Hacker et al. 2020a).

Für StratON wurde der mögliche Aufbau eines deutschlandweiten Netzes elektrifizierter Autobahnstrecken aus zuvor ermittelten möglichen Pilotstrecken in ganz Deutschland untersucht, der Fokus lag dabei auf langlaufenden Straßengüterverkehrstransporten, die zudem möglichst lange Abschnitte des zu elektrifizierenden BAB-Netzes befahren sollten.

Für das Projekt StratES wurde von Anfang an die regionale Betrachtungsebene gewählt, der Fokus liegt klar definiert auf einer möglichen Erweiterung der bereits mit Oberleitung ausgerüsteten Teststrecke ELISA auf der A5 südlich von Frankfurt bis zum Kreuz Walldorf südlich von Heidelberg unter Einbeziehung der parallel dazu verlaufenden Abschnitte der A67 ab dem Kreuz Darmstadt und der A6 (siehe Abbildung 2-1). Dieser Änderung der Betrachtungsebene vom nationalen auf einen regionalen Maßstab wurde modellseitig dadurch Rechnung getragen, dass das untergeordnete Straßennetz in größerem Umfang als in StratON berücksichtigt wurde, um die regionalen Verkehrsflüsse im Untersuchungsraum in adäquater Art und Weise abbilden zu können.

Abbildung 2-1: Auswahlstrecke für die Verkehrsflussanalysen: Bundesautobahnen A5 und A6/A67 zwischen den Kreuzen Frankfurt und Walldorf (Länge: 89 km)



Quelle: intraplan, eigene Darstellung

Das StratES-Modell mit dem Prognosehorizont 2030 basiert auf Quelle-Ziel-Matrizen des Straßengüterverkehrs in Deutschland unter Berücksichtigung des Quell- und Zielverkehrs von Deutschland und dem Ausland und beinhaltet auch Transitverkehre durch Deutschland mit Quelle und Ziel im Ausland. Die Quelle-Ziel-Matrizen werden in Deutschland auf Ebene von 1.572 Feinzellen abgebildet. Das sind Zonen unterhalb der Ebene der ca. 400 Landkreise und kreisfreien Städte (diese entsprechen der NUTS3-Zonierung von EuroStat). Im Ausland sind ca. 382 Verkehrszellen definiert, wobei grenznahe Bereiche detaillierter (auf NUTS3-Ebene) abgebildet

sind als grenzferne Gebiete. Die Quelle-Ziel-Matrizen bilden zudem auch die Straßengüterverkehrstransporte nach Fahrzeugklassen und Fahrzeugarten ab; unterschieden werden die drei Fahrzeugklassen/-arten:

- Lkw zwischen 3,5 und 12 Tonnen zulässiger Gesamtmasse,
- Lkw ohne Anhänger größer 12 Tonnen mit 2-3 Achsen und
- Lastzüge größer 12 Tonnen mit mehr als 3 Achsen.

Angesichts der veränderten Zielstellung (siehe Kapitel 1), wurden bei den verkehrlichen Analysen im Projekt StratES folgende Anpassungen gegenüber dem Projekt StratON vorgenommen:

- Prognosehorizont 2030 (StratON: 2050), um die kurzfristigen Potenziale in den Vordergrund zu rücken,
- Berücksichtigung von zunächst allen Fahrzeugklassen bzw. -arten im Straßengüterverkehr, d. h. Ausweisung von Ergebnissen für alle Lkw größer 3,5 Tonnen zulässiger Gesamtmasse (StratON: Ergebnisse nur für Lastzüge größer 12 Tonnen mit mehr als 3 Achsen),
- Berücksichtigung aller Entfernungsklassen, d. h. keine Filterung der Verkehre anhand der gefahrenen Entfernungen insgesamt und anhand der gefahrenen Entfernung auf elektrifizierten BAB-Abschnitten (StratON: 100 km-Grenze für Quelle-Ziel-Relationen und minimale Fahrtweite auf elektrifizierten BAB-Abschnitten größer 100 km), um auch Regionalverkehre und Fahrten mit nur kurzem Oberleitungskontakt zu berücksichtigen,
- regionale Betrachtungsebene mit detaillierterer Abbildung des Straßennetzes im engeren Untersuchungsraum durch Erweiterung um nachrangige Straßenkategorien (StratON: nationale Betrachtungsebene).

2.2 Schritte der Verkehrsumlegung und Strombündelanalysen (Intraplan)

Die auf das Jahr 2030 bezogenen Quelle-Ziel-Matrizen der Fahrzeuge im Straßengüterverkehr wurden in einem ersten Schritt mit dem Verkehrsmodell auf das Verkehrsnetz des Jahres 2030 zur Darstellung des Gesamtverkehrs umgelegt.

In einem zweiten Schritt wurden aus der Gesamtmenge der umgelegten Quelle-Ziel-Relationen mittels Strombündelanalysen je Fahrzeug-Größenklasse diejenigen Quelle-Ziel-Relationen ermittelt, die auf ihrem Weg von der Quell-Zelle bis zur Ziel-Zelle irgendeinen Abschnitt (gleich welcher Länge) der Auswahlstrecken im Korridor A5, A6 und A67 zwischen dem Kreuz Frankfurt und dem Kreuz Walldorf innerhalb des relevanten Untersuchungsgebietes mit Oberleitung befahren. Diese Quelle-Ziel-Relationen wurden erneut im Verkehrsmodell umgelegt, die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

In Tabelle 1-1 sind die Umlegungseckwerte für die Gesamtnachfrage im Straßengüterverkehr in Deutschland aus dem ersten Schritt und die Eckwerte für das Auswahlnetz auf den BAB A5, A6 und A67 aus dem zweiten Schritt, differenziert nach Fahrzeugklassen/-arten, gegenübergestellt. Die Verkehrsleistungen (Lkw-km) wurden anhand der Straßenentfernungen im Verkehrsmodell berechnet und umfassen beim Merkmal „Lkw-km gesamt“ die Straßenentfernungen im In- und Ausland, beim Merkmal „Lkw-km territorial“ nur die gefahrenen Entfernungen in Deutschland. Dies gilt auch für die Verkehrsleistungen im Nachfragesegment BAB-Auswahlnetz – diese umfassen alle

gefahrenen Entfernungen im In- und Ausland und nicht nur die auf den befahrenen BAB-Abschnitten im Auswahlnetz. Von allen Lkw-Fahrten in Deutschland befahren ca. 4 % auch die BAB-Abschnitte im Auswahlnetz. Bezüglich der Verkehrsleistung gesamt (Lkw-km) liegt dieser Anteil bei ca. 8 %, bei der Verkehrsleistung territorial gar bei ca. 9,5 %. Dies sind Hinweise darauf, dass die hier betrachteten BAB-Abschnitte in deutlich überdurchschnittlichem Maße von langlaufenden Verkehren befahren werden, was ihre große Bedeutung für den Fernverkehr und den internationalen Straßengüterverkehr verdeutlicht.

Tabelle 1-1: Umlegungs-Eckwerte Straßengüterverkehr Prognose 2030 für Deutschland und im Auswahlnetz

Nachfrage/Fahrzeuge	Lkw-Fahrten [Tsd. Fzg./a]	Lkw-km gesamt [Mio. Fzg-km/a]	Lkw-km territorial [Mio. Fzg-km/a]
Gesamtnachfrage in Deutschland			
Lkw, 3,5-12 Tonnen	108.213	17.656	12.185
Lkw ohne Anhänger, > 12 Tonnen, 2-3 Achsen	12.907	2.282	1.557
Lastzug, > 12 Tonnen, > 3 Achsen	253.679	63.623	41.723
Summe LKW > 3.5 Tonnen	374.799	83.561	55.465
Nachfrage im BAB-Auswahlnetz A5, A6, A67			
Lkw, 3,5-12 Tonnen	4.095	1.356	1.021
Lkw ohne Anhänger, > 12 Tonnen, 2-3 Achsen	443	155	118
Lastzug, > 12 Tonnen, > 3 Achsen	12.067	5.157	4.061
Summe LKW > 3.5 Tonnen	16.605	6.667	5.200
Anteile der Nachfrage im BAB-Auswahlnetz an der Gesamtnachfrage in Deutschland			
Lkw, 3,5-12 Tonnen	3,8 %	7,7 %	8,4 %
Lkw ohne Anhänger, > 12 Tonnen, 2-3 Achsen	3,4 %	6,8 %	7,6 %
Lastzug, > 12 Tonnen, > 3 Achsen	4,8 %	8,1 %	9,7 %
Summe LKW > 3.5 Tonnen	4,4 %	8,0 %	9,4 %

