



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland

Julius Jöhrens, Hinrich Helms | ifeu

Mit Beiträgen von:

Prof. Dr. Thorsten Beckers | IKEM

Felix Frischmuth, Norman Gerhardt | Fraunhofer IEE

Heidelberg, Juli 2020



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Erneuerbar
mobil

Inhalt

Über diese Roadmap	3
1 Vorbemerkungen und Rahmen	5
1.1 Ausgangspunkt: Die Technologie und ihre Anwendung in Deutschland	5
1.2 Perspektive: Wirtschaftlichkeit von O-Lkw	7
1.3 Zielhorizont: Potentielle Beiträge von O-Lkw zum Klimaschutz	9
1.4 Umfeld: Regulatorischer Rahmen bis 2030	11
1.5 Fazit: Herausforderungen bei der Einführung eines O-Lkw-Systems	13
2 Roadmap: Schritte zur Systemeinführung	15
2.1 Pilotphase (~5 Jahre)	16
2.1.1 Ausgangssituation und Ziel	16
2.1.2 Handlungsfeld P1: Strategischen Konsens zur künftigen Rolle von O-Lkw schaffen	16
2.1.3 Handlungsfeld P2: Ökosystem für O-Lkw entwickeln	20
2.1.4 Handlungsfeld P3: Pilotierung und Netzplanung	25
2.1.5 Zusammenfassung	30
2.2 Netzausbauphase (~5-7 Jahre)	31
2.2.1 Ausgangssituation und Ziel	31
2.2.2 Handlungsfeld A1: Netzausbau planbar vorantreiben	31
2.2.3 Handlungsfeld A2: Förderkulisse auf den Netzausbau abstimmen	33
2.2.4 Handlungsfeld A3: Anschlussfähigkeit von O-Lkw sicherstellen (geographisch und technologisch)	35
2.2.5 Zusammenfassung	38
3 Ausblick nach Aufbau eines Basisnetzes	39
Literaturverzeichnis	41
Anhang: Langfristige Integration des Oberleitungs-Lkw in das Gesamtenergiesystem	44

Über diese Roadmap

Das Forschungsvorhaben „Roadmap OH-Lkw“ ging über drei Jahre der Frage nach, ob – und wenn ja, auf welche Weise – Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) einen relevanten Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Dazu wurden insbesondere folgende Teilfragen untersucht, deren Ergebnisse jeweils in separaten Berichten dokumentiert sind:

- Wo steht die Oberleitungs-Lkw-Technologie im Vergleich zu anderen Antriebsoptionen (Wasserstoff, reine Batteriefahrzeuge, PtL)¹?
- Welche spezifischen Hemmnisse (insbesondere aufseiten von Betreibern, Fahrzeugherstellern und Politik) müssten für eine Einführung von O-Lkw überwunden werden?²
- Für welche Anwendungsfälle eignen sich O-Lkw besonders und welche Potentiale zur CO₂-Reduktion sind damit verbunden?³
- Wie sehen realistische Ausbaupfade für ein O-Lkw-System aus und welche Rolle spielen technische, fiskalische und politische Rahmenbedingungen dabei?⁴
- Welche Anforderungen sind an die fiskalischen und regulatorischen Rahmenbedingungen zu stellen, um die Einführung von O-Lkw ökonomisch effizient zu unterstützen?⁵

Die Studie zeigt, dass der Aufbau einer Basis-Oberleitungs-Infrastruktur auf stark befahrenen deutschen Autobahnabschnitten (ca. 3.200 Autobahn-km) einen signifikanten Markthochlauf von O-Lkw schon bis zum Jahr 2030 bei entsprechenden Rahmenbedingungen ermöglichen kann. Es wird gezeigt, dass sich O-Lkw nur dann am Markt etablieren können, wenn der Aufbau einer grundlegenden Oberleitungs-Infrastruktur staatlich organisiert wird. Die Infrastruktur könnte danach mittelfristig von den Nutzern refinanziert werden. O-Lkw können (mindestens) für Teilbereiche des schweren Straßengüterverkehrs eine effiziente Lösung zur deutlichen CO₂-Minderung darstellen.

Der zukünftige Straßengüterverkehr wird aus heutiger Sicht einen Technologiemark darstellen. Somit besteht die Herausforderung darin, trotz Unsicherheiten über einige technologische und wirtschaftliche Entwicklungen, sinnvolle Anwendungsfelder der O-Lkw-Technologie klar zu umreißen und zügig die Rahmenbedingungen für eine Erschließung dieser Anwendungsfelder zu schaffen. In der vorliegenden Roadmap machen wir hierzu basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts Vorschläge. Besonderes Augenmerk haben wir dabei auf den Umgang mit Unsicherheiten gelegt.

Insbesondere mit Blick auf die Erreichung der Klimaziele im Verkehrsbereich bis zum Jahr 2030 ist angesichts von Planungs- und Entwicklungszeiten rasches Handeln geboten, gleich, welche Technologie am Ende zum Zuge kommt. Denn für den Nutzfahrzeugbereich sind laut

¹ [Roadmap OH-Lkw: SWOT-Analyse](#) (ifeu / M-Five 2017)

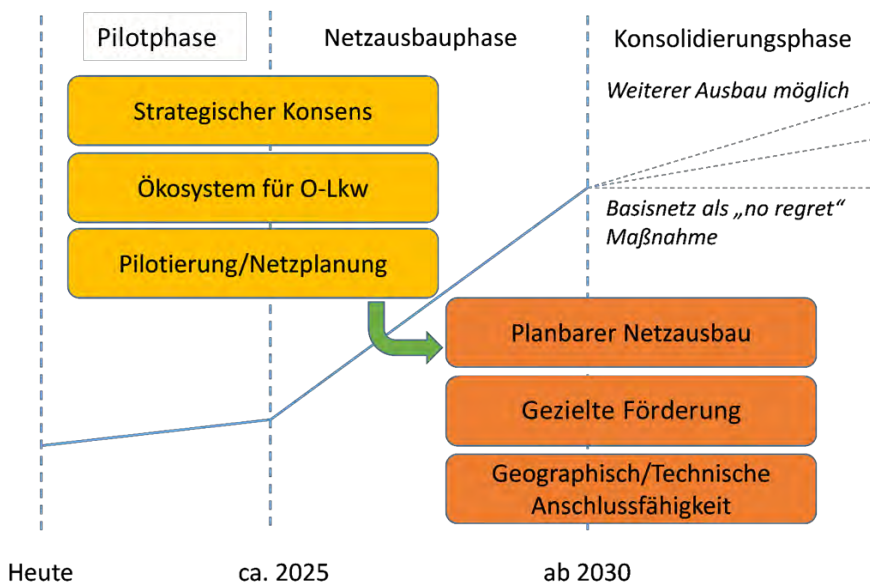
² [Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse](#) (ifeu / M-Five 2018)

³ [Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030](#) (ifeu et al. 2018)

⁴ [Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030](#) (ifeu et al. 2020)

⁵ [Zentrale Ausgestaltungsfragen hinsichtlich eines Förderregimes für Oberleitungs-Hybrid-LKW \(OH-Lkw\) – Eine \(institutionen-\)ökonomische Analyse](#) (Beckers et al. 2019)

Planungen des Bundesverkehrsministeriums zur Erreichung der Klimaziele für das Jahr 2030 jährliche CO₂-Minderungen von 17-18 Mio. Tonnen gegenüber der Referenzentwicklung vorgesehen (BMVI 2019). Unter den bereits beschlossenen Maßnahmen können allerdings lediglich die CO₂-Grenzwerte für Lkw in ihrer CO₂-Minderungswirkung mit etwa 5 Mio. Tonnen pro Jahr klar quantifiziert werden (Öko-Institut / Fraunhofer ISI / et al. 2020). Für die O-Lkw-Technologie wird innerhalb der Bilanzgrenzen des Verkehrssektors ein CO₂-Minderungspotential von bis zu 9,2 Mio. Tonnen im Falle des Aufbaus eines Oberleitungsbasisnetzes aufgezeigt (ifeu et al. 2020). Die O-Lkw-Technologie kann also einen signifikanten Beitrag sowohl zur Schließung der genannten Lücke bei der Klimazielerreichung als auch zur von der Bundesregierung angestrebten Elektrifizierung eines Drittels des schweren Lkw-Verkehrs leisten. Mit dem vorliegenden Papier möchten wir konkrete Handlungsoptionen aufzeigen mit dem Ziel, dieses Potential zur kosteneffizienten Treibhausgasminderung im Güterverkehr zu nutzen und damit die Erreichung der deutschen Klimaziele im Verkehrssektor zu begünstigen.



In der ersten Phase der Roadmap („Pilotphase“) besteht das Hauptziel darin, in größerem Maßstab Erfahrungen mit der O-Lkw-Technologie zu gewinnen. Zentraler Bestandteil der Pilotphase muss somit die Realisierung eines großen Pilotvorhabens in der Größenordnung von mindestens 100 km Länge sein, um O-Lkw im Fernverkehr testen zu können. Die Erfahrungen aus diesem Pilotvorhaben ermöglichen schlussendlich eine politische Grundsatzentscheidung über den Ausbau eines Oberleitungs-Basisnetzes. Ist diese erfolgt, so beginnt die zweite Phase („Netzausbauphase“), in der ein planbarer Oberleitungsnetzausbau mit gezielter flankierender Impulse aufseiten des Fahrzeugmarkts im Vordergrund steht. Zudem können dann verstärkt Synergien zwischen verschiedenen elektrischen Antriebssystemen (Batterie, Brennstoffzelle, Oberleitung) in der Praxis erprobt werden. Zielpunkt der Roadmap ist der Eintritt in eine Konsolidierungsphase um das Jahr 2030 herum. Durch das Basisnetz können Oberleitungs-Lkw dann flächendeckend in den besonders geeigneten Anwendungen eingesetzt werden und das Oberleitungsnetz mittelfristig aus Nutzungsgebühren refinanziert werden.

1 Vorbemerkungen und Rahmen

1.1 Ausgangspunkt: Die Technologie und ihre Anwendung in Deutschland

Gegenwärtig gibt es drei wesentliche Konzepte für die Elektrifizierung von Straßen: Dazu gehören einerseits stromleitende Schienen in oder auf der Fahrbahn (konduktiv) oder drahtlose Lösungen im Straßenkörper (induktiv). In Deutschland wird der Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) favorisiert, der primär von einem Elektromotor angetrieben wird und Strom über eine Oberleitung erhält. Vorteil dieser Technologie ist, dass diese Art der Stromübertragung bereits im Schienenverkehr seit langem erprobt ist und keine Auswirkungen auf die Fahrbahnoberfläche oder das Innere der Fahrbahn hat (Gustavsson et al. 2019). Der Technologie-Reifegrad (engl. Technology Readiness Level [TRL]) von O-Lkw liegt bereits im Bereich von TRL 6-7 (Lehmann et al. 2020). Es sind hier also bereits Prototypen seit mehreren Jahren im Einsatz (siehe Tabelle 1). Die Stromschiene oder eine induktive Lösung befinden sich dagegen tendenziell noch bei TRL 5, da sich die Versuchsanlagen größtenteils noch im Aufbau oder am Beginn des Betriebes befinden. Die O-Lkw Technologie schließt jedoch Pkw prinzipiell von der Straßenelektrifizierung aus.

Da O-Lkw über wesentliche Teile ihres Betriebs direkt mit dem Stromnetz verbunden sind, brauchen sie nur geringe Kapazitäten zur Energiespeicherung an Bord. Damit Fahrten auch jenseits der Oberleitungen möglich werden, ist es dennoch notwendig, entweder Strom in begrenztem Umfang in einer Traktionsbatterie zu speichern oder einen anderen Energieträger mitzuführen. Vor allem zwei Varianten werden diskutiert und in diesem Bericht vorrangig adressiert:

- Ein rein elektrisches O-BEV (BEV = Battery Electric Vehicle) mit einer ausreichend großen Batterie, die während der Fahrt über die Oberleitung geladen werden kann und zusätzlich stationär während längerer Stopps/Pausen, z.B. im Depot oder an einer Rampe. Sind die Strecken jenseits der elektrifizierten Straßen nicht zu lang, lässt sich die Batteriekapazität gegenüber einem rein elektrischen Lkw (BEV) deutlich reduzieren.
- Ein Oberleitungs-Lkw mit Hybridantrieb (O-HEV = Hybrid Electric Vehicle) verfügt dagegen über zwei Antriebsstränge, in der Regel neben dem Elektromotor auch einen Dieselmotor. Hier lässt sich der Kraftstoff zwar problemlos und schnell tanken, das Potenzial zur CO₂-Reduktion fokussiert dabei jedoch auf den elektrischen Fahranteil.

