

Begleitforschung
Oberleitungs-Lkw
in Deutschland

Herausforderungen und Handlungs- erfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw

Diskussionspapier

Ort: Berlin, Heidelberg, Karlsruhe

Datum: 06.03.2023

Version 1

Impressum

Herausforderungen und Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw

Autor:innen

Moritz Mottschall, Florian Hacker, Katharina Göckeler (Öko-Institut)
m.mottschall@oeko.de, f.hacker@oeko.de, k.goeckeler@oeko.de

Julius Jöhrens, Florian Heining, Hinrich Helms (ifeu)
julius.joehrens@ifeu.de, f.heining@ifeu.de, h.helms@ifeu.de

Till Gnann, Uta Burghard, Aline Scherrer (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI)
till.gnann@isi.fraunhofer.de, uta.burghard@isi.fraunhofer.de, aline.scherrer@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

Öko-Institut e.V.
Borkumstraße 2, 13189 Berlin

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilkenstraße 3, 69120 Heidelberg

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Bildnachweis

Deckblatt: BOLD-Projekt

Zitierempfehlung

M. Mottschall, J. Jöhrens, T. Gnann, F. Hacker, K. Göckeler, F. Heining, H. Helms, U. Burghard, A. Scherrer (2023): Herausforderungen und Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw – Diskussionspapier. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

März 2023

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.

Danksagung

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projekts *Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland (BOLD)*, das im Rahmen des Förderprogramms *Erneuerbar Mobil* vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 16EM4011-1 gefördert wird. Ein besonderer Dank gilt den Expert:innen zur O-Lkw-Technologie aus Wissenschaft, Industrie und Anwendung, die durch ihre Mitwirkung am BOLD-Expertenpanel eine wichtige Grundlage für die Erstellung des vorliegenden Papiers geschaffen haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Zielstellung	7
2	Handlungsfelder	11
2.1	Technik: Welche technologische Weiterentwicklung von Fahrzeug und Infrastruktur ist erforderlich?	11
2.1.1	Verfügbarkeit / Zuverlässigkeit.....	11
2.1.2	Standardisierung / Normung	13
2.1.3	Schnittstellen zu anderen Energieversorgungsinfrastrukturen und Antriebssystemen.....	15
2.2	Markt: Wie entstehen ein Angebot und eine Nachfrage für O-Lkw und die erforderliche Infrastruktur?.....	17
2.2.1	Fahrzeuge	17
2.2.2	Marktakzeptanz Fahrzeuge	19
2.2.3	Infrastruktur	21
2.3	Infrastrukturaufbau: Wie kann die Errichtung der Infrastruktur in der notwendigen Geschwindigkeit gelingen?.....	23
2.3.1	Lokale Akzeptanz.....	23
2.3.2	Planung, Genehmigung und Finanzierung.....	25
2.3.3	Netzintegration	27
2.4	Betrieb: Wie kann ein verlässlicher und attraktiver Betrieb des O-Lkw-Systems erreicht werden?	28
2.4.1	Akzeptanz der Technologie bei Anwender:innen.....	28
2.4.2	Technisch und ökonomisch attraktiver Fahrzeugeinsatz.....	29
2.4.3	Infrastrukturbetrieb	31
3	Zentrale Handlungsempfehlungen	34
4	Literatur	37

Zusammenfassung

Die nationalen Klimaschutzziele und die damit einhergehende Regulierung auf nationaler und EU-Ebene erfordern im Straßengüterverkehr eine rasche Abkehr vom konventionell betriebenen Diesel-Lkw als Standardlösung.

Als alternative Technologien gelten in Deutschland insbesondere batterieelektrische (BEV), oberleitungsgebundene (O-BEV) und Brennstoffzellen-Lkw (FCEV). Kurz- bis mittelfristig haben die Optionen mit direkter Stromnutzung das größte Potenzial zur Treibhausgasreduzierung, Sie bilden den Schwerpunkt dieses Papiers. Alle erwähnten Fahrzeugtechnologien sowie die dafür erforderliche Infrastruktur zur Energieversorgung müssen aber noch deutliche Fortschritte erzielen, um konkurrenzfähig und im Massenmarkt einsetzbar zu sein.

Im vorliegenden Papier werden für das O-Lkw-System notwendige Zielzustände und dafür erforderliche Handlungsbedarfe diskutiert, damit die Technologie substantiell zur Erreichung der Klimaschutzziele beitragen kann. Zeitlich orientieren sich die Analysen an den Vorgaben der übergeordneten Klimaschutzziele sowie am Gesamtkonzept für klimafreundliche Nutzfahrzeuge der Bundesregierung (BMVI 2020)¹. Wichtige Zielmarken sind die Jahre 2025 und 2030: Bis 2025 soll eine serienreife Technologie verfügbar sein, um Pfadentscheidungen zu ermöglichen; und bis 2030 sollen alternative Antriebe bereits einen relevanten Marktanteil erreichen, der in den Folgejahren eine Dominanz dieser Antriebe ermöglicht.

Für zentrale Handlungsfelder lassen sich aus den durchgeführten Analysen folgende Empfehlungen für den Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw ableiten:

TECHNIK: Serienreife und europaweit standardisierte O-Lkw mit der Möglichkeit zum dynamischen und stationären Laden entwickeln.

Die Technologiereife von O-Lkw muss so weit vorangetrieben werden, dass diese als ausgereifte Serienprodukte auf einem Massenmarkt angeboten werden können. Die Standardisierung von zentralen Schnittstellen zwischen Komponenten ist hierfür essentiell und erleichtert den Markteintritt weiterer Hersteller. Sich abzeichnende Synergien zwischen Oberleitung und stationärem Laden („Oberleitungs-Readiness“ von BEV) sollten bei der weiteren Technikentwicklung frühzeitig Berücksichtigung finden.

MARKT: Vertrauen in die Technologie bei den Marktakteuren durch verbindlichen Infrastrukturausbau und verlässliche Marktanreize schaffen.

Um Vertrauen bei wichtigen Stakeholdern auf Herstellungs- und Anwender:innenseite zu schaffen, ist eine längerfristige Förderung der Technologie und ein verlässlicher und planbarer Ausbau der Infrastruktur essentiell. Dies gilt analog für die Entstehung eines wettbewerblichen Markts mit einer größeren Anzahl an Wirtschaftsakteuren. Die Umsetzung der geplanten Innovationskorridore² unter Sicherstellung einer niederschweligen Mitwirkung möglichst vieler Stakeholder stellt einen wichtigen nächsten Schritt dar.

INFRASTRUKTUR: Die notwendige Ausbaugeschwindigkeit erfordert eine deutschlandweite Koordinierung und Beschleunigung von Planungsprozessen.

Damit der Ausbau schnell vorangeht, muss der Infrastrukturausbau eine hohe Priorität haben, an zentraler Stelle koordiniert und Wechselwirkungen mit wichtigen Parallelentwicklungen (u. a. der Stromnetzausbau und das stationäre Laden) frühzeitig berücksichtigt werden. Auch Fragen gesell-

¹ Beim Neuzuschnitt der Ministerien entstand im Jahr 2021 aus dem BMVI das Ministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).

² <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/bmvd-bringt-innovationscluster-fuer-klimafreundliche-lkw-antriebstechnologien-auf-den-weg/>

schaftlicher Akzeptanz sind zu beachten. Eine frühzeitige europäische Koordinierung und Standardisierung der Technologie sollte angesichts der engen Verflechtungen des Güterverkehrs angestrebt werden.

BETRIEB: Ein diskriminierungsfreier Infrastrukturzugang sowie ein verlässlicher Betriebskostenvorteil in zentralen Anwendungsfeldern sind wichtige Voraussetzungen für eine hohe Nutzer:innenakzeptanz von O-Lkw.

Eine hohe technische und ökonomische Praxistauglichkeit ist Grundvoraussetzung für die Akzeptanz der Technologie bei Anwender:innen. Ökonomische Anreize (z. B. eine längerfristige Privilegierung bei der Lkw-Maut), die bereits frühzeitig den Einsatz von O-Lkw bei Logistikunternehmen wirtschaftlich vorteilhaft machen und eine unkomplizierte Nutzung der Infrastruktur sind hierfür zentral. Angesichts der Bedeutung grenzüberschreitender Verkehre sollte frühzeitig ein Konzept für die grenzüberschreitende Infrastrukturnutzung erarbeitet werden.

INTERNATIONAL: Bekanntheit der O-Lkw-Technologie auf europäischer Ebene steigern und frühen Infrastrukturaufbau mit Nachbarstaaten initiieren.

Die engen Verflechtungen des Güterverkehrs und des Fahrzeugmarkts in Europa sowie einer Verortung wichtiger Regulierungen auf EU-Ebene unterstreicht die Bedeutung einer frühzeitigen europäischen Koordinierung der Aktivitäten zu O-Lkw. Die weitere Intensivierung der Initiativen Deutschlands zum internationalen Austausch und die direkte Kooperation mit interessierten Nachbarstaaten sind hierfür wichtige nächste Schritte. Perspektivisch sollte die Technologie Eingang in die europäische Infrastrukturplanung finden.

Im Rahmen des projektbegleitenden Stakeholderdialogs wurde von zahlreichen Beteiligten betont, dass eine politische Richtungsentscheidung zugunsten des O-Lkw-Systems zentrale Grundvoraussetzung für eine beschleunigte und erfolgreiche Entwicklung der Technologie darstellt.

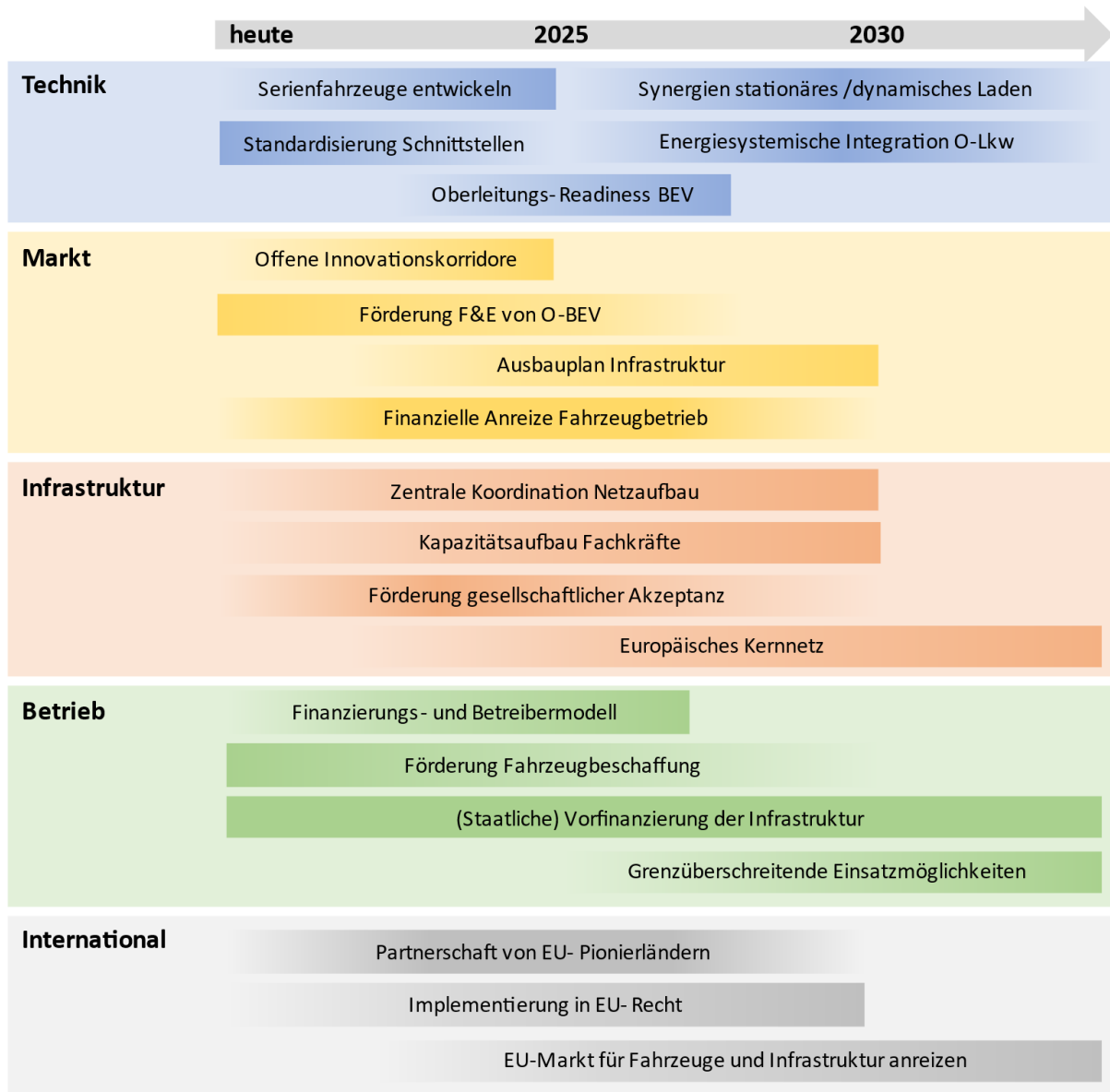


Abbildung 1: Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Einführung von Oberleitungs-Lkw

1 Hintergrund und Zielstellung

Der Verkehrssektor steht in Anbetracht der notwendigen Treibhausgas-minderung vor großen Herausforderungen. Während die Emissionen in anderen Sektoren wie z. B. dem Energiesektor in den vergangenen Jahren teilweise deutlich reduziert werden konnten, lagen sie im Verkehrssektor im Vorkrisenjahr 2019 mit 164 Mio. t CO₂-Äquivalenten auf dem Stand des Jahres 1990. Das im Jahr 2021 novellierte Klimaschutzgesetz verankert das Ziel, die verkehrsbedingten Emissionen bis zum Jahr 2030 auf 85 Mio. t zu reduzieren, was einer Minderung von 42 % gegenüber dem Jahr 2020³ entspricht (KSG 2021; UBA 2021). Auf den schweren Straßengüterverkehr entfielen im Jahr 2020 mit 38 Mio. t rund ein Viertel der verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen. Zur Erreichung der Klimaschutzziele müssten diese Emissionen bis zum Jahr 2030 auf 23 Mio. t sinken und sich damit nahezu halbieren (Matthes et al. 2022). Gleichzeitig wird von einer weiterhin ansteigenden Verkehrsnachfrage und begrenzten kurzfristigen Verlagerungspotenzialen ausgegangen (Repenning et al. 2021).

Deshalb sind tiefgreifende Veränderungen und die Abkehr vom Diesel-Antrieb bei Nutzfahrzeugen, hin zu alternativen Antriebsoptionen notwendig (Burchardt et al. 2021; Sensfuß et al. 2021; Dambeck et al. 2020). Für den Straßengüterverkehr besteht das Ziel, bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Fahrleistung von Lkw auf Basis von Strom zu erbringen (Bundesregierung 2019). Aktuell sind bei schweren Nutzfahrzeugen neben den Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) batterieelektrische-Lkw (BEV), Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw (FCEV) und mit eFuels⁴ betriebene Verbrenner (ICEV) in der Diskussion. O-Lkw können als Hybridfahrzeug mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor (O-HEV) und rein elektrisch mit einer Batterie, die statisch oder dynamisch über die Oberleitung geladen wird (O-BEV), konfiguriert sein.