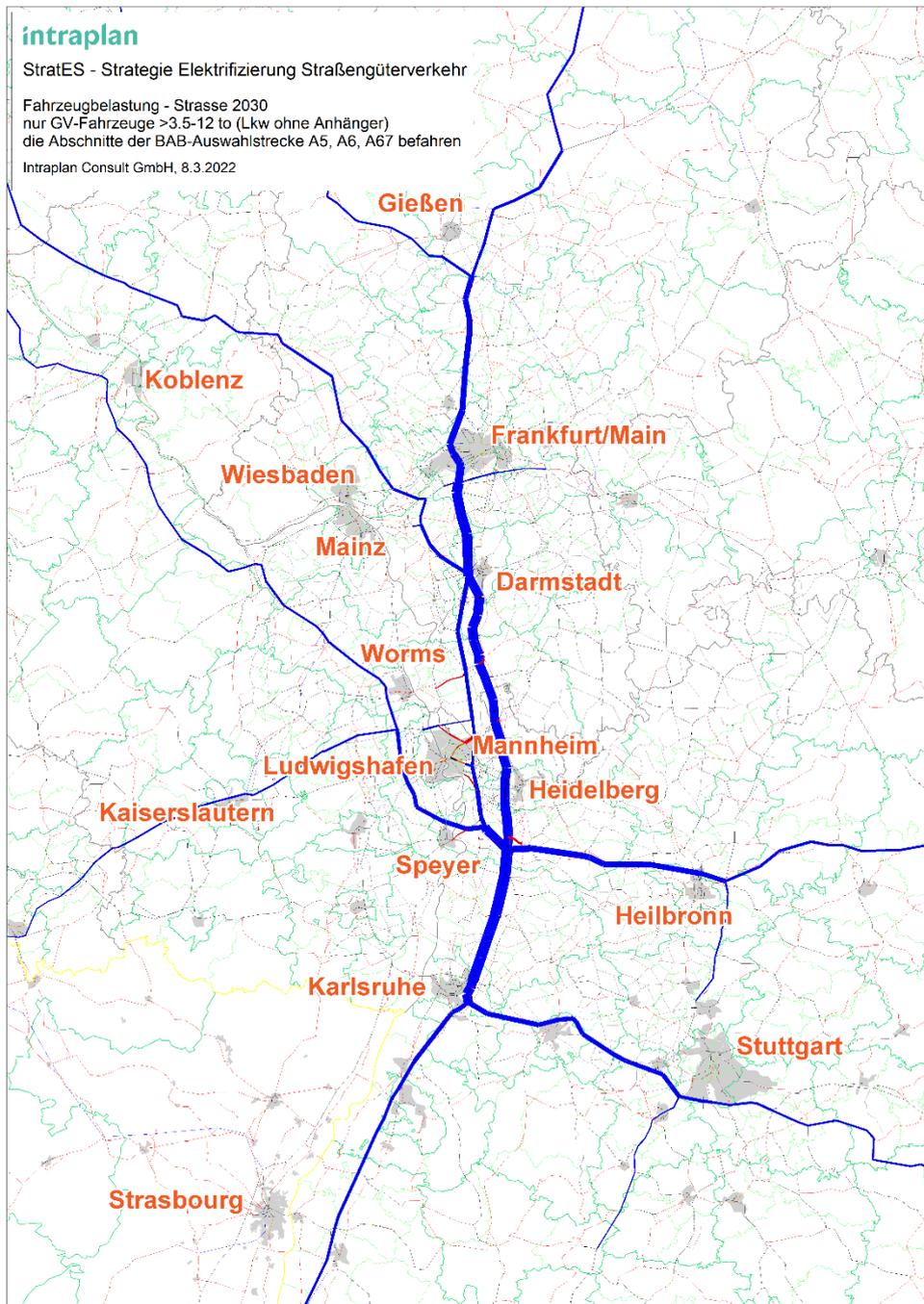
Quelle: intraplan, eigene Berechnungen

Die Verkehrsmengen werden auf der Auswahlstrecke von der Kategorie der Last- und Sattelzüge über 12 Tonnen Gesamtmasse mit einem Fahrten- und Fahrleistungsanteil von etwa drei Vierteln am Gesamtaufkommen dominiert. Die Kategorie der Fahrzeuge bis maximal 12 Tonnen spielt auf der Auswahlstrecke mit einem Anteil von 25 bzw. 20 % (Anzahl Fahrten bzw. Fahrzeugkilometer) eine nachrangige Bedeutung. Lkw ohne Anhänger größer 12 Tonnen sind mit etwa 3 % Anteil auf der Auswahlstrecke vernachlässigbar. Die Bedeutung der betrachteten Fahrzeugkategorien auf der Auswahlstrecke weist vergleichbare Relationen wie im gesamtdeutschen Autobahnnetz auf.

Die Ergebnisse der in den Strombündelanalysen ermittelten Quelle-Ziel-Relationen, die irgendeinen Abschnitt der BAB-Auswahlstrecken befahren und erneut im Verkehrsmodell umgelegt wurden, werden in den Abbildungen 2-2, 2-3 und 2-4 gezeigt – zunächst mit dem gleichen Belastungsmaßstab für alle drei Fahrzeugklassen/-arten, um die jeweiligen Nachfragemengen vergleichbar darzustellen.

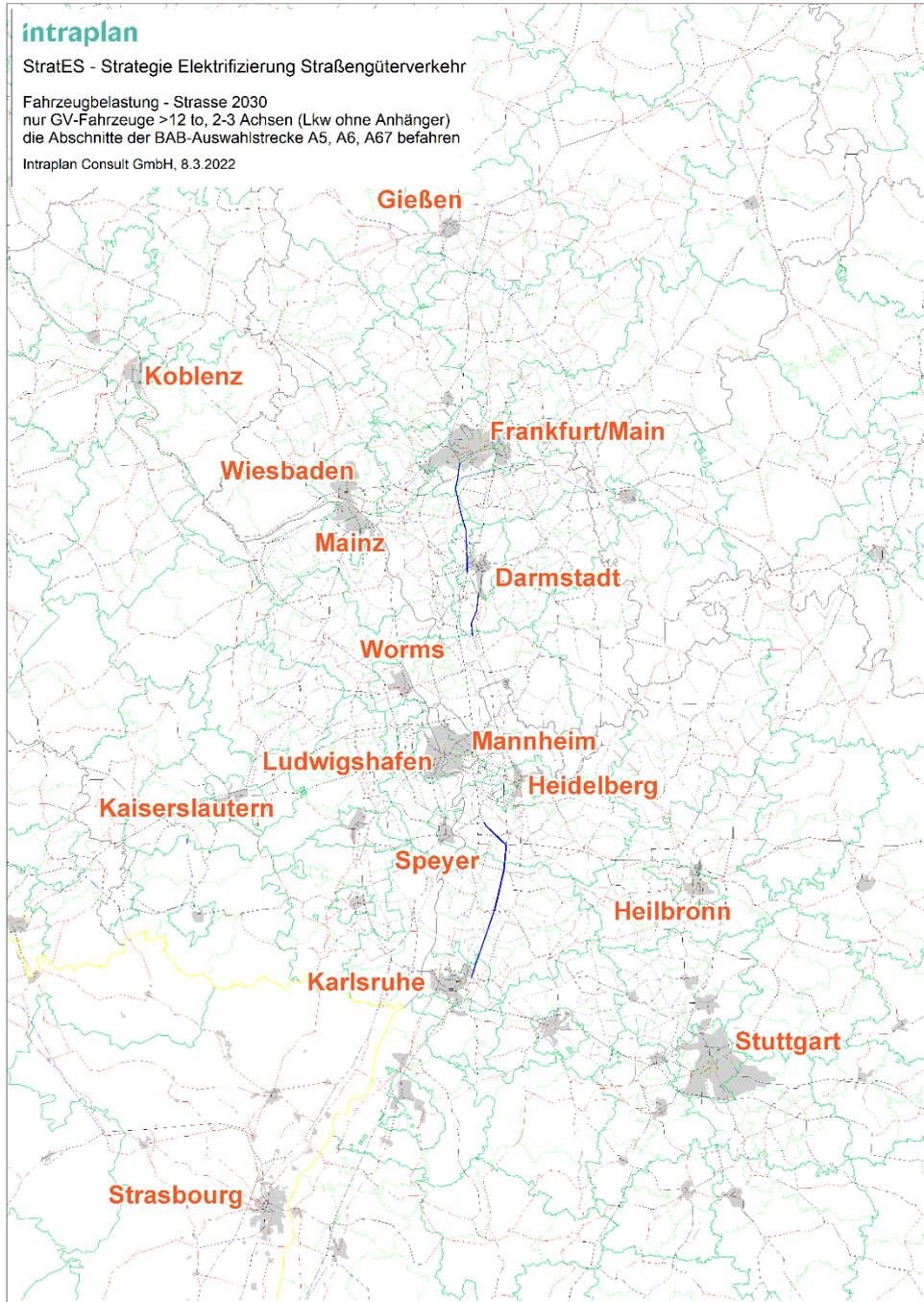
In Abbildung 2-5 ist dann der Belastungsmaßstab vierfach erhöht, um auch für die Verkehre der Fahrzeugkategorie größer 12 Tonnen mit 2-3 Achsen die durchgehende Belastung im BAB-Auswahlnetz und die Verzweigungen im Straßennetz insgesamt darzustellen. Hintergrund ist, dass diese, wie bereits erwähnt und in Tabelle 1-1 ersichtlich, bei der Gesamtnachfrage in Deutschland als auch auf der Auswahlstrecke, im Vergleich der drei Fahrzeugkategorie von geringster Bedeutung sind.

Abbildung 2-2: Darstellung der Verkehre 2030 über die Auswahlstrecken BAB A5, A6 und A67 – nur LKW zw. 3,5 und 12 Tonnen (Lkw ohne Anhänger)