Zusätzlich wird auch über Wasserstoff als ergänzenden Energieträger für Oberleitungs-Lkw diskutiert, der an Bord mittels Brennstoffzelle in Strom umgewandelt werden kann – eine Art „Range Extender“-Konzept. Aktuell sind hier jedoch noch keine Prototypen im Einsatz oder angekündigt.

Die direkte Nutzung von Strom aus dem Netz (ggf. mit Zwischenspeicherung in einer Batterie) ermöglicht Oberleitungs-Lkw gegenüber anderen Antriebstechnologien vergleichsweise

hohe Wirkungsgrade von über 80 % (vom Stromnetz bis zur Achse). Daher liegen die Betriebskosten für O-Lkw in der Regel auch unter denen von Diesel-Lkw. Konzeptbedingt sind O-Lkw jedoch von einer entsprechenden Oberleitungs-Infrastruktur, mindestens an den wichtigsten Fernstraßen, abhängig.



Abbildung 1: Oberleitungs-Lkw im Betrieb auf der ELISA-Teststrecke (A5 in Hessen). Quelle: Siemens 2019

Bisher wird die O-Lkw-Technologie primär im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsprojekte entwickelt. Von 2016 bis 2020 wurde die Technologie in einem Feldversuch in Gävleborg, Schweden, erprobt. Zudem wurde ein „eHighway“ testweise in den USA, Nähe Los Angeles errichtet. In Schweden werden mittlerweile auch andere Technologien zur Elektrifizierung der Straße erprobt: Konduktive Schienen in den Projekten eRoadArlanda und Evolution Road sowie ein induktives System in dem Projekt Smartroad Gotland (siehe Tabelle 1).

Erste Tests in Deutschland begannen mit Oberleitungen auf einer von Siemens betriebenen Teststrecke bei Berlin (Groß Dölln) und wurden durch eine Reihe von wissenschaftlichen Studien (ENUBA und ENUBA 2) begleitet. Mittlerweile befinden sich drei deutsche Feldtests (in Hessen, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg) in verschiedenen Stadien der Umsetzung und werden zu Teilen vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) finanziert:

- **ELISA** (Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen): Beidseitig 5 km lange Strecke auf der Autobahn A5 im Bundesland Hessen zwischen den Anschlussstellen Langen-Mörfelden und Weiterstadt (auf dem Abschnitt zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt). Der Betrieb wurde im Mai 2019 aufgenommen. Es sind 5 Fahrzeuge im Einsatz, die von verschiedenen Logistikunternehmen genutzt werden sollen.
- **FESH** (Feldversuch eHighway Schleswig Holstein): Beidseitig 5 km lange Strecke der Autobahn A1 im Bundesland Schleswig-Holstein zwischen Reinfeld und Lübeck. Die Abnahme

der Oberleitungs-Anlage und die Auslieferung des ersten Lkw erfolgte im Dezember 2019. Die Inbetriebnahme erfolgte Anfang 2020.

- **eWayBW** (eWay Baden-Württemberg): Insgesamt knapp 4 km in zwei Teilen (2,6 km mit Verlängerungsoption um 600 m und 750 m) auf der Bundesstraße B462. Die Planung ist abgeschlossen, der Betriebsbeginn ist für 2021 vorgesehen.

Eine Übersicht der aktuellen Anwendungen findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Aktuelle Anwendung der Straßenelektrifizierung in Europa

Name	Ort	Technik	Start des Fahrbe- triebs	Ende des Fahrbe- triebs
E16 Electric road ¹	E16 in Region Gävleborg, Schweden	Oberleitung	2016	2020
eRoadArlanda ²	Stockholm Arlanda Airport, Schweden	Stromschiene	2018	2020
ELISA ³	A 5, Deutschland	Oberleitung	2019	2022
FESH ⁴	A 1, Deutschland	Oberleitung	2019	2022
eWayBW ⁵	B 462, Deutschland	Oberleitung	2020	2024
Smartroad Gotland ⁶	Visby, Schweden	Induktiv	2020	2022 (vorauss.)
Evolution Road ⁷	Lund, Schweden	Stromschiene	2020	2022 (vorauss.)

1.2 Perspektive: Wirtschaftlichkeit von O-Lkw

Für eine Verbreitung von O-Lkw über geförderte Test- und Pilotanwendungen hinaus wird es mittelfristig auf die Attraktivität der Technologie für die Betreiber ankommen. Diese ist stark von den Kosten getrieben. Da eine hinreichende Oberleitungs-Infrastruktur Voraussetzung für den Systemaufbau ist, anfänglich jedoch nur wenige Lkw diese Infrastruktur nutzen werden, wird im Zeithorizont bis 2030 davon ausgegangen, dass die Infrastruktur zunächst seitens des Staats finanziert werden muss. Die Wirtschaftlichkeit aus Betreibersicht spielt dann die zentrale ökonomische Rolle für den Markthochlauf.

Abbildung 2 zeigt die Vollkosten aus Sicht der Lkw-Betreiber (Total Cost of Ownership, TCO) ohne Infrastrukturbeteiligung für O-Lkw verschiedener Konfiguration: Diesel-Hybrid (O-

¹<https://www.regiongavleborg.se/regional-utveckling/samhallsplanering-och-infrastruktur/elvag/the-electric-highway-in-english/>

²<https://eroadarlanda.com/>

³<https://ehighway.hessen.de/>

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

⁵<https://ewaybw.de/>

⁶<https://www.smartroadgotland.com/>

⁷<https://www.evolutionroad.se/>

HEV) und rein elektrische Oberleitungs-Lkw (O-BEV) mit Traktionsbatterien verschiedener Reichweite für Fahrten abseits der Oberleitung. Wesentliche differierende Kostenbestandteile sind der Wertverlust des Fahrzeugs, die Energiekosten und (abhängig von den gesetzlichen Rahmenbedingungen) die Mautausgaben¹. Die Kosten für die Anschaffung des Fahrzeugs und somit für den Wertverlust wurden dabei auf Basis einer bottom-up-Betrachtung der Komponentenkosten ermittelt und durch Expertengespräche plausibilisiert.

Gegenwärtig (2020) liegen die Vollkosten für Oberleitungs-Lkw noch etwas über den Kosten von Diesel-Lkw. Höhere Fahrzeugkosten, bedingt vor allem durch kleine Stückzahlen, werden dabei zumindest teilweise durch geringere Energiekosten kompensiert. Der Kostenunterschied zwischen einem O-HEV und einem O-BEV mit nur 100 km batterieelektrischer Reichweite ist gering. Lediglich Konzepte mit größeren elektrischen Reichweiten von 250 km verteuern die O-Lkw-Technologie noch einmal deutlich. Unter besonders geeigneten Einsatzprofilen (sehr hoher Fahranteil unter Oberleitung) lässt sich aufgrund des begrenzten Kostenunterschieds sogar bereits heute ein Gesamtkostenvorteil erzielen. Für das Jahr 2030 zeigen sich dann jedoch deutliche Kostenvorteile für den O-HEV und den O-BEV 100 und zumindest eine Kostenparität des O-BEV250 gegenüber dem Diesel-Lkw.

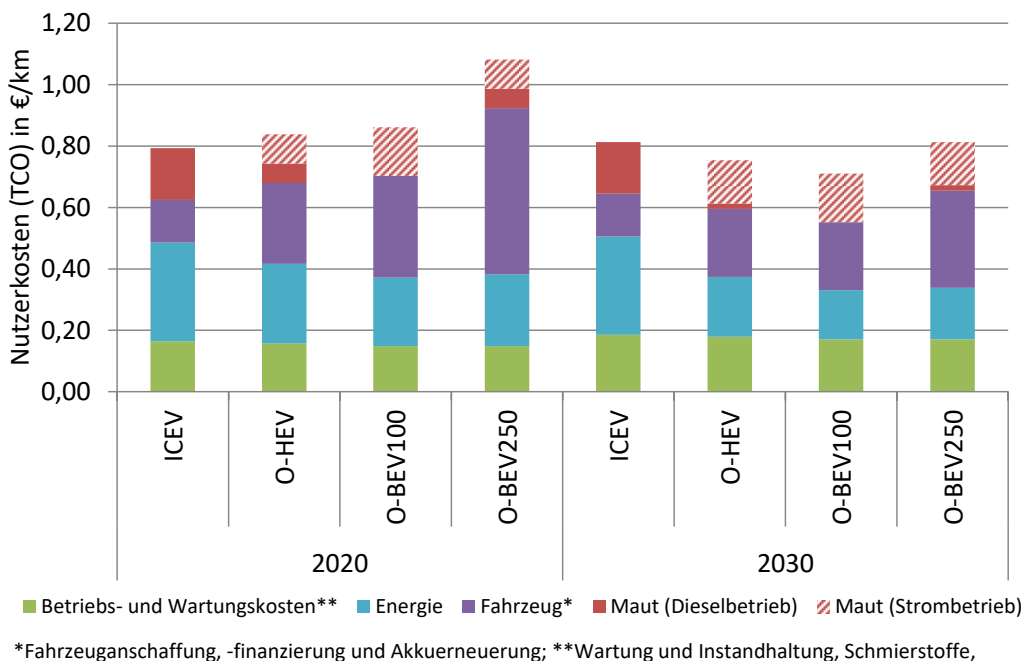


Abbildung 2: Nutzerkosten für Diesel-Lkw und Oberleitungs-Lkw (Bezugsjahr 2020 und 2030) auf Basis von (ifeu et al. 2020)

Auch 2030 wird jedoch noch mit signifikant höheren Fahrzeugkosten gerechnet, die aber durch niedrigere Energiepreise in vielen Fällen kompensiert werden können. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit von O-Lkw ist daher die Strecke, die tatsächlich unter Oberleitung zurückgelegt werden kann. Für das Jahr 2030 wurde ermittelt, dass ein O-Lkw für einen wirtschaftlichen Betrieb jährlich etwa 35.000 km unter Oberleitung betrieben werden muss. Das entspricht etwa einem Drittel der Jahresfahrleistung einer durchschnittlichen Sattelzugmaschine in Deutschland.

¹ Nähere Angaben zur Vollkostenbetrachtung sind (ifeu et al. 2020) zu entnehmen.

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). Weiterhin sind die Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Energiekosten aktuell besonders groß¹.

Schlussendlich stellen TCO jedoch kein alleiniges Entscheidungskriterium für die Technologiewahl der Fahrzeugbetreiber dar (ifeu / M-Five 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 Verlagerung finanziell honoriert werden. In der Praxis sind also prinzipiell Abweichungen von einer rein TCO-basierten Entscheidung in beide Richtungen denkbar.

Für die Politikentscheidung spielen zusätzlich noch die Infrastrukturkosten eine wichtige Rolle. In verschiedenen Studien wurden bereits Abschätzungen der Infrastrukturkosten pro elektrifizierter Strecke in beide Fahrtrichtungen durchgeführt (Öko Institut et al. 2020). Wichtige Einflussfaktoren auf die Kosten sind der Leistungsbedarf pro Kilometer (entsprechend der Befahrungsstärke), das Spannungsniveau sowie die gewählte Art der Netzanbindung. Daher ergeben die vorliegenden Studien eine große Bandbreite zwischen 1,5 und 3 Mio. €/km. Für das in diesem Projekt analysierte Basisnetz ergeben sich damit Investitionskosten für die Infrastruktur zwischen 5 und 10 Mrd. €. Da die Kosten jedoch nur einmalig und über einen längeren Zeitraum anfallen, liegen die jährlichen Kosten im Vergleich mit dem jährlichen Haushalt des Verkehrsressorts (etwa 30 Mrd.€) bei nur wenigen Prozent.

