



Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbausze- narien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland

Eine Synthese

Ort: Berlin, Heidelberg, Karlsruhe

Datum: 15.05.2020

Version 1

Impressum

Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland

Autoren

Florian Hacker (Öko-Institut)
f.hacker@oeko.de

Julius Jöhrens (ifeu)
Julius.joehrens@ifeu.de

Dr. Patrick Plötz (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI)
patrick.ploetz@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

Florian Hacker, Julius Jöhrens, Patrick Plötz (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

April 2020

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 Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter dem Förderkennzeichen 16EM4011-1 gefördert wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung und Handlungsoptionen	5
2	Einleitung und Motivation	7
3	Idee und Status quo Oberleitungs-Lkw	9
4	Wirtschaftlichkeit von Oberleitungs-Lkw	13
4.1	Kosten aus Sicht der Lkw-Betreiber	13
4.2	Infrastrukturkosten	17
4.3	Wirtschaftliche Tragfähigkeit eines Oberleitungs-Lkw-Systems	18
5	Umweltwirkungen von Oberleitungs-Lkw	20
5.1	Spezifisches Treibhausgas-Minderungspotential	20
5.2	Weitere Umweltwirkungen	22
6	Mögliche Ausbauszenarien und deren Wirkungen	23
6.1	Basisnetz	23
6.2	Erste Ausbaustrecken und mögliche Netzbildung	24
6.3	Markthochlaufszzenarien	25
6.4	Aggregiertes CO ₂ -Minderungspotential	27
6.5	Stromnachfrage und regionale Verteilung	28
7	Politische Instrumente	31
7.1	Existierende Politikmaßnahmen	31
7.2	Erfordernisse für einen Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw	32
7.3	Weiteres politisches Umfeld	33
8	Ausblick und Forschungsbedarf	35
9	Literaturverzeichnis	37

1 Zusammenfassung und Handlungsoptionen

Großer Bedarf für alternative Antriebe im Straßengüterverkehr

Der Verkehrssektor steht in Bezug auf die Erreichung der Klimaziele unter besonderem Druck. Der Straßengüterverkehr ist mit mehr als einem Drittel der nationalen Treibhausgasemissionen der zweitgrößte Emittent im Verkehrssektor – und angesichts eines kontinuierlich zunehmenden Güterverkehrs ist die Tendenz eher steigend. Schwere Lkw, also Last- und Sattelzüge, spielen dabei eine besonders wichtige Rolle. Angesichts beschränkter Verlagerungspotenziale auf Schiene und Schiff sind dringend Alternativen erforderlich, die einen klimaneutralen Güterverkehr auf der Straße ermöglichen.

Oberleitungs-Lkw sind elektrische Lkw, die über eine Oberleitung geladen werden.

Durch die Elektrifizierung von hoch ausgelasteten Fernverkehrsachsen können Oberleitungs-Lkw mittels eines Stromabnehmers während der Fahrt Strom beziehen. Abseits der elektrifizierten Strecken fahren die Fahrzeuge mit Energie aus einer kleineren Batterie oder nutzen ein zweites Antriebssystem. Die Technologie wurde in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und befindet sich gerade in zwei Feldversuchen auf öffentlichen Straßen in der Erprobung, ein dritter Feldversuch startet in Kürze.

Neben der Erprobung der Technologie auf öffentlichen Straßen liegen mittlerweile auch umfassende Studien zur Bewertung des Oberleitungssystems aus drei Forschungsvorhaben für Deutschland vor, die die Umsetzbarkeit und die notwendigen Rahmenbedingungen analysieren. In diesem Synthesepapier werden die wichtigsten Ergebnisse dieser und anderer Studien hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung, Ausbauszenarien und Politikinstrumenten zusammengeführt und diskutiert.

Langfristig kann ein Oberleitungssystem sich wirtschaftlich selbst tragen

Oberleitungs-Lkw können ohne Infrastrukturkosten bald die Vollkosten von Diesel-Lkw erreichen. Gelingt der Eintritt in den Massenmarkt, so sind deutliche Kosteneinsparungen gegenüber Diesel-Lkw zu erwarten. Der Aufbau eines Oberleitungsbasisnetzes von etwa 4.000 km auf den stark befahrenen deutschen Autobahnen würde Investitionen von etwa 10 Mrd. Euro über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren erforderlich machen. Ein Teil der Einnahmen aus einer CO₂-basierten Lkw-Maut würde für die Finanzierung ausreichen. Im Hinblick auf die Gesamtkosten für Staat und Fahrzeugbetreiber hat das Oberleitungs-Lkw-System im Jahr 2030 leichte Vorteile gegenüber dem Einsatz strombasierter Flüssigkraftstoffe zur CO₂-Reduktion. Dieser Vorteil wird in den Folgejahren größer.

Mit dem Strommix des Jahres 2030 ermöglichen Oberleitungs-Lkw signifikante Treibhausgasersparungen gegenüber Diesel-Lkw

Oberleitungs-Lkw bieten die Möglichkeit, auch im Straßengüter-Fernverkehr die Vorteile der direkten Stromnutzung zu erschließen und bei einem schnellen Infrastrukturausbau einen relevanten Klimaschutzbeitrag bereits im Jahr 2030 zu liefern. Die Nutzungsphase und insbesondere die Emissionen der Stromerzeugung dominieren die Treibhausgasbilanz von Oberleitungs-Lkw. Die Fahrzeugherstellung hat demgegenüber deutlich geringere Bedeutung, der Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur fällt kaum ins Gewicht. Unter Verwendung des für das Jahr 2030 angenommenen deutschen Strommixes verursachen Diesel-Hybrid-Oberleitungs-Lkw pro Kilometer gegenüber Diesel-Lkw ca. ein Viertel weniger CO₂-Emissionen, während Batterie-Hybrid-Oberleitungs-Lkw die CO₂-Emissionen in etwa halbieren.

Ein Drittel des Autobahnnetzes sollte mit Oberleitung ausgestattet werden

Ein Autobahnkernnetz von etwa 4.000 km ist für den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur besonders geeignet. Über 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf Autobahnen findet innerhalb dieses Netzes statt, das

lediglich ein Drittel des Gesamtnetzes ausmacht. Einzelstrecken mit bedeutenden logistischen Umschlagpunkten an Start- und Endpunkt zeigen besonders hohe Potentiale für eine frühzeitige Elektrifizierung. Vielversprechend sind die Autobahnabschnitte zwischen Hamburg und dem Ruhrgebiet (A1) bzw. Hamburg und Kassel (A7). Bis zum Jahr 2030 kann durch Oberleitungs-Lkw je nach Netzausbaugrad und Studie ein Anteil von 8 bis 17 % der Fahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen elektrisch erfolgen. Bei vollem Netzausbau ist perspektivisch ein elektrischer Anteil von über einem Drittel möglich.

Ein Fünftel der Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs könnte eingespart werden

Werden die Elektrifizierungspotentiale erschlossen, so können die verkehrsbedingten Emissionen durch Oberleitungs-Lkw bis 2030 um 2 bis 4 Mio. Tonnen CO₂ reduziert werden, bei einem schnellen Netzausbau um bis zu 6 Mio. Tonnen CO₂. Langfristig kann eine Minderung um bis zu 12 Mio. Tonnen CO₂ erzielt werden und die Emissionen des Straßengüterverkehrs können um bis zu 19 % reduziert werden. Der Strombedarf durch Oberleitungs-Lkw ist mit einem Anteil von 4 % an der Gesamtstromnachfrage auch im Vergleich E-Pkw mit 14 % von nachrangiger Bedeutung.

Aufbau der Infrastruktur und Marktanreize sind die wichtigsten Politikoptionen

Nach bisherigen Untersuchungen gelten die gleichen Voraussetzungen für die erfolgreiche Markteinführung von Oberleitungs-Lkw wie von anderen Lkw mit alternativen Antrieben:

1. Ein für die Lkw-Betreiber wirtschaftlicher Fahrzeugbetrieb.
2. Die verlässliche Errichtung und Vorfinanzierung einer Basis-Infrastruktur.
3. Ein attraktives Fahrzeugangebot durch die Hersteller.

Die erste Voraussetzung kann durch bereits bestehende Anreize, insbesondere Kaufprämien und Mautbefreiung für elektrische Lkw, gegenwärtig als weitgehend erfüllt angesehen werden. Eine Investitionsentscheidung erfordert allerdings auch langfristige Planungssicherheit. Fällt eine politische Entscheidung für die Einführung von Oberleitungs-Lkw in Deutschland, so sollte der Fokus daher auf den Punkten 2 und 3 liegen.

In der frühen Marktphase erfordert der Infrastrukturaufbau eine staatliche Koordinierung und Vorfinanzierung. Hier sind geeignete Optionen zur Finanzierung weiter zu prüfen und ein geplantes Vorgehen zwischen Politik und Industrie zu diskutieren. Mittelfristig kann die Oberleitungs-Infrastruktur auch ohne die derzeit bestehenden Vergünstigungen für Elektro-Lkw durch ihre Nutzer finanziert werden, ohne die Wirtschaftlichkeit von Oberleitungs-Lkw zu gefährden.

Um für Oberleitungs-Lkw-Betreiber wirtschaftliche Planbarkeit zu schaffen und die Förderkosten des Staats mittelfristig zu begrenzen, eignet sich insbesondere eine CO₂-basierte Mautspreizung. So kann ein hoher elektrischer Fahranteil frühzeitig garantiert und gleichzeitig Mitnahmeeffekte vermieden werden. Eine direkte Fahrzeugförderung sollte hingegen auf die Markteintrittsphase limitiert bleiben. Ein Markt für Oberleitungs-Lkw kann nur entstehen, wenn Lkw-Hersteller ein ausreichendes Fahrzeugangebot bereitstellen. Neben dem Angebot von Oberleitungs-Lkw-Neufahrzeugen sind dabei auch Nachrüstlösungen für Lkw mit elektrischem Antriebsstrang denkbar. In beiden Fällen brauchen Hersteller ein planbares Marktumfeld, das neben finanzieller Förderung für die Nutzer vor allem einen planbaren Ausbaupfad für die Infrastruktur einschließt.

Parallel ist die frühzeitige internationale Kooperation angesichts des hohen Anteils grenzüberschreitenden Verkehrs von hoher Bedeutung. Eine erfolgreiche Umsetzung erfordert daher eine Koordinierung auf europäischer Ebene, bspw. im Rahmen der Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID). Perspektivisch zeichnen sich zudem Synergien zwischen batterieelektrischen Lkw und der Oberleitungstechnologie ab, die näher untersucht werden sollten. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge könnten prinzipiell mit Pantographen ausgestattet werden und so die Vorteile der direkten Stromübertragung (hohe Energieeffizienz und geringe Energiekosten) auf Oberleitungsstrecken nutzen.

2 Einleitung und Motivation

Das Wichtigste in Kürze:

- Das Klimaschutzgesetz erfordert eine erhebliche Senkung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen bis 2030. Zur Erfüllung des Pariser Klimaschutzabkommens und des Klimaschutzplanes der Bundesregierung muss der Straßenverkehr bis zur Mitte des Jahrhunderts CO₂-neutral sein.
- Der schwere Straßengüterverkehr hat einen Anteil von circa einem Viertel an den Emissionen des Straßenverkehrs. Oberleitungs-Lkw können zur Senkung der Emissionen beitragen.
- Technisch ist der Aufbau der Oberleitungs-Infrastruktur machbar. Er braucht aber wie bei allen Infrastrukturen für alternative Antriebe Zeit.

Laut Klimaschutzgesetz müssen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 auf 95 Mio. Tonnen CO₂/a sinken. Eine Verringerung um 40 bis 42 Prozent im Vergleich zu 1990. Bis 2050 ist angesichts der Ziele von Paris eine praktisch vollständige Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs notwendig. Der derzeitige Trend zeigt jedoch in eine andere Richtung: In den letzten Jahren sind die CO₂-Emissionen des Verkehrs durch Zunahme der Fahrleistungen wieder angestiegen und lagen im Jahr 2017 bei mehr als 184 Mio. Tonnen CO₂/a. Davon werden knapp 43 Mio. Tonnen CO₂/a von schweren Nutzfahrzeugen (Lkw >12 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht (zGG)) verursacht – mit steigender Tendenz (TREMODO 6.03).

Der notwendige Beitrag von Lastkraftwagen (Lkw) zur Einsparung von CO₂-Emissionen und damit zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele ist von entscheidender Bedeutung. Der Lkw-Verkehr stellt heute einen Anteil von 73 % an der Transportleistung im deutschen Güterverkehr dar und für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg des Lkw-Verkehrs prognostiziert (BMUB 2016). Ohne eine Verbesserung der Auslastung und Effizienzsteigerung der Fahrzeuge würden die CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs demnach bis zum Jahr 2030 um weitere ca. 10 Mio. Tonnen CO₂ ansteigen – dann wäre das Klimaschutzziel im Verkehr kaum noch erreichbar (UBA; BMU 2018). Selbst unter Ausnutzung aller Verlagerungspotenziale auf Schiene und Schiff sind dringend Alternativen erforderlich, die einen klimaneutralen Güterverkehr auf der Straße ermöglichen (Wietschel et al., 2017). Darüber hinaus sieht das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung vor, dass bis 2030 ein Drittel des schweren Straßengüterverkehrs elektrifiziert wird. Hier können Oberleitungs-Lkw einen relevanten Beitrag leisten. Eine Besonderheit des schweren Straßengüterverkehrs ist, dass nur ca. 300.000 schwere Lkw (über 26 Tonnen zGG) für über die Hälfte der Emissionen des Straßengüterverkehrs verantwortlich sind und für circa ein Viertel des gesamten Straßenverkehrs (EC 2018). Es müssten für ein großes Minderungspotential also nur wenige Fahrzeuge umgerüstet werden. Die 2019 beschlossenen CO₂-Flottengrenzwerte für in Europa verkaufte Lkw stellen eine zusätzliche Motivation für elektrifizierte Antriebe dar, da Batterie-Oberleitungs- und Batterie-Lkw mit 0 g CO₂ angerechnet werden. Aufgrund der drohenden Strafzahlungen bei Zielverfehlung für Hersteller oder für die Bundesregierung im Rahmen der Europäischen Klimaschutzverordnung (auch Zielverteilungsverordnung oder Effort-Sharing-Regulation genannt) ist eine Reduktion der Emissionen auch bei Lkw erforderlich.

Es liegen inzwischen erste Erfahrungen aus Feldversuchen zu Oberleitungs-Lkw aus mehreren Ländern sowie eine Reihe von Studien mit Fokus auf Deutschland vor. Dies sind insbesondere die ENUBA-Studien und Ergebnisse der aktuellen Feldversuche in Deutschland sowie der drei großen Machbarkeits- und Übersichtstudien:

1. Machbarkeitsstudie im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung: Wietschel et al. (2017).
2. Berichte zum StratON-Projekt: Hacker et al. (2020) sowie Kühnel et al. (2018).
3. Berichte zum Projekt Roadmap OH-Lkw: Jöhrens et al. (2017 und 2020).