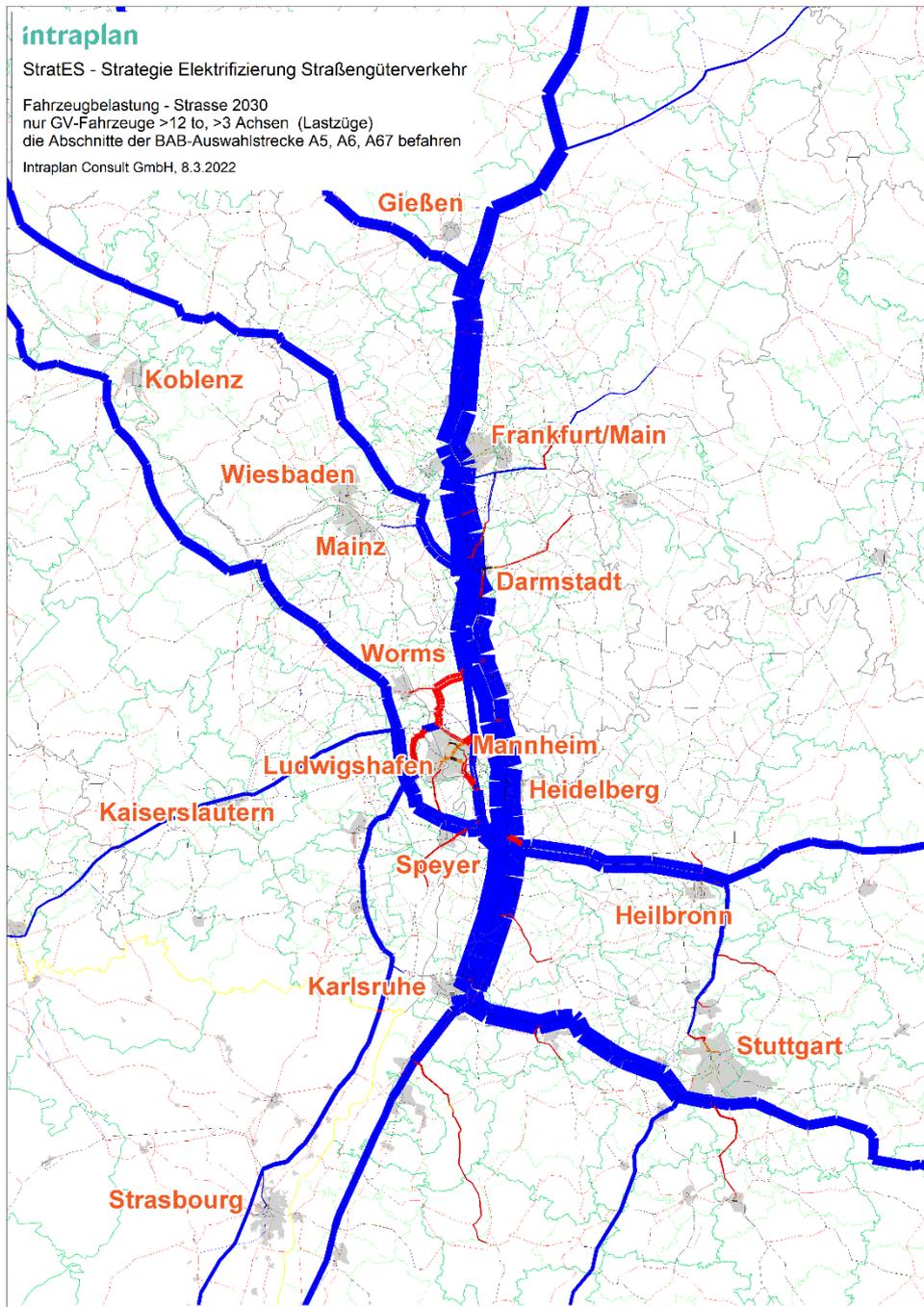
Quelle: intraplan, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 2-3: Darstellung der Verkehre 2030 über die Auswahlstrecken BAB A5, A6 und A67 – nur Lkw größer 12 Tonnen, 2-3 Achsen (Lkw ohne Anhänger)



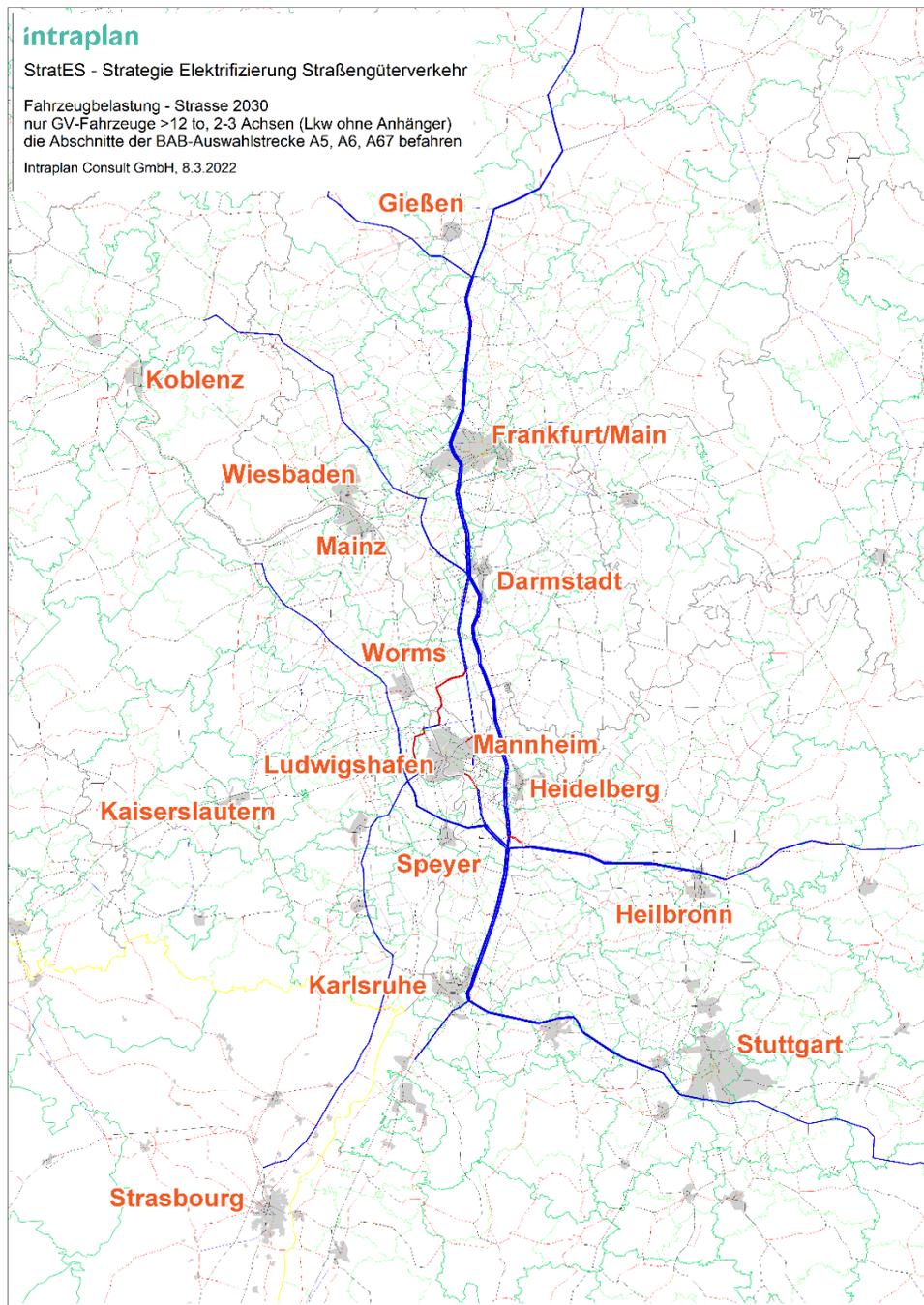
Quelle: intraplan, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 2-4: Darstellung der Verkehre 2030 über die Auswahlstrecken BAB A5, A6 und A67 – nur Lkw größer 12 Tonnen mit mehr als 3 Achsen (Lastzüge)



Quelle: intraplan, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 2-5: Darstellung der Verkehre 2030 über die Auswahlstrecken BAB A5, A6 und A67 – nur Lkw größer 12 Tonnen, 2-3 Achsen (Lkw ohne Anhänger) – Belastungsmaßstab vierfach erhöht



Quelle: intraplan, eigene Berechnungen und Darstellung

Deutlich zu erkennen sind in den Abbildungen zum einen die bereits oben diskutierten unterschiedlichen starken Verkehrsbelastungen durch die Fahrzeugklassen/-arten sowie die Verteilung bzw. Verästelung der Verkehre im Straßennetz außerhalb des Untersuchungskorridors, der aber vor allem auf den Bundesautobahnen stattfindet.

Für die im Schritt 2 identifizierten Verkehre über die BAB-Auswahlstrecken wurde dann in einem dritten Schritt neben der Anzahl der Fahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeug-Größenklasse weitere

Merkmale und Kenngrößen ermittelt, wobei die befahrene Gesamtstrecke in die drei Teilbereiche Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf untergliedert wurde:

- Der Vorlauf beginnt an der Quell-Zelle und endet am ersten Einfahrknoten in das Auswahlnetz: Ermittlung der Vorlauf-Entfernung,
- Der Hauptlauf beginnt am ersten Einfahrknoten in das BAB-Auswahlnetz mit Oberleitung und endet an dem Knoten, an dem das Auswahlnetz endgültig verlassen wird. Eine Besonderheit des StratES-Untersuchungsgebietes sind die parallel verlaufenden Abschnitte der A5, A6 und A67. Viele Verkehre befahren deshalb nur Teilabschnitte der einen Autobahn, verlassen diese zur Befahrung niederrangiger, nicht mit Oberleitung versehener Querverbindungen zur nächsten parallel verlaufenden BAB und befahren diese dann wieder für einen Teilabschnitt⁷. Bei der Ermittlung der Kenngrößen zum Hauptlauf wurde das zwischenzeitliche Verlassen der Auswahlstrecken berücksichtigt durch Erfassung der zwischenzeitlichen Aus- und Einfahrknoten sowie durch getrennte Ermittlung und Ausweisung der Hauptlaufentfernungen im elektrifizierten Auswahlnetz und außerhalb dieses Netzes.
- Der Nachlauf beginnt am letzten Ausfahrknoten aus dem Auswahlnetz und endet an der Zielzelle.

In einem vierten Schritt schließlich wurden die Quelle-Ziel-bezogenen Ergebnisse aggregiert und gemeinsam mit dem Datensatz der Einzelfahrten den nachfolgenden Analysen zu Markthochlaufpotenzialen (siehe Kapitel 3) zur Verfügung gestellt.