Zur Erreichung des Klimaschutzziels ist ein hoher Neuzulassungsanteil alternativer (elektrischer) Antriebe im Jahr 2030 erforderlich. Im Zielszenario aus den Analysen von Matthes et al. (2022) liegt dieser im Jahr 2030 bei über 60 %, wodurch ein elektrischer Fahrleistungsanteil von 37 % an der Gesamtfahrleistung der Lkw realisiert wird.

Auf europäischer Ebene wird die Zielerreichung angebotsseitig durch die Verordnung zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen (2019/1242 2019) für neue schwere Nutzfahrzeuge angereizt, die ein Minderungsziel für neu zugelassene Lkw von 30 % im regulierten Flottenmix je Hersteller vorgibt (ab 2030 und 15 % ab 2025). Die Minderung kann durch Effizienzsteigerungen bei den ICEV und Zulassung von Nullemissionsfahrzeugen (ZEV) erreicht werden, wobei davon ausgegangen wird, dass ein großer Anteil auf die ZEV entfällt. Für die Zielerreichung ist ein ZEV-Zulassungsanteil von 22 % erforderlich (Göckeler et al. 2020). Im Rahmen der Revision der Richtlinie wird eine Ausweitung der unter die Regulierung fallenden Fahrzeugtypen sowie eine Verschärfung des Minderungsziels für das Jahr 2030 und eine Fortschreibung darüber hinaus erwartet.

Die EU-Ziele zum Infrastrukturaufbau sind in der „Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (AFID) geregelt. Diese Richtlinie soll von einer verbindlichen Verordnung abgelöst werden. Der Entwurf für die „Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (AFIR) (COM/2021/559) beinhaltet verbindliche Vorgaben für den Hochlauf von Ladeinfrastruktur für Elektro-Lkw und H₂-Infrastruktur; ein Hochlauf der Infrastruktur für O-Lkw wird derzeit nicht berücksichtigt.

Um den Herausforderungen der Treibhausgas-minderung zu begegnen, ist also eine schnelle Marktreife mit einem anschließend schnellen Markthochlauf von alternativ betriebenen Lkw und deren

³ Im Jahr 2020 lagen die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bedingt durch die Auswirkungen der Covid 19 Pandemie bei 146 Mio. t CO₂e.

⁴ Als eFuels oder Power-to-Liquid-Kraftstoffe werden Kraftstoffe bezeichnet, welche aus mittels Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff synthetisiert werden.

Infrastruktur erforderlich. Dafür hat das Bundesverkehrsministerium im Jahr 2020 ein Gesamtkonzept für klimafreundliche Nutzfahrzeuge erstellt (BMVI 2020). Für die darin enthaltenen Fahrzeugtechnologien BEV-Lkw, FCEV-Lkw und O-Lkw, die jeweils unterschiedliche Stärken und Schwächen haben sowie über unterschiedliche Marktreife und Unterstützung durch Stakeholder verfügen, wird ein Fahrplan aufgezeigt, wie die Transformation langfristig gelingen könnte.

Zu den Unterschieden zwischen den Kraftstoff- und Technologiealternativen zählen auch die damit bis zum Jahr 2030 erzielbaren Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen (vgl. Abbildung 1). Alle strombasierten Lkw-Antriebe und Kraftstoffe können vom geplanten Ausbau erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung profitieren, jedoch aufgrund der Effizienzunterschiede in unterschiedlichem Maße. Während sich bei im Jahr 2030 angeschafften Fahrzeugen mit ausschließlich direkter Stromnutzung⁵ (O-BEV, BEV) ein deutlicher Klimavorteil im Bereich von 50-60 % gegenüber der Nutzung konventioneller Dieselfahrzeuge ergibt, liegt das Reduktionspotenzial bei O-HEV mit einem elektrischem Fahrleistungsanteil von rund zwei Dritteln bei 45 %. Bei elektrolytischer Herstellung von Wasserstoff in Deutschland fällt das Minderungspotenzial von FCEV mit etwas über 10 % deutlich geringer aus, da hohe Konversionsverluste anfallen und daher deutlich mehr Strom benötigt wird als bei den direktelektrischen Antrieben. Noch größere Verluste entstehen bei Nutzung von national mit deutschem Strommix produzierten synthetischen Kraftstoffen, die auch als eFuels oder Power-to-Liquid-Kraftstoffe (vgl. „PtL aus Mix DE“ in Abbildung 1) bezeichnet werden. Die Treibhausgasemissionen liegen hier selbst für 2030 zugelassene Lkw noch um 35 % über denen von Diesel-Lkw. Wasserstoff oder eFuels können im Klimaschutzbeitrag nur mit direkt-elektrischen Lösungen konkurrieren, wenn für ihre Produktion in der nächsten Dekade tatsächlich zusätzliche erneuerbare Energien erschlossen werden. Die Nationale Wasserstoffstrategie 2030 sieht auch nur einen Bruchteil des prognostizierten Bedarfs durch heimische Produktion gedeckt. Allerdings werden wahrscheinlich erst mittel- bis längerfristig - bei Senkung der Transportkosten - Wasserstoff-Importe aus entfernteren Regionen eine Rolle spielen (Matthes et al. 2021).

Damit ergibt sich mittelfristig (2030) ein deutlicher und robuster Klimavorteil von O-Lkw gegenüber Brennstoffzellen-Lkw und der Nutzung synthetischer Kraftstoffe, wenn beide mit deutschem Strommix hergestellt werden. Oberleitungs-BEV besitzen leichte Klimavorteile gegenüber den BEV, welche sich hauptsächlich aus den geringeren Emissionen ergeben, die mit der Batterieproduktion und -entsorgung verbunden sind. Der Einsatz von Oberleitungs-BEV anstelle von BEV wäre daher nicht primär aus Klimaschutzgründen notwendig, könnte aber aus betrieblichen Gründen, aufgrund von Ressourcenaspekten (verringertes Bedarfs von kritischen Batteriewerkstoffen wie Lithium, Kobalt etc.) und zur Netzstabilisierung sinnvoll sein. Diese Einschätzung wird auch von den prozessbegleitenden Stakeholdern geteilt, die den Klimavorteil und die geringere Ressourceninanspruchnahme mit Blick auf die erforderliche Batteriekapazität als zentrale und robuste Vorteile des O-Lkw-Systems im Vergleich zu den Antriebsalternativen bewerten.

⁵ Die veranschlagten Treibhausgasemissionen im deutschen Strommix betragen im Jahr 215 gCO₂-Äquivalente pro kWh.

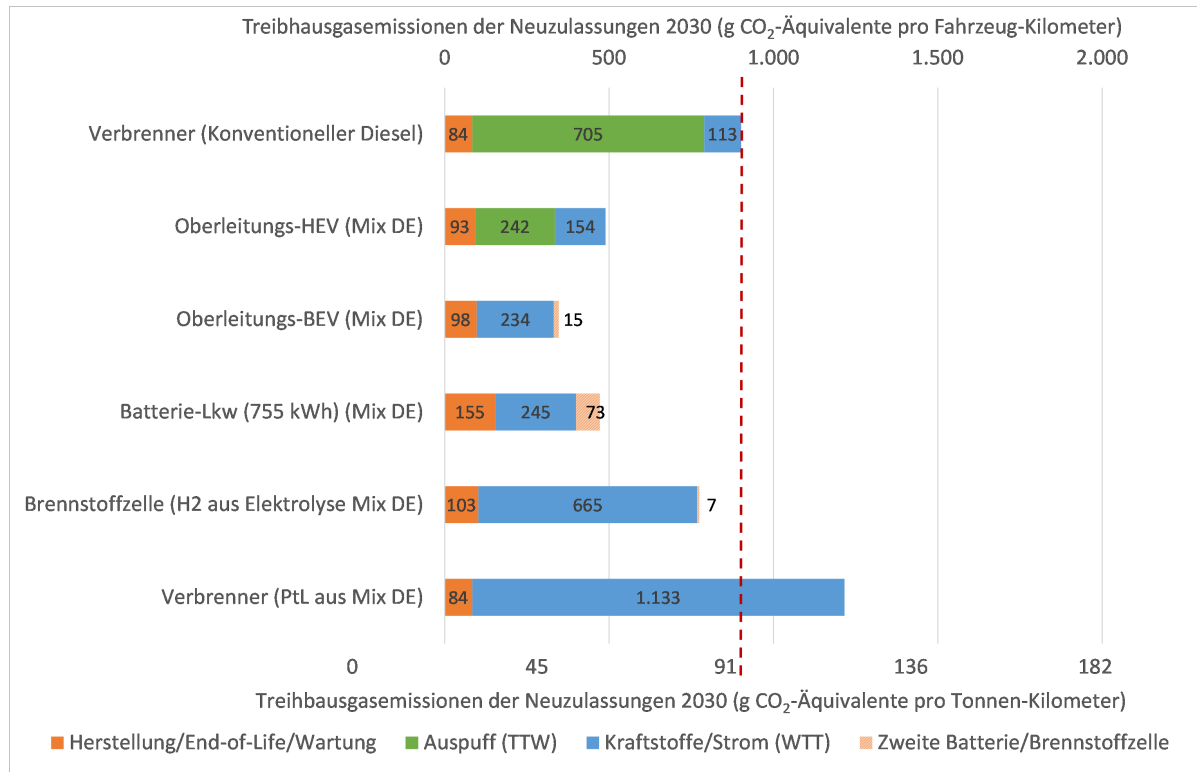


Abbildung 2: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter in Deutschland (800.000 km Laufleistung über 7 Jahre Betriebsdauer, 11 t durchschnittliche Zuladung, Deutscher Strommix). Quelle: Helms 2022

Für einen konkurrenzfähigen Einsatz im Regelbetrieb müssen alle drei Technologien jedoch noch wesentliche Entwicklungsschritte machen. Die jeweilige Einzeltechnologie muss sich dabei an der bisherigen Diesel-Standardtechnologie messen, wird aber voraussichtlich auch von den parallelen Fortschritten der Alternativtechnologien beeinflusst.

Das vorliegende Papier wurde im Rahmen des Projekts BOLD erarbeitet und fokussiert auf den Markthochlauf von O-Lkw und damit verbundene erforderliche Rahmenbedingungen. Ziel dieses Papiers ist es, für den erfolgreichen Markthochlauf von O-Lkw relevante Handlungsfelder zu identifizieren und ausgehend von einer Bestandsaufnahme die notwendigen Handlungsbedarfe aufzuzeigen. Damit soll eine Verbindung zu Erkenntnissen aus den laufenden Erprobungs- und Forschungsprojekten zu O-Lkw hergestellt und ein Beitrag zur weiteren inhaltlichen und zeitlichen Konkretisierung des Fahrplans des BMDV für klimafreundliche Nutzfahrzeuge geleistet werden. Die dargestellten Ergebnisse speisen sich aus eigenen Forschungsergebnissen der Autor:innen, einer Auswertung weiterer Forschungsarbeiten und der direkten Beteiligung von Expertinnen und Experten aus der O-Lkw-Forschung. Diese haben im Rahmen von Interviews und eines Expert:innenpanels im Juni 2022 in vier Arbeitsgruppen entlang der Handlungsfelder den jeweiligen Status Quo und die Zielzustände diskutiert sowie Handlungsbedarfe bzw. -optionen erarbeitet. Ferner wurden die vorläufigen Ergebnisse der Analysen im Rahmen des 3. BOLD-Stakeholder-Dialogs im Dezember 2022 mit etwa 40 Vertreter:innen aus Politik und Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft in Kleingruppen diskutiert und deren Ergänzungen in der vorliegenden Fassung des Arbeitspapiers berücksichtigt.

Im vorliegenden Papier werden Handlungsbedarfe für die Weiterentwicklung und den Markthochlauf der O-Lkw-Technologie diskutiert und Empfehlungen abgeleitet. Diese werden – wo notwendig – auch im Kontext der anderen Antriebs- und Kraftstofftechnologien für schwere Lkw diskutiert.

In der folgenden Diskussion werden bis zu drei als kritisch erachtete Zeitpunkte der Technologie- und Marktentwicklung als Referenzpunkte dienen. Diese leiten sich einerseits aus dem o. g. Fahrplan des BMDV und den darin beinhalteten Zeiträumen für eine Pfadentscheidung der Technologien ab, andererseits aber auch aus dem oben erwähnten klimapolitischen Zeitrahmen für die erforderliche THG-Minderung im Verkehr und damit dem notwendigen Markthochlauf von alternativ angetriebenen Lkw.

Folgende Zeitpunkte werden als Referenzpunkte herangezogen; die Ziele zur Marktdurchdringung beziehen sich immer auf den deutschen Markt:

- **2025:** Die Technologie muss weitgehend ausgereift und standardisiert sein, so dass sie für den beginnenden und notwendigen Markthochlauf von alternativen Lkw zur Verfügung steht. Sollte dies nicht der Fall sein, besteht die Gefahr, dass andere Technologien (selbst bei ggf. geringer technischer Eignung und ggf. höheren gesamtwirtschaftlichen Kosten) angesichts des Dekarbonisierungsdrucks wichtige Marktsegmente „besetzen“. Kann die Technologie bis dahin ihre Marktreife nicht unter Beweis stellen, besteht zudem die Gefahr, dass F&E-Mittel auf andere Antriebstechnologien konzentriert werden, da in diesem Zeitraum möglicherweise mit einer dem Fahrplan des BMDV folgenden „Pfadentscheidung“ zu rechnen ist.
- **2030:** Zu diesem Zeitpunkt muss bereits ein großer Anteil der neuzugelassenen Lkw alternativ betrieben sein und damit deutlich zu einer Minderung der THG-Emissionen beitragen. In den folgenden Jahren müssen die Neuzulassungen in Richtung 100 % alternative Antriebe gehen, um den weiterhin dominierenden konventionellen Lkw-Bestand schnell umzustellen.
- **2035:** In den Folgejahren muss der verbleibende konventionelle Lkw-Bestand weitgehend dekarbonisiert werden und die Infrastruktur für die alternativen Antriebe voll ausgebaut werden. Die eingesetzten Technologien werden nun auch daran gemessen, ob sie einer vollständigen Umstellung gerecht werden können und die dafür notwendige Leistungsfähigkeit aufweisen oder sich mit alternativen Antriebslösungen (z. B. unterschiedliche Optionen der Elektrifizierung) schlüssig ergänzen. Sie müssen dabei auch anspruchsvolle Logistikanwendungen abdecken können.

Im folgenden Kapitel 2 werden die als besonders relevant identifizierten Handlungsfelder diskutiert und darauf aufbauend im Kapitel 3 zentrale Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2 Handlungsfelder

Für die erfolgreiche Weiterentwicklung des O-Lkw-Systems wurden vier Handlungsfelder als besonders zentral identifiziert. Diese werden im Folgenden mit Blick auf ihre Ausgangslage, notwendige Zielzustände und identifizierte Handlungsbedarfe und -option diskutiert. Die adressierten Handlungsfelder untergliedern sich in weitere Unterthemen und lassen sich entlang folgender Hauptfragestellungen strukturieren:

- Technik: Welche technologische Weiterentwicklung von Fahrzeug und Infrastruktur ist erforderlich?
- Markt: Wie entstehen ein Angebot und eine Nachfrage für O-Lkw und die erforderliche Infrastruktur?
- Infrastrukturaufbau: Wie kann die Errichtung der Infrastruktur in der notwendigen Geschwindigkeit gelingen?
- Betrieb: Wie kann ein verlässlicher und attraktiver Betrieb des O-Lkw-Systems erreicht werden?