Ziel dieses Beitrages ist es daher, eine Synthese des aktuellen System-Wissens zu Oberleitungs-Lkw aus mehreren Einzelstudien zu erstellen. Der Schwerpunkt dieser Synthese liegt dabei auf den drei großen Systemstudien, die Feldversuche werden nur am Rande diskutiert. Eine umfangreiche Synthese der Feldversuche ist erst sinnvoll, wenn diese lange laufen oder bereits abgeschlossen sind. Diese Synthese wird zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen des BMU-Vorhaben BOLD erfolgen. Der Oberleitungs-Lkw wird im Folgenden als eine der möglichen Handlungsoptionen zur Emissionsreduktion in Güterfernverkehr betrachtet und mögliche nächste Schritte werden aufgezeigt.

3 Idee und Status quo Oberleitungs-Lkw

Das Wichtigste in Kürze:

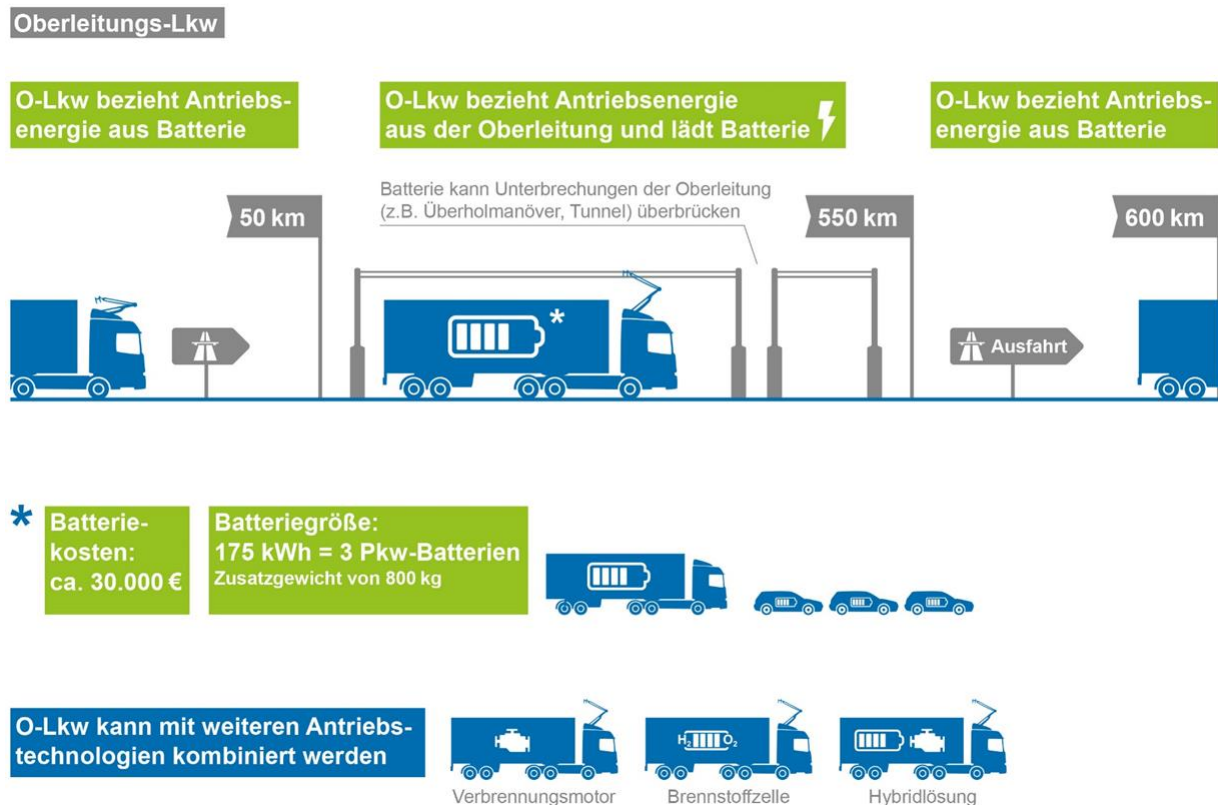
- Ein Oberleitungs-Lkw ist ein Lkw, der über einen Elektromotor angetrieben wird und die Antriebsenergie aus einer stromführenden Oberleitung erhält. Für Fahrten abseits der Oberleitung kann eine Batterie, eine Brennstoffzelle oder ein zusätzlicher Dieselmotor mitgeführt werden.
- In Deutschland fahren Oberleitungs-Lkw derzeit in zwei Feldversuchen auf öffentlichen Straßen, eine dritte Strecke ist derzeit im Bau. Im Ausland existieren weitere Feldversuche.
- Technisch ist der Aufbau der Oberleitungs-Infrastruktur machbar. Er braucht aber wie bei allen Infrastrukturen für alternative Antriebe Zeit.

Grundidee Oberleitungs-Lkw

Ein Oberleitungs-Lkw ist ein Lkw, der über einen Elektromotor angetrieben wird und die Antriebsenergie aus einer stromführenden Oberleitung erhält. Für Fahrten auf Strecken abseits der Oberleitung sind zwei Varianten möglich. Zum einen kann der Oberleitungs-Lkw eine Batterie als Energiespeicher mitführen, so dass Fahrten von einigen hundert Kilometern ohne Oberleitung möglich sind. Dies wäre ein reines Batteriefahrzeug, ein O-BEV (BEV - *Battery electric vehicle*). Die Batterie könnte sowohl während der Fahrt unter der Oberleitung als auch in einem Depot nachgeladen werden. Zum anderen könnte der Oberleitungs-Lkw einen zusätzlichen Verbrennungsmotor mitführen, der auf Strecken ohne Oberleitung für den Antrieb sorgt. Dies wäre ein Hybrid-Oberleitungs-Lkw (O-HEV - *Hybrid electric vehicle*) analog zu einem Plug-in-Hybrid-Fahrzeug bei Pkw. Beide Varianten sind derzeit in der Diskussion und von einzelnen Lkw-Herstellern für die Kleinserien-Produktion geplant. Bei begrenzter elektrischer Reichweite jenseits der elektrifizierten Strecken, kann die Größe und das Gewicht der Batterie stark limitiert werden (vgl. Abbildung 1). Prinzipiell eignen sich perspektivisch auch andere Konzepte, wie beispielsweise die Brennstoffzelle, als ergänzendes Antriebssystem

Entscheidend für einen Einsatz von Oberleitungs-Lkw ist der Aufbau von Oberleitungsinfrastruktur an Straßen. Diese müsste für die Einführung und den sinnvollen Einsatz von Oberleitungs-Lkw in nennenswertem Umfang aufgebaut werden. Damit möglichst viele Fahrzeuge diese Infrastruktur nutzen können, sollte die Oberleitung an stark befahrenen Straßen, d.h. vor allem auf Autobahnen errichtet werden.

Ein wichtiger Vorteil von Oberleitungs-Lkw ist der hohe Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes verbunden mit einer zentralen Infrastruktur, die langfristig hoch ausgelastet wäre. Zentrale Herausforderung eines Oberleitungs-Systems ist aber der notwendige Aufbau der Oberleitungs-Infrastruktur. Der hohe Wirkungsgrad im Betrieb impliziert, dass sehr viel weniger Energie für den Lkw-Verkehr bereitgestellt werden muss, als es heute der Fall ist. Zudem sind die Betriebskosten bei elektrischen Antrieben deutlich unter denen von verbrennungsmotorischen Systemen.

Abbildung 1: Prinzip des Oberleitungs-Lkw

Quelle: Öko-Institut 2020

Stand der Umsetzung und Praxiserfahrung

Auf drei öffentlichen Straßen in Deutschland existiert eine Oberleitungs-Infrastruktur für Lkw bereits oder ist derzeit im Bau. Die entsprechenden Feldversuche sind an der Bundesautobahn A1 in Schleswig-Holstein (Projekt FESH <https://www.ehighway-sh.de/de/>), an der Bundesautobahn A5 zwischen Darmstadt und Frankfurt (Projekt ELISA <https://ehighway.hessen.de/>) sowie an der B462 bei Gaggenau in Baden-Württemberg (Projekt eWayBW <https://ewaybw.de/html/content/ewaybw.html>) vorgesehen. Auf allen drei Strecken werden mehrere Kilometer Oberleitung errichtet und Oberleitungs-Lkw im Realbetrieb erprobt. In allen drei Projekten werden Logistikunternehmen die neuartigen Fahrzeuge im tatsächlichen täglichen Einsatz nutzen.¹

In den Feldversuchen werden Erfahrungen zur technischen Machbarkeit und Umsetzung, aber auch zu rechtlichen und organisatorischen Fragen gesammelt. Ziel ist dabei auch, Erfahrungen in der Genehmigung, der Planung, Bürgerbeteiligung und dem praktischen Aufbau zu sammeln. Prinzipiell sind Masten mit stromführenden Oberleitungen seit vielen Jahren aus dem Schienenverkehr bekannt, allerdings ergeben sich durch den Bau entlang von Straßen und den anderen zugrundeliegenden Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Genehmigung doch Änderungen. Derzeit werden auch Erfahrungen zum eigentlichen Betrieb, hinsichtlich Sicherheit oder auch Reparatur gesammelt. Mit den derzeitigen Feldversuchen und Fahrzeugen steht man kurz vor der Schwelle zu einer breiteren Umsetzung.

Bei allen Testversuchen wurde eine Stakeholder-Beteiligung durchgeführt. Dazu gehören die Gemeinden, der Netzbetreiber, die Straßenbehörden, die Naturschutzabteilungen, die Polizei, die Feuerwehr und das Militär (Kampfmittelräumung). Während einige Herausforderungen im Planungsprozess aufgetreten sind, wurde die Zusammenarbeit im Allgemeinen als positiv erlebt. Die Bedenken der Bürger wur-

¹ Für eine Übersicht früherer Teststrecken und Feldversuche, vgl. Gnann (2018).

den vor allem im Hinblick auf Verkehrsstaus im Bauprozess geäußert, haben aber mit der Inbetriebnahme abgenommen. Auch mehrere große Logistikunternehmen haben ein Interesse an der Erprobung der neuen Technologie gezeigt. In einem Fall hat ein Logistikunternehmen sogar den Feldversuch initiiert. Daraus lässt sich schließen, dass eine ausreichende Anzahl von Logistikunternehmen für die Oberleitungs-Lkw-Technologie offen und bereit zu sein scheint, sich an den Testversuchen zu beteiligen.

Mögliche Ausbaugeschwindigkeit und Hürden

Die Genehmigung und der Aufbau für eine Oberleitungs-Infrastruktur über mehrere hundert Kilometer erfordern wie bei anderen Infrastrukturen für alternative Antriebe auch mehrere Jahre, wäre aber schneller als der Ausbau vergleichbarer Streckenkilometer im Bahnbereich. Ein Vorteil beim Aufbau entlang von Bundesautobahnen ist, dass diese bereits im Besitz des Bundes sind und kein zeitaufwändiger Erwerb von Konzessionen notwendig ist, der Bau kann nach Planung inkl. Planfeststellungsverfahren und Genehmigung direkt erfolgen. Aus technischer Sicht sind Oberleitungen auf Brücken und in Tunneln schwierig zu realisieren, da wenig Platz für die Masten besteht. Allerdings machen diese in der Regel nur wenige Prozent der Autobahn-Kilometer in Deutschland aus und könnten auch ausgespart werden, da alle Oberleitungs-Lkw nennenswerte Strecke ohne Oberleitung fahren können.

Der Anschluss eines Oberleitungsnetzes für Lkw an das existierende Energiesystem würde vmtl. über das Mittelspannungsnetz erfolgen. Wie weit entsprechende Zugänge zur Mittelspannung von den Autobahnen entfernt sind und welcher Aufwand mit einem Anschluss von längeren Streckenabschnitten verbunden wäre ist noch Gegenstand laufender Forschungsprojekte. Alternativ könnte auch entlang der Strecken ein eigenes Mittelspannungsnetz aufgebaut werden. Am Ende der derzeit laufenden Feldversuche wird dies voraussichtlich geklärt sein.

4 Wirtschaftlichkeit von Oberleitungs-Lkw

Das Wichtigste in Kürze:

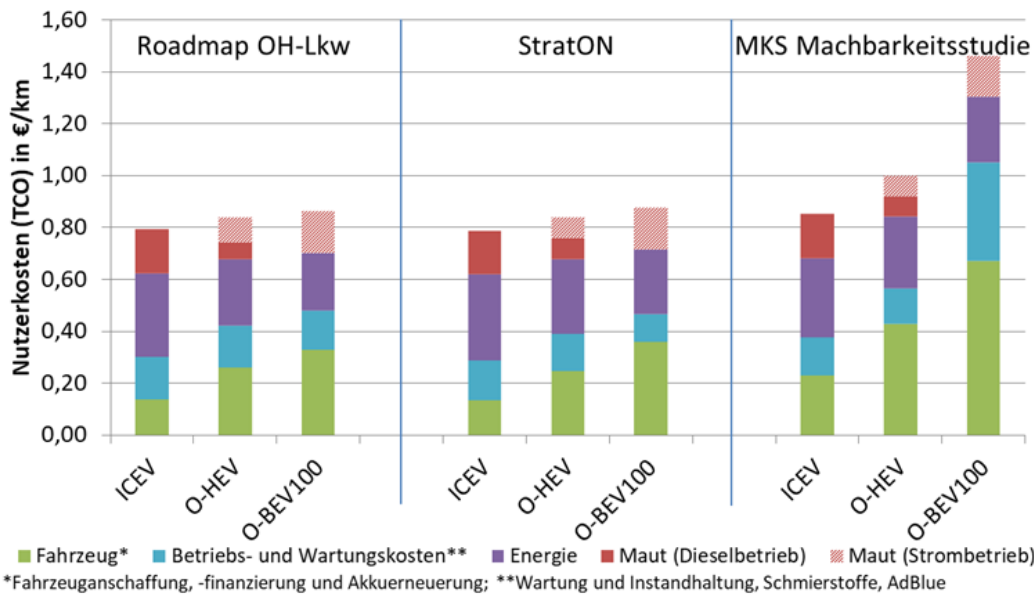
- Gegenwärtig liegen die Vollkosten für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw – wie auch bei anderen alternativen Antrieben – ohne Infrastrukturkosten etwas höher als bei Diesel-Lkw. Gelingt der Eintritt in den Massenmarkt, so sind deutliche Kosteneinsparungen gegenüber Diesel-Lkw zu erwarten.
- Der Aufbau eines Oberleitungsbasisnetzes von etwa 4.000 km auf den stark befahrenen deutschen Autobahnen würde Investitionen von etwa 10 Mrd. Euro über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren erforderlich machen. Ein Teil der Einnahmen aus einer CO₂-basierten Lkw-Maut würde ausreichen, um diese Investitionen zu finanzieren.
- Im Hinblick auf die Gesamtkosten für Staat und Fahrzeugbetreiber hat das Oberleitungs-Lkw-System im Jahr 2030 leichte Vorteile gegenüber dem Einsatz strombasierter Flüssigkraftstoffe zur CO₂-Reduktion. Dieser Vorteil wird in den Folgejahren größer.