1.3 Zielhorizont: Potentielle Beiträge von O-Lkw zum Klimaschutz

Die klimapolitischen Ziele für den Verkehr sind eine politische Haupttriebfeder für die Diskussion von Antriebsalternativen im Straßengüterfernverkehr. Der CO₂-Bilanz von Oberleitungs-Lkw kommt somit eine zentrale Bedeutung zu. Im Projektrahmen wurden die Treibhausgas-Emissionen pro Fahrzeugkilometer für Sattelzugmaschinen mit verschiedenen Antriebssystemen unter energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Jahres 2030 verglichen (Abbildung 3). In diesem Jahr könnte nach erfolgreicher Systemeinführung ein Oberleitungs-Basisnetz etabliert und ein nennenswerter Markthochlauf erreicht sein (vgl. Jöhrens et al. 2020, Abschnitt 3). Die Strombereitstellung für Oberleitungs-Lkw wurde mit etwa 300 g CO₂-Äq/kWh im Jahr 2030 angenommen, was in etwa einer Umsetzung des Kohleausstiegs gemäß dem aktuellen Gesetzentwurf entsprechen würde (vgl. Erläuterungen Jöhrens et al. 2020, Anhang A3). Neben der Nutzungsphase wurde auch die Herstellung des Fahrzeugs und der Oberleitungs-Infrastruktur sowie die Bereitstellung von Strom und Dieselmotorkraftstoff bilanziert.

¹ Die Finalisierung des Berichtes fällt in die Hochzeit der Corona-Pandemie im Frühjahr 2020, die u.a. von stark schwankenden, tlw. sehr niedrigen Ölpreisen, gekennzeichnet ist. Ob und wie lange sich dieser Trend fortsetzt, ist zu diesem Zeitpunkt nicht absehbar. Die Autoren haben darauf verzichtet, diese sehr kurzfristigen und schwankenden Preisentwicklungen im Rahmen der Studie zu berücksichtigen, sondern verwenden bereits etablierte Szenarien zur Entwicklung der Energiepreise.

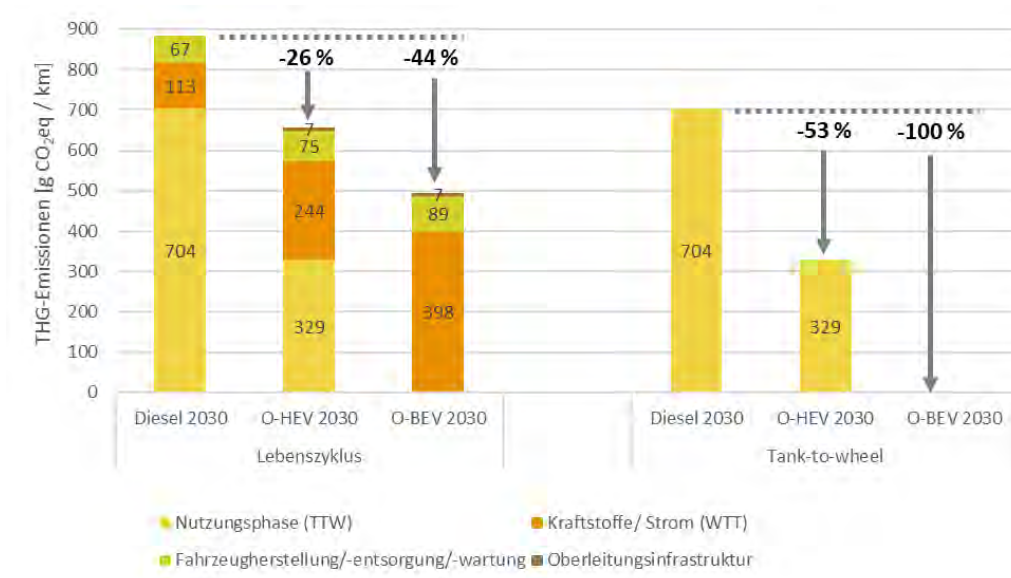


Abbildung 3 : Treibhausgasemissionen pro Fahrzeug-km im Vergleich zwischen Diesel, O-HEV und O-BEV¹ im Bezugsjahr 2030 nach (ifeu et al. 2020)

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-Bilanz².

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 Gesamtminde rung naturgemäß vom Anteil der Fahrleistung unter Oberleitung ab.³

Die jüngst beschlossenen Ziele des "Green New Deals"⁴ 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.

¹ 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.

² 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.

³ Hier wurde der Fahranteil von O-HEV auf dem im Projekt "Roadmap OH-Lkw" definierten Oberleitungsnetz des Jahres 2030 zugrunde gelegt.

⁴ Anhebung des EU-weiten Minderungsziels für 2030 auf über 50 % ggü. 1990

Neben den THG-Minderungen sind durch Oberleitungs-Lkw auch Auswirkungen auf weitere Umweltwirkungskategorien sowie den Bedarf an natürlichen Ressourcen zu erwarten. Bezüglich der Stickoxidemissionen sollten zukünftig alle (neuzugelassenen) Lkw die Schadstoffnorm Euro VI einhalten. Im Antriebsvergleich sind die Unterschiede zwischen dem Diesel-Lkw und den Oberleitungs-Fahrzeugen daher gering. In einer Lebenswegbetrachtung ergeben sich jedoch weitere Unterschiede, die durch die aufwändigere Fahrzeugherstellung bedingt sind. In Summe ist 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.

Mittelfristig wird sich die Luftqualitätsproblematik in deutschen Ballungsgebieten jedoch insgesamt entspannen, 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.

1.4 Umfeld: Regulatorischer Rahmen bis 2030

Der Straßengüterverkehr ist von einer Reihe regulatorischer Vorgaben betroffen, die hauptsächlich von der Bundes- und EU-Ebene ausgehen. Zum Teil werden dabei explizit alternative Antriebstechnologien adressiert. Diese Vorgaben bilden einen wichtigen Rahmen für die vorliegende Roadmap und werden daher im Folgenden kurz erläutert. In den Handlungsfeldern des nachfolgenden Kapitels 2 werden an einigen Stellen Vorschläge für eine Anpassung dieser Vorgaben gemacht.

Auf EU-Ebene können die kürzlich verabschiedeten **CO₂-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge** (EU-Verordnung 2019/1242) als zentrale Maßnahme zur Verringerung der Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs angesehen werden. Im Vergleich zu 2019 sollen die Emissionen von neu zugelassenen Nutzfahrzeugen bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30 % sinken. In 2022 sollen die Grenzwerte einer Revision unterzogen werden. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuzulassungen pro Hersteller werden aus den Emissionen der einzelnen Zulassungen und dem Anteil ihres Anteils an festen Gruppen unterschiedlicher Fahrzeugkonfigurationen berechnet. Nullemissionsfahrzeuge können dabei bis zu einer gewissen Grenze mehrfach auf den Flottendurchschnitt angerechnet werden. Übersteigen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuzulassungen des Herstellers die spezifischen Ziele des Herstellers, sind Strafzahlungen fällig.

Im Zuge der CO₂-Flottengrenzwerte wurde das **zulässige Maximalgewicht für Nullemissionsfahrzeuge** zudem um bis zu 2 Tonnen erhöht, was eventuelle Nachteile bei der Nutzlast ausgleichen soll.

Die europäische **Richtlinie 2014/94/EU über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID)** soll den Infrastrukturaufbau EU-weit vereinheitlichen und beschleunigen. Sie verpflichtet die Mitgliedsländer, nationale Ausbauziele in einem sogenannten Nationalen Strategierahmen nach gewissen Vorgaben festzulegen. So muss die LNG-Infrastruktur bis zum Jahr 2025 den Betrieb von LNG-Lkw im TEN-T-Kernnetz ermöglichen. Ähnliches gilt für Was-

serstoff in den Ländern, die eine H2-Infrastruktur aufbauen (u.a. Deutschland). Die Vorgaben im Bereich der Ladeinfrastruktur adressieren dagegen bislang ausschließlich Pkw, auch fehlt bislang ein fertiger Standard für Ladeleistungen, wie sie von schweren Lkw benötigt werden. Oberleitungs-Infrastruktur spielt bei der AFID bislang keine Rolle. Eine Überprüfung der Richtlinie im Hinblick auf ihre Umsetzung wird im Jahr 2020 stattfinden, gegebenenfalls werden daraufhin einzelne Bestimmungen der Richtlinie angepasst.

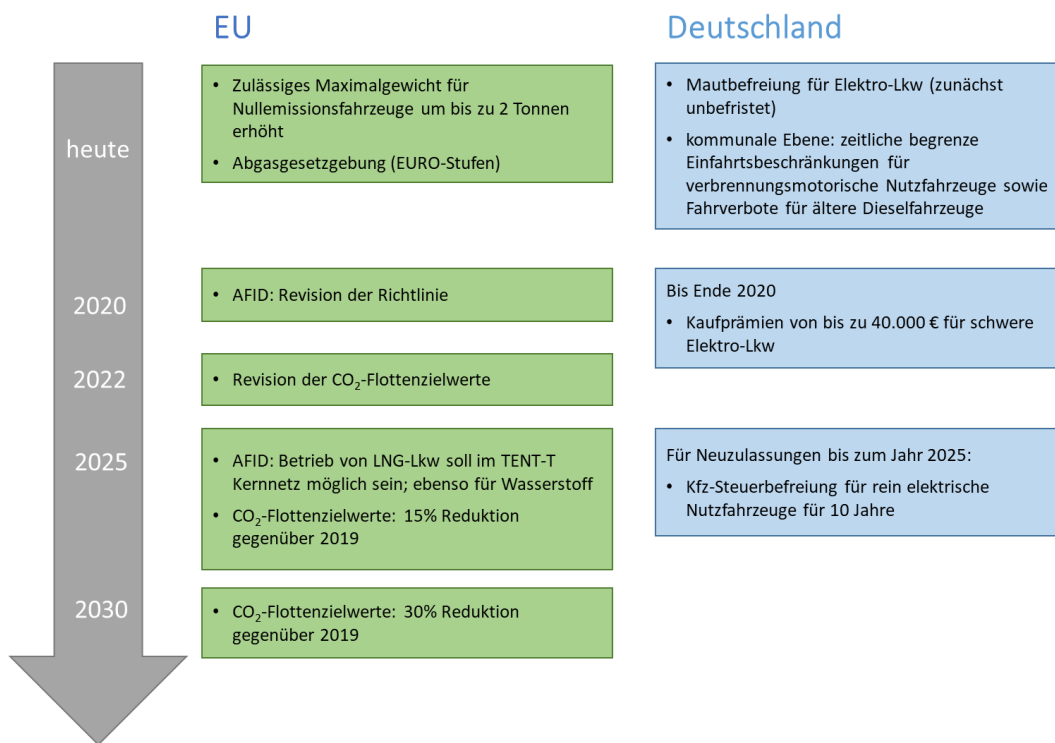


Abbildung 4: Übersicht relevanter Regulatorik für Oberleitungs-Lkw

Des Weiteren sind die Abgasgesetzgebung (Euro-Stufen), die Clean Vehicles Directive mit Vorgaben für den Anteil von Nullemissionsfahrzeugen bei öffentlichen Beauftragungen sowie die Erneuerbare-Energien-Richtlinie auf EU-Ebene für den Straßengüterverkehr prinzipiell bedeutsam. Ihre Relevanz für eine Einführung von O-Lkw wird jedoch insgesamt als deutlich geringer eingeschätzt.

Auf nationaler Ebene sind verschiedene **Förderinstrumente für Lkw mit alternativen Antrieben** in Kraft. So sind Elektro-Lkw in Deutschland zunächst zeitlich unbefristet von der Lkw-Maut befreit (BMVI 2020). Zudem wird eine Kaufprämie von bis zu 40.000 € für schwere Elektro-Lkw gewährt (BMVI 2018). Ferner sind rein elektrische Nutzfahrzeuge, ebenso wie Pkw, für 10 Jahre von der Kfz-Steuer befreit (Zoll online 2020). Die Befreiung soll laut des im Juni 2020 von der Bundesregierung beschlossenen Konjunkturpakets für Neuzulassungen bis zum Jahr 2025 gewährt werden (Bundesregierung 2020a). Von den genannten Vergünstigungen könnten grundsätzlich auch O-Lkw profitieren.

Auf kommunaler Ebene gibt es bereits vereinzelt zeitlich begrenzte Einfahrtsbeschränkungen für verbrennungsmotorische Nutzfahrzeuge, hauptsächlich aus Lärmschutzgründen. Auch aus Gründen der Luftqualität gibt es bereits Fahrverbote für ältere Dieselfahrzeuge in

Kommunen. Diese lokalen Beschränkungen könnten lokal bedeutende Anreize für den Einsatz von Elektro-Lkw darstellen und auch den Einsatz von rein elektrischen O-Lkw begünstigen.