2.1 Technik: Welche technologische Weiterentwicklung von Fahrzeug und Infrastruktur ist erforderlich?

2.1.1 Verfügbarkeit / Zuverlässigkeit

Bestandsaufnahme

Die Oberleitungsanlage (OLA) weist auf den Teststrecken grundsätzlich eine hohe Verfügbarkeit auf (Feldversuch eHighway-Schleswig-Holstein (FESH): 96,3 % für das Jahr 2020; Feldversuch in Hessen (Projekt ELISA): 98 %), das Technology Readiness Level (TRL, dt.: Technologie-Reifegrad) liegt bei etwa 8. Andere Alternativen zum elektrischen Straßensystem (ERS, Electric road system) mittels Stromschiene oder induktivem Laden haben bislang ein niedrigeres TRL von 6-7 (Widegren et al. 2022).

Bisherige Feldversuche konnten wichtige Erkenntnisse für eine robuste Auslegung zukünftiger OLA liefern. In den deutschen Feldversuchen zeigte sich beispielsweise, dass sich auf den Isolatoren der OLA Streusalzablagerungen bilden können, die Defekte zur Folge haben können. Positive Erfahrungen aus einem schwedischen Feldversuch mit alternativen Isolatoren konnten eine Lösung aufzeigen. Darüber hinaus konnten durch die Feldversuche Anpassungsbedarfe an den Schleifleisten der Pantographen identifiziert werden, um deren gleichmäßigen Verschleiß zu erreichen und so Beschädigungen am Fahrdrat zu verhindern.

Das Management von Störfällen wird in den Feldversuchen projektspezifisch geregelt. In Zusammenarbeit mit lokalen Akteuren wie Feuerwehren wurden entsprechende Prozesse erarbeitet. Eine aktuelle Herausforderung liegt darin, diese Prozesse zu verallgemeinern und zu skalieren. Ein weiterer Forschungsgegenstand ist die Frage, wie die Resilienz der OLA bei Störereignissen z. B. Sturm, Eis, Unfälle, Starkregen, Blow-up, breiter Stromausfall allgemein zu bewerten ist. Ein Fahrzeugbrand unter der Oberleitung auf der A5 hatte sich nicht auf die OLA ausgewirkt. Bei OLA im Bahnverkehr gibt es langjährige Erfahrungen bzgl. der Auswirkungen von Störereignissen, auf die man auch beim Management und der Planung von Oberleitungsinfrastruktur zurückgreifen kann. Zuletzt gab es dort bei Sturmereignissen regelmäßig breite Zugausfälle. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen,

dass bei Bahnanlagen der Abstand zu umstehenden Bäumen in der Regel deutlich geringer ist als bei Autobahnen.

Die aktuell in den Feldversuchen eingesetzten Oberleitungsfahrzeuge sind Hybridfahrzeuge (O-HEV) und derzeit noch Prototypen, ihr TRL liegt bei ~7. In der aktuell dritten Phase des ELISA-Feldversuchs auf der A5 werden auch rein elektrische O-Lkw (O-BEV) zur Anwendung kommen. Diese werden bereits auf Basis des modularen Fahrzeugsystems von Scania umgesetzt und eine größere Seriennähe als die bislang genutzten Prototypen aufweisen.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030
<ul style="list-style-type: none"> • Vertieftes Verständnis von Resilienz von OLA ist gegeben und Prozesse zur deren Stärkung sind initiiert. (z. B. zentrales Störfallmanagement) • Verlässlicher Testeinsatz mit verbesserter Datenerfassung- und Auswertung von Fahrzeugen unterschiedlicher Konfigurationen mit hohen Fahrleistungsanteilen an der Oberleitung auch über längere Strecken umgesetzt. → Ziel: TRL 8-9 • Bewusstsein für und aktive Bearbeitung von Belangen der IT-Sicherheit gegeben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Verschleiß an Fahrdrabt und Schleifleiste bei hohen Verkehrsvolumina durch Optimierung der Komponenten und Materialien realisiert. • Hohe Verfügbarkeit der OLA und schnelle Reaktion auf Störereignisse ist gegeben. • Flexibler Einsatz von O-BEV ist durch ein gut ausgebautes stationäres Lade-netz möglich. • Flächendeckendes Servicenetz für O-Lkw ist vorhanden. • O-Lkw sind in einer breiten Palette an Konfigurationen entsprechend des dann aktuellen Stands der Fahrzeug-technologie verfügbar.

Handlungsbedarfe/-optionen

Aufseiten der Oberleitungs-Infrastruktur besteht kurzfristig die oberste Priorität in der Realisierung von Pilotstrecken mit Längen im Bereich von mindestens 100 Kilometern, um weitere Erfahrungen zu sammeln (Zuverlässigkeit und Wirkungsgrade über längere Strecken, Verschleißeffekte im Dauerbetrieb etc.), Fahrzeuge und Infrastruktur zu optimieren, Technologie sichtbar zu machen (vgl. Abschnitt Marktakzeptanz 2.2.2) und damit eine fundierte Hilfestellung bei der Mitte des Jahrzehnts anstehenden Pfadentscheidung zu bieten. Synergien zwischen den Technologieoptionen sowie auch Hindernisse für die parallele Nutzung verschiedener Technologien sollten dabei gezielt untersucht werden.

Parallel zur Realisierung längerer Pilotstrecken sollte die Entwicklung allgemein anwendbarer Konzepte zum Störfallmanagement vorangetrieben werden. Insbesondere ist ein Konzept für die Luftrettung unter Beteiligung aller relevanten Akteure umzusetzen, um potenzielle Landemöglichkeiten für Rettungshubschrauber entlang elektrifizierter Streckenabschnitte bereits bei der Planung zu identifizieren und festlegen zu können. Durch die Untergliederung längerer Oberleitungsstrecken in wenige Kilometer lange Einzelabschnitte, die separat abgeschaltet werden können, kann der Ausfall von längeren Abschnitten im Falle von lokalen Störereignissen vermieden werden. Durch die zukünftig wahrscheinliche Dominanz von O-BEV lassen sich zudem partielle Ausfälle der OLA auch über den batterieelektrischen Antrieb kompensieren und somit die Resilienz des Gesamtsystems erhöhen.

Nach Evaluation der Innovationskorridore ist eine Entscheidung über die Einführung der Oberleitungstechnologie im großen Maßstab auf deutschen Autobahnen notwendig und politisch gemäß des Gesamtkonzepts klimafreundliche Nutzfahrzeuge des BMDV auch vorgesehen (BMVI 2020). Wie groß der Vorteil einer dynamischen Stromzuführung für Lkw gegenüber einer ausschließlichen Nutzung stationärer Ladeinfrastruktur ist, dürfte zentral von den jeweiligen Wechselwirkungen mit dem Energiesystem (→ realisierbare Energiepreise) sowie von der weiteren Entwicklung der Rohstoffmärkte und Lieferketten abhängen, die sich beispielsweise auf die Batteriepreise auswirken kann. Von den am Prozess begleitenden Stakeholdern wurde der geringere Ressourcenbedarf für Batterien im Falle von O-Lkw als zentraler Vorteil gegenüber batterieelektrischen Lkw bewertet. Hier sollten begleitend zur Evaluation der Innovationskorridore wissenschaftlich fundierte Abschätzungen getroffen werden, um die anstehende politische Pfadentscheidung zu unterstützen. Bei positiver Pfadentscheidung ist dann schnelles und entschiedenes politisches Handeln notwendig: So sollten (noch deutlich vor 2030) Ausbaumaßnahmen über die Innovationskorridore hinaus beschlossen und mit der Umsetzung begonnen werden, damit Planungssicherheit für die Fahrzeughersteller (OEM, Original Equipment Manufacturer) besteht und Infrastrukturunternehmen entsprechende Kapazitäten aufbauen können. Die nächste Ausbaustufe jenseits der Innovationskorridore sollte zudem eine hinreichende Größenordnung haben, um eine große Bandbreite von Einsatzprofilen mit O-Lkw zu ermöglichen und damit eine entsprechende Marktdynamik zu entfalten und damit Transportunternehmen Sicherheit für Investitionen zu geben.

Aufseiten der Fahrzeuge geht es kurzfristig zum einen darum, möglichst viel Praxiserfahrungen mit dem Betrieb an der Oberleitung zu sammeln. Hierzu wäre eine deutlich stärkere Auslastung der Pilotstrecken wünschenswert, unter anderem durch den Einsatz weiterer Fahrzeugkonfigurationen. Dadurch können zum einen die Betriebsabläufe verbessert werden (z. B. Bedingungen für zuverlässiges Anbügeln verbessert werden) und zum anderen das Vertrauen in die Technologie aufseiten der Anwender:innen erhöht werden.

Auch die Fahrzeugtechnik muss weiterentwickelt werden, damit zeitnah anstelle von Prototypen serienreife Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Weiterentwickelte Fahrzeuge können iterativ innerhalb der Feldversuche und ggf. auf weiteren Pilotstrecken getestet werden. Wichtige fahrzeugseitige Entwicklungsziele sollten die Erhöhung der möglichen Ladeleistung über den Pantographen sowie die Reduktion des Verschleißes an der Schnittstelle Pantograph-OLA sein. Zudem wäre es mittelfristig wünschenswert, eine generelle Integrierbarkeit des Pantographenmoduls in elektrische Lkw-Plattformen zu ermöglichen.

2.1.2 Standardisierung / Normung

Bestandsaufnahme

Bei den bisherigen Feldversuchen mit Oberleitungs-Lkw wurden technische Spezifikationen fahrzeugseitig (Stromabnehmer und zugehörige Komponenten) und infrastrukturseitig im Dialog zwischen Auftraggeber, Infrastrukturerrichtenden und PAN-/Fahrzeug-Lieferanten vorgenommen. Das Spannungsniveau betrug dabei nominell 600 V. Auf diese Weise konnten Komponenten und Auslegungsverfahren eingesetzt werden, mit denen aus dem Straßenbahnbereich langjährige Erfahrungen bestehen. Es ist jedoch absehbar, dass dieses Spannungsniveau bei einem höheren Aufkommen von O-Lkw keine sichere, effiziente und kostenoptimale Versorgung aller Fahrzeuge innerhalb eines Versorgungsabschnitts sicherstellen kann, weshalb eine Anhebung des Spannungsniveaus derzeit vorbereitet wird.

Hinsichtlich der Standardisierung sind i. W. zwei verschiedene Schnittstellen von Bedeutung:

- Schnittstelle Pantograph–Oberleitung. Hierfür ist der Prozess festgelegt und bereits weit vorangeschritten:
 - Technical Specification (CLC/TC 9X/WG 27) in Abstimmung, final vsl. Ende 2022
 - Standardisierungsprozess beim Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) ist beauftragt mit Deadline 31.12.2023
- Schnittstelle Pantograph-Basisfahrzeug. Hierfür wird in einem Arbeitskreis der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) derzeit eine Spezifikation erarbeitet (DKE-AK.351.1.13).

Bei all diesen Aktivitäten besteht eine wesentliche Herausforderung darin, etablierte Ansätze aus dem Bereich des Fahrzeugbaus mit der Welt der eisenbahnbezogenen Normen in Einklang zu bringen. Dies betrifft u. a. eine vereinheitlichte Nutzung von Spannungsbegriffen, Grenzwerten und die Ableitung von Schutzanforderungen bzw. -maßnahmen.

Ein weiteres Themenfeld ist die Standardisierung von IT-Systemen zur Abrechnung der Oberleitungsnutzung bzw. des Strombezugs. Dabei bestehen – leider noch losgelöst voneinander – separate Lösungen für dynamisches und stationäres Laden mit jeweils umfassenden Akteursmodellen und Abrechnungssystemen. Diese müssen in einem nächsten Entwicklungsschritt harmonisiert und integriert werden. Ein wichtiger Aspekt, den es bei zukünftigen Entwicklungen zu beachten gilt, ist die IT-Sicherheit.

Das der AFIR zugehörige Normungsmandat macht separate Vorgaben zur Standardisierung der verschiedenen ERS- und BZ-Technologien zu verschiedenen Zielzeitpunkten. Weitere Fragestellungen wie z. B. integrierter Datenaustausch und Abrechnungssysteme sind hierbei noch nicht berücksichtigt.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Anpassungsbedarf zur Integration in den Richtlinien und Standards zum Entwurf, der Ausstattung und dem Bau von Straßen sind identifiziert. • CENELEC-Standard zur Schnittstelle Pantograph-Oberleitung ist erarbeitet (Spannung = 1,2 kV). 	<ul style="list-style-type: none"> • Standard für die Schnittstelle zwischen Pantograph (inklusive der zugehörigen Bauteile) und dem elektrischen Basis-Fahrzeug ist entwickelt. • Angepasste Richtlinien zu Entwurf, Ausstattung und Bau von Straßen liegen vor. • IT-Kommunikationsstandards und -schnittstellen zur Abrechnung von Oberleitungsnutzung und Stromverbrauch sind geklärt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Technische und organisatorische Voraussetzungen für gesteuertes Laden von O-Lkw sind geschaffen.

Handlungsbedarfe/-optionen

Als mit Abstand wichtigstes kurzfristiges Ziel in diesem Bereich wurde von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Expertenpanels als auch aus der Stakeholderbeteiligung die zügige Definition

von europaweiten Standards genannt, die herstellerübergreifende Akzeptanz genießen. Dies betrifft kurzfristig vor allem die Schnittstelle Pantograph-Oberleitung, wo eine zielgerichtete Normungsarbeit mit allen relevanten Stakeholdern als essentiell angesehen wird. Die entsprechenden Prozesse laufen bereits und sollten rasch zum Abschluss gebracht werden.

Zeitlich etwas nachgelagert, aber nicht weniger wichtig ist die herstellerübergreifende Standardisierung der fahrzeugseitigen Integration des Pantographen und der zugehörigen Komponenten. Dies betrifft u. a. auch Mess- und ggf. Steuerungssysteme für die Ladevorgänge. Schnittstellendefinitionen und Anforderungen an den Stromabnehmer und die dazugehörige Peripherie sollten dann allen OEMs bekannt sein und von ihnen implementiert werden können. Ziel sollte es sein, dass OEMs bei überschaubarem Entwicklungsaufwand Lkw mit Stromabnehmer anbieten können. Auch eine entsprechende Nachrüstmöglichkeit von elektrischen Lkw („OL-Readiness“) sollte hinsichtlich ihrer Machbarkeit untersucht werden.

2.1.3 Schnittstellen zu anderen Energieversorgungsinfrastrukturen und Antriebssystemen

Bestandsaufnahme

Bisher wurden im Feldversuch ausschließlich Hybridfahrzeuge (O-HEV) als Prototypen aufgebaut und getestet. Für die kommenden Jahre sind von den OEMs v.a. rein elektrische Lkw angekündigt, in den Feldversuchen sollen teilweise auch O-BEV, basierend auf einer modularen Plattform für elektrische Lkw der Firma Scania eingesetzt werden.

Bezüglich Potentialen zum netzdienlichen oder aus Sicht des Energiesystems optimierten Betrieb von O-Lkw liegen derzeit noch keine Erkenntnisse vor.