Die Wirtschaftlichkeit von Oberleitungs-Lkw betrifft das Verhältnis von Kosten und Nutzen aus verschiedenen Perspektiven bzw. für verschiedene Akteure. In diesem Kapitel werden die Kosten aus Sicht der Lkw-Betreiber (Abschnitt 4.1), die Infrastrukturkosten (Abschnitt 0) sowie die Kostenbilanz unter Berücksichtigung beider vorgenannter Aspekte (Abschnitt 4.3) betrachtet.

4.1 Kosten aus Sicht der Lkw-Betreiber

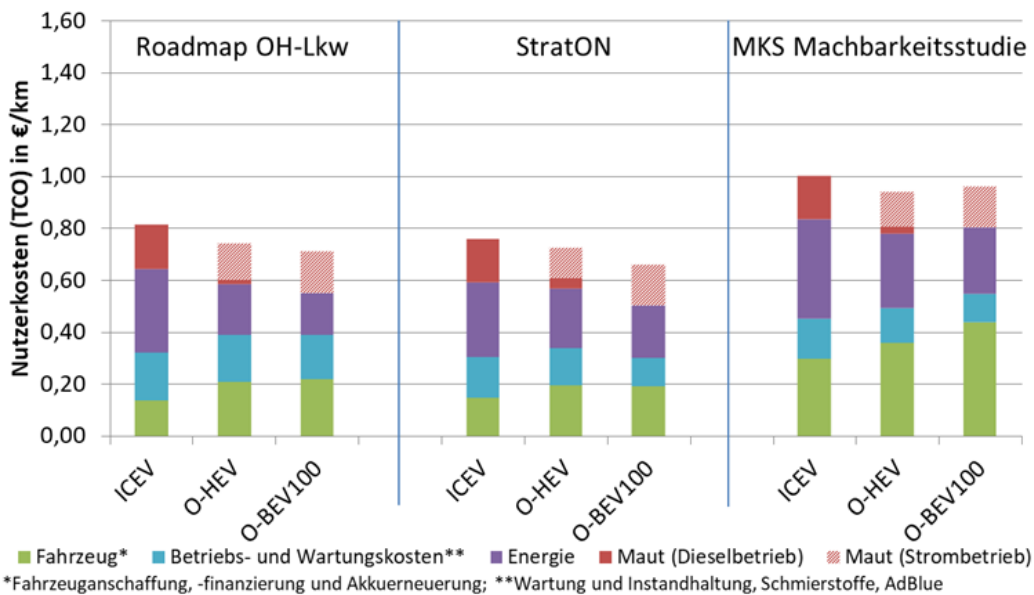
Im Folgenden wird lediglich auf die Differenzkosten zwischen Oberleitungs-Lkw verschiedener Konfiguration und konventionellen Diesel-Lkw eingegangen. Betrachtet werden Vollkosten aus Sicht der Lkw-Betreiber (Total Cost of Ownership, TCO) für Diesel-Lkw (ICEV), Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-HEV) sowie rein elektrische Oberleitungs-Lkw, deren Traktionsbatterie abseits der Oberleitung eine Reichweite von etwa 100 km ermöglicht (O-BEV100). Wesentliche differierende Kostenbestandteile sind der Wertverlust des Fahrzeugs, die Energiekosten und (abhängig von den gesetzlichen Rahmenbedingungen) die Mautausgaben. In verschiedenen Studien wurden dafür die in Abbildung 2 dargestellten Werte für den Beginn einer Oberleitungs-Lkw-Systemeinführung sowie das Szenario-Jahr 2030 ermittelt, in dem die Studien die Existenz einer Oberleitungsinfrastruktur auf den Hauptachsen sowie eines Massenmarktes für Oberleitungs-Lkw annehmen. Die gezeigten Werte enthalten keine Kosten für den Aufbau der Infrastruktur, sondern nur die Kosten für die Anschaffung und den Betrieb der Fahrzeuge. Die Wirtschaftlichkeit aus Betreibersicht spielt eine zentrale Rolle bei der Modellierung des Markthochlaufs (siehe Kapitel 6).

Abbildung 2: Nutzerkosten von Diesel-Lkw und Oberleitungs-Lkw zu Beginn der Oberleitungs-Lkw-Einführung².



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3: Nutzerkosten für Diesel-Lkw und Oberleitungs-Lkw (Bezugsjahr 2030)



Quelle: Eigene Darstellung

² Für StratOn sowie die MKS-Studie ist das Bezugsjahr 2015 dargestellt, für Roadmap OH-Lkw das Bezugsjahr 2020. Die Fahrzeugmehrkosten von O-Lkw als wesentliche differierende Kostenkomponente sind jedoch in hohem Maße von der produzierten Stückzahl und erst in zweiter Linie von den äußeren Rahmenbedingungen abhängig, weswegen hier der angenommene Beginn der Systemeinführung in den Studien als Vergleichszeitpunkt gewählt wird. In der Darstellung sind ausschließlich Kostenbestandteile aufgeführt, bei denen ein Zusammenhang mit dem Antriebssystem besteht. Der angenommene elektrische Fahranteil bei den O-HEV beträgt 55 % bei Roadmap OH-Lkw und der MKS-Studie sowie 50 % bei StratOn. Zu beachten ist, dass Kosten aus dem notwendigen Ersatz der Traktionsbatterie während der Lebensdauer des Fahrzeugs in der MKS-Machbarkeitsstudie den Betriebs- und Wartungskosten zugerechnet werden, während sie bei den anderen Studien unter die Fahrzeugkosten fallen.

Die betrachteten Studien kommen zu deutlich verschiedenen absoluten Kosten, was primär auf differierende Abgrenzungen bei den Kostenpositionen zurückgeht.³ Bezüglich der Tendenzen im Vergleich der Antriebe für das jeweilige Betrachtungsjahr gibt es jedoch deutliche Parallelen:

- Gegenwärtig liegen die Vollkosten für Oberleitungs-Lkw in den meisten Fällen etwas über den Kosten von Diesel-Lkw. Nur bei besonders geeigneten Einsatzprofilen (sehr hoher Fahranteil unter Oberleitung) lässt sich bereits heute ein Gesamtkostenvorteil erzielen. Die Unterschiede bei den Kosten des O-BEV sind primär durch differierende Annahmen zu den Batteriekosten bedingt.
- Für das Jahr 2030 zeigen sich durchgehend Kostenvorteile für Oberleitungs-Lkw, insbesondere für O-BEV. Hier kommen vor allem ein für Oberleitungs-Lkw vorteilhafteres Verhältnis der Diesel- und Stromkosten sowie geringere Kosten für den elektrischen Antrieb zum Tragen.

Kostenannahmen zu Technologien, die sich noch im Prototypenstadium befinden, sind grundsätzlich mit größeren Unsicherheiten verbunden. Produktions- und Entwicklungskosten sind ein Geschäftsgeheimnis der Fahrzeughersteller und können nur grob geschätzt werden. Zudem ist die Preisgestaltung der Hersteller für neu in den Markt eingeführte Technologien von diversen strategischen Faktoren bestimmt, wie beispielsweise gesetzlichen Anforderungen (CO₂-Flottengrenzwerte für Nutzfahrzeuge ab 2025) und Fördermaßnahmen (z.B. Kaufprämien).

Allen ausgewerteten Quellen ist gemein, dass auch im Jahr 2030 gegenüber der Diesel-Referenz noch signifikant erhöhte Anschaffungsausgaben für Oberleitungs-Lkw gesehen werden, während die Betriebskosten bedingt durch geringere Energiekosten niedriger liegen. Daraus ergibt sich eine gewisse Mindestfahrleistung unter der Oberleitung (bzw. im elektrischen Betrieb im Falle von O-BEV), die für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendig ist. Die nachfolgende Abbildung stellt die sich nach den verschiedenen Untersuchungen ergebenden Break-even-Distanzen für O-HEV gegenüber.

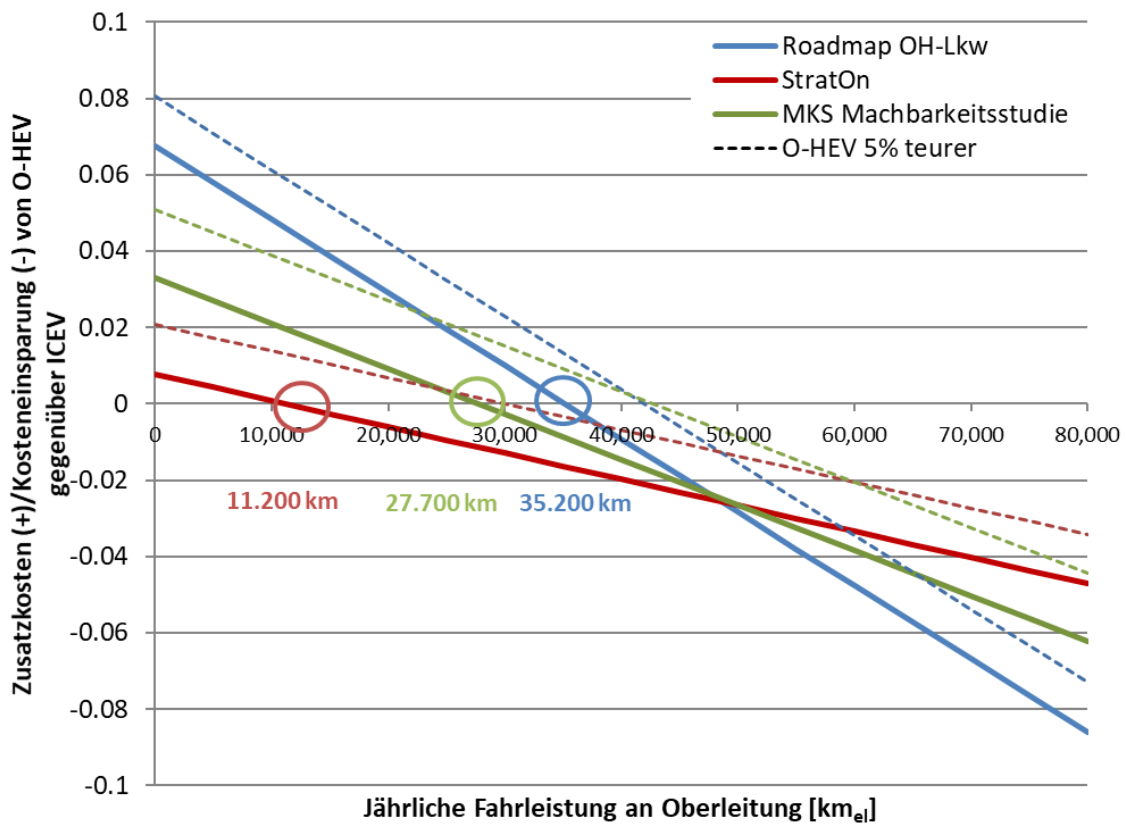
Aus den in den verschiedenen Studien angenommenen fixen und variablen Kostenbestandteilen lässt sich jeweils die wirtschaftliche Break-even-Distanz berechnen, also die Fahrleistung, die ein Oberleitungs-Hybrid-Lkw mindestens unter Oberleitung zurücklegen muss, um gegenüber dem Diesel-Lkw einen wirtschaftlichen Vorteil zu erreichen (Abbildung 4). Im Projekt "Roadmap OH-Lkw" wurde für das Jahr 2030 ein Break-even von jährlich etwa 35.000 km unter Oberleitung ermittelt, das entspricht etwa einem Drittel der Jahresfahrleistung einer durchschnittlichen Sattelzugmaschine in Deutschland. Bei den anderen Untersuchungen stellt sich die Wirtschaftlichkeit bereits früher ein.

Die Spannbreite bei den Break-even-Distanzen zwischen den Studien erklärt sich dadurch, dass die absoluten Kostenunterschiede zwischen den Antrieben vergleichsweise gering sind (siehe Abbildung 3). Somit können bereits kleine Unterschiede bei den Annahmen zu den Energiekosten die Break-Even-Distanz deutlich verschieben. Die Größenordnung erweist sich dabei jedoch als robust. Auch eine Erhöhung der in den Studien angenommenen Fahrzeugkosten für O-HEV um jeweils 5 % (gestrichelte Linien in Abbildung 4) verändert den Befund nicht grundlegend.

Wie Abbildung 2 und Abbildung 3 zu entnehmen ist, hängen die TCO stark von der Konfiguration des Fahrzeugs als O-HEV oder O-BEV sowie von der Batteriegröße ab. Durch die Annahme weiter fallender Batteriepreise in allen hier betrachteten Untersuchungen gewinnen O-BEV gegenüber O-HEV im Laufe der Zeit an Attraktivität. Gleichzeitig nehmen jedoch bei einer breiten Markteinführung und begrenztem Oberleitungsnetz auch die mittleren Entfernungen zu, die Oberleitungs-Lkw abseits der Oberleitungen zurücklegen müssen, da dann auch etwas weniger geeignete Fahrprofile in das System einbezogen werden. Die Folge ist ein höherer Reichweitenbedarf bei O-BEV und somit höhere Kosten. Hierfür spielt allerdings auch eine Rolle, ob die Traktionsbatterien stationär am Zielort geladen werden können oder lediglich unter Oberleitung. Aus den bisherigen Untersuchungen lässt sich noch keine klare Tendenz ableiten, welche Oberleitungs-Lkw-Konfiguration künftig aus Kostensicht überlegen sein wird.

³ Der Fokus lag in allen Fällen auf den Differenzkosten zwischen verschiedenen Antrieben, weshalb nur prinzipiell differierende Kostenbestandteile betrachtet wurden.

Abbildung 4: Kostendifferenz von O-HEV zu Diesel-Lkw in Abhängigkeit der Fahrleistung unter Oberleitung (Bezugsjahr 2030)



Quelle: Eigene Darstellung

Eine zentrale Rolle hinsichtlich der zukünftigen TCO von elektrischen und Verbrennungsantrieben kommt den Energiekosten zu. Aufgrund der hohen Effizienz des elektrischen Antriebs liegen die Energiekosten für Oberleitungs-Lkw unter denen von Diesel-Lkw trotz eines im Vergleich zu Diesel pro Kilowattstunde deutlich höheren Strompreises. Mittel- bis langfristig ist aus Klimaschutzgründen davon auszugehen, dass weite Teile des Energiebedarfs im Straßenverkehr auf Basis erneuerbaren Stroms gedeckt werden müssen. Dies bedeutet auch einen signifikanten Anteil von PtL-Kraftstoff am Dieserverbrauch. Aufgrund der geringen Energieeffizienz der PtL-Gewinnung ist dadurch ein weiterer Energiekostenanstieg beim Dieselantrieb zu erwarten.