2.3 Fahranteile im Haupt-, Vor- und Nachlauf der Oberleitungsstrecke

Die Einteilung der Fahrten in einen Vor-, Haupt- und Nachlauf zur Oberleitungsstrecke ermöglicht eine Abschätzung der technischen Einsatzpotenziale von Oberleitungs-Lkw. Speziell für batterieelektrische Oberleitungs-Lkw (O-BEV) müssen die Vor- und Nachlaufstrecken zur batteriebedingten Reichweite passen. Für Hybridfahrzeuge mit zusätzlichem Dieselmotor (O-HEV) entscheidet der Fahranteil unter der Oberleitungsstrecke über die elektrisch zurückgelegten Kilometer und die damit verbundene Einsparung direkter THG-Emissionen. Es ist jedoch zu erwarten, dass O-HEV längerfristig ohnehin keine relevante Rolle spielen.

Die Vor- und Nachlaufstrecken der Einzelfahrten werden in vier Entfernungsklassen aufgeteilt und die Fahrleistungen je Entfernungsklasse für den Vor-, Haupt- und Nachlauf aggregiert. Die Ergebnisse sind für die drei untersuchten Größenklassen in Tabelle 2-2 bis Tabelle 2-4 aufgeführt. Zunächst fällt an den Summen der Fahrzeugkilometer auf, dass der Fahranteil im Hauptlauf der Auswahlstrecke nur rund 10 % der über die gesamten Strecken zurückgelegten Fahrleistung entspricht. Langlaufende Verkehre mit Vor- und Nachlaufstrecken von über 250 km fallen bei einer Oberleitungsstrecke von lediglich 89 km Länge deutlich ins Gewicht. Der Fokus soll im Folgenden daher stärker auf den regionalen Verkehren liegen, da Potenziale im Fernverkehr nicht allein durch eine regionale Oberleitungsstrecke gehoben werden können.

Auf die Entfernungsklasse bis 100 km im Vor- und Nachlauf entfallen für Lkw bis 12 Tonnen (Tabelle 2-2) etwa 36 % der Fahrzeugkilometer im Hauptlauf. Etwa 66 % der im Hauptlauf erbrachten Fahrleistung können Fahrten mit Vor- und Nachlaufstrecken bis 250 km zugeschrieben werden. Für

⁷ Z.B. Einfahrt auf die A5 an der Anschlussstelle 27 Darmstadt-Eberstadt, Fahrt auf der A5 bis zur Anschlussstelle 30 Bensheim, dort Ausfahrt auf die B47 und Weiterfahrt bis zur Anschlussstelle 9 Lorsch, dort Einfahrt auf die A67 bis zum Viernheimer Dreieck, dort Verlassen des Auswahlnetzes durch Weiterfahrt über die A6 Richtung Kaiserslautern (siehe auch Abbildung 2-1).

Lkw bis 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht kann aufgrund der Einsatzmuster also auf ein relativ hohes Potenzial für O-BEV geschlossen werden. Allerdings weist diese Fahrzeugkategorie, wie bereits oben erwähnt, einen vergleichsweise geringen Anteil an der Verkehrsbelastung auf der Auswahlstrecke auf.

Die Fahrleistung der Lkw größer 12 Tonnen mit 2-3 Achsen liegt bei nur 2 % und wird daher nicht weiter diskutiert, da diese Kategorie für eine Auslastung einer hypothetischen Oberleitungsstrecke von vernachlässigbarer Bedeutung wäre.

Ein besonderes Augenmerk muss auf Last- und Sattelzüge gerichtet werden, da diese, wie oben dargestellt, auch auf der Auswahlstrecke mit großem Abstand dominieren. Für Last- und Sattelzüge, die typischerweise hohe Fahrstrecken zurücklegen, liegt der Fahranteil im Hauptlauf von Fahrten mit maximalen Vor- und Nachlaufstrecken bis 100 km mit 18 % auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Werden zusätzlich die Entfernungsklassen bis 250 km Vor- und Nachlaufstrecke berücksichtigt, könnten theoretisch 51 % der auf der Auswahlstrecke erbrachten Fahrleistung über O-BEV abgedeckt werden. Voraussetzung dafür wäre allerdings ein Batteriespeicher für eine Reichweite von 250 km, eine Nachlademöglichkeit am Start- und Zielort sowie ein dynamisches Nachladen an der Oberleitung mit hoher Ladeleistung, damit die Batterie unter der Oberleitung vollständig aufgeladen werden kann.

Angesichts des hohen Fahrleistungsanteils dieser Fahrzeugkategorie auf der Auswahlstrecke haben Lastzüge im Vergleich zur Kategorie der Lkw bis maximal 12 Tonnen auch bei einer Beschränkung des Vor- und Nachlaufs auf maximal 250 Kilometer eine nahezu dreimal so hohe Bedeutung für die Fahrleistung auf der Strecke und sind daher für die anschließende Bestimmung des Marktpotenzials von herausragender Bedeutung.

Tabelle 2-2: Vor-, Haupt- und Nachlauf für Fahrten auf der Oberleitungsstrecke für Lkw bis 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht

Vorlauf		Hauptlauf auf BAB-Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf	Lkw-km (Tsd. Fzg-Km/a)	Anzahl Lkw (Tsd. Fzg/a)	Lkw-km (Tsd. Fzg-Km/a)	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf	Lkw-km (Tsd. Fzg-Km/a)
bis 100 km	41.529	1.732	56.113	36,2 %	bis 100 km	40.258
bis 100 km	10.510	557	19.104	12,3 %	101 - 250 km	89.296
bis 100 km	4.490	173	7.454	4,8 %	251 - 500 km	59.777
bis 100 km	2.105	91	3.841	2,5 %	ab 501 km	80.837
101 - 250 km	81.026	507	18.956	12,2 %	bis 100 km	10.359
101 - 250 km	24.256	138	8.617	5,6 %	101 - 250 km	23.038
101 - 250 km	14.684	86	4.605	3,0 %	251 - 500 km	30.028
101 - 250 km	14.114	73	2.900	1,9 %	ab 501 km	57.345
251 - 500 km	65.529	185	8.128	5,2 %	bis 100 km	5.360
251 - 500 km	40.602	113	5.694	3,7 %	101 - 250 km	19.138
251 - 500 km	27.356	78	2.426	1,6 %	251 - 500 km	25.718
251 - 500 km	19.082	53	2.369	1,5 %	ab 501 km	38.065
ab 501 km	79.488	100	4.559	2,9 %	bis 100 km	2.211
ab 501 km	39.449	51	2.980	1,9 %	101 - 250 km	9.481
ab 501 km	33.492	46	2.448	1,6 %	251 - 500 km	16.493
ab 501 km	105.160	113	4.816	3,1 %	ab 501 km	89.945
Summe	602.872	4.095	155,009			597.349

Quelle: intraplan, eigene Berechnungen

Tabelle 2-3: Vor-, Haupt- und Nachlauf für Fahrten auf der Oberleitungsstrecke für Lkw ohne Anhänger mit 2-3 Achsen und mehr als 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht

Vorlauf		Hauptlauf auf BAB-Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungs- klasse im Vorlauf	Lkw-km (Tsd.Fzg- Km/a)	Anzahl Lkw (Tsd. Fzg/a)	Lkw-km (Tsd.Fzg- Km/a)	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungs- klasse im Nachlauf	Lkw-km (Tsd.Fzg- Km/a)
bis 100 km	4.452	160	5.157	31,6 %	bis 100 km	4.259
bis 100 km	1.342	63	2.058	12,6 %	101 - 250 km	10.086
bis 100 km	721	25	1.110	6,8 %	251 - 500 km	8.902
bis 100 km	248	10	348	2,1 %	ab 501 km	9.131
101 - 250 km	9.119	56	2.058	12,6 %	bis 100 km	1.350
101 - 250 km	3.560	20	1.283	7,9 %	101 - 250 km	3.328
101 - 250 km	1.962	12	595	3,6 %	251 - 500 km	4.155
101 - 250 km	1.495	8	171	1,0 %	ab 501 km	6.224
251 - 500 km	10.242	28	1.258	7,7 %	bis 100 km	885
251 - 500 km	5.571	16	774	4,7 %	101 - 250 km	2.563
251 - 500 km	3.430	10	269	1,6 %	251 - 500 km	3.296
251 - 500 km	2.047	5	168	1,0 %	ab 501 km	4.671
ab 501 km	8.791	11	389	2,4 %	bis 100 km	270
ab 501 km	3.021	4	153	0,9 %	101 - 250 km	700
ab 501 km	3.675	4	146	0,9 %	251 - 500 km	1.558
ab 501 km	8.433	11	404	2,5 %	ab 501 km	9.232
Summe	68.110	444	16.342			70.610

Quelle: intraplan, eigene Berechnungen

Tabelle 2-4: Vor-, Haupt- und Nachlauf für Fahrten auf der Oberleistungsstrecke für Lastzüge über 3 Achsen und mehr als 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht

Vorlauf		Hauptlauf auf BAB-Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungs- klasse im Vorlauf	Lkw-km (Tsd.Fzg- Km/a)	Anzahl Lkw (Tsd. Fzg/a)	Lkw-km (Tsd.Fzg- Km/a)	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungs- klasse im Nachlauf	Lkw-km (Tsd.Fzg- Km/a)
bis 100 km	77.932	2.713	89.485	17,5 %	bis 100 km	74.592
bis 100 km	36.999	1.483	57.548	11,2 %	101 - 250 km	251.668
bis 100 km	29.494	1.007	46.808	9,1 %	251 - 500 km	356.784
bis 100 km	9.808	419	17.274	3,4 %	ab 501 km	366.393
101 - 250 km	237.441	1.389	59.697	11,7 %	bis 100 km	38.658
101 - 250 km	151.352	845	55.418	10,8 %	101 - 250 km	142.957
101 - 250 km	89.632	534	28.070	5,5 %	251 - 500 km	184.449
101 - 250 km	42.764	232	8.689	1,7 %	ab 501 km	176.930
251 - 500 km	405.157	1.114	51.788	10,1 %	bis 100 km	35.616
251 - 500 km	262.307	737	35.860	7,0 %	101 - 250 km	122.931
251 - 500 km	169.300	476	13.353	2,6 %	251 - 500 km	160.152
251 - 500 km	58.523	159	6.085	1,2 %	ab 501 km	144.808
ab 501 km	362.533	459	20.618	4,0 %	bis 100 km	10.840
ab 501 km	124.417	166	9.303	1,8 %	101 - 250 km	29.609
ab 501 km	127.489	149	5.655	1,1 %	251 - 500 km	51.451
ab 501 km	151.100	184	6.353	1,2 %	ab 501 km	160.382
Summe	2.336.246	12.066	512.002			2.308.220