Aktuell sind zur großmaßstäbigen Erprobung alternativer Lkw-Antriebe drei technologieübergreifende Innovationskorridore geplant. In ihnen könnte zum einen das Zusammenspiel von Oberleitungsinfrastruktur mit stationärer Ladeinfrastruktur untersucht werden – sowohl fahrzeug- als auch netzseitig. Sie können prinzipiell auch den Rahmen bieten, um die Stromversorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen per Oberleitung zu testen. In solchen Fahrzeugkonzepten könnte die Brennstoffzelle beispielsweise die Rolle eines Range Extenders übernehmen, um gelegentliche Fahrten in entlegene Gebiete oder in Nachbarländer ohne Oberleitung zu ermöglichen.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrungswerte zur sinnvollen Auslegung von O-BEV-Antriebssträngen liegen vor (u. a. Batteriegrößen, Ladeleistungen an OL). • Hersteller können kundenspezifische Fahrzeuge anbieten, z. B. hinsichtlich Batteriegröße. 	<ul style="list-style-type: none"> • Breites Vorhandensein betrieblicher Ladeinfrastruktur erleichtert den Einsatz von O-BEV-Lkw. • Berücksichtigung von Anforderungen des Stromnetzes beim Energiemanagement für O-Lkw führt zu signifikant geringeren Energiekosten. • Koordination von Oberleitungsinfrastruktur und stationärer LIS senkt die Netzan-schlusskosten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konvergenz der Schnittstellen für stationäres und dynamisches Laden, z. B. stationäre Ladung über den Pantographen. • Rolle von ERS in einem vollständig erneuerbaren Energiesystem ist geklärt.
<ul style="list-style-type: none"> • Integration des Pantographenmoduls mit BEV-Fahrzeugarchitekturen. 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Integration des Pantographenmoduls mit FCEV-Fahrzeugarchitekturen. Hauptziele: Effizienzsteigerung, Betriebskostensenkung. 	

Handlungsbedarfe/-optionen

Kurzfristig steht beim Thema Schnittstellen die Optimierung von Betriebsstrategien und das Zusammenspiel zwischen dem Strombezug aus der Oberleitung und aus stationärer Ladeinfrastruktur im Vordergrund. Hier sollte beispielsweise untersucht werden, welche Auswirkungen verschiedene Ladeszenarien auf die Alterung der Traktionsbatterie haben.

Der elektrische Betrieb von Lkw mittels Oberleitung sowie die Nachladung der Batterie während der Fahrt verringert den Flächendruck durch stationäre Lademöglichkeiten entlang von Fernstraßen. Im Stakeholderdialog wurde dieser Aspekt als zentraler Vorteil der O-Lkw-Technologie bewertet. Eine stationäre Lademöglichkeit über den Pantographen birgt darüber hinaus Potential zur Vereinfachung von stationären Ladevorgängen vor allem bei kurzen Standzeiten / hohem Fahrzeugdurchsatz (wie beispielsweise auf Autobahnparkplätzen) und kann gegenüber kabelgebundenem Laden kompaktere Layouts solcher Ladestellen ermöglichen. Um schon bald abschätzen zu können, welche Rolle die stationäre Pantographenladung künftig spielen kann und dies bei anstehenden Infrastrukturentscheidungen berücksichtigen zu können, sollte diese technologische Option prioritär erforscht werden.

Die betriebliche Resilienz und Flexibilität von O-HEV ist in der Einführungsphase höher als die von O-BEV, da auch größere Strecken oberleitungsfrei zurückgelegt werden können. Um Entwicklungsressourcen effizient einzusetzen, sollte geprüft werden, welche Anwendungsperspektiven es längerfristig für O-HEV gibt, auch unter Berücksichtigung der Situation an den Energiemärkten.

Mit zunehmenden Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromsystem gewinnt die Gestaltung des Lastprofils von Verbraucher:innen und ihre Steuerbarkeit für die anwendbaren Strompreise an Bedeutung. Die Anpassungsfähigkeit von Oberleitungsfahrzeugen an das Energiesystem ist daher mittel- bis langfristig ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Technologie. Daher sollten frühzeitig Flexibilitätspotentiale von O-Lkw beim Strombezug untersucht und in Feldversuchen validiert werden, um dies bei der Entwicklung künftiger Betriebsstrategien und Infrastrukturlayouts berücksichtigen zu können. Mit Blick auf den erforderlichen Netzanschluss sollten die Anforderungen durch dynamisches und stationäres Laden frühzeitig gemeinsam analysiert und berücksichtigt werden.

2.2 Markt: Wie entstehen ein Angebot und eine Nachfrage für O-Lkw und die erforderliche Infrastruktur?

2.2.1 Fahrzeuge

Bestandsaufnahme

Der Fahrzeugmarkt für O-Lkw beläuft sich zurzeit auf Prototypen-Modelle von Scania im Übergang von der 2. zur 3. Entwicklungsgeneration (vgl. Abschnitt 2.1.1). Neben den Feldversuchen in Deutschland hat Scania bereits für ein Demonstrationsprojekt in Schweden im Jahr 2016 Hybrid-Lkw mit Stromabnehmern ausgerüstet; auch die Volvo Gruppe stellte für ein Pilotprojekt zu Oberleitungssystemen in Los Angeles im Jahr 2017 eine Sattelzugmaschine mit Pantographen zur Verfügung (Siemens AG et al. 2016).

Fahrzeugseitig muss im Wesentlichen eine Schnittstelle für den Pantographen und die Stromaufnahme im Antriebsstrang geschaffen werden. Für die Fahrzeughersteller sind Anpassungsbedarfe im Vergleich zu der Entwicklung anderer Antriebsoptionen wie Brennstoffzellen-Fahrzeuge weniger aufwendig. Die Basisfahrzeuge elektrischer Lkw werden von allen OEMs bereits in Serie entwickelt. Diese können für den mittelfristigen Einsatz rein elektrischer O-Lkw genutzt werden. Der Pantograph wird derzeit von Siemens in Kompatibilität mit der Oberleitungs-Infrastruktur angeboten. In einer Kooperation mit Continental wird die Serienproduktion des Pantographen vorbereitet.⁶

Wie kritisch die Verfügbarkeit von geeigneten Fahrzeugen in der Pilotphase einer System Einführung ist, zeigten die Feldversuche. Auf allen drei Feldversuchen konnte der Betrieb erst einige Monate nach Fertigstellung der Infrastruktur starten, weil Lkw nicht zeitnah mit der Fertigstellung der Infrastruktur zur Verfügung gestanden hatten.

Bislang existiert kein Wettbewerb für den Pantographen oder oberleitungskompatible Fahrzeuge. Unklar ist, ob durch den Aufbau von Oberleitungs-Korridoren oder -Teilnetzen weitere Hersteller- und Zuliefererunternehmen aktiviert werden können. Entscheidend dafür werden auch die Entwicklungen bei BEV und FCEV sein. In laufenden Forschungsprojekten (u. a. Projekte LiVE und LiVePLuS) im Rahmen des Förderprogramms „erneuerbar mobil“ des BMWK wird aktuell die Kompatibilität von E-Lkw etablierter Hersteller mit der Oberleitung geprüft und Zuliefererunternehmen sind an der Weiterentwicklung der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Oberleitung beteiligt (Projekt ELONSO).⁷

⁶ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elonso>

⁷ <https://www.erneuerbar-mobil.de/>

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Prototypen oder Vorserienmodelle mehrerer Hersteller verfügbar und auf längeren Teststrecken erprobt. • Zur Kompensation von geringer Verfügbarkeit der O-Infrastruktur neben O-BEV ggf. O-HEV weiterhin verfügbar. • Öffnung des Marktes für Pantographen für weitere Zuliefererfirmen durch Standardisierung der Schnittstelle zu Infrastruktur und Fahrzeug. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Technik ist serien-tauglich verfügbar. • Der Pantograph kann als standardisiertes Modul, ohne größere Anpassungen, in bestehende Modellreihen integriert werden. • Herstellerfirmen bieten ihre Neufahrzeuge als Oberleitungs-kompatibel an (OL-Readiness). • Idealerweise kann der Pantograph auch an Bestandsfahrzeugen (BEV) nachgerüstet werden • Die Erschließung internationaler Märkte und Einsatzmöglichkeiten stärkt den Wettbewerb und stellt weitere Technologieentwicklungen und Skalierungsmöglichkeiten sicher. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel ist ein internationaler, wettbewerbsfähiger Markt mit einem breiten Angebot an Oberleitungsfahrzeugen und Pantographen-Technik. • Die benötigten Skaleneffekte für einen Hochlauf rein elektrischer Antriebe im Schwerlastverkehr bis zum Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 können sichergestellt werden.

Handlungsbedarfe/-optionen

Ein breites und zuverlässiges Fahrzeugangebot ist kritisch für den Markthochlauf. Oberstes Ziel in der Pilotphase muss es demzufolge sein, weitere Fahrzeughersteller und Systemausrüster für die Technologie zu interessieren, um einen Wettbewerb herzustellen. Beispielsweise fördert eine Öffnung der angekündigten Innovationskorridore für „projektfremde“ Fahrzeuge den Wettbewerb. Zusätzlich kann ein Anreiz für Systemhersteller, in die Pantographen-Entwicklung einzusteigen, über entsprechende Förderaufrufe⁸ gesetzt werden.

Voraussetzung für eine in Teilen parallele Entwicklung von Pantographen- und Fahrzeugtechnologien ist die Standardisierung des Pantographen bzw. der Schnittstellen zu Infrastruktur und Fahrzeug auf EU-Ebene (vgl. Abschnitt 2.1.2). Zudem ist mit Blick auf den Wettbewerb die patentrechtliche Lage zu beachten, da wesentliche Bestandteile des O-Lkw-Systems im Idealfall anbieterunabhängig ohne Zahlung von Lizenzgebühren implementierbar sein sollten.

Ein breites Angebot an OL-kompatiblen Fahrzeugen (z. B. verschiedene Batteriegrößen, Fahrzeugkonfigurationen) sollte über ein Marktanreizprogramm sichergestellt werden. Aufgrund der hohen Synergien zwischen BEV und O-Lkw empfiehlt es sich, die Entwicklung von O-BEV prioritär anzureizen. Der zeitliche Handlungsdruck der Klimakrise erfordert zudem eine rasche Skalierbarkeit der Technologie, sobald die politischen Weichen gestellt sind. Deutschland sollte seine proaktive Rolle

⁸ Gemäß den Förderrichtlinien im Förderprogramm "Erneuerbar mobil" des BMWK können entsprechende Skizzen eingereicht werden.

weiter ausbauen, um weitere Länder sowie internationale Wettbewerber:innen für die OL-Technologie zu interessieren. Im Rahmen des Stakeholderdialogs wurde ebenfalls auf die Bedeutung der verlässlichen politischen Rahmensetzung und Richtungsentscheidung auf nationaler wie auch europäischer Ebene mit Blick auf die OL-Technologie hingewiesen. Sie wird als wichtige Grundlage bewertet, um die Bereitschaft von Herstellern zu signifikanten Investitionen in die Technologie sicherzustellen und einen Fahrzeugmarkt anzureizen.

2.2.2 Marktakzeptanz Fahrzeuge

Bestandsaufnahme

Die Marktakzeptanz ist auf der Angebots- und Nachfrageseite unterschiedlich ausgeprägt und lässt sich durch eine genauere Betrachtung der Fahrzeughersteller sowie der Nutzer:innen bestimmen. Auch Infrastrukturbereitsteller sind für die Marktakzeptanz relevant, hier liegen jedoch bis auf die Bereitschaft des Herstellers Siemens aktuell keine weiteren Erkenntnisse vor. Fahrzeughersteller lassen sich in die Gruppe der an Feldversuchen beteiligten sowie der nichtbeteiligten Firmen aufteilen. Die beteiligten Firmen sehen Oberleitungs-Lkw als eine Option im Technologiemix für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs an. Der strategische Fokus dieser Firmen liegt aber hauptsächlich auf batterie-elektrischen Lösungen mit stationärem Laden. Aktuell nicht beteiligte Firmen sehen Oberleitungs-Lkw sehr kritisch. Einige Firmen nehmen eine neutrale Position ein, während andere Oberleitungs-Lkw nicht als realistische Lösung betrachten. Der Fokus dieser Firmen liegt auch auf elektrischen Lösungen im Allgemeinen, mit unterschiedlichen Gewichten auf batterie-elektrisch betriebenen und brennstoffzellen-basierten Lastwagen. Relevante Investitionen, die in diesen Bereichen bereits getätigt wurden, erklären womöglich die Skepsis mehrerer Hersteller gegenüber einer (vermeintlich) konkurrierenden Technologie wie dem OL-System. Als wichtige Kriterien zur Bewertung der Oberleitungs-Lkw im Vergleich mit den Alternativen werden auf der positiven Seite die Effizienz, kleinere Batterien und damit geringere Fahrzeuggewichte sowie das Entfallen von Ladepausen angeführt. Als einschränkend bewertet wird die Routen-Flexibilität der Fahrzeuge auch im grenzübergreifenden Einsatz, Herausforderungen beim Infrastrukturaufbau und der Standardisierung sowie öffentliche Akzeptanz und Ästhetik. Bei den nicht beteiligten Firmen zeigt sich außerdem, dass die unternehmerische Suche und Abwägung der Technologie Oberleitungs-Lkw und die damit verbundenen strategischen Entscheidungen unter den aktuell erhältlichen Informationen bereits getroffen wurden. Dies führt bei einzelnen Akteuren dazu, dass neuere Entwicklungen, wie beispielsweise hin zu rein elektrisch anstatt hybrid betriebenen Oberleitungs-Lkw und die Einbeziehung der Oberleitungs-Lkw in Kaufpreisförderungen, nicht bekannt sind.

Bei den Speditionen zeigen sich zwischen an den Feldversuchen beteiligten und nicht beteiligten Unternehmen sowohl Unterschiede als auch Gemeinsamkeiten. Bereits an Versuchen mit Oberleitungs-Lkw beteiligte Speditionen zeigen eine hohe Akzeptanz und Eigeninitiative bei der Erprobung der Technologie. Als wichtigste Voraussetzung für eine positive Bewertung der Technologie nennen die Speditionen die Befriedigung ihrer Kundenbedürfnisse und die damit verbundene Verlässlichkeit der Technologie. Aus Sicht eines Logistikverbands sind bisher nicht an Feldversuchen beteiligte Logistikfirmen allgemein offen dafür, neue Optionen auszuprobieren. Allerdings seien vor allem die Kosten entscheidend und auch die Anforderungen und Bedürfnisse der Kunden. Noch im Jahr 2019 wurden im Bereich der alternativen Antriebe von den Verbandsmitgliedern vor allem Gasantriebe genutzt, gefolgt von batterieelektrischen Lkw. Die Meinung zu Oberleitungs-Lkw sei gemischt und viele Logistikfirmen warteten auf die Ergebnisse der Feldversuche. Hersteller beobachteten im Bereich der Logistikfirmen vor allem Unsicherheiten und Überforderung angesichts der vielen möglichen alternativen Antriebsoptionen. Es sei hier schwierig für Speditionen, sich zu entscheiden. Auch sie

nehmen Speditionen als generell technologieoffen wahr, sofern die Kosten stimmen. Daher wird die gesetzliche Förderung bei der Fahrzeuganschaffung als zentraler Punkt angesehen, der vor dem Hintergrund einer längerfristig verlässlichen Förderkulisse geschieht.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Das Vertrauen in die Technologie ist gestärkt und die Investitionsbereitschaft von Herstellern und Speditionen wächst. • Hersteller sehen Sicherheit für ihre Investitionen in die O-Lkw Technologie auch gegenüber ERS-Alternativen und anderen alternativen Antrieben. • Das bezieht auch eine notwendige Klarheit beispielsweise bezüglich der patentrechtlichen Lage, der Standardisierung und der Einsetzbarkeit (d.h. auch den perspektivischen Absatzchancen im In- und Ausland) mit ein. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehr Hersteller sind von der Technologie überzeugt und Fahrzeuge mit Pantographen sind damit rechtzeitig zu einem potenziellen größeren Aufbau von Infrastruktur verfügbar. • Eine Konkurrenz auf dem Markt sorgt dafür, dass die Technologie immer weiter verbessert und kostengünstiger wird. 	<ul style="list-style-type: none"> • Speditionen und deren Kunden sind vom Potenzial in der Nutzung überzeugt und fragen die Fahrzeuge nach, um sie unter der Oberleitungs-Infrastruktur zu nutzen. • Die Vorteile der Technologie im Vergleich zu anderen alternativen Antrieben, vor allem im Vergleich zum batterieelektrischen Fahren mit stationärem Laden, sind klar erkennbar.