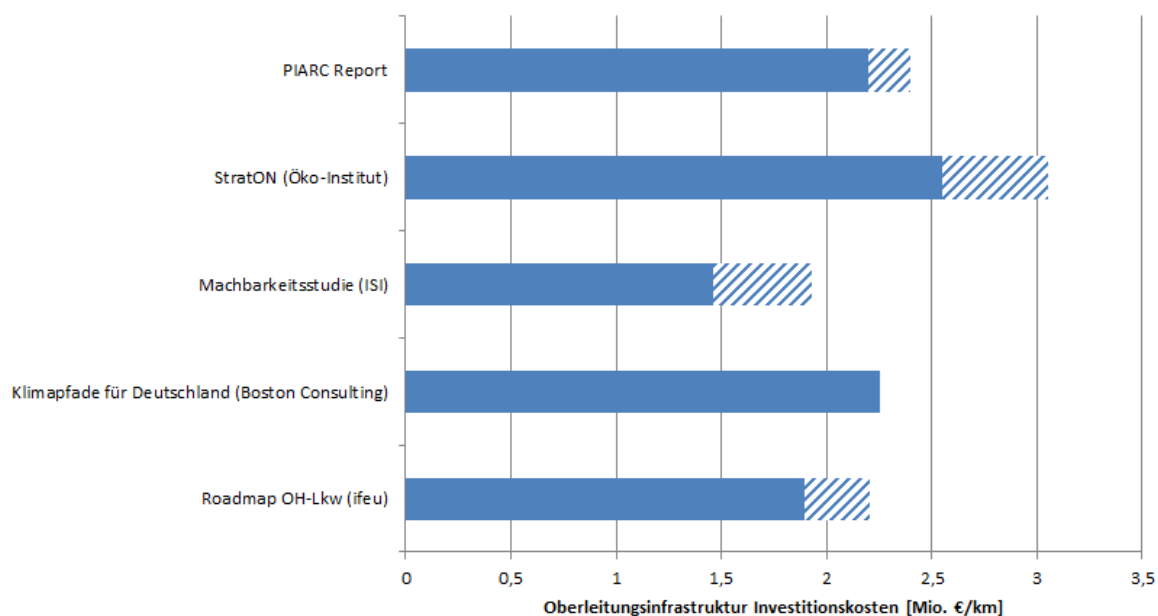
Generell ist zu berücksichtigen, dass die TCO kein alleiniges Entscheidungskriterium für die Technologiewahl der Fahrzeugbetreiber darstellen (siehe auch Jöhrens et al. 2018). Durch die hohe Risikoaversion vieler Fahrzeugbetreiber ist damit zu rechnen, dass für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw ein gewisser finanzieller Mindestvorteil erwartet wird. Steigt allerdings die Nachfrage nach „Grüner Logistik“, könnten Transporte mit Oberleitungs-Lkw durch Verlagerer finanziell honoriert werden. In der Praxis sind also prinzipiell Abweichungen von einer rein TCO-basierten Entscheidung in beide Richtungen denkbar.

4.2 Infrastrukturkosten

Die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw besteht aus einer zweipoligen Oberleitung mit dem zugehörigen Kettenwerk und Masten, den Einspeisestationen (sog. Unterwerken) sowie der Anbindung der Unterwerke an das Stromnetz. In verschiedenen Studien wurden Abschätzungen der Infrastrukturkosten pro elektrifizierter Strecke in beide Fahrrichtungen durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 5 zusammengefasst und gelten jeweils für ein ausgebautes Netz mit entsprechend hoher Befahrungstärke. In (Wietschel et al. 2017) wurde eine detaillierte Bottom-up-Betrachtung der einzelnen Systemkomponenten durchgeführt, auf die sich auch (Kühnel et al. 2018) und (Jöhrens et al. 2020) beziehen.

Abbildung 5: Spezifische Infrastrukturkosten für ein Oberleitungssystem

Die sich aus den Studien jeweils ergebende Bandbreite ist schraffiert dargestellt.⁴



Quelle: Eigene Darstellung

Wichtige Einflussfaktoren auf die Kosten sind der Leistungsbedarf pro Kilometer (d.h. wie viele Oberleitungs-Lkw gleichzeitig auf einem Streckenabschnitt versorgt werden können), das Spannungsniveau sowie die gewählte Art der Netzanbindung⁵. In (Kühnel et al. 2018) wurden die spezifischen Infrastrukturkosten für drei verschiedene Ausbaustände eines Oberleitungsnetzes mit jeweils entsprechenden Befahrungstärken quantifiziert. Es zeigt sich, dass die Kosten pro Streckenkilometer bei einem ausgebauten Oberleitungssystem (und entsprechendem Oberleitungs-Lkw-Verkehr) mit knapp 3 Mio. €/km deutlich höher liegen als in der ersten Phase der Systemeinführung (ca. 1,7 Mio. €/km). Zu Beginn der Systemeinführung, wenn noch wenige Fahrzeuge unterwegs sind, kann das Netz also zu vergleichsweise geringen Kosten aufgebaut werden. Später muss es dann ggf. entsprechend der auftretenden Befahrungstärken ertüchtigt werden, kann dann aber auch durch höhere Nutzerzahlen besser refinanziert werden.

Die gesamten Investitionen liegen auf Basis der o.g. Erkenntnisse für ein Netz von 4.000 Kilometern in beide Fahrrichtungen bei etwa 10 Mrd. €.

⁴ Für die Studie „Roadmap OH-Lkw“ beschreibt die angegebene Bandbreite den Unterschied zwischen der Abschreibung zzgl. Instandhaltung und den tatsächlich zu tätigen Investitionen (inkl. Instandhaltung) bis zum Jahr 2030.

⁵ Denkbar sind hier die Anbindung der Unterwerke an vorhandene Mittelspannungsnetze sowie der Bau eigener MS-Netze entlang der elektrifizierten Straße zur Versorgung der Oberleitungsinfrastruktur. Untersuchungen des Fraunhofer IEE im Projekt Roadmap OH-Lkw ergaben, dass letzteres Vorgehen in der Regel wirtschaftlicher ist.

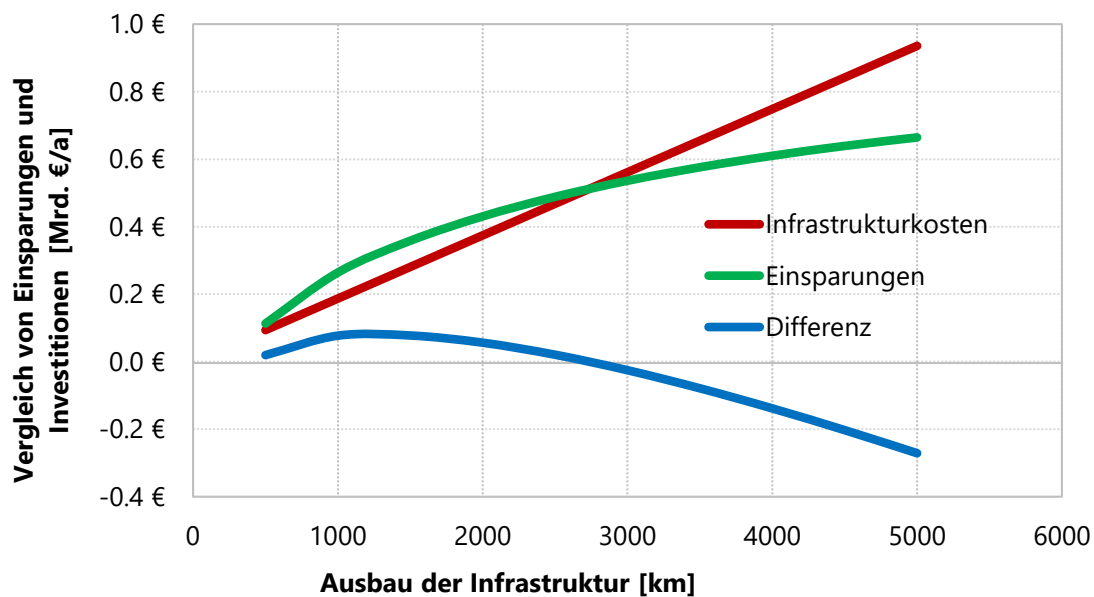
4.3 Wirtschaftliche Tragfähigkeit eines Oberleitungs-Lkw-Systems

Um die Wirtschaftlichkeit von Oberleitungs-Lkw aus Systemsicht zu beurteilen, müssen die Kosten der Fahrzeugbetreiber und der öffentlichen Hand zusammen betrachtet werden. Differenzkosten für Energie und Fahrzeuge sind in den Kosten der Lkw-Betreiber enthalten. Die Infrastrukturkosten können prinzipiell staatlich oder privat vorfinanziert oder direkt durch die Nutzer des Systems finanziert werden. Bei den Kosten für den Staat sind des Weiteren mögliche Änderungen der Energiesteuereinnahmen zu berücksichtigen, die sich aus dem Antriebswechsel ergeben. Je nach Ausgestaltung der Förderkulisse können für den Staat zudem Kosten für die Unterstützung der Markteinführung von Oberleitungs-Lkw anfallen. Darüber hinaus wird die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems prinzipiell auch volkswirtschaftliche Effekte haben (Beschäftigungseffekte, Auswirkungen auf andere Branchen etc.); diese wurden bislang allerdings nicht untersucht.

Mehrere Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass ein Oberleitungs-Lkw-System erst dann aus Systemsicht wirtschaftlich tragfähig sein kann, wenn eine breite Nutzerbasis erreicht ist. Oberleitungs-Lkw-Nutzer in der ersten Phase der Systemeinführung haben zumeist einen relativ geringen Kostenvorteil pro km⁶, dessen Abschöpfung die Ausgaben für Bau und Betrieb der Infrastruktur nicht decken kann. Es ist daher eine Vorfinanzierung des Netzaufbaus erforderlich, die prinzipiell entweder durch den Staat oder durch einen privaten Betreiber erfolgen kann. Im Zuge des Markthochlaufes von Oberleitungs-Lkw erfolgt eine bessere Auslastung der Infrastruktur, die dann pro Fahrzeug geringere Infrastrukturkosten zur Folge hat und mittelfristig die Finanzierung der Infrastruktur durch die Nutzer ermöglicht. Auf längere Sicht kann sich ein Oberleitungssystem somit finanziell selbst tragen.

Da sich ein großer Teil des Straßengüterfernverkehrs in Deutschland auf einem begrenzten Teil des Fernstraßennetzes konzentriert, geht ab einem gewissen Ausbaugrad der Oberleitungsinfrastruktur der zusätzliche Nutzen und damit die Wirtschaftlichkeit des Systems wieder zurück. Die Grenzkosten für einen weiteren Systemausbau werden dann höher (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6 Vergleich von Infrastrukturkosten und Einsparungen durch Oberleitungs-Lkw



Quelle: Wietschel et al. (2017)

⁶ Im Vorhaben "Roadmap OH-Lkw" wurde dieser Vorteil für einen Zeitpunkt 6 Jahre nach Beginn der Systemeinführung quantifiziert. Demnach bieten etwa 80 % der Oberleitungs-Lkw, die zu diesem Zeitpunkt wirtschaftlich betrieben werden können, einen Kostenvorteil von unter 4 ct/km.

Zur Finanzierung der Infrastruktur sind verschiedene Modelle denkbar und werden derzeit in weiteren Forschungsvorhaben untersucht (vgl. z.B. AMELIE-RED; Hartwig et al. 2019). Grundsätzlich ist dabei zunächst zu klären, welche Teile der Oberleitungsinfrastruktur als Teil des Stromnetzes betrachtet werden (und somit durch Netzentgelte finanziert werden können) und welche Teile der Fernstraßeninfrastruktur angehören, die in Deutschland zu wesentlichen Teilen über die Lkw-Maut finanziert wird. Unter der Annahme, dass die Finanzierung der Oberleitungsinfrastruktur komplett über die Lkw-Maut erfolgt, müsste der jährliche Beitrag aus den Mauteinnahmen sowohl die Abschreibung der Investitionen in die Oberleitungsinfrastruktur als auch deren Betriebs- und Wartungskosten decken. Bei einem Oberleitungsnetz von 3.200 km Länge, wie in "Roadmap OH-Lkw" angenommen, würden sich die jährlichen Kosten auf etwa 600 Mio. Euro belaufen. Das ergibt (bei der derzeitigen Gesamtfahrleistung mautpflichtiger Lkw in Deutschland) einen Beitrag von 0,0145 €/km für die Oberleitungsinfrastruktur, wenn die Kosten auf alle Mautzahler umgelegt würden. Dies entspricht etwa 8 % des derzeitigen Mautsatzes für eine Euro-VI-Sattelzugmaschine.

Neben den zwei oben skizzierten grundlegenden Finanzierungsansätzen sind diverse Mischformen und weitere Finanzierungskomponenten denkbar. Beispielsweise könnte ein Mautaufschlag für die Infrastrukturfinanzierung nur für Oberleitungs-Lkw erhoben werden oder bei der Bepreisung des Stroms für Oberleitungs-Lkw könnte eine Infrastrukturkomponente integriert werden.

Da Oberleitungs-Lkw eng mit der Erreichung politischer Klimaschutzziele verbunden sind, bietet sich zur Finanzierung eine Verzahnung mit bestehenden oder zukünftigen Klimaschutzinstrumenten an, beispielsweise einer CO₂-abhängigen Spreizung der Lkw-Maut. Den Berechnungen im Projekt StratON zufolge würde ein CO₂-Aufschlag von 80 €/Tonne zu jährlichen Mehreinnahmen von ca. 2 Mrd. Euro führen. Dies würde die für einen Oberleitungsinfrastrukturaufbau benötigten Mittel deutlich übersteigen. Eine CO₂-abhängige Mautkomponente wird zukünftig voraussichtlich aufgrund der in Verhandlung befindlichen Novelle der Eurovigniettenrichtlinie zulässig sein. Zu prüfen wäre, inwieweit resultierende Einnahmen zur Finanzierung von antriebspezifischer Verkehrsinfrastruktur genutzt werden dürfen.

Zur Dekarbonisierung des schweren Güterverkehrs sind neben elektrischen Antrieben momentan in Deutschland vor allem synthetische Kraftstoffe im Gespräch. Diese könnten dem Dieseldieselkraftstoff beigemischt werden, ohne eine Änderung der Antriebstechnologie erforderlich zu machen. In den zugrundeliegenden Studien wurde u.a. untersucht, wie sich eine Einführung synthetischer Kraftstoffe im Vergleich zu elektrischen Antrieben auf die Systemkosten des Straßengüterverkehrs in Deutschland auswirken würde. Dazu wurden jeweils die Kosten für eine identische CO₂-Minderung zu bestimmten Zeitpunkten durch die verschiedenen Technologien untersucht. Mit Blick auf die mit einem Oberleitungs-Basisnetz elektrifizierbaren Fahrleistungen (die überwiegend auf stark befahrenen Strecken erbracht werden) ergab sich dabei ein deutlicher Kostenvorteil für ein Oberleitungs-Lkw-System. Ein Systemkostenvergleich im Vorhaben "Roadmap OH-Lkw" ergab beispielsweise um gut 10 % niedrigere Kosten eines Oberleitungs-Lkw-Systems (Basisnetz von 3.200 km) im Jahr 2030 gegenüber einer Beimischung von synthetischen Kraftstoffen mit der gleichen WtW-Treibhausgasreduzierung. Im Projekt StratON ergab der Vergleich der kumulierten Gesamtkosten bis zum Jahr 2050 einen Kostenvorteil von etwa 40 % des Oberleitungs-Lkw-Systems gegenüber einer entsprechenden THG-Minderung mittels synthetischer Kraftstoffe. Ein Oberleitungs-Lkw-System lässt somit auch im Umfeld konkurrierender Dekarbonisierungstechnologien eine wirtschaftliche Tragfähigkeit erwarten. Ein Vergleich mit den Gesamtkosten für reine Batterie-Lkw und deren Ladeinfrastruktur steht noch aus.