1.5 Fazit: Herausforderungen bei der Einführung eines O-Lkw-Systems

Die Einführung von O-Lkw würde den Straßengüterfernverkehr in vielfältiger Weise verändern und dabei eine Vielzahl von Akteuren betreffen. Die dabei auftretenden Herausforderungen lassen sich grob in folgende Bereiche unterteilen (ifeu / M-Five 2018):

- **Akzeptanz:** Sind die betroffenen Akteure bereit, die neue Technologie mitzutragen?
- **Zuverlässigkeit:** Ist das O-Lkw-System technisch stabil und den Anforderungen im Straßengüterverkehr gewachsen?
- **Kosten:** Ist ein wirtschaftlicher Betrieb der O-Lkw-Technologie für alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette gegeben?
- **Umfeld:** Welche äußeren Faktoren können die Möglichkeit oder Sinnhaftigkeit eines O-Lkw-Systems potentiell in Frage stellen? Besondere Bedeutung kommt in dieser Hinsicht der Planbarkeit zu: Können sich die Akteure darauf verlassen, dass die Rahmenbedingungen für ein Engagement bei der O-Lkw-Technologie konstant bleiben oder sich in einer vorhersehbaren Weise verändern?

Die konkreten Herausforderungen lassen sich wiederum danach differenzieren, welcher Teil des O-Lkw-Systems betroffen ist, also beispielsweise die Oberleitungs-Infrastruktur, die Fahrzeuge oder die Betreiber- und Logistikstrukturen. Die nachstehende Tabelle veranschaulicht dies mit einigen beispielhaften Fragestellungen.

Tabelle 2: Beispielhafte Fragestellungen und Herausforderungen bei der Einführung von Oberleitungs-Lkw

	Fahrzeuge	Infrastruktur	Betreiber und Logistik
Akzeptanz	Welche Rolle spielt der Elektroantrieb für die Lkw-Fahrer?	Gibt es visuelle Beeinträchtigungen durch die Infrastruktur?	Wird es eine Zahlungsbereitschaft für umweltfreundliche Transporte mit O-Lkw geben?
Zuverlässigkeit	Ist die schnelle Reparatur eines O-Lkw gesichert?	Welche Folgen hat ein Defekt der Oberleitung?	Sind Terminlieferungen durch technische Unsicherheiten gefährdet?
Kosten	Welche Preise sind für O-Lkw auf dem Zweitmarkt erzielbar?	Kann sich ein Oberleitungs-System künftig finanziell tragen?	Für welche Einsatzprofile ist ein wirtschaftlicher Betrieb gesichert?
Umfeld	Wie entwickeln sich Antriebsalternativen?	Sind Batterie-Lkw mit Schnellladeinfrastruktur künftig fernverkehrstauglich?	Wie wird die Digitalisierung die Nutzung von Fahrzeugen verändern?

In der vorliegenden Roadmap werden solche Herausforderungen auf der Zeitschiene eingeordnet und zu Handlungsfeldern zusammengefasst. Es werden Vorschläge gemacht, auf welche Weise die Herausforderungen adressiert werden können. Je nach Charakter der Herausforderung werden dabei zum Teil konkrete Instrumente vorgeschlagen, an anderer Stelle aber auch Fragestellungen für weitergehende Forschung formuliert.

2 Roadmap: Schritte zur Systemeinführung

Die Einführung der Oberleitungs-Lkw-Technologie in den Straßengüterfernverkehr wird hier in drei Phasen unterteilt¹:

- Die **Pilotphase**, in der neben der Erprobung der Technik vor allem technische und administrative Voraussetzungen für eine breite Systemeinführung geschaffen werden,
- die **Netzausbauphase**, in der Infrastrukturaufbau und Marktentwicklung im Vordergrund stehen, sowie
- die **Konsolidierungsphase**, in der das O-Lkw-System wirtschaftlich verstetigt wird.

Nach ausreichender Erprobung und Klärung der Ausbaubedingungen würden am Ende der Pilotphase eine politische Entscheidung für den Ausbau einer grundlegenden Oberleitung-Infrastruktur getroffen und die Bedingungen für die Netzausbauphase gesetzt werden. Verbindliche Rahmenbedingungen zum Netzausbau sind Grundlage für alle beteiligten Akteure. Diese müssen so ausgelegt sein, dass das resultierende Basisnetz mit hoher Wahrscheinlichkeit einen systemisch sinnvollen Betrieb eines O-Lkw-Systems ermöglicht und somit unabhängig von der weiteren Technologie- und Netzentwicklung in der nachfolgenden Konsolidierungsphase eine tragfähige Entscheidung („no regret“) darstellt.

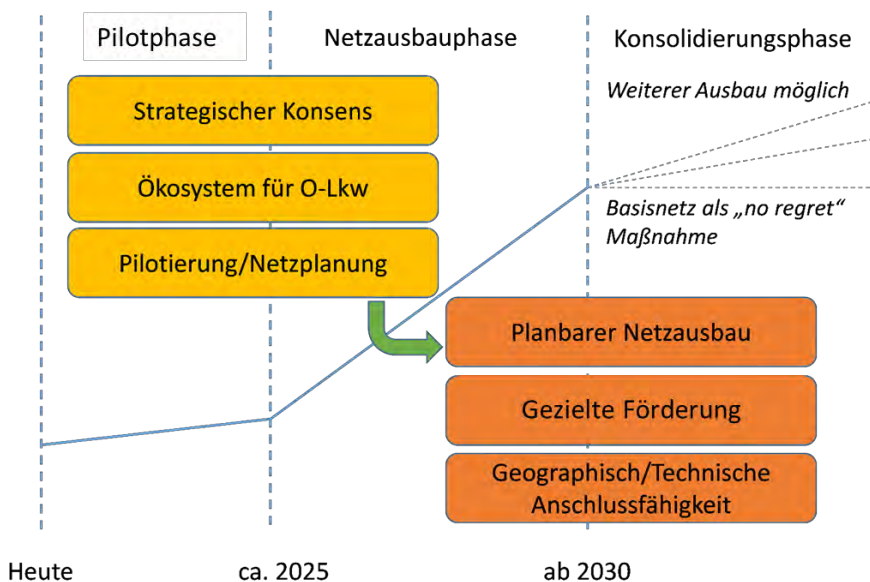


Abbildung 5: Phasen der Einführung von Oberleitungs-Lkw. Auf der Ordinate ist die Entwicklung der elektrifizierten Streckenlänge in den einzelnen Phasen qualitativ angedeutet.

¹ Diese drei Phasen entsprechen den Phasen 2-4 in (Beckers et al. 2019), wo die Ergebnisse der institutionenökonomischen Markteinführungsbetrachtung innerhalb des Vorhabens „Roadmap OH-Lkw“ dargestellt sind.

Für die Pilotphase sowie die Netzausbauphase werden im Folgenden Handlungsfelder umrissen und konkrete Schritte aufgezeigt. Die Konsolidierungsphase wird abschließend in Form eines Ausblicks beschrieben.

2.1 Pilotphase (~5 Jahre)

2.1.1 Ausgangssituation und Ziel

Startpunkt der Pilotphase ist die aktuelle Situation (siehe Abschnitt 1.1). Oberleitungs-Lkw sind im Vergleich zu anderen alternativen Antrieben erst seit relativ kurzer Zeit (nämlich etwa 10 Jahren) im Gespräch. Die Technologie wurde im Rahmen von Feldversuchen auf öffentlichen Straßen in den letzten drei Jahren weiterentwickelt und wird aktuell auf der TRL-Skala mit 6-7 angegeben. Die positive Treibhausgasbilanz von O-Lkw im Vergleich zu Diesel-Lkw ist mittlerweile hinreichend belegt (siehe Abschnitt 1.3). Im Kontext der deutschen Forschungsprojekte zu O-Lkw hat sich eine Fachcommunity aus Forschern, Industrie, Verbänden und Regierung entwickelt, die regelmäßig zum Austausch zusammenkommt. Auf internationaler Ebene gibt es eine Regierungsvereinbarung zwischen Schweden und Deutschland über Forschungszusammenarbeit im Themenbereich von „Electric Road Systems“ (ERS), zu denen auch O-Lkw gehören (Bundesregierung / Government of Sweden 2017). Zudem findet ein regelmäßiger internationaler Austausch, z.B. bei der jährlichen „Electric Road Systems Conference“, statt.

In der aktuellen Pilotphase der O-Lkw-Einführung spielen vor allem Hemmnisse in folgenden drei Bereichen eine wichtige Rolle:

1. Es besteht bei vielen Akteuren Unklarheit über die technologie-, wirtschafts- sowie umweltpolitischen Gründe, die für eine Einführung von O-Lkw sprechen, und demzufolge über die Rolle, die diese Technologie zukünftig spielen könnte.
2. Die Technologie wird stark von einzelnen Akteuren vorangetrieben, die jedoch nur Teilbereiche der für eine Systemeinführung notwendigen Aktivitäten und Dienstleistungen abdecken können.
3. Der Bekanntheitsgrad der O-Lkw-Technologie ist innerhalb wie außerhalb Deutschlands noch gering. Im Diskurs auf EU-Ebene spielen O-Lkw derzeit noch kaum eine Rolle.

Diese Hemmnisse können überwunden werden, indem (1) ein strategischer Konsens über die sinnvolle zukünftige Rolle von O-Lkw hergestellt wird, (2) ein integriertes System von Akteuren geschaffen wird, das sämtliche für den O-Lkw-Betrieb notwendigen Bereiche abdeckt, sowie (3) mittels größerer Pilotvorhaben die Bekanntheit der Technologie gesteigert wird und die praktischen Erfahrungen vertieft werden. In den folgenden Abschnitten werden entsprechende Handlungsmöglichkeiten dazu umrissen.

2.1.2 Handlungsfeld P1: Strategischen Konsens zur künftigen Rolle von O-Lkw schaffen

Die O-Lkw-Technologie ist einem großen Teil der allgemeinen Öffentlichkeit bisher nicht bekannt; auch unter Spediteuren ist das Wissen um diese Technologie derzeit noch gering. Durch die mittlerweile angelaufenen Feldversuche konnte der Bekanntheitsgrad allerdings

bereits erheblich gesteigert werden – zum einen durch die direkte Sichtbarkeit auf den entsprechenden Autobahnabschnitten, zum anderen durch die mediale Berichterstattung über die Feldversuche.

Eine weitere Steigerung der Bekanntheit von O-Lkw, insbesondere über größere Pilotvorhaben, ist essentiell, um die Grundlage für eine breite Diskussion über eine großmaßstäbige Einführung zu legen.



Sofern die Technologie einzelnen Akteuren bekannt ist, besteht momentan weitgehende Unklarheit über ihre technologie-, wirtschafts- sowie umweltpolitische Motivation. Beispielsweise wird oftmals angenommen, die Technologie sei als Ersatz für den Schienengüterverkehr intendiert. Daraus wird von manchen Akteuren ein Widerspruch zum politischen Ziel einer Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf die Schiene abgeleitet. Unabhängig davon ist beim Ausbau der Infrastruktur für den Straßenverkehr (gleich für welchen Antrieb) grundsätzlich darauf zu achten, dass dadurch keine zusätzlichen Anreize für Straßentransporte gegenüber Schienentransporten entstehen. Dabei spielen auch lokale Kapazitätsengpässe eine Rolle: Vielerorts ist die Schieneninfrastruktur bereits heute in einem Maße ausgelastet, dass eine zusätzliche Verlagerung von Transporten von der Straße auf die Schiene nicht mit der vorhandenen Infrastruktur möglich ist. Der notwendige Ausbau der Schieneninfrastruktur hat lange Planungs- und Bauzeiten und wird auch langfristig nur Teile des Straßengüterverkehrs auf die Schiene verlagern können. Eine entschiedene Dekarbonisierung des Straßenverkehrs bleibt somit notwendig.

Es sollte noch deutlicher kommuniziert werden, dass der O-Lkw keine zusätzliche Konkurrenz zum Schienengüterverkehr darstellt, sondern dazu beiträgt, den auch unter sehr optimistischen Annahmen bezüglich der Verlagerung auf die Bahn weiterhin auf der Straße abgewickelten Güterverkehr klimaverträglicher zu gestalten.



Bei vielen Akteuren besteht weiterhin Unwissen über die Kostenbilanz von O-Lkw. Die Investitionskosten für die Infrastruktur sind leicht verständlich und wurden medial breit kommuniziert. Die Analyse weiterer Kostenpunkte (insbesondere der Betriebskosten) sowie der Gesamtkostenbilanz erfordert hingegen eine vertiefte Beschäftigung mit der Materie. Im Ergebnis wird die Technologie mithin als teuer wahrgenommen, obwohl wissenschaftliche Untersuchungen übereinstimmend signifikante Kostenvorteile im Falle einer System Einführung im größeren Maßstab konstatieren (Gerbert et al. 2018), (Wietschel et al. 2017), (Hacker et al. 2020).