Handlungsbedarfe/-optionen

Handlungsbedarfe für das Thema Akzeptanz weisen große Schnittstellen zu anderen Unterthemen auf, da die Wahrnehmung der Akteure viele verschiedene Dimensionen rund um die Technologie umspannt. Über die Fahrzeuge hinaus betrifft dies vor allem die Infrastruktur und das Verhältnis zu anderen alternativen Antrieben.

Damit Hersteller Oberleitungs-Lkw anbieten, muss eine klare Perspektive hinsichtlich des Infrastrukturaufbaus gegeben sein. Der Gesetzgeber und/oder am Ausbau beteiligte Firmen müssen diese Perspektive rechtzeitig schaffen. Das Verhältnis von stationärem zu dynamischem Laden muss geklärt werden und es sollte eine Option sein, Ladeanschlüsse am Fahrzeug mit zu definieren bzw. vorzuschreiben, um eine Flexibilität bzgl. der nutzbaren Ladeinfrastruktur zu erreichen. Um eine neue Suche nach Informationen bei Fahrzeugherstellern anzuregen und O-Lkw damit eine Integration in die Innovationsstrategien zu ermöglichen, muss insgesamt eine starke Veränderung der Sachlage wahrgenommen werden. Mehr Austausch und Wissenstransfer zwischen projektbeteiligten und nicht beteiligten Akteuren können diesen Prozess unterstützen. Eine verbesserte Informationspolitik, die sich an den Kommunikationsstrategien der Alternativtechnologien orientiert, sollte angestrebt werden.

Um Vertrauen in die Nutzung der Technologie bei den Speditionen aufzubauen, ist der erfolgreiche Abschluss der Feldversuche wichtig. Die Demonstration auf längeren Pilotstrecken in den nächsten Jahren kann zusätzlich zeigen, dass die Technologie Alltagseinsätze im Fernverkehr auch mit einer großen Anzahl von Lastwagen abdecken kann. Die Förderung und die Rahmenbedingungen müssen so ausgestaltet sein, dass Oberleitungs-Lkw kostenseitig mit anderen Alternativen konkurrieren

können und Fehlanreize vermieden werden. Dies betrifft sowohl die Anschaffung des Fahrzeugs, das von einem oder mehreren Herstellern verfügbar sein muss, sowie die Energiekosten, die während des Ladens auf der Strecke anfallen. Hierfür sind eine längerfristig verlässliche Förderkulisse und eine Richtungssicherheit mit Blick auf politische Entscheidungen für die Anwender:innen zentral.

Außerdem muss ein flächendeckender Service für Fahrzeuge mit Pantographen vorhanden sein. Für viele Speditionen muss außerdem die Anschlussfähigkeit in andere Länder zukünftig sichergestellt werden.

2.2.3 Infrastruktur

Bestandsaufnahme

Die höchste technische Reife für Konzepte zum dynamischen Laden weist das eHighway-System von Siemens auf. In drei Feldversuchen in Deutschland und einem Feldversuch in Schweden wurde das System im realen Straßenbetrieb erprobt und gilt als marktreif. Andere Unternehmen mit Vorerfahrungen mit Oberleitungssystemen für Schienen- und Busverkehre können vergleichbare technische Lösungen anbieten. Bislang beschränkt sich das Angebot an Infrastruktur für O-Lkw allerdings auf Siemens.

Aktuell stehen nur wenige Kilometer Oberleitungs-Infrastruktur mit dezidiertem Fahrzeugzuordnung zur Verfügung. In den nächsten Jahren sollen im Rahmen von so genannten „Innovationsclustern“⁹ zwei weitere längere Oberleitungsstrecken in Hessen/BaWü und Bayern entstehen. Der Aufbau der Infrastruktur erfolgt durch Bauunternehmen aus dem Schienenbereich. Entsprechend kann ein Wettbewerb rund um die Infrastrukturerichtung erwartet werden, der mit Ausbauprojekten im Schienenverkehr konkurrieren könnte. Zudem sollen im Rahmen der Erweiterung der ELISA-Teststrecke¹⁰ Hinweispapiere für den Bau des Oberleitungssystems entstehen, um den Wettbewerb zu fördern.

Zuständig für die Planung und den Betrieb der für die Feldversuche errichteten OL-Infrastruktur ist die staatliche Autobahn GmbH. Die Zuständigkeit für den Betrieb eines permanenten OL-Netzes hängt von der rechtlichen Zuordnung der OL zur Straße oder zum Stromnetz ab. Mit dieser Fragestellung und möglichen Interaktionen der relevanten Akteure beschäftigt sich das Projekt „AMELIE“¹¹. Nach aktuellem Vorschlag empfiehlt sich eine Zuordnung zur Straße, woraus sich weiterhin eine Zuständigkeit der Autobahn GmbH als übergeordneter Betreiber der OL-Infrastruktur ergibt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Darüber hinaus wird ein Akteursmodell vorgeschlagen, welches zur Förderung des Wettbewerbs privatwirtschaftliche Mobilitätsanbieter und Stromlieferanten in die Strombereitstellung einbezieht (Knezevic et al. 2022).

International zeichnet sich ein zunehmendes Interesse an ERS-Technologien ab. Neben der Oberleitungs-Technologie werden international auch konduktive, bodengebundene Systeme oder mit längerfristiger Perspektive induktive Ladesysteme diskutiert. Interesse an ERS-Technologien besteht bislang in Schweden, Frankreich, den Niederlanden, Belgien/Flandern, Österreich, Dänemark, Italien, Ungarn und Großbritannien. Durch zum Teil unterschiedliche Technologie-Präferenzen ist ein Wettbewerb zwischen den ERS-Technologien zu erwarten, auch wenn die Oberleitungstechnologie aktuell die höchste Technologiereife (vgl. Abschnitt 2.1.1) aufweist (Widegren et al. 2022). Die Vielfalt

⁹ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/104-scheuer-innovationscluster-strassennutzverkehr.html>

¹⁰ <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elisa-ii-b>

¹¹ <https://www.ikem.de/projekt/amelie/>

an diskutierten Systemen und die verbleibende Unsicherheit über EU-weit implementierbare Lösungen werden von den beteiligten Stakeholdern als zentrale Herausforderungen für den Markthochlauf gesehen.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Der Markt wird über einen offenen Wettbewerb um die Planung und Errichtung der OL-Infrastruktur in den Innovationsclustern aktiviert. • Die Pfadentscheidung für O-Lkw fällt positiv aus und wird von einer Ausschreibung konkreter Strecken begleitet. • Die rechtlichen Fragen zum Betrieb der OL-Infrastruktur werden geklärt. • Die Standardisierung der Infrastruktur ermöglicht einen breiteren (internationalen) Wettbewerb um die Entwicklung der Oberleitungs-Technologie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Im In- und Ausland steht ausreichend OL-Infrastruktur zur Verfügung, um Nachfrage seitens der Transportbranche zu erzeugen, die wiederum Nachfrage bei Fahrzeugen und Infrastruktur generiert. • Für die Errichtung und Instandhaltung der OL-Infrastruktur konnten Kompetenzen bei diversen Bauunternehmen aufgebaut werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zielbild ist ein internationaler Markt für den Aufbau und die Instandhaltung von OL-Infrastruktur auf Autobahnen.

Handlungsbedarfe/-optionen

Wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung von Märkten für die Entwicklung, den Bau und ggf. den Betrieb von OL-Infrastruktur ist eine klare Zielsetzung und Bekenntnisse der Bundesregierung. Im Falle einer positiven Pfadentscheidung zugunsten eines Aufbaus von OL-Infrastruktur sollte möglichst frühzeitig ein konkreter Fahrplan formuliert werden, wann welche Strecken elektrifiziert werden und wann die Ausschreibung erfolgt, um Planungssicherheit für die relevanten Akteure zu schaffen. Der Infrastrukturaufbau sollte dem Fahrzeugabsatz zeitlich vorauslaufen, um vermeintlichen Henne-Ei-Problematiken zu begegnen.

Für die Entwicklung von möglichen Geschäftsmodellen bei privatwirtschaftlichen Akteuren sind darüber hinaus die rechtlichen Grundlagen rund um den Aufbau und den Betrieb des Oberleitungssystems zu schaffen. Auf EU-Ebene sollten die laufenden Standardisierungsprozesse zügig fortgesetzt werden, um für internationale Wettbewerber:innen Klarheit über die technischen Anforderungen zu schaffen. Die Wechselwirkungen von OL-Infrastruktur und stationärer Ladeinfrastruktur sollten näher untersucht und bei Infrastrukturentscheidungen berücksichtigt werden. Richtungsentscheidungen in mehreren für den europäischen Güterverkehr strategisch wichtigen Ländern erhöhen den Absatzmarkt und Sicherheit für Investitionen. Deutschland sollte die Initiative für einen internationalen Austausch ergreifen, um Bündnisse zum OL-Aufbau mit weiteren EU-Partnerländern zu erzielen.

2.3 Infrastrukturaufbau: Wie kann die Errichtung der Infrastruktur in der notwendigen Geschwindigkeit gelingen?

2.3.1 Lokale Akzeptanz

Bestandsaufnahme

In den Feldversuchen wurden Analysen zur Akzeptanz von Anwohnenden und der betroffenen Bevölkerung vor Ort durchgeführt. Forschungsergebnisse aus eWayBW.¹² (vor dem Bau der Anlage) zeigen, dass viele den Bau der Infrastruktur kritisch sehen, da Auswirkungen auf den Verkehr vermutet werden. Weitere genannte Vorbehalte beziehen sich auf einen als zu gering wahrgenommenen Einbezug der lokalen Bevölkerung vor Ort, mangelnde politische Legitimation, befürchtete lokale Umweltschäden sowie auf die Kosten des Projekts (Burghard und Scherrer 2020). Auch in FESH wird ein mangelnder Einbezug und Information der lokal Betroffenen negativ angemerkt. Zudem wird in den Befragungen in diesem Projekt häufig berichtet, dass wenig O-Lkw auf der Strecke zu sehen sind, d.h. die Sichtbarkeit der Technologie wird kritisch eingeschätzt. Auch die optischen Auswirkungen spielen eine Rolle, d.h. einige merken an, dass sie die Masten stören (Kryl und Trimpop 2021).

Im Projekt ELISA wurden Untersuchungen mit Verkehrsteilnehmer:innen durchgeführt. Die Messung des Fahrverhaltens vor und nach dem Bau der Infrastruktur zeigt, dass kein Unterschied im Fahrverhalten bei Pkw-Fahrer:innen feststellbar ist. Dabei gilt es, die bisher geringe Zahl an O-Lkw auf der Strecke zu berücksichtigen. Eine Befragung von Verkehrsteilnehmer:innen in Deutschland zeigt zudem, dass die eHighway-Infrastruktur bei einigen Fahrer:innen Befürchtungen hervorruft (Bsp. Lesbarkeit Schilder, Beeinträchtigung Rettungseinsätze). Insbesondere trifft dies für Befragte aus Regionen zu, die nicht mit der Technologie vertraut sind. Dennoch erfolgt laut Aussage der Befragungsteilnehmer:innen keine Anpassung des Fahrverhaltens. Knapp 50 % der Befragten äußern keine Befürchtungen durch das Oberleitungssystem (Schöpp und Wauri 2021).

¹² <https://ewaybw.de/de/ewaybw/>

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030
<ul style="list-style-type: none"> • Die Sichtbarkeit der Technologie ist gegeben, d.h. für Anwohnende und Verkehrsteilnehmer:innen von Projekten und Testversuchen sind O-Lkw auf den Strecken beobachtbar. • Damit ist auch erkennbar, dass die Technologie funktioniert. • Anwohnende und Verkehrsteilnehmer:innen wissen, welche lokalen Vorteile die O-Lkw-Technologie hat und dass die Errichtung von Oberleitungsinfrastruktur an Straßen (sowie der Betrieb) kaum lokale Umweltauswirkungen mit sich bringt. • Zudem ist ihnen bekannt, dass der Verkehr durch die Errichtung der Infrastruktur kaum oder gar nicht beeinträchtigt wird. • Verkehrsteilnehmer:innen von Projekten und Testversuchen haben keine Sicherheitsbedenken gegenüber der Technologie. • Auch weitere Akteure, die von Projekten lokal (tatsächlich oder zukünftig) betroffen sind, wie bspw. Feuerwehren oder Straßenbetriebsdienste, sind (bereits) mit dem System vertraut. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale Akzeptanz bzw. kein (massiver) Widerstand vor Ort ist gegeben. • Die Sichtbarkeit der Technologie ist hoch, d.h. viele Verkehrsteilnehmer:innen kennen O-Lkw und -Infrastruktur und haben keine (Sicherheits-)Bedenken bei der Nutzung der elektrifizierten Streckenabschnitte.

Handlungsbedarfe/-optionen

Bei der Auswahl der zu elektrifizierenden Strecken sollten Fragen lokaler Akzeptanz (Bsp. visuelle Auswirkungen, Präsenz Industrie vor Ort etc.) möglichst frühzeitig berücksichtigt werden. Des Weiteren gilt es hier, auch den Abstand zu Siedlungen zu berücksichtigen, denn die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass eine große Nähe zu Siedlungen die lokale Akzeptanz negativ beeinträchtigen kann. Zudem sollten auch weiterhin lokale Umweltauswirkungen bei der Streckenauswahl (Bsp. visuelle Auswirkungen, Auswirkungen auf Flora und Fauna, Lärm etc.) berücksichtigt werden. (Dies ist bei größeren und dauerhaften Infrastrukturprojekten ohnehin gesetzlich vorgeschrieben.) Im Stakeholderdialog wurde die Befürchtung geäußert, dass die negative Resonanz vor Ort die politische Entscheidung für das OL-System erschweren könnte.