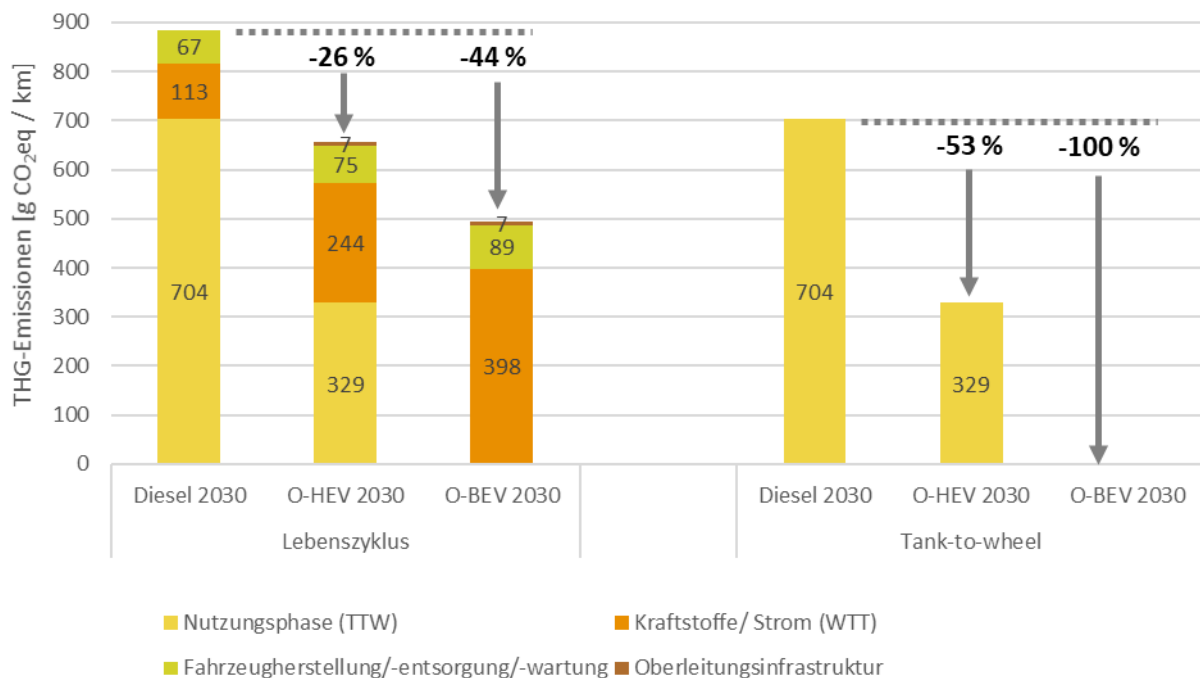
5 Umweltwirkungen von Oberleitungs-Lkw

Das Wichtigste in Kürze:

- Die Nutzungsphase und insbesondere die Emissionen der Stromerzeugung dominieren die Treibhausgasbilanz von Oberleitungs-Lkw. Die Fahrzeugherstellung hat demgegenüber deutlich geringere Bedeutung, der Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur fällt kaum ins Gewicht.
- Diesel-Hybrid-Oberleitungs-Lkw verursachen pro Kilometer unter Verwendung des voraussichtlichen deutschen Strommixes im Jahr 2030 gegenüber Diesel-Lkw ca. ein Viertel weniger CO₂-Emissionen, während Batterie-Hybrid-Oberleitungs-Lkw die CO₂-Emissionen in etwa halbieren.
- Die Emission von Luftschadstoffen ist v.a. in Ballungsgebieten relevant, wo primär rein elektrische Oberleitungs-Lkw für Entlastung sorgen könnten, die auch abseits der Oberleitung batterieelektrisch fahren können. Bei den Abriebemissionen aus Oberleitung und Schleifleiste gibt es noch Forschungsbedarf.

5.1 Spezifisches Treibhausgas-Minderungspotential

Die erforderliche, drastische Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs ist die politische Haupttriebfeder für die Diskussion von Antriebsalternativen im Straßengüterfernverkehr zum etablierten Diesel-Lkw. Der CO₂-Bilanz von Oberleitungs-Lkw kommt somit eine zentrale Bedeutung zu. Im Projekt "Roadmap OH-Lkw" wurden die Treibhausgas-Emissionen pro Fahrzeugkilometer für Sattelzugmaschinen mit verschiedenen Antriebssystemen unter energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Jahres 2030 verglichen (Abbildung 7). In diesem Jahr könnte nach erfolgreicher Systemeinführung ein Oberleitungsbasisnetz etabliert und ein nennenswerter Markthochlauf erreicht sein (siehe Kapitel 6). Die Strombereitstellung für Oberleitungs-Lkw wurde mit etwa 300 gCO₂-Äq/kWh im Jahr 2030 angenommen, was in etwa einer Umsetzung des Kohleausstiegs gemäß dem aktuellen Gesetzentwurf entsprechen würde. Neben der Nutzungsphase wurde auch die Herstellung des Fahrzeugs und der Oberleitungsinfrastruktur sowie die Bereitstellung von Strom und Dieselmotorkraftstoff bilanziert.

Abbildung 7 : Treibhausgasemissionen pro Fahrzeug.-kmVergleich zwischen Diesel, O-HEV und O-BEV⁷ im Bezugsjahr 2030 nach Jöhrens et al. (2020)

Quelle: Eigene Darstellung

Bedingt durch die hohe Fahrleistung von Fern-Lkw wird die THG-Bilanz stark durch die Nutzungsphase inklusive der dafür notwendigen Energiebereitstellung dominiert, die beim Diesel-Lkw etwa 90 % und beim O-BEV-Lkw immer noch 80 % der THG-Emissionen verursacht. Die Fahrzeugherstellung fällt demgegenüber weniger ins Gewicht, die Oberleitungs-Infrastruktur hat einen vernachlässigbar geringen Anteil an der THG-Bilanz⁸. Dies wird auch durch Untersuchungen des Fraunhofer IML im Rahmen der MKS-Machbarkeitsstudie belegt.

In der Gesamtbilanz haben O-HEV im Ergebnis um etwa 26 % niedrigere THG-Emissionen als Diesel-Lkw, O-BEV senken die Emissionen um etwa 44 %. Betrachtet man allein die Emissionen durch Fahrzeugbetrieb und Energievorkette, so werden diese durch den elektrischen Antrieb in etwa halbiert. Bei O-HEV hängt die Gesamtminderung naturgemäß vom Anteil der Fahrleistung unter Oberleitung ab.⁹ Im Projekt StratON wurde ebenfalls die THG-Bilanz ermittelt, dort werden mit etwa 60 % Minderung im Jahr 2030 noch etwas höhere Reduktionen durch O-BEV erwartet.

Die jüngst beschlossenen Ziele des "Green New Deals"¹⁰ könnten demgegenüber auf dem europäischen Strommarkt einen noch deutlich stärkeren Zubau erneuerbarer Stromerzeugung zur Folge haben. Selbst ohne den Kohleausstieg ergäbe sich für Oberleitungs-Lkw im Jahr 2030 immer noch ein THG-Vorteil von etwa 15-20 % gegenüber dem Diesel-Lkw.

⁷ Für den O-BEV-Lkw wurde in den Markthochlaufszszenarien des Projekts Roadmap OH-Lkw eine mittlere Batteriekapazität von 160 kWh ermittelt, was einer Reichweite abseits der Oberleitung von etwa 150 km entspricht; diese wurde in dieser Darstellung zugrunde gelegt.

⁸ Dies gilt für den Fall eines "eingeschwungenen Zustands", also einer guten Auslastung der Infrastruktur. Betrachtet man isoliert Zeiträume während des Infrastrukturaufbaus, so kann der Anteil der Infrastruktur auch etwas höher ausfallen, bleibt aber dennoch in der Gesamtbilanz ein kleinerer Posten.

⁹ Hier wurde der Fahranteil von O-HEV auf dem im Projekt "Roadmap OH-Lkw" definierten Oberleitungsnetz des Jahres 2030 zugrunde gelegt.

¹⁰ Anhebung des EU-weiten Minderungsziels für 2030 auf über 50 % ggü. 1990

5.2 Weitere Umweltwirkungen

Neben den THG-Minderungen sind durch Oberleitungs-Lkw auch Auswirkungen auf weitere Umweltwirkungskategorien sowie den Bedarf an natürlichen Ressourcen zu erwarten. Hierzu liegen bisher nur erste Anhaltspunkte vor, in den Oberleitungs-Lkw Feldversuchen ELISA, FESH sowie eWayBW sowie im übergreifenden Begleitforschungsprojekt BOLD wird dazu aktuell geforscht.

Bei den Stickoxydemissionen wird davon ausgegangen, dass alle (neuzugelassenen) Lkw die Schadstoffnorm Euro VI einhalten. Im Antriebsvergleich zeigen sich daher nur geringe Unterschiede zwischen dem Diesel-Lkw und den Oberleitungsfahrzeugen. Bei den Feinstaubemissionen (PM₁₀) wirken vor allem die aufwändigere Fahrzeugherstellung (etwa 50 % der Gesamtemissionen bei O-BEV150) sowie der fossile Teil der Strombereitstellung (etwa 35 % der Gesamtemissionen bei O-BEV150) als Treiber; auch die Bereitstellung der Infrastruktur spielt hier eine Rolle. In Summe ist derzeit von einer deutlichen Erhöhung der massenbasierten Feinstaubemissionen über den Lebensweg auszugehen. Die Relevanz dieser Tatsache ist jedoch schwer einzuschätzen, da für die Gesundheitsbelastung vor allem die Konzentrationen von PM₁₀ und NO₂ in dicht besiedelten Gebieten sowie die Partikelanzahl maßgeblich sind. Hier können durch Oberleitungs-Lkw aufgrund der Emissionsfreiheit des Antriebs im elektrischen Betrieb voraussichtlich Vorteile erzielt werden. Zu klären ist in diesem Zusammenhang noch der mögliche Einfluss von Abrieb des Fahrdrachts sowie der Schleifleiste des Pantographen auf die Partikelemissionen. Diese Fragestellungen werden im Rahmen der derzeitigen Feldversuche beleuchtet, es liegen allerdings derzeit noch keine Ergebnisse vor.

Mittelfristig ist damit zu rechnen, dass sich die Luftqualitätsproblematik in deutschen Ballungsgebieten insgesamt entspannen wird, insbesondere durch das Ausscheiden älterer Dieselfahrzeuge aus dem Bestand. Um in den kommenden Jahren einen relevanten Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität zu leisten, wäre eine sehr kurzfristige Einführung erforderlich, bei der die Oberleitungs-Lkw auch in den Städten mit Elektroantrieb fahren, z.B. durch eine ausreichende Batteriekapazität.

6 Mögliche Ausbauszenarien und deren Wirkungen

Kurzfassung dieses Kapitels:

- Ein Autobahnkernnetz von etwa 4.000 km ist für den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur besonders geeignet. Über 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf Autobahnen findet auf diesem Netz statt, das lediglich ein Drittel des Gesamtnetzes ausmacht.
- Einzelstrecken mit bedeutenden logistischen Umschlagpunkten an Start- und Endpunkt zeigen besonders hohe Potentiale für eine frühzeitige Elektrifizierung. Vielversprechend sind die Autobahnabschnitte zwischen Hamburg und dem Ruhrgebiet (A1) bzw. Hamburg und Kassel (A7).
- Bis zum Jahr 2030 kann durch Oberleitungs-Lkw ein Anteil von 8 bis 17 % der Fahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen elektrisch erfolgen. Bei vollem Netzausbau ist perspektivisch ein elektrischer Anteil von über einem Drittel möglich.
- Werden die Elektrifizierungspotentiale erschlossen, so können die verkehrsbedingten Emissionen durch Oberleitungs-Lkw bis 2030 um 2 bis 4 Mio. Tonnen CO₂ reduziert werden, bei einem schnellen Netzausbau um bis zu 6 Mio. Tonnen CO₂. Langfristig kann eine Minderung um bis zu 12 Mio. Tonnen CO₂ erzielt werden und die Emissionen des Straßengüterverkehrs um etwa 20 % reduziert werden.
- Der Strombedarf durch Oberleitungs-Lkw ist mit einem Anteil von 4 % am Gesamtstrombedarf im Vergleich zu E-Pkw mit einem Anteil von 14 % von nachrangiger Bedeutung.

6.1 Basisnetz

Der Einsatz von Oberleitungs-Lkw wird insbesondere für den schweren Straßengüterfernverkehr (Lkw >26 t) diskutiert. Eine verfügbare Oberleitungsinfrastruktur ist Grundvoraussetzung für den Einsatz von oberleitungsgebundenen Fern-Lkw. Ein sinnvolles Basisnetz stellt einen Kompromiss zwischen den Kosten für den Ausbau der Infrastruktur und seinem Nutzen hinsichtlich der Elektrifizierung des Verkehrs dar.