Um hier Transparenz zu schaffen, ist u.a. eine bessere Vernetzung der Forschungsarbeiten zu O-Lkw mit solchen zu anderen alternativen Antrieben sowie zu übergeordneten Fragestellungen erforderlich.



Es wird oftmals angenommen, die Einführung von O-Lkw schließe die Einführung anderer alternativer Antriebssysteme im Lkw-Fernverkehr aus, es müsse demzufolge also eine Alternativenentscheidung getroffen werden, die aufgrund der derzeitigen Faktenlage nicht getroffen werden kann. Die Untersuchung von Einführungsszenarien in diesem Vorhaben (ifeu et al. 2020) sowie in anderen Vorhaben (Hacker et al. 2020) zeigen dagegen recht klar, dass die stark befahrenen Autobahnabschnitte primäre Anwendungsgebiete von O-Lkw sind. Sie weisen aber auch darauf hin, dass auf weniger stark befahrenen (oder aus anderen Gründen für O-Lkw nicht optimalen) Strecken andere Antriebssysteme zum Einsatz kommen könnten und sollten.

Bezüglich der Rolle des Staates bei der Technologiewahl kommt eine aktuelle Untersuchung zu dem Schluss, dass es mitunter gezielter staatlicher Rahmensetzungen bedarf, um Technologieoffenheit herzustellen (Lehmann et al. 2020). Um einen ökonomisch effizienten Technologiemix zu ermöglichen, muss der Staat demzufolge beispielsweise infrastrukturelle Voraussetzungen schaffen und Pfadabhängigkeiten im Zusammenhang mit etablierten Technologien auflösen. Mithin kann dies nur gelingen, wenn der Staat vorhandenes Wissen nutzt, um einen effizienten zukünftigen Technologiemix einzugrenzen.

Im Auftrag der verantwortlichen Ressorts sollten daher optimale Einsatzfelder für die verschiedenen Technologien im Straßengüterverkehr unter wissenschaftlicher Begleitung definiert und abgegrenzt werden. Somit können Leitplanken für einen sinnvollen Technologiemix unter Maßgabe einer schnellen, verlässlichen und effizienten Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs abgeleitet werden.



Auf dieser wissenschaftlich abgesicherten Grundlage könnten dann baldmöglichst auch auf planerischer und politischer Ebene eine Diskussion über konkrete zukünftige Anwendungsfelder der O-Lkw-Technologie sowie verfügbarer Alternativtechnologien beginnen.

Diese Diskussion sollte im Rahmen institutionalisierter Dialogformate unter Beteiligung aller relevanten Stakeholder (insbesondere aus Politik, Fahrzeughersteller und Fahrzeugbetreiber) erfolgen.



Angesichts vorherrschender Planungsunsicherheit unter den Stakeholdern können in solchen Formaten alle Beteiligten in die Entwicklung gemeinsamer Ziele eingebunden werden und ein gemeinsames Verständnis für die Rolle der einzelnen Technologien im Straßengüterverkehr geschaffen werden. Die wissenschaftliche Basis beugt dabei einer Allokation von Technologien allein aufgrund von industriepolitischen Interessen vor, die ökonomisch und ökologisch weniger effizient sein könnte.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Dialogs können dann die notwendigen Entscheidungen der Politik sowie der Privatwirtschaft insbesondere zur Investition in Infrastruktur getroffen werden. Bereits existierende Strategien und Roadmaps sind primär entlang einzelner Technologien ausgerichtet, wie beispielsweise das Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Bundesregierung 2016), der nationale Entwicklungsplan Elektromobilität (Bundesregierung 2009) sowie ganz aktuell die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (Bundesregierung 2020b). Eine technologieübergreifende Diskussion ist essentiell, um diese Elemente sinnvoll zu verzahnen und insbesondere realistische Marktpotentiale für konkurrierende Einzeltechnologien abzuschätzen, um den Technologiehochlauf adäquat unterstützen zu können.

Wesentliche Ergebnisse eines solchen Dialogs sollten sein:

- Eine strategische Priorisierung verschiedener Antriebstechnologien für einzelne Anwendungsfelder¹ in einem breiten, stakeholderübergreifenden Konsens.
- Ein Fahrplan, in welchem Zeitrahmen grundlegende Infrastruktur für den Einsatz der jeweils prioritären Technologie in den einzelnen Anwendungsfeldern geschaffen werden soll. Im Fall des O-Lkws könnte dies die Entwicklung eines Kernnetzes auf stark befahrenen Autobahnstrecken bedeuten.

¹ Anwendungsfelder können beispielsweise durch Entfernungsklassen, logistische Netzwerktypen, transportierte Güter oder spezielle Anforderungen an die Transporte abgegrenzt werden.

- Die Quantifizierung indikativer Infrastrukturbudgets zur Aufnahme in die mittelfristige Finanzplanung.
- Vorschläge zur Schaffung von Investitionssicherheit bei den beteiligten Akteuren. Beispielsweise ist zu klären, wer Risiken durch nicht erwartungsgemäß verlaufende technische Entwicklungen bei den Antriebstechnologien oder durch Änderungen der Energiepreise zu tragen hat (Beckers et al. 2019).

Die „Nationale Plattform Zukunft der Mobilität“ (NPM) bildet den geeigneten Rahmen für einen solchen Dialog. Hier wurden bereits Grundlagen in Gestalt einer technologischen Charakterisierung der verfügbaren Technologien gelegt (NPM 2019a; b) sowie Abschätzungen der jeweiligen Potentiale vorgenommen (NPM 2020). Darauf könnte eine Abgrenzung der jeweils primären Einsatzfelder aufsetzen.

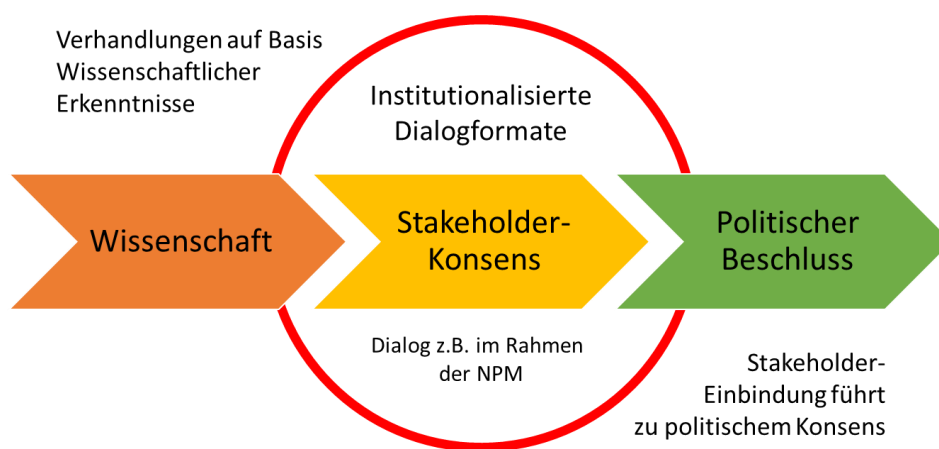


Abbildung 6: Prozessvorschlag, um die künftige Rolle der O-Lkw-Technologie als Klimaschutzinstrument zu definieren.

Parallel zu diesen nationalen Aktivitäten sollte die O-Lkw-Technologie auch auf europäischer Ebene bei Diskussionen um die Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs stets berücksichtigt werden. Insbesondere sollte sie in die Entwicklung einschlägiger Strategiedokumente sowie in die Formulierung wichtiger Rahmenprogramme wie des „Green New Deals“ Eingang finden. Die europäische Langfriststrategie zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs ist in Form von Strategiedokumenten festgehalten (Weißbuch zum Verkehr 2011, Europäische Strategie für emissionsarme Mobilität von 2016), die bislang nicht auf die O-Lkw-Technologie eingehen. Da diese Dokumente allerdings nur eine CO₂-Minderung um 60 % ggü. 1990 vorsehen, ist hier ohnehin eine Überarbeitung notwendig.

Bei zukünftigen Strategieentscheidungen sollte die Rolle der O-Lkw-Technologie bei der Erreichung ambitionierterer Ziele (im Einklang mit dem „New Green Deal“) definiert werden.



Im Jahr 2017 hat die EU-Kommission mit „Europa in Bewegung“ ein Maßnahmenbündel für eine nachhaltige Transformation des Verkehrssystems vorgeschlagen, aus dem u.a. die Richtlinie über den Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID) sowie die CO₂-Grenzwerte für Nutzfahrzeuge für die Jahre 2025 und 2030 hervorgegangen sind.

Bei der Weiterentwicklung insbesondere dieser Gesetzeswerke sollte die O-Lkw-Technologie berücksichtigt werden:



- Angemessene Anrechenbarkeit von O-Lkw auf die CO₂-Flottenzielwerte sicherstellen.
- Infrastruktur für O-Lkw als Gegenstand der nationalen Strategierahmendokumente aufnehmen, in denen die Mitgliedsländer ihre Infrastrukturplanungen niederlegen.
- Technische Mindestanforderungen an Oberleitungen in der AFID definieren, um internationale Interoperabilität zu gewährleisten.

Diese Schritte sind nicht zuletzt essentiell, um eine Gleichbehandlung der O-Lkw-Technologie mit anderen alternativen Antriebstechnologien und somit Planbarkeit für die beteiligten Akteure sicherzustellen.

Grundsätzlich ist überdies bei allen elektrisch angetriebenen Lkw die Erweiterung um einen Pantographen zur Nutzung von Strom aus der Oberleitung denkbar, unabhängig vom Energiespeicher an Bord (Batterie, Brennstoffzelle, Diesel-Range-Extender). Batteriefahrzeuge können zudem die Traktionsbatterie aus der Oberleitung laden. Welche technologischen Konfigurationen sinnvoll sind, wird stark vom Einsatzfeld des jeweiligen Fahrzeugs abhängen.

Für solche Kombinationen der O-Lkw-Technologie mit anderen On-Board-Energiespeichern für Lkw sollten frühzeitig Einsatzszenarien wissenschaftlich untersucht werden, um rechtzeitig ggf. Synergien heben zu können.



2.1.3 Handlungsfeld P2: Ökosystem für O-Lkw entwickeln

Der Einsatz von O-Lkw erfordert, wie andere Antriebstechnologien auch, ein komplexes systemisches Umfeld. Im Fall von O-Lkw besteht dies aus folgenden wesentlichen Bereichen (Gustavsson et al. 2019):

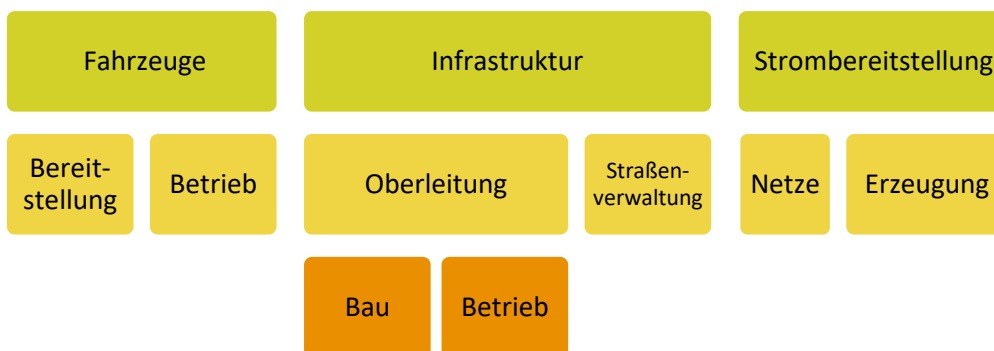


Abbildung 7: Wesentliche Bereiche des O-Lkw Systems (schematisch)

In all diesen Bereichen sind bereits Akteure tätig (Fahrzeugbetreiber, Fahrzeughersteller, Systemausrüster, Netzbetreiber usw.), die ihre Aktivitäten aber z.T. erheblich anpassen oder erweitern müssten, um Teil eines O-Lkw-Systems zu werden. Um O-Lkw anzubieten, müssen Fahrzeughersteller beispielsweise mit neuen Systemausrüstern kooperieren sowie ihre Vertragswerkstätten in die Lage versetzen, O-Lkw zu warten; Bauunternehmer müssen Know-how zum Oberleitungsbau auf Autobahnen aufbauen; etc. – Im Kern müssen dabei folgende Dinge gewährleistet werden:

- Es müssen neue oder angepasste technologische Lösungen entwickelt werden.
- Es sind neue Kooperationen zwischen verschiedenen Akteuren bzw. die Integration bestimmter Aufgaben (z.B. Strom- und Infrastrukturbereitstellung) erforderlich.
- Es müssen Geschäftsmodelle unter Unsicherheit über die Entwicklung technischer und wirtschaftlicher Parameter definiert werden.
- Diese Aktivitäten müssen vorfinanziert werden, solange sie keine planbaren Einnahmen generieren.