Im Betrieb sollte die Sichtbarkeit der Lkw auf den Strecken sichergestellt werden. Das bedeutet, zur Förderung von Akzeptanz sollten auch häufigere Demonstrationsfahrten durchgeführt werden, denn insbesondere Anwohnenden ist es wichtig, die Technologie erleben und beobachten zu können. Auch die Auslastung der Infrastruktur und damit eine (potenzielle) Wirtschaftlichkeit ist damit erfahrbar für die lokal Betroffenen.

Daneben gibt es Handlungsbedarf bei den Themen Kommunikation und Bildung. In den Feldversuchen hat sich gezeigt, dass lokal Betroffene mehr Information wünschen - nicht nur zu Beginn der Projekte, sondern auch fortlaufend besteht ein hoher Informationsbedarf. Hier ist es wichtig, nicht nur über das Projekt selbst und den Status Quo zu berichten, sondern auch über das System

Oberleitungs-Lkw und -Infrastruktur zu informieren. So sollte hier stärker über die (lokalen) Vorteile und Potentiale von Oberleitungs-Lkw (z. B. Minderung von Lärm- und Luftschadstoffemissionen) berichtet werden und klarer herausgestellt werden, was der Charakter und Zweck von Demonstrationsprojekten ist. Gleichzeitig sollte auch klarer werden, was die übergreifende Strategie zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs der Bundesregierung ist.

Auch die Kommunalpolitik sollte mehr mit einbezogen werden und hier bspw. Info-Abende angeboten werden. Insgesamt gilt es, alle Personen zu adressieren, die in der Nähe der Anlage wohnen, arbeiten und fahren.

Bei den weiteren lokal relevanten Akteuren (Bsp. Rettungsdienste, Feuerwehren, Straßenbetriebsdienste) sollte das Wissen über die eHighway-Technologie bereits in die Ausbildung integriert werden.

Auch im Stakeholderdialog wurde die Intensivierung und Verbesserung der Kommunikation zur OL-Technologie in Richtung unterschiedlichster Stakeholder als Bedingung für die erfolgreiche Umsetzung benannt.

2.3.2 Planung, Genehmigung und Finanzierung

Bestandsaufnahme

Die bestehenden Oberleitungsanlagen in den Feldversuchen wurden alle befristet genehmigt, um - im Sinne einer möglichst zügigen Technikerprobung - ein Planfeststellungsverfahren in der Planungsphase zu vermeiden. Dieses Vorgehen bedeutet eine deutliche Vereinfachung und Beschleunigung des Prozesses für einen zeitlich befristeten Betrieb. Mit der Befristung einher geht jedoch auch, dass auf den aktuell bestehenden Anlagen keine kommerzielle Nutzung der Oberleitung möglich ist (Hartwig 2021, Knezevic et al. 2021).

Nach aktueller Expert:innen-Einschätzung gilt jedoch die Oberleitungsanlage als Teil der Straßeninfrastruktur (Hartwig 2020). Folgt man dieser Argumentation, sollte sie dementsprechend über die Wegekostenrichtlinie (1999/62/EG) im Rahmen der Lkw-Maut finanziert und betrieben werden. Derzeit sind unterschiedliche Finanzierungs- und Betreibermodelle in Diskussion. Beispielsweise könnte als Betreiber der Bund selbst, die Autobahn GmbH oder auch ein Privatunternehmen infrage kommen, auch ÖPP-Modelle (Öffentlich-Private-Partnerschaft) wären denkbar (Jöhrens et al. 2020).

Auf EU-Ebene sind Electric Road Systems (ERS), die neben den Oberleitungsoptionen auch in die Straße eingelassene Stromschienen oder induktive Anlagen umfassen, im Anhang der gerade in Überarbeitung befindlichen Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR; Nachfolger der Richtlinie AFID) genannt. In der TEN-T (Trans-European Transport Network)-Regulierung und der Eurovignette Richtlinie sind ERS bislang nicht genannt. Eine Überarbeitung beider Dokumente steht jedoch an (Widegren et al. 2022, Jöhrens et al. 2020, Hartwig 2021).

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Status von Oberleitungsanlagen sollte in der StVO geklärt, Bau- und Energiewirtschaftsrecht klar vereinfacht werden, um ein einfaches standardisiertes Verfahren zu gewährleisten. • Prozess zur Integration von ERS in die Europäische Gesetzgebung sollte angestoßen werden (explizite Nennung in TEN-T-Regulierung, Eurovignette-Richtlinie und AFIR). • Ein nationaler Aufbau von größeren Streckenabschnitten mit Oberleitung ist notwendiger nächster Schritt für die Technologie, ggfs. auch mit Anbindungen an benachbarte Länder und internationalen Piloten (Jöhrens et al. 2020). • Aufgrund zahlreicher großer Bauvorhaben im Rahmen der Energiewende (z. B. EE- und Netzausbau) aber auch Modernisierung von Straßen und Brückenanlagen, ist unbedingt auch an eine Planung und ein Aufbau von personellen Kapazitäten und Kompetenzen wichtig. • Bis 2025 sollte das Finanzierungs- und Betreibermodell definiert und technisch und organisatorisch vorbereitet werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bis zum Ende des Jahrzehnts sollte ERS in der europäischen Gesetzgebung fest verankert sein. Auch Mindestausbauziele auf europäischer Ebene (AFIR) und gemeinsame rechtliche Standards müssen verabschiedet sein. • Das deutsche Recht muss hinsichtlich Baugenehmigungsverfahren und Energiewirtschaftsrecht klar vereinfacht sein, um den Ausbau nicht verzögern, aber trotzdem Rechtssicherheit zu schaffen. • In diesem Zug sollte der Infrastrukturbetreiber auch die Abrechnung der Nutzung von Oberleitungsanlagen übernehmen. • Bis 2030 ist das Finanzierungs- und Betreibermodell praktisch umzusetzen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ab dem Jahr 2030 sollte sich der Staat aus der Koordinationsrolle der ersten Streckenabschnitte zurückziehen und diese in den kommerziellen Betrieb, z. B. auch was Abrechnung und Betrieb angeht, übergeben. Ein sukzessiver Rückzug aus weiteren Abschnitten sollte nach Bedarf erfolgen.

Handlungsbedarfe/-optionen

Die Einbindung in die europäische Gesetzgebung sollte vorangetrieben werden. Eine Verankerung in der „Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (AFIR) bei der nächsten Revision im Jahr 2024 mit Vorgaben für den Infrastrukturaufbau ist für den europäischen Ausbau des O-Lkw-Systems eine zentrale Voraussetzung.

Generell ist ein einfaches Genehmigungsverfahren wichtig, um den Oberleitungsausbau zu beschleunigen, wie auch die frühzeitige Planung eines Infrastrukturaufbaus und der Aufbau von personellen Kapazitäten für ebendiesen. Für diese Aufgaben ist eine aktive Koordinationsstelle auf Bundesebene von Nöten, die Gremien zur Abstimmung von strategischen Konzepten einberuft, aber auch die mittel- und langfristige Planung koordiniert. Diese könnte als Teil der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur angelegt werden, sich aber vornehmlich um den Oberleitungsinfrastrukturaufbau kümmern. Auch wäre die Verfolgung des Nutzfahrzeugkonzepts des BMDV und die Berücksichtigung der Konkurrenztechnologieentwicklung hiermit gewährleistet (Jöhrens et al. 2020). Die wissenschaftliche Beratung sollte sich mittelfristig auf Detailfragen konzentrieren, die in Studien, Policy Papers, Handlungsempfehlungen als Basis für politische Entscheidungsfindung dienen.

In Projekten sollten die letzten verbliebenen Unsicherheiten zu Finanzierungsmodellen geklärt werden, um auf dieser Basis eine Entscheidung über das weiter zu verfolgende Modell zu treffen. Dieses muss in den folgenden Jahren weiter ausdefiniert und vor allem auf die Lkw-Maut abgestimmt werden (Jöhrens et al. 2020).

Im Rahmen des Stakeholderdialogs wurde auf die Personalengpässe in der Verwaltung und beim Infrastrukturaufbau – insbesondere mit der direkten Konkurrenz um Fachkräfte mit dem Schienenverkehr – hingewiesen. Ein frühzeitiger Einstieg in die Planung und die Vereinfachung von Planungsprozessen sind vor diesem Hintergrund zentrale Erfolgsfaktoren für eine zeitnahe Umsetzung. Nur wenn klare Richtungsentscheidungen und eine Konkretisierung von Ausbauplänen erfolgen, ist eine ausreichende Gewinnung von Fachkräften wahrscheinlich.

2.3.3 Netzintegration

Bestandsaufnahme

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Nachfrage von Oberleitungs-Lkw weder mengenmäßig noch regional oder zeitlich verteilt in der Netzausbauplanung berücksichtigt. Dies gilt auch nur in begrenztem Umfang für andere alternative Antriebe (Elsland et al. 2016); auch die Kapazitäten für Lademöglichkeiten an Rastplätzen werden mittelfristig beschränkt sein. Die nachgefragte Energiemenge bis 2025 wird überschaubar bleiben, danach ist sie aber zwingend einzuplanen, um zukünftige Netzengpässe zu vermeiden (Tersteegen et al. 2021).

Derzeit ist der Strom in den Feldversuchen über die Betreiber der Anlagen finanziert, da eine fahrzeugscharfe Abrechnung auch eine eichrechtskonforme Messung der Energiemenge notwendig macht. Diese kann im aktuellen Testbetrieb noch nicht gewährleistet werden.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristig sollte ein Ausbauplan mit einer Streckenfestlegung entstehen, auf dem basierend Netzertüchtigungen erfolgen können. • Große zukünftige Energiebedarfe sollten in der Netzausbauplanung berücksichtigt werden; nach Möglichkeit technologieunabhängig. 	<ul style="list-style-type: none"> • Standardlastprofile sind definiert und stehen den Netzbetreibern als Planungsgröße für die Netzauslegung/-anbindung zur Verfügung. • Nach der Pfadentscheidung sollte das Zusammenspiel zwischen dynamischem und statischem Laden noch besser untersucht und der Netzausbauplan ggf. angepasst werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Versorgung des Oberleitungs-Zielnetzes ist netzseitig vollständig eingeplant und im Aufbau. • Ggf. ist eine Integration vormals statischer Ladepunkte, die nun zu dynamischen Lademöglichkeiten umfunktioniert werden, berücksichtigt (Plötz et al. 2021)

Handlungsbedarfe/-optionen

Für eine funktionierende Netzintegration muss eine Bedarfsabschätzung (absolut, regional verteilt, im Zeitverlauf) erfolgen, auf die eine gezielte Netzertüchtigung oder ein Netzausbau folgen kann. Hierbei sollte unbedingt auf das Zusammenspiel zwischen dynamischem und statischem Laden geachtet werden, um eine optimale, aber auch anpassbare Kombination beider Technologieoptionen zu errichten.

2.4 Betrieb: Wie kann ein verlässlicher und attraktiver Betrieb des O-Lkw-Systems erreicht werden?

2.4.1 Akzeptanz der Technologie bei Anwender:innen

Bestandsaufnahme

Bei frühen Nutzer:innen in den Feldversuchen zeigt sich eine hohe Akzeptanz der Oberleitungstechnologie. Diese ist in der praktischen Erprobung begründet. Auch die Eignung in der logistischen Praxis scheint gegeben. Anfänglich aufgetretenen Verunsicherungen durch z. B. unübliche Leasingkonzepte und notwendige Sondergenehmigungen aufgrund der Länge und Höhe der O-Lkw konnte im Projektverlauf begegnet werden.

Allerdings konnten bislang nur wenige Unternehmen Erfahrungen mit O-Lkw in den Pilotvorhaben sammeln. Potenzielle Anwender:innen, die bislang keine Praxiserfahrung sammeln konnten, stehen der Technologie weniger positiv gegenüber. Grundsätzlich ist die Technologie bei möglichen Anwender:innen wenig bekannt. Zudem führen mehrere Technologieoptionen und deren unklare Perspektiven zu einer abwartenden Haltung in der Transportbranche.

Im Rahmen einer Unternehmensbefragung zeigt sich, dass wenige potenzielle Anwender:innen von einem standardmäßigen Einsatz von O-Lkw im Jahr 2030 ausgehen. Mehr als die Hälfte der Befrag-

ten geht dagegen davon aus, dass O-Lkw zu diesem Zeitpunkt vom Markt verschwunden sind. Potenzielle Anwender:innen, die in der überwiegenden Mehrheit bisher keine praktischen Erfahrungen mit alternativen Antrieben gemacht haben, sehen für das Jahr 2030 vor allem den Einsatz von mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Lkw (FCEV) und Lkw mit H₂-Verbrennungsmotor. Hier gehen 97 % (FCEV) bzw. 96 % der befragten Unternehmen zumindest von einem Einsatz in Nischen aus (Göckeler et al. 2022).

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Klarheit über Technologiepfad und beginnender OL-Netzausbau besteht. • Breite Bekanntheit der OL-Technologie bei potenziellen Anwender:innen ist gegeben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzielle Anwender:innen haben bereits Erfahrungen mit dem Betrieb von O-Lkw sammeln können. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Eignung für Nutzer:innen durch grenzüberschreitende Nutzung von O-Lkw.

Handlungsbedarfe/-optionen

Die Erfahrungen von den Anwender:innen auf den Pilotstrecken und wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Alternativtechnologien sollten verstärkt mit potenziellen Anwender:innen geteilt werden. Gezielte Maßnahmen zur Verbreitung von Wissen zu O-Lkw bei den Fahrzeugbetreibern können beispielsweise Workshops, Webinare sein, die auch in Kooperation mit den Branchenverbänden (v. a. Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V., Bundesverband Spedition und Logistik e.V. (DSLVL)) organisiert werden könnten. Die Aufbereitung von Informationen zu O-Lkw sollte sich bei Inhalt und Form an den Bedarfen der Akteure jenseits der Forschung orientieren. Dabei sollte verstärkt auf die Synergien zwischen dem dynamischen Laden von O-Lkw und dem stationären Laden von BEV und O-Lkw eingegangen werden.

Mittelfristig ist die Unsicherheit hinsichtlich der Entscheidung bezüglich der verschiedenen möglichen Technologieoptionen ein Hindernis für eine höhere Akzeptanz der O-Lkw. Oftmals dürfte es bei potenziellen Nutzer:innen an Vertrauen in einen Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur fehlen. Um diesem Hemmnis zu begegnen, sollte der Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur als nationales und europäisches Ziel entsprechend dem Ausbau der Schnellladeinfrastruktur für Lkw z. B. in der Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) verankert werden.

Im Stakeholderdialog wurde betont, dass eine Richtungsentscheidung für das O-Lkw-System als auch die Verfügbarkeit von serienreifen O-Lkw sowie die Perspektive eines Oberleitungsnetzes Voraussetzungen sind, um in der Logistikbranche eine ausreichende Investitionssicherheit zu gewährleisten und größere Akzeptanz für die Technologie zu schaffen.

2.4.2 Technisch und ökonomisch attraktiver Fahrzeugeinsatz

Bestandsaufnahme

Der Einsatz der O-Lkw in Deutschland erfolgt derzeit auf Pilotstrecken in Hessen, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg. Der Testeinsatz beschränkt sich jeweils auf ein kleines Einsatzgebiet mit elektrifizierten Streckenabschnitten je Fahrtrichtung von bis zu 5 km. Die OL-Infrastruktur wird ausschließlich von den im Rahmen der Pilotvorhaben beschafften Fahrzeugen genutzt. Der Testeinsatz findet zu Forschungszwecken statt, ohne die Förderung von Fahrzeugen und Infrastruktur wäre ein wirtschaftlicher Betrieb heute nicht möglich.