Quelle: intraplan, eigene Berechnungen

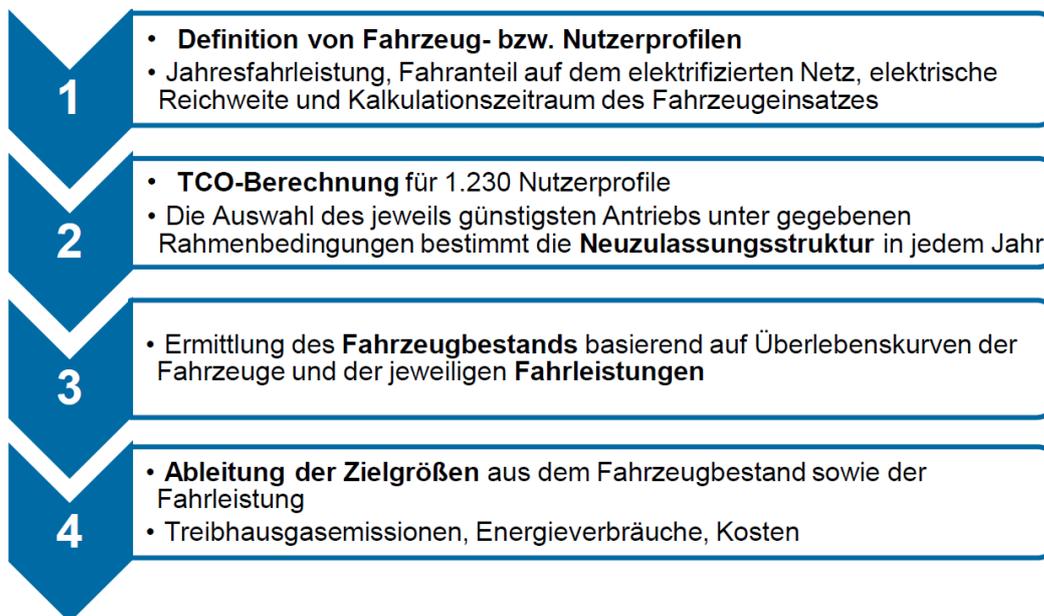
3 Markthochlauf-Modellierung

3.1 Grundsätzliches Vorgehen

Für die Modellierung des regionalen Marktpotenzials von O-Lkw durch die Elektrifizierung des oben beschriebenen Abschnitts des Korridors A5 und A6/67 wird das Modell TEMPS eingesetzt. Das Modell wurde im Vorläuferprojekt StratON um ein Modul zur Abbildung von O-Lkw erweitert und kommt weitestgehend unverändert in der hier dargestellten Analyse zum Einsatz. Der Modellansatz kombiniert die Analyse der technischen Potenziale von O-Lkw unterschiedlicher Ausgestaltungsvarianten und unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungsprofile mit einem TCO-basierten Ansatz, der die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Antriebsalternativen analysiert. Eine ausführliche Beschreibung des methodischen Vorgehens ist im StratON-Endbericht (Hacker et al. 2020a) verfügbar. Im Folgenden werden daher die erfolgten Anpassungen und Aktualisierungen für die aktuelle Fragestellung thematisiert. Um möglichst präzise und zeitgemäße Ergebnisse zu generieren, wurde auf die Rahmendaten des zum Stand der Modellierung aktuellen Projektionsberichts der Bundesregierung (Mit-Maßnahmen-Szenario) (Bundesregierung (BReg) (2021) zurückgegriffen (Verkehrsnachfrage, Energiepreise, Bevölkerungs- und BIP-Wachstum etc.).

Das grundsätzliche Vorgehen des Modells TEMPS zur Quantifizierung des Marktpotenzials von O-Lkw umfasst die folgenden Analyseschritte (Abbildung 2-2). Zunächst werden Fahrzeug- bzw. Nutzungsprofile auf Basis der vorangegangenen verkehrlichen Analysen (siehe Abschnitt 2.1) abgeleitet. Im zweiten Schritt werden Gesamtkostenrechnungen (TCO) für unterschiedliche Antriebsvarianten auf Basis der Nutzungsprofile ermittelt und die jeweils kostengünstigste Variante unter Berücksichtigung von Nutzungsrestriktionen (u.a. Batteriereichweite) bestimmt. Die sich daraus ergebende Neuzulassungsstruktur nach Antriebstyp bildet die Grundlage für die Ermittlung des Fahrzeugbestands und die Ableitung von Zielgrößen wie Emissionen von Treibhausgasen oder Endenergiebedarf zur Bewertung der Umsetzung der regionalen Oberleitungsstrecke.

Abbildung 2-1: Schritte der Markthochlaufmodellierung



Quelle: eigene Darstellung

3.2 Projektspezifische Anpassungen

Definition von Fahrzeug- bzw. Nutzungsprofilen

Die Modellierung der Kaufentscheidung basiert auf einer Vielzahl von Agenten, die über gewichtete Nutzungsprofile die Grundgesamtheit aller Lkw in Deutschland abbilden. Für die Abbildung von O-Lkw ist, neben weiteren Parametern (siehe Abschnitt 8.2.2 im StratON-Endbericht (Hacker et al. 2020a)) relevant, welchen Fahranteil diese unter der regionalen Oberleitungsstrecke absolvieren und welche Vor- und Nachlaufstreckenlängen bestehen. Diese leiten sich aus den vorangegangenen verkehrlichen Analysen (siehe Abschnitt 2.2) ab. Für die gewichteten Nutzungsprofile wird auf Basis der TCO der günstigste Antrieb gewählt und die Neuzulassungsstruktur abgeleitet.

Wie aus den verkehrlichen Analysen (Kapitel 2) hervorgeht, ist auch bei der Betrachtung einer relativ kurzen Oberleitungsstrecke und der starken Beschränkung der Vor- und Nachläufe die Fahrzeugkategorie der Last- und Sattelzüge über 12 Tonnen dominierend. Daher wird in der regionalen Analyse der Einsatz von O-Lkw weiterhin auf die Klasse der Last- und Sattelzüge

beschränkt. Durch den Wegfall der Restriktion von einer Mindestfahrlänge von 100 km auf einer elektrifizierten Autobahn im Projekt StratON, werden jedoch auch Fahrzeuge mit kürzeren Einzelfahrtenlängen in den aktuellen Analysen berücksichtigt und damit eine größere Anzahl an Fahrten bzw. Fahrzeugen in die Potenzialbetrachtung einbezogen.

Elektrischer Fahranteil unter Oberleitung und Reichweitenanforderungen

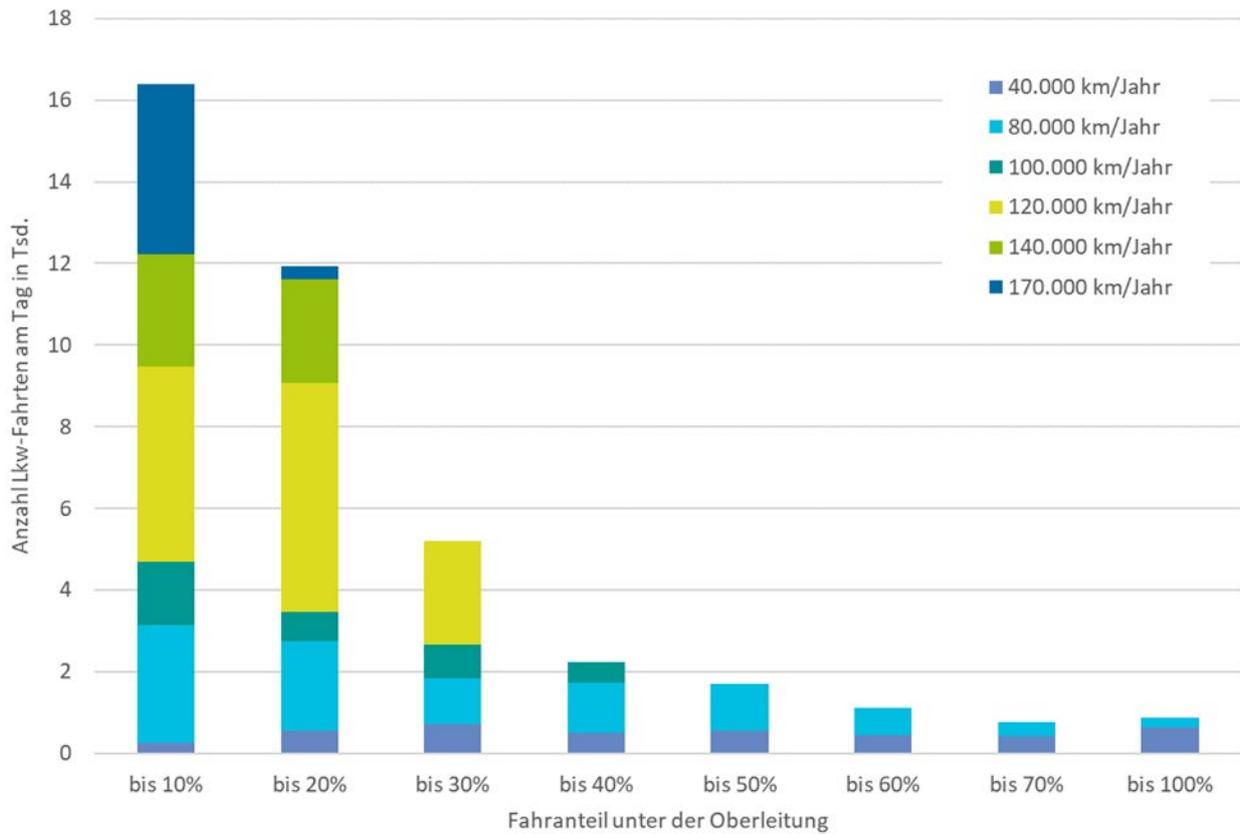
Der elektrische Fahranteil unter der regional verfügbaren Oberleitungsstrecke sowie die Reichweitenanforderung jenseits der elektrifizierten Strecke werden für alle Fahrten, die die Oberleitungsstrecke tangieren, auf Basis der vorangegangenen verkehrlichen Analysen (siehe Abschnitt 2.2) ermittelt. In einem nächsten Schritt werden die einzelnen Fahrten den Profilen zugeordnet (siehe folgender Abschnitt).