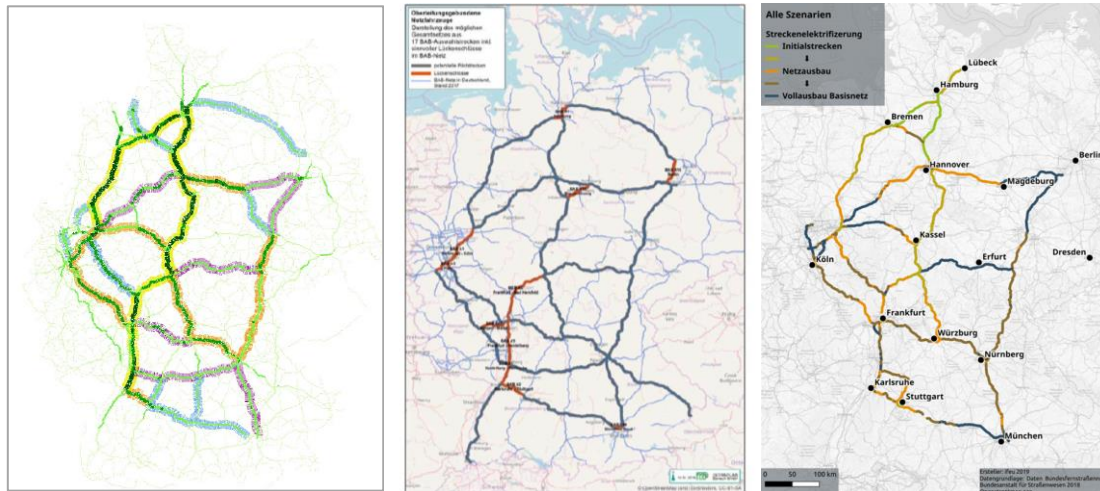
Der schwere Straßengüterverkehr konzentriert sich vorwiegend auf Fernstraßen. Mehr als 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf der Autobahn findet auf einem Kernnetz statt, das rund ein Drittel des deutschen Autobahnnetzes umfasst. Diese etwa 4.000 km Strecke umfassen im Wesentlichen die einstelligen Autobahnen A1 bis A9. Über dieses Kernnetz lassen sich die meisten großen Wirtschaftszentren in Deutschland mit Kantenlängen von ca. 200 bis 250 km untereinander vernetzen. Dennoch unterscheiden sich die einzelnen Streckenzüge teilweise deutlich voneinander, u.a. hinsichtlich der Fahrzeugzahlen, der Homogenität des Verkehrsflusses („Korridorcharakter“) sowie parallellaufender Schienengüterverkehre.

Vor diesem Hintergrund bietet sich im Straßengüterfernverkehr die Möglichkeit mit einer räumlich verhältnismäßig stark konzentrierten Infrastruktur eine große Anzahl an potenziellen Nutzern entlang dieser Korridore zu erreichen und damit perspektivisch eine hohe Infrastrukturauslastung sicherzustellen.

Bereits in frühen Studien (SRU 2012) wurde auf die Bedeutung eines Autobahn-Teilnetzes hingewiesen. Ergebnisse aus umfangreicheren Analysen (Wietschel et al. 2017, Jöhrens et al. 2020, Hacker et al. 2020) liefern nun detailliertere Aussagen zu einem besonders geeigneten Basisnetz und dessen Potentiale für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw. Die vorgeschlagenen Basisnetze weisen eine hohe Übereinstimmung auf und umfassen die verkehrsstärksten Autobahnen. Bei den möglichen Lückenschlüssen, die für die

Netzbildung notwendig sind, sowie bei einzelnen längeren Abschnitten (z.B. A 24 und A 6) gibt es leichte Abweichungen zwischen den Studien.

Abbildung 8 Zielnetze in MKS-Machbarkeitstudie, StratON, Roadmap OH-Lkw (v.l.n.r)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Länge des Zielnetzes variiert zwischen 3.200 km (Jöhrens et al. 2020), und 4.200 km (Hacker et al. 2020). Wobei teilweise auch nur eine Teilelektrifizierung des Netzes angenommen wird. Die vollständige Realisierung des jeweiligen Netzes wird in den Studien für den Zeitraum zwischen 2030 und 2040 un-terstellt.

6.2 Erste Ausbaustrecken und mögliche Netzbildung

Der Aufbau des Oberleitungs-Basisnetzes ist das Resultat einer zunehmenden Vernetzung von Einzelstrecken. Um bereits frühzeitig ein hohes Potential an Fahrzeugen und damit eine hohe Auslastung und Wirtschaftlichkeit sicherzustellen, kommt der geeigneten Auswahl von ersten Ausbaustrecken eine hohe Bedeutung zu. Hierfür ist nicht alleine die absolute Verkehrsstärke relevant, sondern insbesondere in der frühen Marktphase die Länge der Vor- und Nachläufe von Lkw-Fahrten jenseits der elektrifizierten Streckenabschnitte sowie ein hoher Anteil an Pendelverkehren. So stellen kurze Vor- und Nachläufe sicher, dass das Fahrzeug einen hohen elektrischen Fahranteil realisieren und damit besonders wirtschaftlich betrieben werden kann. Zudem reduziert sich insbesondere bei Pendelverkehren das Risiko im Falle von O-BEV, dass die Reichweite der Batterie jenseits des Oberleitungs-Netzes überschritten wird und der Fahrzeugeinsatz somit auf einer Relation nicht möglich ist.

Trotz unterschiedlicher methodischer Ansätze bei der Netzentwicklung zeigen auch hier die oben genannten Studien deutliche Schnittmengen. In allen drei Studien werden die A 1 (Hamburg – Ruhrgebiet) und die A 7 (Hamburg – Kassel) als besonders geeignet für den frühen Ausbau identifiziert. Neben der hohen Verkehrsstärke erklärt sich die hohe Eignung für den frühen Einsatz von Oberleitungs-Lkw mit den Start- und Zielpunkten, die jeweils bedeutende logistische Umschlagpunkte darstellen und somit zu verhältnismäßig kurzen Vor- und Nachläufen führen.

Als möglicher weiterer Zwischenschritt, wird im Projekt StratON (Hacker et al. 2020) mit einem „Stern“ rund um Hannover (A2, A7, A39) ein erstes Teilnetz analysiert, das bereits eine höhere Skalierung der verkehrlichen Potentiale durch die Netzbildung aufzeigt. Perspektivisch weist zudem das mögliche Kernnetz auch zahlreiche Anknüpfungspunkte an internationale Güterverkehrskorridore auf.

Abbildung 9 Mögliche erste Oberleitungs-Strecken

Basisnetz gemäß StratON (Hacker et al. 2020) und perspektivische internationale Anbindung.



Quelle: Öko-Institut 2020

6.3 Markthochlaufszzenarien

Eine verfügbare Oberleitungsinfrastruktur ist eine Voraussetzung für den Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw. Dieser ist jedoch von weiteren Einflussgrößen abhängig. Die in den oben genannten Studien durchgeführten Markthochlaufsimulationen ermöglichen eine Abschätzung der zukünftigen Marktpotentiale von Oberleitungs-Lkw und die Identifikation besonders relevanter Einflussgrößen.

Der Fokus liegt in allen Studien auf dem schweren Straßengüterfernverkehr in Deutschland. Durch den hohen Anteil an Fahrten auf Autobahnen eignen sich Fern-Lkw (vorwiegend Last- und Sattelzüge) für die direkte Elektrifizierung durch Oberleitungen. Sie haben eine typische Nutzungsdauer von 5 bis 6 Jahren und eine mittlere Jahresfahrleistung von 100.000 bis 120.000 km.

Zur Abbildung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw werden die Gesamtnutzungskosten als Summe von Investitionen und betriebsbedingten Kosten modelliert. Im Vergleich zu konventionellen Diesel-Lkw werden Kaufentscheidungen abgeleitet, mit welchen der Anteil von Oberleitungs-Lkw an der Gesamtfahrzeugflotte prognostiziert wird. Grundlage hierfür bilden unterschiedliche Fahrzeugeinsatzprofile und dem bei unterschiedlichem Netzausbaugrad realisierbaren elektrischen Fahranteil. Diese werden jeweils auf Basis von Verkehrsdaten (Quelle-Ziel-Matrizen) abgeleitet. Teilweise wird in den Modellansätzen (Jöhrens et al. 2020 und Wietschel et al. 2017) in der frühen Marktphase eine eingeschränkte Fahrzeugverfügbarkeit für Oberleitungs-Lkw unterstellt sowie eine besondere Eignung für bestimmte Gütergruppen (Jöhrens et al. 2020) angenommen. Unterschiede in der Risikoaversion der Marktteilnehmer wird teilweise (Hacker et al. 2020) über unterschiedliche maximale Amortisationszeiträume bei der Fahrzeugwahl berücksichtigt. Während sich Jöhrens et al. (2020) auf die ersten zehn Jahre des Netzausbaus fokussiert, werden in Hacker et al. (2020) vor allem die mittel- bis langfristigen Potentiale betrachtet und die Netzausbaugeschwindigkeit (siehe Tabelle) variiert. Mögliche ergänzende Potentiale durch (Regional-)Verkehre, die nur kürzere Strecken auf dem Oberleitungsnetz absolvieren und

durch internationale Verkehre wurden in den Studien nicht betrachtet. Diese könnten das Marktpotential aber weiter erhöhen.

Tabelle 1 Zentrale Annahmen und Rahmenbedingungen der Markthochlaufmodellierung im Vergleich der Studien

	StratON	Roadmap OH-Lkw	MKS-Studie
Betrachtungsraum	Deutschland	Deutschland	Deutschland
Verkehre	innerdeutsch	innerdeutsch	Innerdeutsch
Fahrzeugklassen	Lkw >26 t	Lkw >26 t	Lkw >26 t
Anteil an Straßengüterverkehrsleistung¹¹	42 %	12 %	circa 45 %
Fahrt auf O-Netz	>100 km	>50 km	-
Zeitraum	2025-2050	Bis 2030	2015-2030
Netzausbau¹²	2030: 1.750/3.000 km 2035: 3.000/3.800 km 2040: 3.800 km	2030: 3.200 km	2030: 4.000 km
Affine Gütergruppen	nein	nur Oberleitungs-Lkw-affine Gütergruppen	nein
Weitere Einschränkungen	nein	nur potentielle Pendelverkehre	nein
Amortisationsdauer	variiert	konstant	konstant

Quelle: StratON = Hacker et al. (2020), Roadmap = Jöhrens et al. (2019), MKS = Wietschel et al. (2017)

Im Jahr 2030 wird in den jeweiligen Basisszenarien der Studien eine elektrische Fahrleistung von rund 4 Mrd. Kilometern erreicht. Dies entspricht – je nach zugrunde gelegter Ausgangsbasis – zwischen knapp 8 und bis zu 17 % Gesamtfahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen in Deutschland (siehe auch Abbildung). In Hacker et al. (2020) kommen bereits frühzeitig vor allem O-BEV zum Einsatz und etwa die Hälfte der elektrischen Fahrleistung wird jenseits der elektrifizierten Streckenabschnitte erbracht. Bei einem vergleichbaren Netzausbau (Szenario N+) kann daher auch bereits eine deutlich höhere elektrische Gesamtfahrleistung von rund 9 Mio. Kilometern (19 %) realisiert werden.

Bei vollständigem Netzausbau und günstigen Rahmenbedingungen in Bezug auf Technikentwicklung und Kosten kann bis zum Jahr 2040 in Hacker et al. (2020) etwa ein Drittel der Gesamtfahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen elektrisch erfolgen.

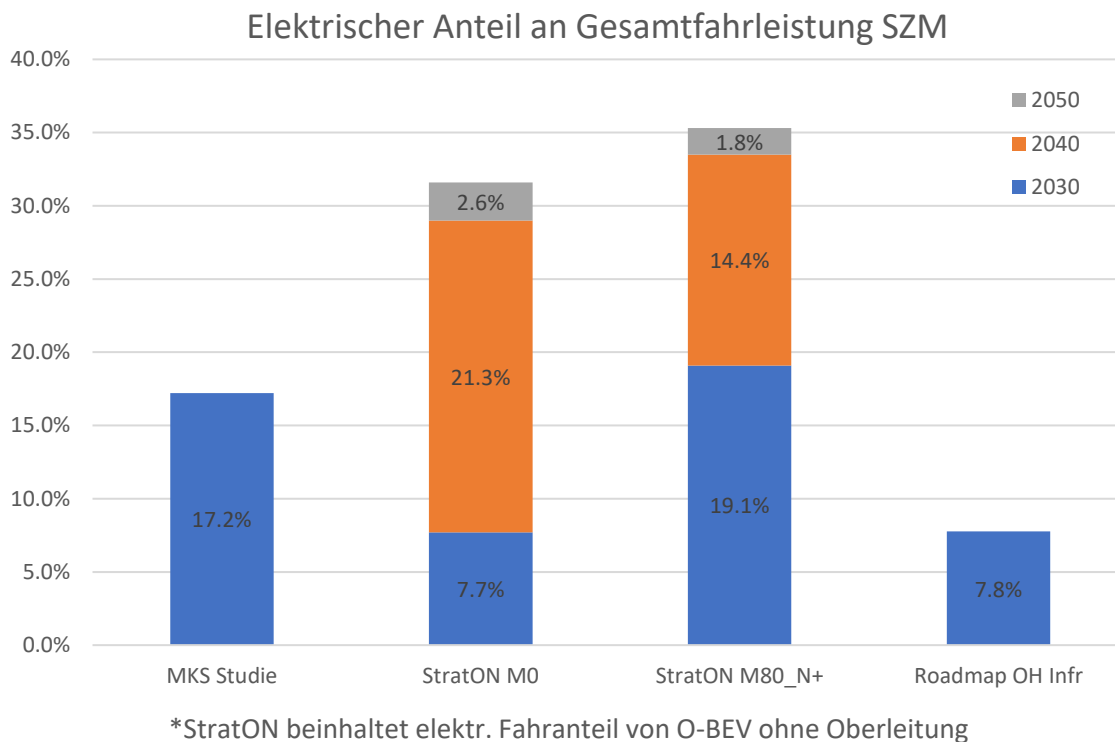
Die Szenarioanalysen zeigen, dass das Marktpotential von Oberleitungs-Lkw insbesondere von der Verfügbarkeit des Oberleitungsnetzes und der Sicherstellung eines stabilen Wirtschaftlichkeitsvorteils gegenüber Diesel-Lkw abhängig ist. Letzterer wird in den Analysen u.a. durch eine Begünstigung bei der Maut, bei den Energiekosten oder bei der Fahrzeugbeschaffung abgebildet.

¹¹ Dieser Anteil der Straßenverkehrsleistung wurde in den Studien betrachtet. Für StratON bezieht sich der Wert auf tkm, für die MKS-Studie auf Fzg-km.

¹² StratON: Ausgangsszenario M0 und Szenario N+ mit unterschiedlicher Netzausbaugeschwindigkeit

Abbildung 10 Anteil der elektrische Fahrleistung von Oberleitungs-Lkw

Anteil an der Gesamtfahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen im Jahr 2030 in den Markthochlaufszennarien der betrachteten Studien.



Quelle: Eigene Darstellung

6.4 Aggregiertes CO₂-Minderungspotential

Die Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen durch Oberleitungs-Lkw ist von deren Markthochlaufgeschwindigkeit und der erzielbaren elektrischen Fahrleistung abhängig. Mit der zunehmenden Dekarbonisierung des Stromsystems steigt die Minderungswirkung pro elektrischem Kilometer zudem über die Zeit an.