Aus heutiger Perspektive wird der Einsatz von O-Lkw in Deutschland in einer Reihe von Studien als eine langfristige ökonomisch attraktive Alternativoption zu Dieselfahrzeugen bewertet (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020; Jöhrens et al. 2022; Hacker et al. 2020). Auch im Stakeholderdialog wurden die vorteilhaften Gesamtnutzungskosten und die vergleichsweise günstigen und sicheren Strompreise als Vorteile des O-Lkw-Systems bewertet. Allerdings werden batterieelektrische Lkw als technisch-ökonomisch attraktive Alternative gesehen und von zentralen Marktakteuren wie den Fahrzeugherstellern propagiert. Die sehr dynamische Entwicklung der Batterietechnologie verändert die bisher prognostizierten ökonomischen und ökologischen Vorteile der Oberleitungstechnologie.

Aufgrund der mangelnden Langzeiterfahrung des Einsatzes von O-Lkw bestehen noch Unsicherheiten z. B. in Hinblick auf die Wartungsintervalle bei den Fahrzeugen. Für potenzielle Anwender:innen von O-Lkw sind diese Unsicherheiten mit einem Kostenrisiko verbunden, das allerdings auch bei anderen alternativen Antrieben gegeben ist.

Notwendige Zielzustände

Bis 2025	Bis 2030	Bis 2035
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibler Einsatz von O-Lkw durch Hybridkonzepte ist bei selbst noch geringem OL-Infrastruktur-Ausbau möglich. • Betriebswirtschaftlich konkurrenzfähiger Fahrzeugeinsatz durch Fahrzeug- und Infrastrukturförderung sichergestellt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Einsatzspektrum wird durch eine zunehmende Netzbildung der OL-Infrastruktur und Erschließung von Synergien von O-Lkw und batterieelektrischen Lkw erreicht. • Hoher elektrischer Fahranteil kann realisiert werden. • Betriebswirtschaftlich konkurrenzfähiger O-Lkw-Betrieb ist bei rückläufiger Förderung möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlicher Betrieb von Fahrzeug und Infrastruktur ist ohne Förderung möglich. • Berücksichtigung von Zukunftstechnologien wie z. B. dem Platooning bei der Weiterentwicklung von Fahrzeug und Infrastruktur.

Handlungsbedarfe/-optionen

Neben der Verfügbarkeit von serienreifen O-Lkw (vgl. Abschnitt 2.1.1) ist für einen technisch und ökonomisch attraktiven Fahrzeugeinsatz eine vorhandene Infrastruktur erforderlich. Demzufolge ist der Auf- und Ausbau von elektrifizierten Streckenabschnitten die entscheidende Voraussetzung (vgl. Abschnitt 2.2.3).

In der Markthochlaufphase ist zunächst eine hohe staatliche Förderung der Fahrzeugbeschaffung und die Vorfinanzierung des Infrastrukturaufbaus erforderlich, um einen wirtschaftlichen Betrieb der O-Lkw zu ermöglichen. Mit steigenden Anteilen elektrischer Fahrleistung durch den voranschreitenden Infrastrukturausbau und der aufgrund von Skaleneffekten sinkenden zusätzlichen Fahrzeugkosten kann diese Förderung zunehmend abgeschmolzen werden. Mittel- bis langfristig kommt zudem eine verstärkte Anreizwirkung durch die CO₂-Spreizung der Maut zum Tragen.

Zur Absicherung von Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Energiepreise für die Nutzer:innen von O-Lkw wäre es auch denkbar, einen Teil der fahrzeugbezogenen Förderung so auszugestalten,

dass sie sich an den jeweils anfallenden Energiepreisen orientiert und damit die Gesamtnutzungskosten statt ausschließlich die Anschaffungskosten berücksichtigt.

Um die Unsicherheiten in Hinblick auf die zukünftigen Gesamtkosten für mögliche Anwender:innen von O-Lkw zu reduzieren, ist es zunächst erforderlich, weitere Erfahrungen auf den Feldversuchs- und ersten Ausbaustrecken zu sammeln und das daraus abgeleitete Wissen über die Kosten an die relevanten Akteure auf der Anwender:innenseite zu kommunizieren. Im Stakeholderdialog wurde zudem angeregt, bei den weiteren Praxiserprobungen (siehe bspw. Innovationscluster) einen Fokus auf die Betriebsdatenerhebung zu legen, um zukünftig noch belastbarere Aussagen zu den real erzielbaren Vorteilen von O-Lkw für interessierte Anwender:innen treffen zu können. In diese Kommunikation sollte auch die Wirkung bereits umgesetzter Instrumente wie der CO₂-Preis im Rahmen des BEHG und die THG-Quote sowie weitere im Koalitionsvertrag der Bundesregierung festgehaltene Instrumente wie die CO₂-Bepreisung der Maut in die zukünftigen Gesamtnutzungskosten von Diesel-Lkw einbezogen werden.

Darüber hinaus bestehen betriebliche Unsicherheiten auf der Betreiberseite in Hinblick auf die Fahrzeugverfügbarkeit bzw. Störanfälligkeit. Diese können beispielsweise durch günstige Versicherungen gegen technisch bedingten Ausfall von Fahrzeugen reduziert werden wie auch durch Instrumente zur schnellen und unkomplizierten Bereitstellung von Ersatzfahrzeugen im Bedarfsfall (z. B. durch einen Fahrzeugpool).

2.4.3 Infrastrukturbetrieb

Bestandsaufnahme

Der Betrieb der OL-Infrastruktur erfolgte bisher nur im befristeten Betrieb in den Feldversuchen mit wenigen Nutzer:innen und ohne eine energiewirtschaftliche Einordnung der Anlage. Dabei erfolgt die Stromabrechnung mittels geeichter Stromzähler pauschal an der Übergabestation für die gesamte Anlage. Eine geeichte, fahrzeugspezifische Abrechnung ist bislang nicht möglich.

Durch den Betrieb der Feldversuchsstrecken wurden Praxiserfahrungen mit der Wartung der Anlagen und mit dem Umgang von Störfällen gesammelt. Definierte Leitlinien für den Betrieb längerer Strecken liegen bislang nicht vor, es kann aber an die in den Feldversuchen erarbeiteten und angewandten Handlungsvorgaben angeknüpft werden.

Mit dem Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur treffen erstmals die Rechtsbereiche Energie- und Straßenrecht auf diese Weise aufeinander. Hierbei entstehen an der Schnittstelle beider Rechtsbereiche regulatorischer Handlungsbedarf und Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle. Aus verschiedenen Forschungsvorhaben liegen bereits Studien mit Vorschlägen zu möglichen zukünftigen Betreibermodellen und Abrechnungssystemen sowie der notwendigen Anpassungen des Rechtsrahmens (u. a. Wegekostenrichtlinie) vor (Knezevic et al. 2022).

Notwendige Zielzustände

Vor 2025	2025	Bis 2030
<ul style="list-style-type: none"> • Umsetzungsmodell für Infrastrukturbetrieb und die Stromabrechnung ist geklärt, um Innovationskorridore bei mehreren Netzbetreibern realisieren zu können. • Festlegung auf ein präferiertes nationales Akteursmodell ist erfolgt, das effiziente Marktprozesse und Wettbewerb ermöglicht. • Rechtssicheres Abrechnungsmodell für den fahrzeugspezifischen Stromverbrauch auf Basis von eichrechtskonformen Stromzählern ist etabliert. 	<ul style="list-style-type: none"> • Angepasster europäischer Rechtsrahmen ermöglicht eine rechtssichere Umsetzung des präferierten Akteurs-/Betriebsmodell auf nationaler Ebene. • Betriebsprozesse für bestimmte Situationen (bspw. Störungsmanagement, Change Management) definiert. • Ein nationales Betriebsmodell mit klar definierten Zuständigkeiten ist etabliert. 	<ul style="list-style-type: none"> • Wettbewerb der Mobilitätsanbieter mit flexiblen Tarifen ist etabliert. • Für den Betrieb besteht Klarheit über das Betriebsmodell, die Finanzierung der Instandhaltung und einer möglichen Re-Finanzierung des Aufbaus. • Es besteht Klarheit über die Organisation der Energieversorgung, die rechtlich auch der Autobahn GmbH obliegt. So könnten Tochtergesellschaften der Autobahn GmbH gegründet werden und/oder es wird für bestimmte Dienstleistungen ein Markt geschaffen.

Handlungsbedarfe/-optionen

In Hinblick auf den Infrastrukturbetrieb ist es erforderlich, zeitnah den Schritt von den in den Feldversuchen umgesetzten Lösungen hin zu tragfähigen Betreibermodellen für einen größeren Roll-Out der Infrastrukturlösung anzustoßen.

Der Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur macht neuartige Kooperationen zwischen verschiedenen Akteuren bzw. die Integration von deren Aufgaben (z. B. Strom- und Infrastrukturbereitstellung) erforderlich. Deshalb ist es wichtig, relevante Akteure z. B. von Seiten der Energienetzbetreiber, der Straßenverwaltungen, der Autobahn GmbH und der Anwender:innen stärker zu vernetzen. Neben dem Wissenstransfer ist es das Ziel, die Bedarfe und Handlungsmöglichkeiten der Akteure unter Berücksichtigung von Unsicherheiten über die Entwicklung technischer und wirtschaftlicher Parameter bei der Entwicklung und Ausgestaltung von Geschäfts- und Betreibermodellen zu berücksichtigen. Dabei kann es erforderlich sein, die Vernetzungsaktivitäten vorzufinanzieren, solange keine planbaren Einnahmen generiert werden können.

Darauf aufbauend sollten die Festlegung auf ein Betreibermodell für die Oberleitungs-Infrastruktur und die Stromversorgung ggf. für unterschiedliche Netzausbauzustände wie etwa bundeslandübergreifende Innovationskorridore und anschließend der bundesweite Netzausbau getroffen werden, mit dem effiziente Marktprozesse ermöglicht werden können. Parallel dazu ist es erforderlich, notwendige Anpassungen des nationalen und europäischen Rechtsrahmens (u. a. AFIR, Wegekostenrichtlinie) zu initiieren.

Teil dieses Prozesses ist die Klärung grundlegender Ausgestaltungsfragen des Abrechnungssystems, insbesondere wie die Messung des Stromverbrauchs und die Erhebung von Nutzungsgebühren für die Oberleitungsinfrastruktur technisch und organisatorisch erfolgen sollten.¹³ Dabei ist eine energiebezogene Abrechnung aus rechtlichen und ökonomischen Gründen anzustreben.

Aufbauend auf Erfahrungen aus dem Betrieb der Pilotanlagen sollten durch die involvierten Stakeholder Leitlinien zur Handhabung bei Störfällen durch die Rettungsdienste wie z. B. Meldekettens erstellt und etabliert werden.

¹³ Diese Fragen werden derzeit u. a. im Vorhaben AMELIE untersucht.

3 Zentrale Handlungsempfehlungen

Soll bis zum Jahr 2025 eine positive Pfadentscheidung für die O-Lkw-Technologie entsprechend der oben skizzierten Roadmap fallen, damit sie ab 2030 substantiell zu den nationalen Klimaschutzziele beitragen kann, ist eine Weiterentwicklung von Technologie, Markt und Rahmenbedingungen erforderlich. Wie aus den vorangegangenen Analysen hervorgeht, lassen sich für die notwendige Entwicklung, ausgehend von den heutigen Pilotanwendungen, folgende zentrale Empfehlungen für wichtige Handlungsfelder formulieren. Dabei lässt sich zwischen kurzfristigen und mittel- bis längerfristigen Handlungsbedarfen unterscheiden (Abbildung 3).

TECHNIK: Serienreife und europaweit standardisierte O-Lkw mit der Möglichkeit zum dynamischen und stationären Laden entwickeln.

Für einen Massenmarkteintritt in unterschiedliche Lkw-Einsatzfelder ist eine Weiterentwicklung der aktuell eingesetzten Fahrzeugtechnik erforderlich. Dies bedeutet, die Fahrzeugtechnik in ihrer Technologiereife voranzutreiben und in naher Zukunft einen Technologiereifegrad (TRL) von 8 bis 9 zu erreichen sowie Fahrzeugkonfigurationen aufzubauen, die vollständig oder weitestgehend elektrisch fahren.

Die zügige herstellerübergreifende Standardisierung der Schnittstellen Oberleitung-Pantograph sowie Pantograph-Fahrzeug ist eine essentielle Voraussetzung, um eine größere Anzahl an Unternehmen anzureizen, zentrale Systemkomponenten herzustellen und sich der Entwicklung von massenmarktfähigen Serienfahrzeugen zu nähern.

Perspektivisch (ab 2030) zeichnen sich Synergien zwischen stationärem und dynamischem Laden ab und damit die Möglichkeit für Fahrzeuge, beide Technologien bedarfsabhängig zu nutzen. Bei der Entwicklung der Fahrzeugtechnik und Oberleitungsinfrastruktur sollten diese Wechselwirkungen wie auch die möglichen Flexibilitätspotenziale des dynamischen Ladens mit Blick auf die Integration von erneuerbaren Energien frühzeitig Berücksichtigung finden. Hierfür sollte bereits bei der aktuellen Entwicklung von BEV die spätere Integrationsfähigkeit von Pantographen berücksichtigt werden („Oberleitungs-Readiness“).

MARKT: Vertrauen in die Technologie bei den Marktakteuren durch verbindlichen Infrastrukturausbauplan und verlässliche Marktanreize schaffen.

Um die Voraussetzungen für einen Hochlauf des Marktes von O-Lkw und der Oberleitungsinfrastruktur zu schaffen, ist es zwingend erforderlich, dass Fahrzeughersteller, Infrastrukturrichtenden und Flottenbetreiber Vertrauen in die Technologie erlangen. Dafür sind Marktanreize durch herstellerübergreifende Nutzungsmöglichkeiten der geplanten Innovationskorridore und die Förderung der Entwicklung von O-BEV und Pantographen erforderlich und es sollten praxisorientierte Fahrzeuganforderungen konkretisiert werden. Dies sind zentrale Voraussetzungen, um die Entstehung eines wettbewerblichen Marktes zu befördern.

Um Infrastrukturrichtenden eine vorausschauende Planung und den Aufbau dafür benötigter Kapazitäten zu ermöglichen, sollten konkrete Ausbaupläne für die Infrastruktur unter Angabe der Ausschreibungszeitpunkte entwickelt werden.

Perspektivisch muss für die Anwender:innenseite sichergestellt werden, dass verlässliche Fahrzeuge und Infrastruktur zeitnah zur Verfügung stehen. Außerdem müssen finanzielle Anreize und Rahmenbedingungen bestehen, die die Attraktivität von O-Lkw im Vergleich zu alternativen Optionen sicherstellen werden.

INFRASTRUKTUR: Die notwendige Ausbaugeschwindigkeit erfordert eine deutschlandweite Koordinierung und Beschleunigung von Planungsprozessen.