Die Anforderungen an die elektrische Reichweite jenseits der Oberleitungsstrecken (für O-BEV relevant) werden über die Länge von Vor- und Nachlauf definiert. Es wird angenommen, dass die Batterie am Start- und Zielort stationär geladen werden kann und eine Nachladung der Batterie während der Fahrt unter der Oberleitung mit 150 kW Leistung erfolgen kann. In der vorliegenden Analyse werden O-Lkw mit einer Batteriereichweite von 100 km (O-BEV 100) bzw. 200 km (O-BEV 200) betrachtet.

Zuordnung der Fahrten zu Nutzungsprofilen

Die vorangegangenen verkehrlichen Analysen liefern Aussagen zu Einzelfahrten. Für die Modellierung des technischen und ökonomischen Potenzials sind jedoch fahrzeugbezogene Nutzungsprofile erforderlich, die sich aus Einzelfahrten zusammensetzen. Die Zuordnung von Einzelfahrten zu Nutzungsprofilen erfolgt analog zum Vorgehen in StratON. Dabei werden kürzeren Einzelfahrten Nutzungsprofile mit eher geringerer und längeren Fahrten Nutzungsprofile mit höherer Jahresfahrleistung zugeordnet. Es wird zudem davon ausgegangen, dass Fahrten mit Oberleitungsbezug gebündelt von Lkw erbracht werden, also O-Lkw bewusst in der betreffenden Region zum Einsatz kommen. Es handelt sich also um eine „best case“-Annahme, die zwar einer ökonomischen Rationalität folgt, deren Umsetzung mit Blick auf die unternehmerischen Rahmenbedingungen aber an dieser Stelle nicht näher plausibilisiert werden kann.

Abbildung 3-2: Verteilung der Fahrten über den elektrischen Fahranteil je Jahresfahrleistungskategorie für die betrachtete BAB-Auswahlstrecke



Quelle: intraplan, eigene Berechnungen

3.3 Ermittlung der Neuzulassungsstruktur auf Grundlage der antriebspezifischen Gesamtnutzungskosten (TCO)

Die Berechnung der antriebspezifischen Gesamtnutzungskosten (TCO) ist die Grundlage für die Modellierung der Neuzulassungsstruktur und erfolgt analog zum Vorgehen im Projekt StratON. Unterschiede ergeben sich durch die veränderten Nutzungsprofile (siehe vorangegangener Abschnitt), die lediglich eine Regionalstrecke für die Oberleitungsnutzung berücksichtigen, während im Projekt StratON ein bis zu 4.000 Kilometer langes Netz zugrunde gelegt wurde.

Die berücksichtigten Technologiekosten wurden weitestgehend aus StratON übernommen. Es wurden die Fahrzeugpreise für Dieselfahrzeuge aktualisiert und eine weniger starke Effizienzsteigerung angenommen (Tabelle 4-1) (European Commission 2018). Um möglichst hohe Aktualität zu gewährleisten, wurden zudem Rahmendaten (wie Energiekosten, BIP-Wachstum, Referenzverkehrsnachfrage) und der Stand politischer und regulatorischer Instrumente aus dem zum Zeitpunkt der Modellierung aktuellen Projektionsbericht der Bundesregierung (Bundesregierung (BReg) 2021) übernommen. Die beschlossene Einführung einer CO₂-Komponente in der Maut von 200 €/tCO₂ ab Dezember 2023 ist daher noch nicht berücksichtigt, sondern es wurden die ab 2019 gültigen Mautsätze angewendet.

3.4 Ableitung des Fahrzeugbestands

Der Fahrzeugbestand wird analog zu StratON modelliert. Basierend auf den Überlebenskurven für Sattelzugmaschinen des Modells TREMOD und der unterstellten Fahrleistungsentwicklung werden die jährlichen Neuzulassungen bestimmt.

3.5 Einordnung der getroffenen Annahmen für die Modellierung

Die getroffenen Annahmen für die Modellierung des Marktpotenzials von O-Lkw weisen in ihrer Ausprägung und ihren Einschränkungen hohe Überschneidungen mit dem Vorgehen in StratON auf.

Diese umfassen folgende zentrale und deckungsgleiche Annahmen:

- Die Struktur der Nutzungsprofile und die Jahresfahrleistung der Fahrzeuge bleibt über die Zeit unverändert.
- Die modellierte Nachfrage nach Fahrzeugen hat – insbesondere mit Blick auf alternative Antriebe – keinen Einfluss auf die Angebotspreise und es wird keine Restriktion bei der Fahrzeugverfügbarkeit unterstellt.
- Die prozentuale Wertminderung der Lkw wird antriebsübergreifend konstant angenommen.
- Die TCO-basierte Ableitung der Neuzulassungsstruktur basiert auf der Annahme eines ökonomisch rationalen Entscheiders.
- Mögliche Nutzlastverluste durch alternative Antriebe werden ökonomisch nicht berücksichtigt.
- Die Kaufentscheidung wird nur für das verfügbare Oberleitungsnetz (hier: eine regionale Oberleitungsstrecke von 89 Kilometern Länge) simuliert. Erwartungen an einen weiteren Netzausbau, die einen höheren elektrischen Fahranteil zur Folge haben könnten, werden nicht berücksichtigt.
- Die Auslastung und Leistungsfähigkeit der Oberleitung kann das Aufladen der Batterie während der Fahrt beschränken, vor allem, wenn viele O-Lkw auf der elektrifizierten Strecke gleichzeitig unterwegs sind. Dies verringert die Ladeleistung bei hoher Auslastung, sodass ein Lkw möglicherweise während einer kurzen Fahrt unter der Oberleitung seine Batterie nicht komplett aufladen kann. Da die konkrete Auslastung von Streckenabschnitten nicht modelliert wird, konnte diese Restriktion nicht in die Modellierungen einfließen.
- Bei den verkehrlichen Analysen wurden zwar im Vergleich zu StratON zusätzlich neben Last- und Sattelzügen auch Lkw mit weniger als 12 Tonnen als auch Lkw mit maximal 3 Achsen und mehr als 12 Tonnen berücksichtigt. Aufgrund ihrer geringen verkehrlichen Bedeutung auf der betrachteten regionalen Oberleitungsstrecke wurden diese beiden Fahrzeugkategorien – analog zum Vorgehen in StratON – bei der Markthochlaufmodellierung nicht berücksichtigt.

Folgende Annahmen stellen wichtige Änderungen gegenüber den Analysen im Vorläuferprojekt StratON dar:

- Es wurde keine minimalen Fahrtweite unter der Oberleitung (mind. 100 km) definiert und somit alle Fahrten mit Kontakt zur regionalen Auswahlstrecke – unabhängig von der Länge – zunächst in die Betrachtung eingeschlossen.

- Bei der Synthese von (insbesondere kürzeren) Einzelfahrten zu Fahrzeugnutzungsprofilen wurden Fahrten mit Oberleitungsbezug vorzugsweise kombiniert. Dieses Vorgehen wird von der Annahme getragen, dass Fahrten im Bereich der regional verfügbaren Oberleitung vorzugsweise von O-Lkw erbracht werden (z.B. Pendelverkehre) und damit eine Optimierung der Fahrten bei der Zuordnung erfolgt. Damit handelt es sich um eine „best case“-Annahme.
- Für O-BEV wird ein Nachladen der Batterie unter der Oberleitung mit einer mittleren Leistung von 150kW angenommen. Das bedeutet, dass der Energiebezug aus der Batterie aus dem Vorlauf unter der Oberleitung – je nach Fahrtlänge unter der Oberleitung nachgeladen werden kann und somit einen längeren Nachlauf jenseits der Oberleitung ermöglicht.
- Standardmäßig wird für alle O-BEV eine Nachlademöglichkeit am Start-/Zielort angenommen. Dies bedeutet, dass sowohl an diesen Orten eine verfügbare Ladeinfrastruktur als auch eine für die Nachladung ausreichende Standzeit angenommen wird. Damit handelt es sich ebenfalls um eine „best case“-Annahme.
- Wie bereits oben erwähnt, wurden zentrale Rahmendaten (u.a. Energiepreise) aktualisiert und an aktuelle Entwicklungen angepasst.
- Bei der Betrachtung des technischen und ökonomischen Potenzials von O-Lkw wird lediglich die Elektrifizierung der betrachteten regionalen Ausbaustrecke berücksichtigt. Ein weiter fortschreitender Netzausbau, der sowohl das technische als auch wirtschaftliche Potenzial von O-Lkw erhöhen würde (siehe Projekt StratON), wurde nicht angenommen.

4 Szenarien und Ergebnisse

4.1 Betrachtete Szenarien

Für die Analyse des Potenzials von O-Lkw bei der Realisierung der dargestellten regionalen Oberleitungstrecke werden zwei Szenarien gegenübergestellt.

In einem Referenzszenario („Referenz“) wird die Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen und des Lkw-Bestands in Deutschland für den Fall modelliert, dass bis zum Jahr 2030 deutschlandweit keine Oberleitungsinfrastruktur verfügbar ist. Die Definition der Rahmenbedingungen basiert auf dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts 2021 (Bundesregierung (BReg) 2021). Die im MMS abgebildete OL-Netzlänge von 300 Kilometern wird nicht übernommen.