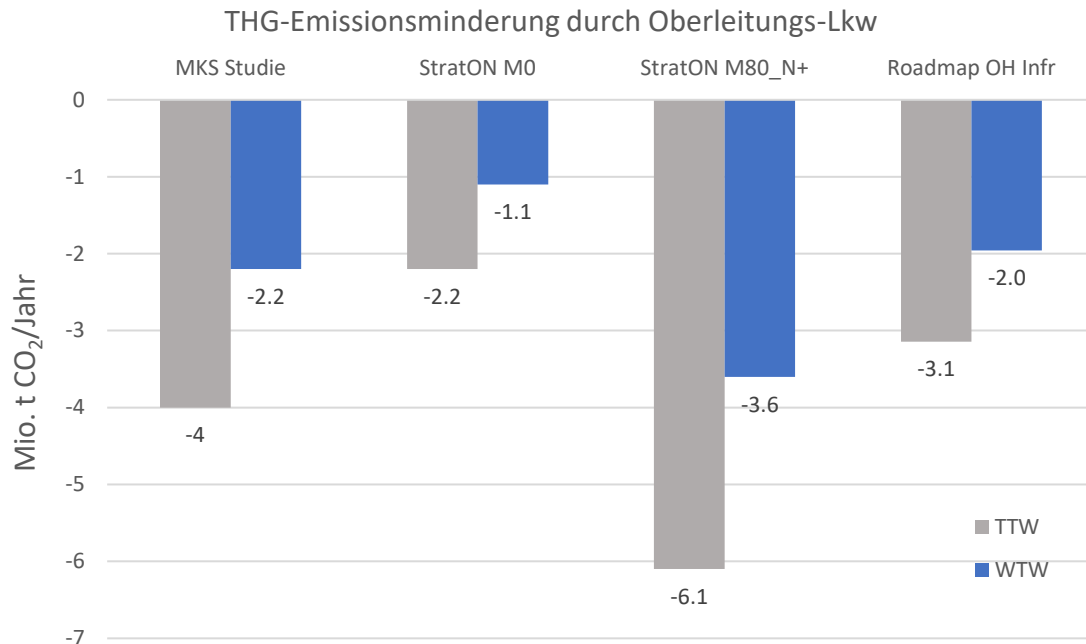
Für die oben eingeführten Basisszenarien ergibt sich im Jahr 2030 eine Treibhausgas-Minderung (TTW) um 2,2 bis etwa 4 Mio. Tonnen CO₂. Dies entspricht etwa 6 bzw. 11 % der Emissionen von Last- und Sattelzügen (>26 Tonnen zGG) und etwa 4 bzw. 7 % der Emissionen des gesamten Straßengüterverkehrs im Jahr 2030.

Im Falle eines schnellen Netzausbaus¹³ und starker Anreize für elektrisch erbrachte Fahrleistung steigt der Minderungsbeitrag auf etwa 6 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2030. Langfristig können laut der betrachteten Studien unter günstigen Bedingungen und bei einem Oberleitungsnetz von knapp 4.000 km Länge die verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen um 9 bis 12 Mio. Tonnen CO₂ reduziert werden – etwa 14-19 % der heutigen Emissionen des Straßengüterverkehrs. Mögliche Potentiale von Verkehren mit geringem Streckenanteil auf dem Oberleitungsnetz sowie weitere Potentiale im Falle von grenzüberschreitender Verfügbarkeit einer Oberleitungsinfrastruktur sind dabei noch nicht berücksichtigt.

¹³ Szenario **StratON M80_N+** in Hacker et al. (2020)

Abbildung 11 Minderung der Treibhausgasemissionen durch Oberleitungs-Lkw

Im Jahr 2030 in den Markthochlaufszensarien der betrachteten Studien im Vergleich zu einem Diesel-Referenzszenario.



*StratON beinhaltet elektr. Fahranteil von O-BEV ohne Oberleitung

Quelle: Eigene Darstellung

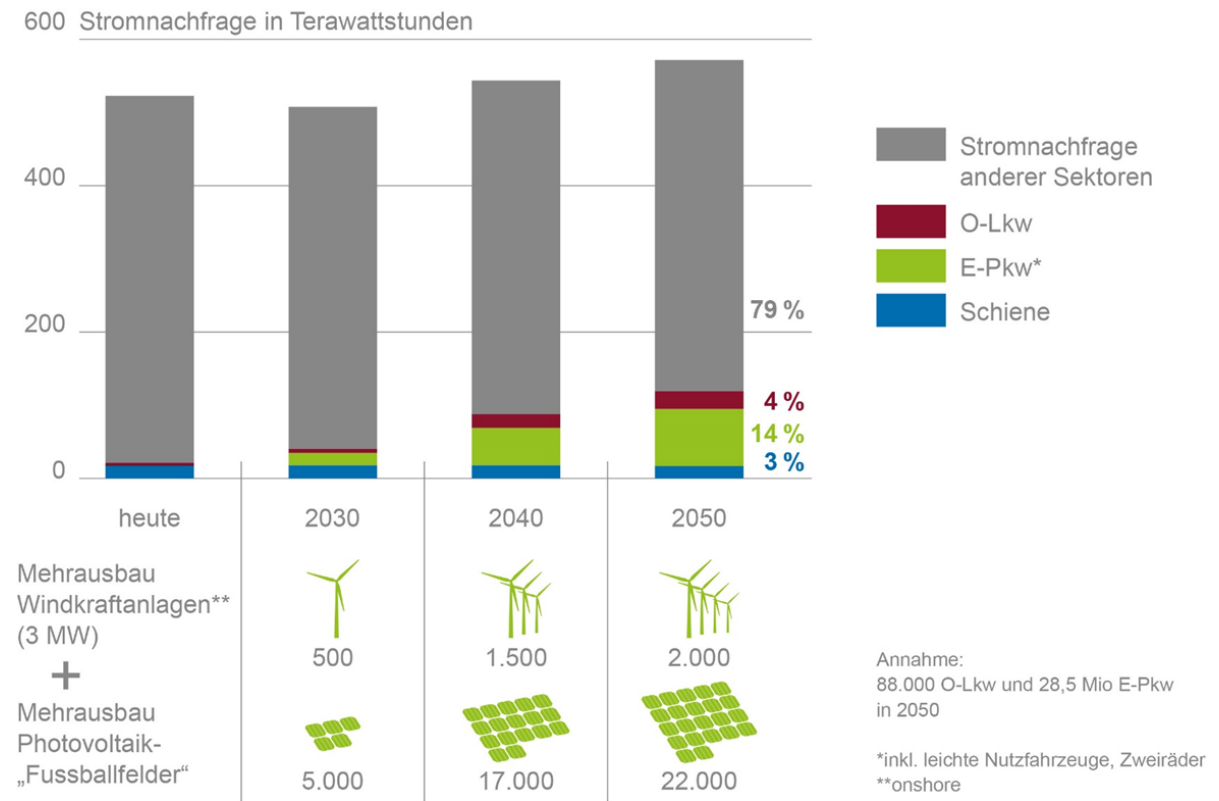
6.5 Stromnachfrage und regionale Verteilung

Durch den Ersatz von Diesel-Lkw durch Oberleitungs-Lkw verschiebt sich die Energienachfrage des Straßengüterverkehrs von Dieselmotoren hin zu Strom. Der Strombedarf von Oberleitungs-Lkw steigt in Abhängigkeit von der erbrachten elektrischen Fahrleistung. Er ist also abhängig von der Anzahl der Oberleitungs-Lkw und der jeweils im elektrischen Betrieb erbrachten Fahrleistung.

In den oben aufgeführten Szenarien bewegt sich der Strombedarf von Oberleitungs-Lkw im Jahr 2030 zwischen 5,5 und 13,4 TWh. Dies entspricht zwischen 1 % und 2 % der Gesamtstromnachfrage in Deutschland im Jahr 2018. Unter der Annahme einer starken Zunahme der Marktdurchdringung von Oberleitungs-Lkw bis zum Jahr 2050 macht der Fahrstrombedarf in den untersuchten Szenarien mit ca. 25 TWh/a im Jahr 2050 nur einen kleinen Anteil (etwa 4 %) des gesamten nationalen Strombedarfs aus (Hacker et al. 2020). Zum Vergleich: elektrische Pkw könnten mit einem Anteil von mehr als 11 % bis zum Jahr 2050 eine mehr als doppelt so große Bedeutung für die Gesamtstromnachfrage haben. Die Stromnachfrage des Schienenverkehrs liegt in der Größenordnung von Oberleitungs-Lkw. Über das gesamte Jahr betrachtet und bezogen auf die Gesamtstromnachfrage des kompletten Landes sind die Auswirkungen von Oberleitungs-Lkw auf die Stromnachfrage daher vergleichsweise gering.

Um eine CO₂-neutrale Bereitstellung des Fahrstroms für den Betrieb der Oberleitungs-Lkw sicherzustellen, ist ein zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung erforderlich. Für das oben aufgeführte StratON-Langfristszenario (Hacker et al. 2020) wäre ein Zubau an Erneuerbaren Energien (EE) Anlagen in der Größenordnung von 20 GW bis 2050 notwendig. Dies entspricht gut 15 % der heute in Deutschland installierten Leistung von EE-Anlagen. Der erforderliche Zubau stellt sich angesichts eines Zeithorizonts von etwa 30 Jahren als moderat dar.

Abbildung 12 Einordnung der Stromnachfrage von Oberleitungs-Lkw am Beispiel des StratON-Szenarios M0



Quelle: Eigene Darstellung

Die regionale Lastnachfrage kann durch die Elektrifizierung von Autobahnen in ländlichen Räumen spürbar ansteigen – je nach Ausbauszenario auch im zweistelligen Prozentbereich. Zudem sind Oberleitungs-Lkw eine inflexible Last, d.h. das Laden kann nicht wie bei Elektro-Pkw um mehrere Stunden verschoben werden.

7 Politische Instrumente

Das Wichtigste in Kürze:

- Eine Vorfinanzierung der Infrastruktur ist notwendig für den Markthochlauf, da eine Kostenverteilung auf die Lkw-Betreiber erst durch einen hohen Nutzungsgrad ermöglicht wird.
- Die derzeit in Kraft befindlichen Fördermaßnahmen auf Fahrzeugseite ermöglichen ersten Nutzern prinzipiell einen wirtschaftlichen Betrieb von Oberleitungs-Lkw, sofern die Infrastruktur vorhanden ist. Größte Herausforderung ist die Verfügbarkeit seriennaher Fahrzeuge am Markt.
- Priorität sollte demzufolge auf der Planung des Infrastrukturausbaus und der Entwicklung des Fahrzeugmarkts liegen. Um die Einführung der Technologie für den Staat längerfristig kostenneutral und zielkonform zu gestalten, können die zur Systemeinführung notwendigen Investitionen aus einer CO₂-Bepreisung sukzessive gegenfinanziert werden.

7.1 Existierende Politikmaßnahmen

Politische Instrumente im Kontext der Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems unterscheiden sich u.a. in folgender Hinsicht:

- Wirkungsbereich: Auf welchen Bereich wirkt das Instrument? (z.B. Fahrzeuganschaffung, Fahrzeugnutzung, Energiebereitstellung, Infrastruktur)
- Zielgruppe: Welche Akteure werden adressiert? (z.B. Fahrzeughersteller, Fahrzeugnutzer, Infrastrukturbetreiber)
- Grad der Technologiespezifität: Ist das Instrument spezifisch für Oberleitungs-Lkw konzipiert oder werden auch andere alternative Antriebstechnologien adressiert?

Im Bereich der Fahrzeuganschaffung werden die CO₂-Emissionen der Neufahrzeugflotten von Lkw-Herstellern europaweit ab dem Jahr 2025 reguliert (Verordnung (EU) 2019/1242) (vgl. Rodriguez 2019). Die Fahrzeughersteller müssen die durchschnittlichen Emissionen ihrer neuen Lkw bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30 % gegenüber dem Jahr 2020 reduzieren.

Zudem schreibt die Clean-Vehicles-Richtlinie für den Zeitraum 2021-2025 einen Anteil von 10 % Niedrigemissionsfahrzeugen an öffentlich ausgeschriebenen Lkw-Beschaffungen vor, der sich im Zeitraum 2026-2030 auf 15 % erhöht und dann nur noch Nullemissionsfahrzeuge umfasst. Der Anteil öffentlich ausgeschriebener Lkw ist jedoch im Vergleich zum Privatsektor gering, weswegen die Auswirkungen der Clean-Vehicles-Richtlinie auf den Markthochlauf alternativer Antriebe bei Lkw begrenzt sein dürften. Kurzfristig relevant sind vor allem Zuschüsse (BMVI 2018) bei der Anschaffung von Elektro-Lkw, die momentan bis zu 40.000 € der Mehrinvestitionen für ein Fahrzeug mit zGG > 12 Tonnen abdecken.

Bei den Nutzungskosten gewährt der Staat für elektrische Lkw eine (bislang nicht zeitlich begrenzte) Mautbefreiung¹⁴. Das entspricht einer Ersparnis von etwa 8 - 14 ct/km und damit einer Reduktion der gesamten kilometerbezogenen Kosten um einige Prozentpunkte. Die Mautbefreiung stellt somit eine Möglichkeit dar, um die Vollkosten von Elektro-Lkw für die Betreiber zu senken.

Im Bereich Infrastruktur gibt es bislang drei staatlich geförderte Teststrecken auf öffentlichen Straßen, von denen sich Stand März 2020 zwei im Betrieb und eine in Planung befinden. Die Errichtung der Teststrecken ist eingebettet in eine Reihe von öffentlich geförderten F&E-Aktivitäten, in deren Rahmen auch

¹⁴ Gemäß §1(2) Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG), vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/bfstrmg/_1.html

die Fahrzeugtechnik für Oberleitungs-Lkw weiterentwickelt und die Rahmenbedingungen und Hemmnisse für einen Einsatz von Oberleitungs-Lkw in Deutschland untersucht werden. Ein weiterer Ausbau der Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw ist derzeit nicht in Planung.

7.2 Erfordernisse für einen Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw

In den Vorhaben „StratON“ sowie „Roadmap OH-Lkw“ wurden die Auswirkungen möglicher politischer Instrumente auf die Markteinführung von Oberleitungs-Lkw in Deutschland untersucht. Dabei wurde fokussiert auf den Infrastrukturausbau sowie auf Instrumente, die die Kosten der Lkw-Betreiber beeinflussen. Vereinfachend wurde davon ausgegangen, dass Oberleitungs-Lkw dann eingesetzt werden, wenn sich für die Betreiber ein Vollkostenvorteil gegenüber entsprechenden Diesel-Lkw ergibt und die Einsatzprofile im Falle von Batterie-Oberleitungs-Lkw technisch realisiert werden können.

Neben den oben erwähnten, bereits existierenden Instrumenten wurden dabei weitere mögliche Maßnahmen untersucht, insbesondere eine partielle oder auch vollständige Mautbefreiung nur für elektrisch zurückgelegte Strecken (die derzeitige Mautbefreiung gilt für alle Strecken), eine Ermäßigung bei den Stromkosten (z.B. über eine Senkung der durch Oberleitungs-Lkw zu entrichtenden EEG-Umlage, ähnlich wie im Schienenverkehr) sowie ein CO₂-Preis auf Dieselkraftstoff bzw. eine CO₂-basierte Mautspreizung.