Im Falle einer positiven Pfadentscheidung ist eine schnelle Errichtung der Infrastruktur in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts entscheidend, damit O-Lkw bis zum Jahr 2030 einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Dafür ist eine deutschlandweite Koordinationsstelle auf Bundesebene erforderlich, die die Entwicklung plant und begleitet und relevante Akteure vernetzt. Weiterhin ist es unerlässlich, eine Vereinfachung von Rechtsvorschriften beim Bau anzustoßen und die Qualifizierung von Fachkräften für Planung, Genehmigung und Bau der Infrastruktur und den Aufbau von Kapazitäten sicherzustellen.

Ein zentral geplanter Ausbau erleichtert ebenfalls die etwaige Stromnetzertüchtigung und den -netzausbau, der auch das Zusammenspiel zwischen dynamischem und statischem Laden berücksichtigen sollte.

Um Verzögerungen beim Aufbau der Infrastruktur zu verhindern, sollten bei der Auswahl der zu elektrifizierenden Strecken Fragen lokaler Akzeptanz (Bsp. visuelle Auswirkungen), die Nähe zu Siedlungen und lokale ökologische Auswirkungen frühzeitig berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, gezielte Informationsangebote für lokal Betroffene anzubieten, um eine hohe Akzeptanz sicherzustellen. Die Kommunikation zur Technologie sollte darüber hinaus mit Blick auf unterschiedliche Zielgruppen verbreitert und intensiviert werden.

Perspektivisch sollte der Aufbau eines europäischen Kernnetzes angestrebt werden und dessen Umsetzung in der EU-Gesetzgebung verankert und europäisch koordiniert werden.

BETRIEB: Ein diskriminierungsfreier Infrastrukturzugang sowie ein verlässlicher Betriebskostenvorteil in zentralen Anwendungsfeldern sind wichtige Voraussetzungen für eine hohe Nutzer:innenakzeptanz von O-Lkw

Um Logistikunternehmen für den Einsatz von O-Lkw zu gewinnen, ist es entscheidend, dass neben dem Auf- und Ausbau der benötigten Infrastruktur und der Verfügbarkeit von serienreifen, bedarfsgerechten Fahrzeugen die organisatorischen Voraussetzungen für deren Einsatz geschaffen werden. Dafür muss kurzfristig ein Finanzierungs- und Betreibermodell für die Infrastruktur definiert und dessen Umsetzung vorbereitet und mittelfristig realisiert werden. Die dafür notwendigen Anpassungen der rechtlichen Grundlagen auf nationaler sowie auf EU-Ebene sollten zügig angegangen werden.

Insbesondere in der Phase des Markthochlaufes ist eine staatliche Förderung der Fahrzeugbeschaffung und die Vorfinanzierung des Infrastrukturaufbaus erforderlich, um einen ökonomisch attraktiven Fahrzeugeinsatz zu ermöglichen. Mittelfristig sollten Instrumente wie die CO₂-Spreizung der Maut so ausgestaltet werden, dass der Einsatz von O-Lkw attraktiv wird und eine Fahrzeugförderung ausgeschlichen werden kann.

Perspektivisch wird eine grenzüberschreitende Nutzung von O-Lkw erforderlich sein. Die Abstimmungen zu und Schaffung der Grundlagen für einen diskriminierungsfreien Infrastrukturzugang bei länderübergreifender Nutzung von O-Lkw sollten deshalb in den nächsten Jahren geschaffen werden.

INTERNATIONAL: Bekanntheit der O-Lkw-Technologie auf europäischer Ebene steigern und frühen Infrastrukturaufbau mit Nachbarstaaten initiieren.

Eine perspektivische internationale Nutzung von O-Lkw ist eine Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Markthochlauf in einem über Pendelstrecken hinausgehenden Maßstab. Dafür ist es erforderlich, die Bekanntheit über die Technologie in den europäischen Staaten und auf Ebene der EU zu vergrößern und eine europaweite Standardisierung der Technologie zu erreichen. Deutschland sollte deshalb seine proaktive Rolle zur Förderung von internationalem Austausch intensivieren

und Bündnisse mit weiteren europäischen Staaten anstoßen bzw. vertiefen. Für den frühen Netzausbau kommt dem Austausch mit denjenigen unmittelbaren Nachbarstaaten, die ein hohes Interesse an der Umsetzung des O-Lkw-Systems zeigen, eine besondere Bedeutung zu.

Das Ziel sollte sein, dass führende Mitgliedstaaten der EU das dynamische Laden von O-Lkw auf Autobahnen als Konzept verfolgen und in ihrer Infrastrukturplanung berücksichtigen sowie die notwendigen Schritte für die Implementierung der Technologie in der EU-Gesetzgebung (u. a. AFIR, Wegekostenrichtlinie) angehen. Dies ist eine zentrale Voraussetzung dafür, dass perspektivisch ein internationaler bzw. europäischer Markt für zentrale Elemente des O-Lkw-Systems entsteht, der neben der Herstellung der Fahrzeuge und der erforderlichen Komponenten auch die Planung, den Bau und die Errichtung der Infrastruktur umfasst.

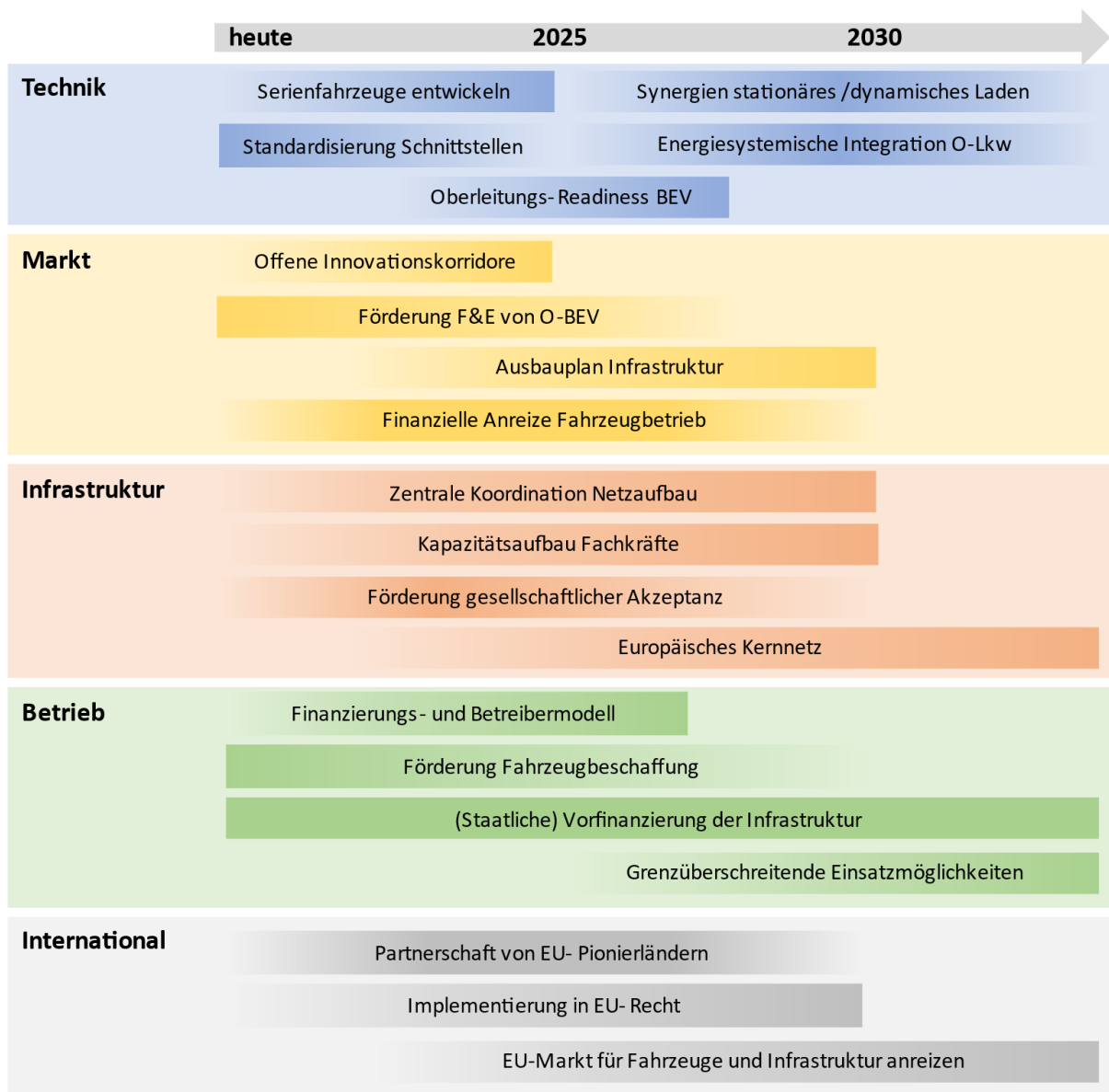


Abbildung 3: Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Einführung von Oberleitungs-Lkw

4 Literatur

- 2019/1242 (2019): EU. Verordnung (EU), 2019/1242, Fassung vom des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>.
- BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (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 (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.
- Burchardt, J.; Franke, K.; Herhold, P.; Hohaus, M.; Humpert, H.; Päivärinta, J.; Richenhagen, E.; Ritter, D.; Schönberger, Stefan; Schröder, J.; Strobl, S.; Treis, C. et al. (2021): Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. BDI. Bundesverband der deutschen Industrie (Hg.).
- Burghard, U.; Scherrer, A. (2020): Der eHighway aus gesellschaftlicher Perspektive, Erkenntnisse zur sozialen Akzeptanz und den Akteuren rund um Oberleitungs-Lkw-Systeme in Deutschland und Europa. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/2020-Bericht-Akzeptanz_BOLD_eHighways.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piégsa, A.; Schefler, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wunsch, A.; Wunsch, M. et al. (2020): Klimaneutrales Deutschland, In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Unter Mitarbeit von Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut. Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut. Agora Energiewende; Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität (Hg.). Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- Elsland, R.; Boßmann, T.; Klingler, A.-L.; Herbst, A.; Klobasa, M.; Wietschel, M. (2016): Netzentwicklungsplan Strom. Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile-Begleitgutachten. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Karlsruhe.
- 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 - 1. Teilbericht, Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Unter Mitarbeit von Öko-Institut und Hochschule Heilbronn. Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Göckeler, K.; Hacker, F.; Ziegler, L.; Heinzemann, J.; Lesemann, L.; Bernecker, T. (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien - Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung, Zweiter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht_2-Befragung_Logistikbranche.pdf, zuletzt geprüft am 06.07.2022.
- Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W. (2020): StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, Endbericht. Unter Mitarbeit von Öko-Institut; HHN; Fraunhofer IAO und ITP. Öko-Institut.

- Hartwig, M. (2020): Akteursmodell für die Finanzierung und Abrechnung elektrischer Straßensysteme (ERS). IKEM Working Paper.
- Hartwig, M. (2021): Regulierung für Elektrische Straßensysteme (ERS) – Handlungsempfehlungen. Präsentation entstanden im Rahmen des Projekts AMELIE.
- Helms, H. (2022): Erfolgsfaktoren für einen effektiven Klimaschutz im Straßengüterverkehr, Policy Brief im Rahmen des Projekts BOLD. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, zuletzt geprüft am 12.11.2022.
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Bus-verkehrs My eRoads“. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; PTV Transport Consult. Heidelberg, Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2022.
- Jöhrens, J.; Helms, H.; Beckers, T.; Frischmuth, F.; Gerhardt, N. (2020): Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; IKEM; Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik. Heidelberg.
- Knezevic, G.; Grosse, B.; Fynn, C.; Hartwig, M.; Radeisen, A.; Bußmann-Welsch, A. (2022): AMELIE II, Rechtlich kohärentes Betriebs- und Marktszenario eines Akteursmodells für Electric-Road-Systems. Teilstudie I. Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. IKEM (Hg.). Berlin.
- Knezevic, G.; Grosse, B.; Hartwig, M. (2021): Stromabrechnung in Elektrischen Straßensystemen (ERS). IKEM Working Paper. IKEM.
- Kryl, I.; Trimpop, R. (2021): Ergebnisse der Akzeptanzforschung aus Erhebungsphase 2. Feldversuch eHighway an der BAB A1 in Schleswig-Holstein FESH II-B., Web-Meeting F und E Zentrum FH Kiel Mai 2021. FH Kiel.
- KSG (2021): Bundesregierung. Bundes-Klimaschutzgesetz, KSG, Fassung vom 12.05.2021.
- Matthes, F. C.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hermann, H.; Kasten, H.; Kreye, K.; Loreck, C.; Repenning, J.; Zerrahn, A.; Cook, V. (2022): Klimaschutz 2030: Ziele, Instrumente, Emissionsminderungslücken sowie die Verbesserung der Überprüfungs- und Nachsteuerungsregularien, Analyse. Öko-Institut e.V. Stiftung Denkfabrik Klimaneutralität (Hg.). Berlin, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- Matthes, F. C.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Göckeler, K.; Heinemann, C.; Hermann, H.; Kasten, P.; Mendelevitch, R.; Mottschall, M.; Seebach, D.; Cook, V. (2021): Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland, Untersuchung für die Stiftung Klimaneutralität. Öko-Institut. Öko-Institut e.V. (Hg.).
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2020): Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge, Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung. (NPM, AG 1) Arbeitsgruppe 1. NPM. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1 (Hg.).
- Plötz, P.; Hacker, F.; Jöhrens, J.; Speth, D.; Gnann, T.; Scherrer, A.; Burghard, U. (2021): Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr., Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich - ein Diskussionspapier. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Öko-Institut; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/BOLD_Truck_charging_discussion%20paper.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Repenning, J.; Harthan, R.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, C. W.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R. et al. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Unter Mitarbeit von Ralph O. Harthan; Ruth Blanck; Hannes Böttcher; Sybille Braungardt; Veit Bürger et al. Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES; Thünen-Institut. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/projektionsbericht_2021_bf.pdf.
- Schöpp, F.; Wauri, D. (2021): AG Akzeptanz. 14.10.2021 (online). Technische Universität Darmstadt. Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.

- Sensfuß, F.; Maurer, C.; Krail, M.; Speth, D.; Gnann, T.; Wietschel, M.; Deac, G.; Mellwig, P.; Müller-Kirchenbauer, J. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Treibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr. Unter Mitarbeit von Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Consentec GmbH; Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) und Technische Universität Berlin (TU Berlin). Fraunhofer ISI. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.).
- Siemens AG; Technische Universität Dresden; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Verkehrssystemtechnik (2016): ENUBA 2, Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Version V3 vom 31. August 2016. Siemens AG; Technische Universität Dresden; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Verkehrssystemtechnik.
- Tersteegen, B.; Dröscher, T.; Laderman, A.; Maurer, C.; Sensfuß, F.; Willemsen, S. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Langfristszenarien 3) – Treibhausgasneutrale Hauptszenarien, Modul Stromnetze. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Consentec GmbH. Aachen.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2021): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2019. UBA. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_cc_43-2021_nir_2021_1.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2021.
- Widegren, F.; Helms, H.; Hacker, F.; Andersson, M.; Gnann, T.; Eriksson, M.; Plötz, P. (2022): Ready to go? Technology Readiness and Life-cycle Emissions of Electric Road Systems, A discussion paper from the COLLERS2 project. WSP Sverige AB; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Öko-Institut e.V.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Stockholm, Heidelberg, Berlin, Karlsruhe, zuletzt geprüft am 12.11.2022.