Dem Referenzszenario gegenübergestellt wird das Szenario „Regio“ mit identischen Rahmenbedingungen, dass jedoch die Umsetzung einer Oberleitungsanlage in beide Fahrtrichtungen auf der oben dargestellten regionalen Strecke von 89 km Länge zwischen dem Kreuz Frankfurt und dem Kreuz Walldorf umfasst. Es wird angenommen, dass der Oberleitungsaufbau im Jahr 2024 umgesetzt wird und sich bis spätestens im Jahr 2030 die Auswirkungen auf die Neuzulassungen (Anteil O-Lkw) vollständig im Lkw-Bestand niedergeschlagen haben.

Im „Regio“-Szenario wird bei der Kaufentscheidung neben Diesel-Lkw auch die Wahl von Oberleitungs-Lkw mit Diesel-Hybridantrieb (O-HEV) bzw. batterieelektrischen O-Lkw mit einer Reichweite jenseits der Oberleitung von 100 Kilometern (O-BEV-100) bzw. 200 Kilometern (O-BEV-200) ermöglicht. Entlang des elektrifizierten Abschnitts erfolgt der Fahrzeugbetrieb bei O-Lkw

elektrisch, jenseits davon, im Falle von O-HEV mit Dieselkraftstoff und im Falle von O-BEV mit Strom, aus der Batterie. Die Nachladung der Batterie erfolgt unter der Oberleitung mit bis zu 150 kW und entsprechend der Aufenthaltsdauer im elektrifizierten Streckenabschnitt. An den Start- und Endpunkten kann die Batterie im Depot jeweils vollständig kabelgebunden wieder aufgeladen werden.

Mit Blick auf die Szenarioergebnisse ist zu beachten, dass die Lkw-Neuzulassungen für Gesamtdeutschland modelliert werden, sich die Einsatzmöglichkeiten von O-Lkw jedoch auf die regionale Strecke beschränken und damit das Potenzial erheblich einschränken.

In weiteren Sensitivitätsbetrachtungen wurde ausgehend vom „Regio“-Szenario zusätzlich die Konkurrenz zu batterieelektrischen Lkw (BEV) und eine Variation von Batterie- und Strompreis betrachtet.

4.2 Szenarioergebnisse

4.2.1 Vergleich der antriebsspezifischen Gesamtnutzungskosten (TCO)

Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt, erfolgt die modellierte Wahl von Antriebsoptionen primär auf Grundlage der minimalen Gesamtnutzungskosten und unter Berücksichtigung möglicher technologiebedingter Einsatzrestriktionen. Angesichts der Vielzahl an abgebildeten Nutzungsprofilen, können an dieser Stelle nur grundsätzliche Unterschiede in der Kostenstruktur diskutiert und anhand von Beispielen illustriert werden. Die Anschaffungskosten beinhalten den Kaufpreis abzüglich des Wiederverkaufswertes nach der Haltedauer. Für das betrachtete Referenzjahr 2030 zeigen O-Lkw unter den getroffenen Rahmenbedingungen höhere Anschaffungskosten als vergleichbare Diesel-Lkw. Die höheren Anschaffungskosten werden durch Kosten für den erforderlichen Pantographen in Höhe von etwa 13.500 Euro und im Falle von O-BEV durch zusätzliche Kosten für die Batterie verursacht. Durch den effizienteren elektrischen Antrieb und der angenommenen Vorteile bei der Lkw-Maut (hier: Minderung der Mauthöhe um 75 %), können die höheren Anschaffungskosten mit zunehmender Fahrleistung und bei relevantem elektrischen Fahranteil über die Nutzungsdauer kompensiert werden.

Tabelle 4-1: Annahmen zu Fahrzeugpreisen, Energieverbräuchen und -preisen nach Antriebsart und Kraftstofftyp

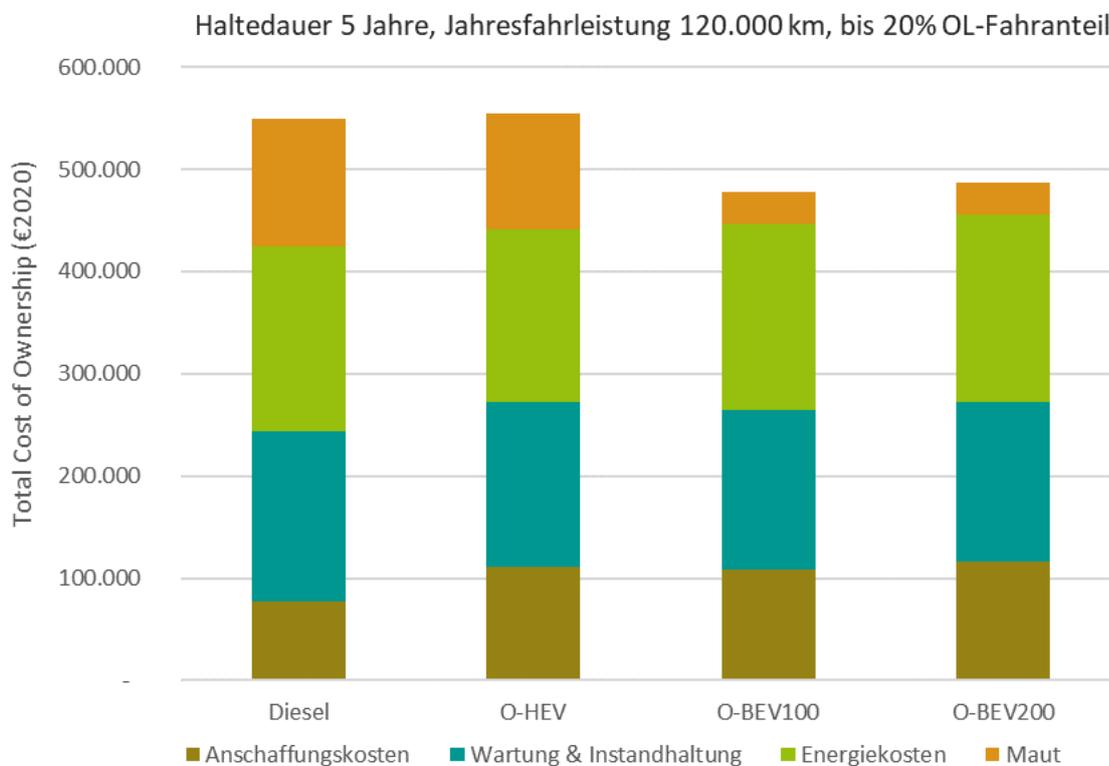
	Einheit	Diesel	O-HEV	O-BEV100	O-BEV200
Fahrzeugpreis	€	101.256	146.344	146.591	158.067
Dieserverbrauch	MJ/km	9,2	8,8	-	
Stromverbrauch (ohne Ladeverluste)	MJ/km	-	4,7	4,7 / 4,4 (abseits der OL)	
Mautminderung	Anteil	0%	0%*	75 %	
Dieselpreis	€/Liter	1,11			
Strompreis	ct/kWh	26,7			
Strompreis OL	ct/kWh	21,2			

*im konventionellen Betrieb / elektrische Fahrleistung unter der Oberleitung von CO₂-Komponente der Maut befreit

Quelle: (Moultak et al. 2017), (Bundesregierung (BReg) 2021), eigene Berechnungen (Kühnel et al. 2018)

Das Beispiel eines modellierten Lkw mit 120.000 km Jahresfahrleistung, 5 Jahren Nutzungsdauer und 20 % Fahranteil unter der regionalen Oberleitungsstrecke (siehe Abbildung 4-1) veranschaulicht diesen Zusammenhang. Insbesondere durch den hohen Mautvorteil von elektrischen Antrieben können die O-BEV-Varianten deutliche Kostenvorteile gegenüber der Dieselvariante erzielen. Im dargestellten Fall reicht der elektrische Fahranteil hingegen nicht aus, um einen O-HEV über die Nutzungsdauer durch Einsparungen bei Energiekosten und der CO₂-Komponente der Maut gegenüber einem Diesel-Lkw aus Nutzersicht wirtschaftlich konkurrenzfähig zu betreiben. Im illustrierten Fall würde die Ausprägung als O-BEV-100 daher vom Modell als bevorzugte Variante für dieses Nutzungsprofil gewählt.

Abbildung 4-1: Gesamtnutzungskosten für unterschiedlicher Antriebsvarianten eines Last-/Sattelzugs im Jahr 2030 für ein beispielhaftes Nutzungsprofil



Quelle: eigene Berechnung

4.2.2 Marktpotenzial von O-Lkw und Treibhausgasminderungspotenzial im Jahr 2030

Wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, lassen sich mittels der Gesamtnutzungskostenanalysen für die analysierten Nutzungsprofile die wirtschaftlich realisierbaren Marktanteile von O-Lkw unter den gesetzten Rahmenbedingungen modellieren.

Für das „Regio“-Szenario ergibt sich bei vollständiger Realisierung der 89 Kilometer langen Oberleitungsstrecke im Raum Frankfurt bis zum Jahr 2030 ein wirtschaftlicher Einsatz von O-Lkw für 3,1 % der gesamtdeutschen Lkw-Neuzulassungen (>12 Tonnen zul. Gesamtgewicht). Zur besseren Einordnung des Potenzials sei auf folgende Rahmenbedingungen im Besonderen verwiesen.