Dem Staat kommt die Aufgabe zu, hierfür geeignete Rahmenbedingungen und Anreize zu setzen und das Vertrauen der Akteure in die Technologie zu stärken. Dies kann zum einen durch ein allgemein positives Umfeld für umweltfreundliche Technologien, zum anderen durch gezielte Impulse für die O-Lkw-Technologie umgesetzt werden. Momentan geschieht dies vor allem durch staatliche F&E-Zuwendungen im Rahmen des Förderprogramms "erneuerbar mobil" des BMU. Im Folgenden werden einige Aspekte genannt, die bei staatlichen Aktivitäten in der Pilotphase der Systemeinführung besonders in den Blick genommen werden sollten.

Fahrzeuggestellung

Der wohl kritischste Punkt in der Pilotphase einer Systemeinführung ist die **Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeuge**. Bisher haben sich die Firmen Scania und Siemens intensiv mit der Entwicklung von O-Lkw beschäftigt. Durch den Eintritt weiterer Unternehmen in den Markt kann die benötigte hohe Dynamik bei der weiteren Entwicklung sichergestellt werden.

Wichtiges Ziel in der Pilotphase sollte es demzufolge sein, weitere Fahrzeughersteller und Systemausrüster für die Technologie zu interessieren, um einen Wettbewerb herzustellen.



So kann sichergestellt werden, dass technische und wirtschaftliche Optimierungspotentiale genutzt und Leistungen möglichst nah an den Kundenwünschen realisiert werden.

Im Falle der Fahrzeughersteller bedeutet dies auch, Klarheit über die konkrete Anrechenbarkeit von O-Lkw auf gesetzliche Verpflichtungen, insbesondere die europäischen CO₂-Flottengrenzwerte zu schaffen. Zu beachten ist weiterhin auch die patentrechtliche Lage; wesentliche Bestandteile des O-Lkw-Systems müssen anbieterunabhängig ohne Zahlung von Lizenzgebühren implementierbar sein.



Ob es gelingt, weitere Anbieter zu gewinnen, wird schließlich nicht zuletzt auch von einem glaubhaften strategischen Bekenntnis zum Einsatz der O-Lkw-Technologie abhängen, siehe Abschnitt 2.1.2. Das Angebot von O-Lkw kann (mittelfristig) dadurch erhöht werden, dass bei elektrischen Lkw künftig der zusätzliche Einbau eines Stromabnehmers im Fahrzeugkonzept vorgesehen wird, bzw. ggf. schon existierende E-Lkw nachgerüstet werden, sofern dies mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Dadurch könnten weitere (auch kleinere Anbieter) in die Produktion von O-Lkw einsteigen. Die technischen Voraussetzungen für beides sollten in der Pilotphase geprüft werden.

Fahrzeugbetrieb

Auch die Fahrzeugbetreiber müssen stärker mit der Technologie vertraut gemacht werden. Eine wichtige Grundlage dafür ist der in Handlungsfeld 1 zu entwickelnde strategische Konsens, für welche Anwendungsfelder die O-Lkw-Technologie Priorität genießen sollte. Wenn den Fahrzeugbetreibern in diesen Anwendungsfeldern eine Oberleitungs-Infrastruktur konkret in Aussicht gestellt wird, können diese sich mit realistischen Einsatzmöglichkeiten für O-Lkw in ihrer Flotte befassen.

Zum zweiten müssen den Betreibern technische Grundkenntnisse über Zusammenhänge und Auslegungsmöglichkeiten bei O-Lkw-Systemen vermittelt werden. Dazu gehört beispielsweise die Tatsache, dass O-Lkw als Hybridfahrzeuge grundsätzlich auch abseits der Oberleitung fahren können; so kann sichergestellt werden, dass infrage kommende Einsatzprofile für O-Lkw seitens der Betreiber zutreffend eingeschätzt werden. Zudem besteht auf Betreiberseite generell oftmals eine gewisse Skepsis bezüglich der technischen Leistungsfähigkeit und der Zuverlässigkeit neuer technischer Lösungen.

Um hier solidere Erkenntnisse und damit Vertrauen zu schaffen, ist die Durchführung weiterer und auch größer angelegter Feldversuche unter umfassender Einbindung einer Vielzahl an Praxispartnern sowie entsprechender wissenschaftlicher Begleitung dringend notwendig (siehe Abschnitt 2.1.4).



Schließlich müssen die Bedingungen für Anschaffung und Betrieb von O-Lkw auf einer initialen Oberleitungs-Infrastruktur hinreichend attraktiv sein. Dafür müssen gezielt die hauptsächlichsten Hemmnisse adressiert werden, denen sich potentielle Fahrzeugbetreiber in dieser Phase gegenübersehen:

- Die Margen im Transportgewerbe sind in der Regel sehr gering und lassen kaum Spielraum für zusätzliche Investitionen, die sich erst in der Zukunft amortisieren. Einige wenige Fahrzeuge dürften vor allem von größeren Logistikfirmen primär aus Imagegründen auch zu höheren Kosten angeschafft werden. Für das Gros der Fahrzeuge besteht allerdings die Erwartung, dass sie zumindest gegenüber Diesel-Lkw keine Mehrkosten verursachen bzw. niedrigere Kosten das höhere Risiko ausgleichen müssen.
- Die Befassung mit einer neuen Antriebstechnologie durch die Lkw-Betreiber sowie die technische Abstimmung der Kleinserienfahrzeuge verursachen signifikante Zeitkosten. Zudem ist mit weiteren Zeitkosten durch in der Anfangszeit häufigere Wartung der Fahrzeuge zu rechnen.
- Es besteht in dieser Phase (auch im Falle eines grundsätzlichen strategischen Konsenses der Akteure, siehe Abschnitt 2.1.2) Unsicherheit über den zukünftigen Oberleitungs-Ausbau und somit über die Potentiale für O-Lkw-Betrieb im Unternehmen.

Die aktuell gültigen Rahmenbedingungen (Stand Mai 2020) sehen eine erhebliche Förderung sowohl der Anschaffung (Kaufprämie von bis zu 40.000 €) als auch des Betriebs (Mautbefreiung) von Elektro-Lkw vor. In einer reinen Vollkostenbetrachtung würde diese Förderung auf Basis der aktuellen Kostenannahmen (Großserienfertigung bei den Fahrzeugen vorausgesetzt) bereits heute O-Lkw in vielen Fällen konkurrenzfähig gegenüber dem Dieselantrieb machen, sofern die Infrastruktur durch die öffentliche Hand bereitgestellt wird (ifeu et al. 2020). Quantitativ kann die aktuelle Förderung im Falle einer Großserienfertigung der Fahrzeuge also mithin als ausreichend angesehen werden. Darüber hinaus sollten jedoch zwei weitere Aspekte in die Förderung aufgenommen werden:



- **Gezielte Maßnahmen zur Verbreitung von Wissen zu O-Lkw bei den Fahrzeugbetreibern.** Dies können beispielsweise Workshops, Online-Seminare etc. sein, die auch in Kooperation mit den Branchenverbänden (v.a. BGL, DSLV) organisiert werden könnten.
- **Absicherung von finanziellen und betrieblichen Unsicherheiten auf Betreiberseite.** Dies kann beispielsweise die Übernahme von Kosten zur Versicherung gegen technisch bedingten Ausfall von Fahrzeugen sein, sowie Instrumente zur schnellen und unkomplizierten Bereitstellung von Ersatzfahrzeugen im Bedarfsfall (z.B. durch einen Fahrzeugpool). Denkbar wäre auch eine Komponente der Förderung, die sich an den aktuellen Energiepreisen orientiert.

Bei der Festsetzung von Förderniveaus in der Pilotphase sollte eher großzügig vorgegangen werden. Die geringen Fahrzeugmengen in dieser Phase verursachen nur begrenzte absolute Kosten. **Wichtig ist allerdings, intensive finanzielle Förderung zeitlich oder volumenmäßig zu begrenzen bzw. degressiv auszugestalten.** In der nachfolgenden Ausbauphase sollte dann der Umstieg auf für den Staat kostenneutrale Förderinstrumente erfolgen (siehe Abschnitt 2.2.3).

Allgemein ist beim Design von Förderinstrumenten zu berücksichtigen, dass schwere Lkw im Güterfernverkehr von den Betreibern in der Regel geleast werden. Dies dürfte laut Aussage der meisten Lkw-Betreiber bei neuen Technologien in noch stärkerem Maße der Fall sein, da das Risiko für einen Leasingnehmer in der Regel geringer ist als für einen Eigentümer. Zudem sind bei der Ausgestaltung der Förderung juristische Fragen im Kontext bestehender verfassungs- und europarechtlicher Rahmenbedingungen zu klären. Insgesamt sollten Fördersysteme aber nicht unnötig komplex konzipiert werden, da Komplexität in der Regel zu höheren Transaktionskosten bei allen Beteiligten führt (Beckers et al. 2019).

Jenseits der „klassischen“ Modelle des Fahrzeugbetriebs (Besitz und Leasing) ist in der Pilotphase zu **prüfen, ob neue Geschäftsmodelle die Voraussetzungen für den Einsatz von O-Lkw verbessern können.** In Frage kommen hier beispielsweise die gemeinsame Nutzung von Lkw durch mehrere Betreiber („Lkw-Sharing“) oder das Modell der Traktionsdienstleistung mit O-Lkw. Hierbei verkehren die O-Lkw (nahezu) ausschließlich auf Strecken mit Oberleitungen und bewegen dabei fremde Sattelaufleger, die ihnen zuvor von Nicht-Oberleitungs-Fahrzeugen übergeben und danach wieder von solchen Fahrzeugen entgegengenommen werden. Mit solchen Modellen ist es prinzipiell möglich, die elektrische Fahrleistung von O-Lkw zu steigern, was ihre Kostenbilanz verbessert. In der Pilotphase sollten diese und andere Modelle hinsichtlich ihrer Machbarkeit und spezifischer Voraussetzungen¹ näher geprüft werden. Fällt diese Machbarkeitsprüfung positiv aus, so kann geprüft werden, ob solche Geschäftsmodelle mit speziellen Policy-Instrumenten sinnvoll unterstützt werden können.

Infrastrukturbau und -betrieb sowie Stromversorgung

Das Themengebiet „Infrastruktur für O-Lkw“ besteht aus mehreren Bereichen, deren jeweilige Abgrenzung und Schnittstellen gegenwärtig noch nicht einheitlich definiert sind:

¹ Im Falle der Traktionsdienstleistung wären beispielsweise spezielle Bereiche zum Wechseln von Auflegern an Knotenpunkten entlang der elektrifizierten Straßenabschnitte notwendig.

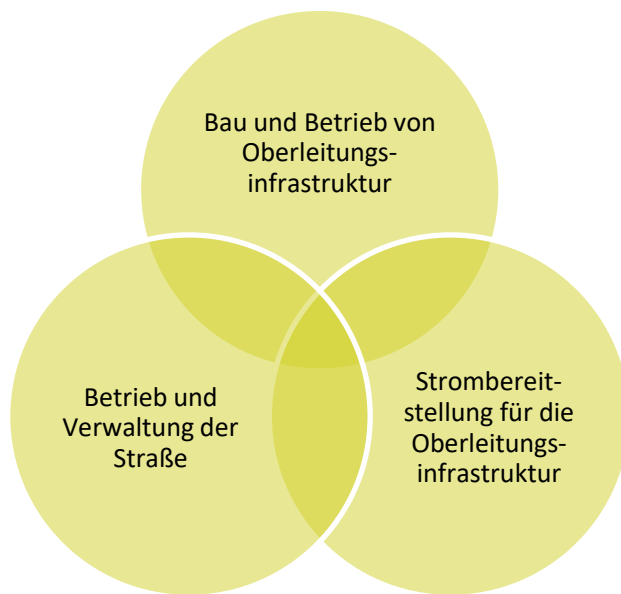


Abbildung 8: Teilaspekte der Infrastruktur für O-Lkw (eigene Darstellung)

Es ist daher wichtig, in der Pilotphase Schnittstellen, Zuständigkeiten, regulatorische Fragestellungen und nicht zuletzt Standards zu klären, um potentiellen Akteuren in diesem Bereich die notwendige Sicherheit für die Entwicklung von Geschäftsmodellen zu geben.