Aus den Modellrechnungen ergaben sich für die Einführungsphase eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland folgende Erkenntnisse:

- Eine Vorfinanzierung der Infrastruktur ist nötig, da eine Kostenverteilung auf die Lkw-Betreiber erst durch einen hohen Nutzungsgrad ermöglicht wird. Später ist eine Gegenfinanzierung durch die Nutzer möglich.¹⁵
- Wird der vorgenannte Infrastrukturaufbau staatlich vorfinanziert, so ist bei Abschluss des Netzaufbaus im Jahr 2030 der Einsatz von Oberleitungs-Lkw auf den entsprechenden Strecken in den meisten Fällen wirtschaftlich voraussichtlich attraktiv, auch wenn die derzeit bestehenden Fördermaßnahmen für Anschaffung (Kaufprämie) und Nutzung (Mautbefreiung) von Elektro-Lkw nicht fortgeschrieben werden.¹⁶
- Schreibt der Staat diese Fördermaßnahmen hingegen fort, so kann der Markthochlauf in den ersten Jahren bis etwa 2026 deutlich beschleunigt werden¹⁷, was u. U. zur Stabilisierung der Systemeinführung erwünscht sein kann. Zudem sind solche Förderungen in der Initialphase ein probates Mittel, um der Risikoaversion potentieller Nutzer zu begegnen (die in der Transportbranche bedingt durch kurze Vertragslaufzeiten in der Regel hoch ist). Diese Risikoaversion führt oftmals dazu, dass neue Technologien trotz Vorteilen bei den Lebenszykluskosten nicht eingesetzt werden. Nicht zuletzt würde eine solche Förderung auch den Fahrzeugherstellern Sicherheit bei der Bereitstellung von Fahrzeugen für die erste Marktphase verschaffen.
- Auf der anderen Seite sind mit starker finanzieller Förderung von Oberleitungs-Lkw erhebliche Zusatzkosten und Risiken verbunden:
 - Eine Förderung der Anschaffung oder des Betriebs von Oberleitungs-Lkw während der Systemeinführungsphase erhöht zwar die absolute elektrische Fahrleistung der Oberleitungs-Lkw-

15 Im Vorhaben "Roadmap OH-Lkw" wurde beispielsweise ermittelt, dass bei Aufbau eines Basisnetzes von 3.200 km die jährlichen Infrastrukturkosten (Betrieb und Abschreibung) etwa 10-15 Jahre nach Beginn der Systemeinführung aus den potentiellen Erlösen der Nutzung gedeckt werden können.

16 Im Projekt "Roadmap OH-Lkw" ergaben die Wirtschaftlichkeitsberechnungen, dass sich etwa 90% der auf dem Oberleitungsnetz durchgeführten Fahrten, die eine prinzipielle Eignung (Distanzen, Fahrzeugtyp, Gütergruppe) für Oberleitungs-Lkw-Betrieb aufweisen, wirtschaftlich vorteilhaft mit Oberleitungs-Lkw abwickeln lassen.

17 Eine Mautbefreiung für den elektrischen Betrieb von Oberleitungs-Lkw ergab in den Berechnungen des Projekts "Roadmap OH-Lkw" sechs Jahre nach Beginn der Systemeinführung in etwa eine Verdopplung des Oberleitungs-Lkw-Bestands, eine Kaufprämie in Höhe von 40.000 € gar eine Verdreifachung.

- Flotte, senkt jedoch die elektrische Fahrleistung pro Lkw und führt damit systemisch gesehen zu Effizienzverlusten.
- Förderprogramme für die Fahrzeuganschaffung bergen generell die Gefahr von Mitnahmeeffekten.
 - Eine Senkung der Transportkosten im Straßengüterverkehr kann grundsätzlich zu Rebound führen und somit dem Ziel entgegenstehen, Verkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern.
 - Aus den vorgenannten Gründen ist es angezeigt, eine Mautbefreiung oder eine erhebliche Kaufprämie für Oberleitungs-Lkw lediglich für die erste Phase der Markteinführung vorzusehen und degressiv auszugestalten. Die bisherigen Studien zeigen, dass der Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw längerfristig effektiv und effizient durch eine CO₂-Bepreisung im Bereich von 80 bis 200€/t stabilisiert werden kann. Damit würde der Straßengüterverkehr moderat verteuert und somit auch das Wachstum der Verkehrsleistung insgesamt gedämpft.
 - Mittelfristig kann eine Förderung auch gezielt bestimmte Kostenrisiken bei Betreibern von Oberleitungs-Lkw adressieren. So ist zum Ausgleich von Unsicherheiten bei den Energiekosten z.B. eine fahrleistungsabhängige Förderung denkbar, deren Höhe sich am aktuellen Verhältnis von Strom- und Dieselpreis bemisst.

Prinzipiell sind auch ordnungspolitische Instrumente denkbar, um bei vorhandener Infrastruktur einen Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw sicherzustellen. In Frage kämen hier die Einführung einer Quote für Lkw mit alternativen Antrieben bei den Lkw-Neuzulassungen oder auch eine Verpflichtung, Transporte auf mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Strecken mit Oberleitungsfahrzeugen durchzuführen.

7.3 Weiteres politisches Umfeld

Neben möglicher Fördermaßnahmen und der Finanzierung der Infrastruktur sind eine Reihe von politischen Fragen in der Einordnung von OH-Lkw zu beachten.

Aufgrund des häufig grenzüberschreitenden Verkehrs von Lkw würde ein europaweiter Ausbau von Oberleitungsinfrastruktur die Einsatzpotentiale und Wirtschaftlichkeit für die Nutzer verbessern und eine erfolgreiche Verbreitung der Technologie wahrscheinlicher machen. Derzeit sind Oberleitungen nicht Teil der europäischen Pläne zum Ausbau von Infrastruktur für alternative Antriebe. Aber eine Novelle der relevanten Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (*alternative fuels infrastructure directive* – AFID) ist derzeit in Vorbereitung und könnte die Verbreitung von Oberleitungen für Lkw fördern. Außerhalb Deutschlands gibt es derzeit Aktivitäten zu oder Interesse an Oberleitungen in Form von Testprojekten und Feldversuchen in Schweden, Italien, Frankreich und Ungarn.

Aufgrund der CO₂-Flottengrenzwerte für Lkw bis 2030 planen viele Lkw-Hersteller derzeit die breitere Einführung von alternativen Antrieben auch bei schweren Lkw. Hier werden besonders Batterie-Lkw und der Ausbau einer Hochleistungs-Schnellladeinfrastruktur diskutiert. Auch Brennstoffzellen-Lkw kämen hierfür in Frage. Batterie-Lkw mit Schnellladen und Oberleitungs-Lkw könnten sich langfristig sinnvoll ergänzen. Batterie-Lkw bieten einen Einstieg in elektrische Lkw und eine erste Infrastruktur könnte dezentral aufgebaut werden. Diese Schnelllade-Infrastruktur wäre zumindest zum Markteinstieg günstiger aufzubauen und erlaubt den Aufbau eines Bestandes von elektrischen Lkw. Mit einem Nachrüstsystem für Pantographen könnte dann sofort ein nennenswerter Bestand von elektrischen Lkw die Oberleitung nutzen und die Phase mit sehr gering ausgelasteter Infrastruktur übersprungen werden. Gleichzeitig bräuchte ein großer Bestand von batterie-Lkw ohne Oberleitung vmtl. eine erhebliche Anzahl an Schnellladestationen entlang der Autobahnen und bräuchte erheblich Platz und große Leistungen an den La-

deorten (> 10 MW). Stattdessen könnten mit Pantographen nachgerüstet relativ viele Batterie-Lkw entlang der Oberleitung laden. Dafür wären keine Pausenzeiten nötig, wenig Platz würde gebraucht und die Nachfrage nach elektrischer Energie würde über viele km verteilt werden.

8 Ausblick und Forschungsbedarf

Das Wichtigste in Kürze:

- Oberleitungs-Lkw sind nahe der Kommerzialisierung aber weitere Praxiserfahrungen sind notwendig, besonders zu Fragen der Umsetzung und der Akzeptanz.
- Ein mögliches Zusammenspiel mit Batterie-Lkw und ihrer Schnellladeinfrastruktur ist für einen Markthochlauf eine wichtige Forschungsfrage.
- Weitere Forschungsfragen betreffen die energiewirtschaftliche Integration sowie Fragen der Standardisierung und Finanzierung.

In den letzten Jahren sind erste Forschungsarbeiten zum Thema Oberleitungs-Lkw im In- und Ausland entstanden und es lassen sich erste Kernergebnisse festhalten – wie in den vorangegangenen Kapiteln erfolgt. Da es sich bei Oberleitungs-Lkw jedoch um eine vergleichsweise neue Idee zur THG-Minderung im Verkehr handelt, sind noch viele Fragen offen. Dieser Abschnitt gibt daher eine kurze Übersicht zu offenen Forschungsfragen.

Alle denkbaren Antriebsalternativen bei Lkw sind noch in einem relativ frühen Technologiestadium und noch nicht in Serienreife. Angesichts der hohen Dynamik bei der Batterieentwicklung wird der batterieelektrische Antrieb voraussichtlich zu einer ernstzunehmenden Alternative bzw. Ergänzung im Straßengüterverkehr, insbesondere im Nah- und Regionalverkehr. In weiterführenden Analysen sollte daher der batterieelektrische Antrieb als weitere Technologieoption (u. a. bei der Modellierung des Markthochlaufs) verstärkt Berücksichtigung finden und unterschiedliche Ladeszenarien (an der Oberleitung sowie stationär) vertiefend analysiert werden. Dies sollte vor dem Hintergrund unterschiedlicher Anforderungen im Fern- und Nah-/Regionalverkehr geschehen.

Die Elektrifizierung von hochfrequentierten Autobahnen macht den Einsatz der Oberleitungstechnik für Lkw auf diesen Korridoren voraussichtlich bereits kurzfristig wirtschaftlich. Bisherige Analysen auf Basis von Quelle-Ziel-Matrizen können allerdings die betriebliche Realität, dass Lkw häufig keine festen Routen fahren, sondern flexibel zum Einsatz kommen und Wegeketten mit diversen Be- und Entladungspunkten abfahren, nicht explizit abbilden. In den Modellen können lediglich Aussagen auf Ebene von Fahrten, aber nicht von konkreten Fahrzeugen getroffen werden. Hier fehlen vor allem Daten zu Fahrzeugeinsatzprofilen. Solche könnten die Aussagen zum tatsächlich realisierbaren elektrischen Fahranteil für konkrete Fahrzeuge und Einsatzzwecke verbessern.

Erste Grundsatzfragen zur Finanzierung des Infrastrukturaufbaus für Oberleitungs-Lkw sowie zu denkbaren Geschäftsmodellen und den daran beteiligten Akteuren konnten im Rahmen der bisherigen Studien geklärt werden. Auf Basis der verfügbaren Daten mussten sich die Analysen dabei allerdings auf die Identifizierung wichtiger Akteure und wesentliche Grundsatzfragen z. B. zur Stromabrechnung beschränken, wobei das Zusammenspiel und die zeitliche Entwicklung einer Zusammenarbeit der Akteure offenbleiben. Letztlich ist noch also unklar, wie eine Systemtransformation zu einem elektrischen schweren Straßengüterverkehr konkret aussehen könnte.

Die vorhandenen energiewirtschaftlichen Analysen haben gezeigt, dass der zusätzliche Strombedarf von Oberleitungs-Lkw auch bei einem hohen Marktanteil begrenzt ist. Von größerer Relevanz ist jedoch die räumliche und zeitliche Verteilung der Stromnachfrage, da sich diese insbesondere in ländlichen Gebieten teilweise deutlich erhöhen kann. Zudem hat der Vergleich von Oberleitungs-Lkw und batterieelekt-

rischem Lkw im Fernverkehr unter anderem gezeigt, dass die Implikationen in Bezug auf die Lastnachfrage sehr unterschiedlich sind. Während sich der Betrieb von Oberleitungs-Lkw durch eine zeitlich und räumlich verteilte zusätzliche Last auszeichnet, führt der Betrieb von batterieelektrischen Lkw durch die stationäre Nachladung, u. a. während der Fahrerpausen, zu einer voraussichtlich wesentlich stärkeren punktuellen Stromnachfrage. Perspektivisch sind daher Fragen der Netzeinbindung und der Laststeuerung im Kontext von elektrischen Lkw voraussichtlich von größerer Bedeutung als die Betrachtung der Strommengen und sollten auch im Vergleich der unterschiedlichen Antriebsoptionen vertieft werden.

Auch die Frage wie ein Zusammenspiel der Infrastruktur sowohl für batterieelektrische Lkw als auch Oberleitungs-Lkw aussehen könnte ist noch unklar.

Bisher gibt es wenig Praxiserfahrungen zu Oberleitungs-Lkw und Fragen der Akzeptanz konnten nur in begrenztem Umfang untersucht werden. Für eine verlässliche Einschätzung der Markt-, Politik- und Vor-Ort-Akzeptanz können die laufenden Pilotvorhaben im öffentlichen Straßenraum und deren wissenschaftliche Begleitung wichtige Informationen aus der Praxis liefern und eine belastbare Datengrundlage für zukünftige Analysen bieten.

9 Literaturverzeichnis

- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin,
- BMVI / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018): Scheuer: Ministerium fördert umweltfreundliche Lkw. Pressemitteilung vom 04.06.2018. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2018/036-scheuer-umweltfreundliche-lkws.html>, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- EC (European Commission) (2018): EU Transport in Figures - Statistical Pocketbook 2018. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2018_en, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Gnann, T. (2018): Technologiebericht 7.2 Elektromobilität – Hybrid-Oberleitungs-LKW (energiewirtschaftliche Aspekte). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W.; Bernecker, T.; Speiser, J.; Röckle, F.; Schubert, M.; Nebauer, G. (2020): StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Berlin.
- Hartwig, M.; Lehmann, M. (2019): Regulative framework for overhead contact lines for trucks on motorways – The AMELIE project aiming at a European approach of financing and billing for ERS. Proceedings of the 3rd Electric Road Systems Conference 2019. Frankfurt am Main, Germany.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Helms, H.; Schade, W.; Hartwig, J. (2018): Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. Analyse technischer und logistischer Hemmnisse der OH-Lkw-Technologie im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg: Ifeu. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf, zuletzt geprüft 13.05.2020.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Helms, H.; Biemann, K.; Schillinger, M.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D. (2020): Einführungsszenarien 2020-2030 - Optimierung des Infrastrukturaufbaus für Oberleitungs-Lkw und Analyse von Kosten- und Umwelteffekten in der Einführungsphase. Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Jamet, M.; Keller, M.; Lambrecht, U.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Veres-Homm, U.; Schwemmer, M. (2017): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030 – Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH von OHOH von OH-Lkw. Analyse im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg, Karlsruhe.
- Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W. (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Öko-Institut, Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Rodriguez, F. (2019): CO₂ standards for heavy-duty vehicles in the European Union.
- SRU / Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012). Umweltgutachten 2012. Verantwortung in einer begrenzten Welt.

- UBA; BMU (2018): Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Klimabilanz 2017: Emissionen gehen leicht zurück. Umweltbundesamt; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D. et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Hg. v. Fraunhofer ISI.