Der Einsatz von O-Lkw ist nur für Fahrzeuge attraktiv, die das Oberleitungsnetz regelmäßig über längere Abschnitte tangieren und damit von den vorteilhaften Betriebskosten profitieren. Angesichts des geringen Ausbaugrads im dargestellten Fall, ist das Potenzial dadurch stark beschränkt. Gleichzeitig ist bemerkenswert, dass bei einem Oberleitungsaufbau auf 89 km Länge, welcher damit nur knapp 0,7 % des Gesamtnetzes der deutschen Autobahnen umfasst, ein überproportionaler Anteil des Gesamtbestands an Lkw in Deutschland erreicht werden kann. Grund hierfür ist v. a., dass die O-Lkw neben der verfügbaren Oberleitung auch von der getroffenen Annahme einer standardmäßigen Verfügbarkeit von kabelgebundenen Lademöglichkeiten an Start- und Zielort stark profitieren. So wird weniger als ein Viertel der Gesamtstromnachfrage der ermittelten O-Lkw über die regionale Oberleitungsstrecke bezogen und mehr als drei Viertel über stationäre Ladepunkte am Start- und Zielort. Zudem handelt es sich, wie auch bereits die verkehrlichen Analysen (siehe Abschnitt 2.2) gezeigt haben, bei der Auswahlstrecke um eine besonders relevante Strecke für den Straßengüterverkehr mit hoher Verkehrsstärke und einem hohen Anteil an der Gesamtverkehrsleistung. So haben 4,4 % aller Lkw-Fahrten in Deutschland Kontakt mit der analysierten Strecke und haben in ihrer Gesamtlänge (inkl. Vor- und Nachlauf) einen überproportionalen Anteil von etwa 9,5 % an der erbrachten Gesamtfahrleistung in Deutschland.

Der ermittelte Anteil am Gesamtfahrzeugbestand von 3,1 % für O-Lkw im Jahr 2030 als Resultat des frühzeitigen Aufbaus der regionalen Oberleitungsstrecke würde mit einer entsprechenden Verringerung von Diesel-Lkw einhergehen. Durch die damit verbundene elektrische Fahrleistung und Substitution von Dieselmotoren würden sich die direkten Treibhausgasemissionen um etwa 0,6 Millionen Tonnen im Jahr 2030 reduzieren. Dies entspricht etwa 1,5 % der Emissionen, die aktuell durch den Straßengüterverkehr in Deutschland verursacht werden. Angesichts einer Elektrifizierung von lediglich 0,7 % des deutschen Autobahnnetzes ist dieser Effekt als durchaus beträchtlich einzuordnen.

4.3 Einordnung der Ergebnisse

Bisherige Analysen zu Oberleitungs-Lkw stellen den Straßengüterfernverkehr in den Mittelpunkt und treffen Aussagen für ein relativ weit ausgereiftes Oberleitungsnetz. Wenn auch dieses Zielbild für die Oberleitungstechnologie schlüssig ist, so würde in der Praxis ein sukzessiver Ausbau des Netzes wahrscheinlich sein und die Frage nach der Eignung erster Einzelstrecken, die über heutige Teststrecken hinausgehen, an Bedeutung gewinnen. In diesem Kontext lassen sich aus den hier diskutierten Analysen zu der dargestellten regionalen Oberleitungsstrecke zwischen Kreuz Frankfurt und Kreuz Walldorf einige Schlussfolgerungen ziehen und müssen gleichzeitig Einschränkungen hinsichtlich der Aussagekraft gemacht werden.

- Die verkehrlichen Analysen weisen angesichts der hohen Bedeutung für den Straßengüterverkehr auf eine allgemein hohe Eignung der betrachteten Strecke für eine regionale Elektrifizierung hin. Dieses Ergebnis wird auch durch andere Studien gestützt (siehe u.a. Hacker et al. (2022)).
- Das Potenzial für O-Lkw ist bei einer Einzelstrecke wirtschaftlich jedoch nur gegeben, wenn auch im Vor- und Nachlauf elektrisch gefahren werden kann. Dies setzt eine kabelgebundene Ladestation am Start- und Zielort voraus. Der Aufbau einer stationären Ladeinfrastruktur, insbesondere in Depots und an Güterumschlagpunkten, stellt sich vor diesem Hintergrund als auch mit Blick auf die zusätzliche Eignung für die Energieversorgung von rein batterieelektrischen Lkw als No-Regret-Maßnahme dar.

- Auch bei der betrachteten Regionalstrecke ist die Technologie vor allem für Last- und Sattelzüge relevant. Andere Fahrzeugklassen können durch die deutlich geringere Fahrleistung nur geringfügig zur Auslastung der Strecke beitragen. Zudem verschlechtert sich in diesen Fällen auch die Kostenbilanz, da fixe Zusatzkosten für den Pantographen bei Fahrzeugen mit geringerem Basispreis anteilmäßig höher ins Gewicht fallen.
- Die Analyse der Gesamtnutzungskosten weist auf die große Bedeutung der Mautausgestaltung⁸ hin, die durch die angenommene Begünstigung von elektrischen Antrieben einen robusten Kostenvorteil von elektrischen Antriebsvarianten und damit auch von O-Lkw sicherstellt.
- Der wirtschaftliche Betrieb von O-Lkw ist wie auch bei BEV ansonsten stark von Batteriekosten und Stromkosten abhängig. Bei höheren Batteriekosten (in einer Sensitivitätsanalyse abgebildet) zeigt die O-HEV-Variante in mehr Anwendungsfällen gegenüber dem O-BEV wirtschaftliche Vorteile. Unter den Referenzannahmen ist die Auslegung als O-HEV hingegen von geringer Bedeutung.
- Unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen (siehe Fokus auf BEV) wäre der Aufbau einer regionalen Oberleitungsstrecke kein Garant für das aufgezeigte Potenzial für O-Lkw. So zeigen ergänzende Sensitivitätsanalysen, dass bei der betrachteten regionalen Umsetzung sowohl technisch als auch nutzerkostenseitig eine hohe Konkurrenz zum BEV besteht. Zusätzliche Anreize⁹ für den O-Lkw-Einsatz könnten daher für die Erschließung des Potenzials bei einer lediglich regional verfügbaren Oberleitungsstrecke notwendig sein. Zudem müsste das Oberleitungssystem so leistungsfähig ausgebaut sein, dass auch bei einer zunächst kurzen Oberleitungsstrecke und einer folglich kurzen Verweildauer von Lkw (maximal eine Stunde) unter der Oberleitung, die Batterie für die Strecke jenseits der Oberleitung ausreichend nachgeladen werden kann.
- Gleichzeitig zeigen die Analysen, dass bei einer geeigneten Streckenwahl auch ein zunächst regionaler Streckenausbau im Idealfall schon relevante Potenziale im Straßengüterverkehr erschließen kann und einen deutlichen Mehrwert gegenüber bisherigen Pilotvorhaben darstellt. Dieser erscheint aber nur sinnvoll, wenn er sich als Zwischenschritt in einen längerfristigen Netzausbauplan einfügt, da erst mit einer zunehmenden Netzbildung die ausgeprägten Vorteile der Technologie mit Schwerpunkt auf den Fernverkehr (u.a. kürzere Standzeiten für die Batterieladung, Kostenvorteile) verstärkt erschlossen werden.

⁸ Die beschlossene Einführung einer CO₂-Komponente in der Maut von 200 €/tCO₂ ab Dezember 2023 ist in den vorliegenden Analysen noch nicht berücksichtigt, sondern es wurden die ab 2019 gültigen Mautsätze angewendet.

⁹ z.B. deutliche Kostenvorteile beim Strombezug über die Oberleitung im Vergleich zum stationären Laden

5 Literaturverzeichnis

- BMU (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin.
- BReg (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009. Hg. v. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt (Climate Change, 39/2023). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_2023.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2023.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hg.) (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. BMVI. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.10.2021.
- Bundesregierung (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG, vom 12.05.2021.
- Bundesregierung (BReg) (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2022.
- BVU Beratergruppe; Intraplan Consult GmbH; IVV GmbH & Co. KG; Planco Consulting (Planco) (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Abschlussbericht - Los 3, zuletzt geprüft am 16.01.2017.
- European Commission (Hg.) (2018): Support for preparation of the impact assessment for CO2 emissions standards for Heavy Duty Vehicles. Final report for 'SR9 Heavy Duty Vehicles CO2'. TNO innovation for life (TNO); Graz University of Technology; CE Delft; International Council on Clean Transportation (ICCT).
- Göckeler, Katharina; Steinbach, Inia; Görz, Wolf; Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Mottschall, Moritz (2023): StratES – Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen. Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Hg. v. Öko Institut e.V. Öko Institut e.V. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Szenarien-Elektrifizierung-Strassengueterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 27.09.2023.
- Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Görz, Wolf (2020a): StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Öko-Institut; Hochschule Heilbronn (HHN); Fraunhofer IAO; ITP. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 26.03.2023.
- Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Gather, Matthias; Hartwig, Matthias; Gnann, Till, Göckeler, Katharina; Plötz, Patrick; Lehmann, Michael (2023): Expansion Strategies for Electric Road

Systems (ERS) in Europe. A working paper from the COLLERS2 project. Online verfügbar unter https://electric-road-systems.eu/e-r-systems-wAssets/docs/COLLERS-2-Discussion-paper-4-Expansion-strategies_2023-08-04.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2023.

Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Plötz, Patrick (2020b): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese. Hg. v. Öko-Institut, Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) und Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI).

Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Wallace, Robert; Speth, Daniel (2022): Mögliche Ausbauschritte für eine Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr in Deutschland. Eine kriterienbasierte Analyse. Hg. v. Öko-Institut e.V., ifeu und Fraunhofer ISI (Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland (BOLD)). Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2022/BOLD_M%C3%B6gliche_Ausbauschritte_Oberleitungsinfrastruktur_in_Deutschland_2022.pdf, zuletzt geprüft am 01.02.2023.

Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Görz, Wolf (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Hg. v. Öko-Institut.

Moultak, Marissa; Lutsey, Nic; Hall, Dale (2017): Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. International Council on Clean Transportation (ICCT). Washington DC (White Paper). Online verfügbar unter <https://www.theicct.org/publications/transitioning-zero-emission-heavy-duty-freight-vehicles>.