Insbesondere sind dabei folgende Punkte anzugehen:

- Klärung, inwiefern die Oberleitungs-Infrastruktur auf Autobahnen dem **Regulierungsregime** des Stromsystems oder demjenigen der Straßenverkehrsinfrastruktur unterliegt (Hartwig / Lehmann 2019).
- **Vernetzung** von Energienetzbetreibern, Oberleitungs-Baufirmen, Straßenverwaltungen etc. vor dem Hintergrund des in Handlungsfeld P1 erzielten strategischen Konsenses.
- Bewertung verschiedener **Betreibermodelle für die Oberleitungs-Infrastruktur** (z.B. Betrieb durch öffentliche Hand, öffentliche Ausschreibung von Oberleitungs-Strecken etc.).
- Bewertung verschiedener **Betreibermodelle für die Stromversorgung** (Netzbetreiber, Stromlieferant, Flexibilitätsvermarkter) sowie der Frage, von welchen Marktakteuren sie jeweils sinnvollerweise umgesetzt werden könnten. Hierzu wurden im Vorhaben erste Überlegungen durch Fraunhofer IEE angestellt, die separat veröffentlicht werden.
- Klärung grundlegender **Ausgestaltungsfragen des Abrechnungssystems**, insbesondere wie die Messung des Stromverbrauchs und die Erhebung von Nutzungsgebühren für die Oberleitungs-Infrastruktur technisch und organisatorisch sinnvollerweise erfolgen sollte¹.

¹ Diese Fragen werden derzeit u.a. im Vorhaben AMELIE untersucht.

- Überprüfung und ggf. Ausbau der **Kapazitäten für den Systemausbau** (Oberleitungen, Komponenten, Energienetzanbindung). Dies betrifft insbesondere die Bereiche Schulung, Planung, Genehmigung, Fertigung, Bau, Abnahme und Instandhaltung. Es ist dabei zu klären, welches spezifisch anzupassende Fach- und Methodenwissen für den Oberleitungsbau und die anschließende Instandhaltung auf Straßen erforderlich ist. Dieses Wissen muss konsolidiert, dokumentiert und im Rahmen von Aus- und Weiterbildungen bei aktuellen und zukünftigen Fachkräften verbreitet werden, um hier einen Markt zu entwickeln. Dies kann durch eine zügige Standardisierung unterstützt werden.

2.1.4 Handlungsfeld P3: Pilotierung und Netzplanung

In diesem Handlungsfeld geht es zum einen darum, die infrastrukturellen Voraussetzungen für die erfolgreiche Entwicklung eines O-Lkw-Ökosystems zu schaffen (siehe Handlungsfeld F2, Abschnitt 0). Zum anderen geht es darum, eine Planungsgrundlage für den späteren Systemausbau in Phase 2 (Netzausbauphase) zu schaffen.

Pilotierung

Zum jetzigen Zeitpunkt haben zwei der drei bislang geplanten O-Lkw-Feldversuche auf öffentlichen Straßen in Deutschland den Betrieb aufgenommen (ELISA sowie FESH). In diesen Feldversuchen wurden bzw. werden jeweils etwa 5 Streckenkilometer in beiden Fahrtrichtungen mit einer Oberleitung ausgestattet. Dies ist für die technische Validierung im Wesentlichen ausreichend, kann jedoch nur ein eingeschränktes Spektrum logistischer Einsatzfälle sinnvoll abdecken und erlaubt damit nur sehr eingeschränkt eine Validierung in der betrieblichen Praxis.

Um dies zu ermöglichen und die O-Lkw-Technologie für eine größere Menge von Anwendern erfahrbar zu machen, sollte umgehend mit der Planung und anschließenden Realisierung eines größeren Piloten begonnen werden.



In Schweden wird ein solcher Pilot (mit mindestens 20-30 km Länge) derzeit vorbereitet, mit dem Ziel, ihn im Jahr 2023 in Betrieb nehmen zu können (Arminas 2020; Jelica 2019; Trafikverket 2017). Bisherige Arbeiten zur Bewertung von Strecken in Deutschland kamen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die A1 zwischen Hamburg und Bremen sowie die A7 zwischen Hamburg und Kassel aus verkehrlicher Sicht besonders geeignete Kandidaten für solch einen Piloten sind (Öko-Institut / ifeu / et al. 2020). Diese Strecken mit einer Gesamtlänge von gut 600 km weisen eine hohe Befahrungsstärke mit schweren Lkw auf, gleichzeitig ist der Anteil nationaler Verkehre vergleichsweise hoch. Zudem verbinden diese Strecken bedeutende logistische Umschlagpunkte, so dass die Vor- und Nachläufe vieler Lkw außerhalb dieser Strecken relativ kurz sind. Damit könnten O-Lkw hier voraussichtlich hohe Fahranteile unter Oberleitung realisieren. Ein besonders hohes Potential innerhalb der genannten Strecken ergab eine relationsbezogene Potentialmodellierung in der Region rund um Hamburg (A1 Hamburg-Bremen sowie A7 Hamburg-Hannover), siehe (ifeu et al. 2020).

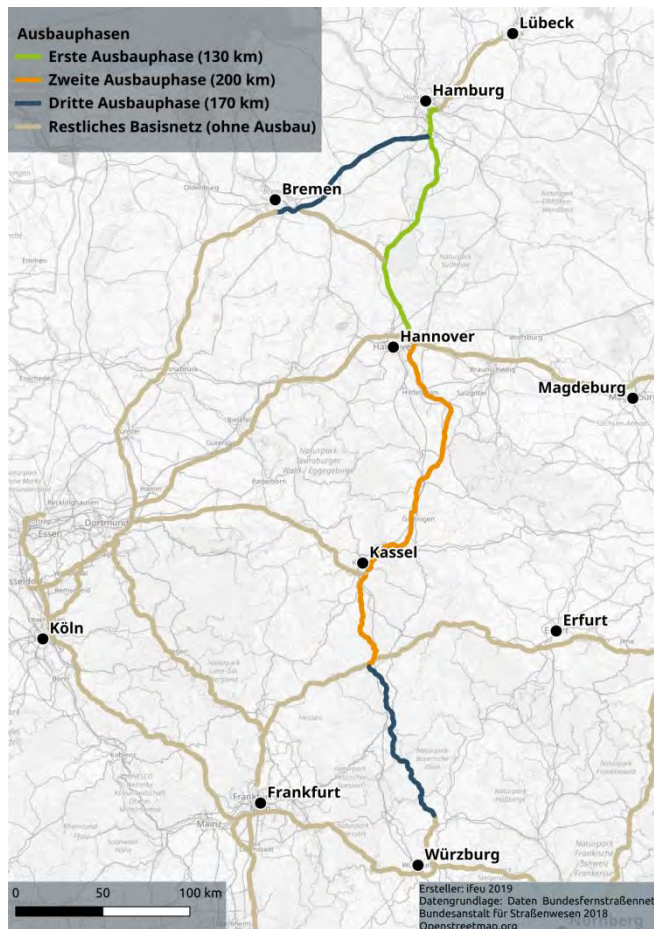


Abbildung 9: Darstellung von Streckenabschnitten, die auf Grundlage der Modellergebnisse im Vorhaben "Roadmap OH-Lkw" für eine Pilotierung geeignet erscheinen.

Zu beachten ist jedoch, dass neben der verkehrlichen Eignung weitere Kriterien in die Auswahl erster Pilotstrecken einbezogen werden müssen. Insbesondere eine voraussichtlich schnelle und möglichst unkomplizierte Realisierbarkeit (Planungsprozesse, Partner vor Ort) sollte unbedingt gegeben sein, um maximalen technischen Erkenntnisgewinn beim Betrieb des Piloten innerhalb der Pilotphase sicherzustellen. Zur Einschätzung der Realisierbarkeit kann und sollte aus Erfahrungen aus den derzeit laufenden Feldversuchen zurückgegriffen werden.

Für die Realisierung des vorgenannten Piloten sollten folgende Schritte gegangen werden:

- **Screening der genannten Strecken** auf technische Eignung für den Oberleitungsbau. Hierbei kann bspw. das durch die TU Darmstadt entwickelte Tool „BeTSIE“ eingesetzt werden. Zudem sind anstehende Baumaßnahmen an den betroffenen Autobahnabschnitten zu berücksichtigen; so sind bspw. an der A7 zwischen Hamburg und Hannover diverse Arbeiten im Rahmen des BVWP geplant.
- **Identifikation von Ankernutzern** mit einem hohen Transportvolumen auf den genannten Strecken. Dabei kann z.B. auf Logistikdatenbanken zurückgegriffen werden;



hierfür wurde im Vorhaben Roadmap OH-Lkw bereits ein Verfahren entwickelt (ifeu et al. 2018).

- **Festlegung eines Vergabeverfahrens** unter Berücksichtigung der Erfahrungen mit den bereits realisierten Feldversuchen. Das Verfahren sollte insbesondere die Bildung strategischer Allianzen aus Verladern und Fahrzeugbetreibern für den O-Lkw-Betrieb honorieren, da dies nach aktuellem Kenntnisstand ein wesentlicher Erfolgsfaktor für das Engagement der Fahrzeugbetreiber sein dürfte (ifeu / M-Five 2018).
- **Klärung der planungsrechtlichen Voraussetzungen.** Hierbei kann z.B. das im Rahmen des ELISA-Feldversuchs erarbeitete Handbuch zur Realisierung von O-Lkw-Pilotversuchen hilfreich sein.
- **Klärung einer möglichen Kofinanzierung** durch die EU (z.B. als Scandria-Korridorprojekt¹).
- **Verbindliche Vereinbarungen mit Fahrzeugherstellern und Systemausrüstern** über die Bereitstellung von O-Lkw.

Die Standardisierung zentraler Komponenten und Schnittstellen sollte in dieser Phase entschieden vorangetrieben werden, und zwar primär auf der europäischen oder ggf. internationalen Ebene (CENELEC).



Aufgrund der üblichen Laufzeit von Standardisierungsprozessen ist allerdings nicht damit zu rechnen, dass wichtige Standards für das Pilotvorhaben bereits in finaler Form vorliegen. In diesen Fällen müssen für den Piloten nach Experteneinschätzung sinnvolle Entscheidungen getroffen und diese im weiteren Standardisierungsprozess vertreten werden, wenn sie sich in der Praxis bewähren.

Netzplanung

Parallel zur Pilotierung muss eine Planungsgrundlage für den späteren Ausbau des Oberleitungs-Netzes geschaffen werden, und zwar unter Berücksichtigung der strategischen Festlegungen, die im Handlungsfeld P1 (Abschnitt 2.1.2) getroffen wurden. Es sollte hierfür insbesondere eine klare Vorstellung seitens der Politik und Verwaltung bestehen, welche Anwendungsfälle im Güterverkehr mittelfristig primär mithilfe der O-Lkw-Technologie dekarbonisiert werden sollen.

Folgende Punkte sind dabei von zentraler Bedeutung:

- **Definition technischer Reifekriterien** der O-Lkw-Technologie, die erfüllt sein müssen, um die Entscheidung für einen Oberleitungs-Netzausbau über den Pilotmaßstab hinaus treffen zu können. Hierzu gehören u.a. folgende Aspekte:
 - Sicherheit



¹ Bei Scandria handelt es sich um eine Initiative, die den Transportkorridor zwischen Skandinavien und der Mittelmeerregion im Rahmen diverser Projekte in Kooperation mit der EU weiterentwickeln möchte, explizit auch im Bereich alternativer Kraftstoffe (vgl. "Scandria Webseite" 2018)

- Zuverlässigkeit
- Dauerbelastbarkeit, Verschleiß
- Ökologische Unbedenklichkeit (z.B. Naturschutzbelange)
- mögliche Rückwirkungen auf das Energiesystem

- **Festlegung eines Oberleitungs-Basisnetzes** als Zielsystem für die Netzausbauphase. Grundlagen dafür wurden in diesem Vorhaben bereits geschaffen (ifeu et al. 2020).
- **Priorisierung der einzelnen Ausbauschritte** und ungefähre Anordnung auf der Zeitskala. Hierfür sollten, wenn möglich, anonymisierte Betriebsdaten der aktuellen Lkw-Flotte genutzt werden, die durch die meisten Lkw-Hersteller für einen großen Teil der Flotte laufend erhoben werden. Auch anonymisierte Bewegungsdaten aus der Mauterhebung könnten hierfür genutzt werden, sofern dies rechtlich möglich ist.
- **Abgleich dieser Priorisierung mit geplanten Baumaßnahmen** entlang der Bundesfernstraßen (Bundesverkehrswegeplan 2030) sowie mit den übergeordneten Planungen und Prioritätensetzungen auf dem europäischen TEN-T-Netz.
- **Erarbeitung einer Checkliste für die politische Entscheidung** über die konkrete Realisierung einzelner Ausbaumaßnahmen.
- **Durchspielen von Genehmigungsprozessen** für längere, bundeslandübergreifende elektrische Strecken; Identifikation und Schließung planungsrechtlicher Lücken.
- **Festlegung des Betreibermodells für die Oberleitungs-Infrastruktur.** Grundsätzlich kommt sowohl die öffentliche Hand selbst über die Autobahngesellschaft (ab 2021) als auch der Eintritt eines privaten Betreibers im Auftrag der öffentlichen Hand in Frage. Weiterhin sind ÖPP-Modelle (Öffentlich-Private Partnerschaft) denkbar¹. Die Wahl des Betreibermodells sollte Erkenntnisse insbesondere der Institutionenökonomik sowie aus vergangenen Infrastruktur-Großprojekten im Verkehrsbereich (z.B. aus dem Aufbau des Lkw-Mautsystems) berücksichtigen.
- **Berücksichtigung der O-Lkw-Technologie im europäischen Regulierungsrahmen**
 - Berücksichtigung von Oberleitungs-Infrastruktur bei der anstehenden Revision der europäischen Richtlinie für die Infrastruktur alternativer Antriebe (AFID).
 - Anpassung der Eurovigniettenrichtlinie derart, dass Oberleitungs-Infrastruktur zukünftig mindestens teilweise über Mauteinnahmen finanziert und dabei der CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge berücksichtigt werden kann.
 - Klarstellung, wie O-Lkw im Rahmen der CO₂-Flottengrenzwerte für Nutzfahrzeuge angerechnet werden.

Am Ende der Pilotphase: **Abgleich des technischen Entwicklungsstands der O-Lkw-Technologie mit den zuvor festgelegten Kriterien**, um über den Eintritt in die Netzausbauphase zu entscheiden.

Bei einer netzbasierten Technologie können einzelne Ausbaumaßnahmen prinzipiell nicht völlig unabhängig voneinander betrachtet werden. Insbesondere müssen verkehrliche

¹ Zu beachten ist, dass der Anwendung des ÖPP-Ansatzes bei den Bundesautobahnen grundgesetzlich enge Grenzen gesetzt sind (vgl. Art. 90 Abs. 2 S. 5 GG).

Wechselwirkungen berücksichtigt werden, denn für viele potentielle Nutzer dürfte ein O-Lkw-System erst mit einer bestimmten Kombination von Ausbaumaßnahmen interessant werden. Des Weiteren sind auch Wechselwirkungen in anderen Bereichen, wie beispielsweise dem Planungsprozess (Kapazitäten der Planungsbehörden) oder der Energie-netzanbindung denkbar.

Um Ausbaupfade sowie einzelne Ausbaumaßnahmen gesamtsystemisch zu bewerten, sollte ein zentrales Instrumentarium zur Potential- und Netzanalyse für O-Lkw geschaffen werden, das auf das gesamte deutsche Fernstraßennetz anwendbar ist.



Grundlagen für ein solches Instrumentarium wurden bereits im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (Wietschel et al. 2017) sowie in den Vorhaben StratOn (Hacker et al. 2020) und Roadmap OH-Lkw (ifeu et al. 2020) gelegt. Insbesondere die folgenden Punkte müssen hier allerdings noch vertieft bzw. ergänzt werden:

- Abbildung von **Einsatzprofilen einzelner Fahrzeuge**. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Eignung von Lkw für den Oberleitungs-Betrieb einzuschätzen. Hier könnten Fahrzeugnutzungsdaten aus Telematiksystemen genutzt werden.
- Integration **streckenbezogener Eignungsindikatoren** (Beschaffenheit der Randbereiche, Brücken/Anschlussstellen, naturschutzrechtliche Belange etc.).
- Abbildung derjenigen **Antriebskonfigurationen für O-Lkw** (Batteriegröße, Hybridkonfiguration etc.), die während der Netzausbauphase am Markt zu erwarten sind. Hierzu ist eine intensive Abstimmung mit den Fahrzeugherstellern erforderlich.

Ein solches Analyseinstrument kann eine wertvolle Faktengrundlage für Management und Priorisierung einzelner Ausbaumaßnahmen hin zum Basisnetz durch die politischen Entscheidungsträger liefern. Eine Herausforderung besteht darin, die technische Ausgestaltung der Ausbaustrecken an die auf den Markt kommende Fahrzeugtechnologie anzupassen. Sollten O-Lkw beispielsweise absehbar größere, schnellladefähige Batterien erhalten, so könnte es sinnvoll sein, Oberleitungs-Infrastruktur in kürzeren Abschnitten zu planen, aber für höhere Leistungsabgabe auszurüsten. Umgekehrt sollten allerdings auch Erkenntnisse bezüglich der Infrastrukturauslegung (z.B. Grenzkosten für eine Erhöhung der verfügbaren elektrischen Leistung auf einem Speiseabschnitt) bei der Antriebsentwicklung berücksichtigt werden. Die Untersuchung des Wechselspiels zwischen Infrastruktur- und Fahrzeugauslegung ist wesentlicher Bestandteil der derzeitigen O-Lkw-Feldversuche.

2.1.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die erste Phase einer möglichen Einführung von O-Lkw skizziert. Ausgangssituation, wichtige Handlungsfelder und resultierende Meilensteine sind in der nachfolgenden Darstellung zusammengefasst.

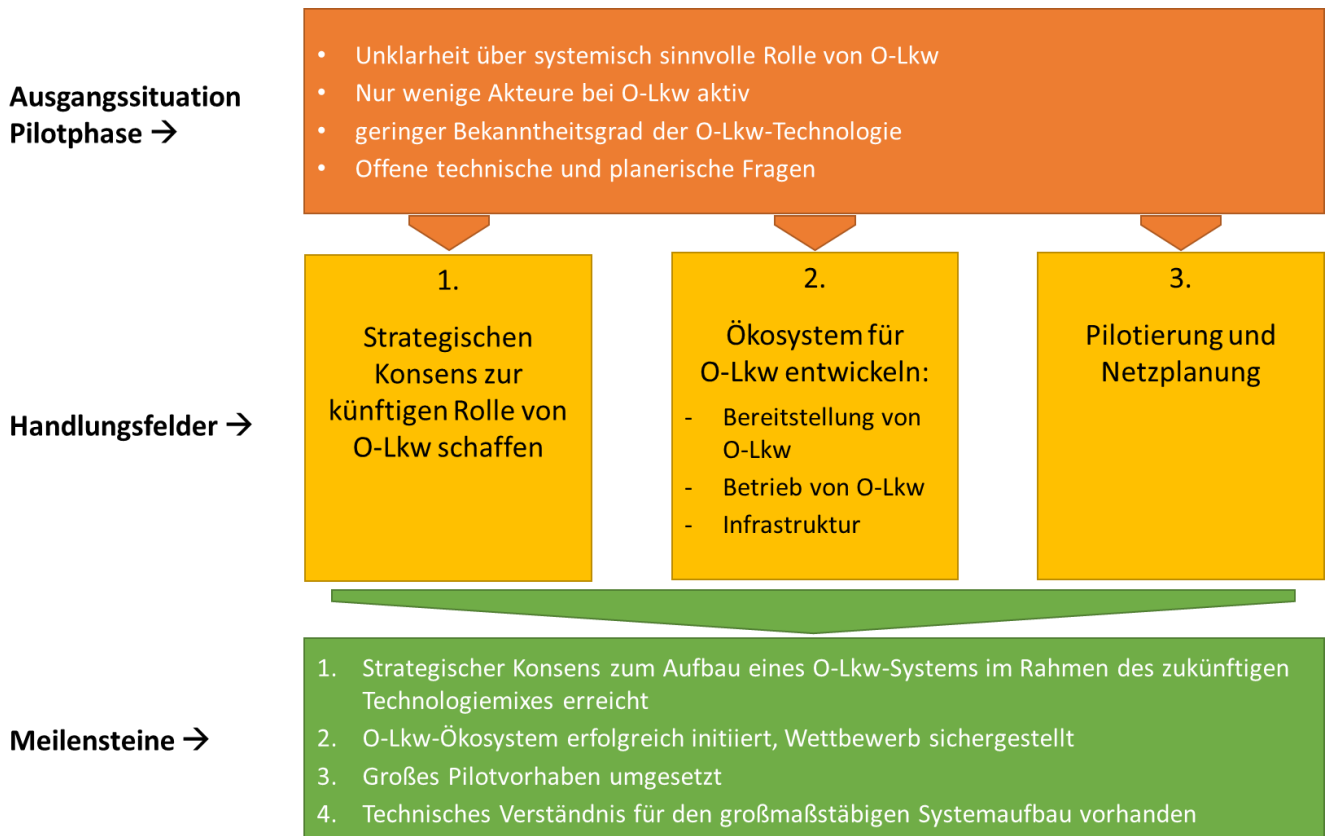


Abbildung 10: Übersicht wesentlicher Elemente der Pilotphase

Wurden die genannten Meilensteine erreicht, so kann der Einstieg in den Ausbau eines Oberleitungs-Basisnetzes und damit die Einführung von O-Lkw im großen Maßstab durch die Bundesregierung beschlossen werden. Dieser Beschluss sollte den im Handlungsfeld P1 erzielten strategischen Konsens in Gesetzesform überführen und die benötigten Mittel für den Netzausbau in der mittelfristigen Finanzplanung des Bundes allozieren. Auf Grundlage dieses Beschlusses kann dann die nachfolgend beschriebene Netzausbauphase begonnen werden.



Auch für den Fall, dass die Entscheidung über den Aufbau eines Oberleitungs-Netzes letztlich negativ ausfallen sollte, können wichtige Ziele der Pilotphase erreicht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse (insbesondere hinsichtlich Technologie und Akzeptanz) und die etablierten Akteursstrukturen können in jedem Fall genutzt werden, um die zweifellos notwendige Wende hin zu elektrischen Antrieben im Straßengüterverkehr voranzutreiben.

2.2 Netzausbauphase (~5-7 Jahre)

2.2.1 Ausgangssituation und Ziel

Ziel der Netzausbauphase ist es, die Voraussetzungen für den breiten Einsatz von O-Lkw in Deutschland zu schaffen. Am Anfang der Netzausbauphase steht der politische Beschluss, dass O-Lkw einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzziele im Straßengüterverkehr leisten sollen. Die technischen Voraussetzungen dafür wurden im Verlauf der Pilotphase positiv geklärt. Ebenso wurde sichergestellt, dass der Ausbau und die Weiterentwicklung der O-Lkw-Technologie in einem wettbewerblichen Umfeld stattfinden können.

Im Gegensatz zur Pilotphase, die in erster Linie durch Dialogprozesse und F&E-Förderung geprägt ist, müssen in der Netzausbauphase finanzielle Mittel in relevantem Umfang eingesetzt werden. Dies betrifft sowohl die Fahrzeugbetreiber (Beschaffung von O-Lkw), die Fahrzeughersteller (Aufbau einer Massenproduktion für O-Lkw) als auch die Politik (Infrastrukturausbau und Markthochlaufförderung). Die wichtigste Aufgabe der Politik in dieser Phase besteht somit darin, für alle Akteure möglichst planbare und hinreichend attraktive Bedingungen für dieses finanzielle Engagement zu schaffen.

Die wesentlichen Herausforderungen bestehen dabei in folgenden Bereichen:

- **Realisierung eines Oberleitungs-Ausbaus** mit hinreichender Geschwindigkeit und Verlässlichkeit.
- **Sicherstellung eines Fahrzeugangebots**, das O-Lkw in Kombination mit den gewählten Anreizinstrumenten für Lkw-Betreiber attraktiv macht.
- **Sicherstellung internationaler Anschlussfähigkeit**, ohne dabei das notwendige nationale Momentum abzuschwächen.
- **Identifikation von Synergien** sowohl zwischen verschiedenen Antriebstechnologien als auch zwischen Antriebs- und Fahrzeugtechnologien (wie bspw. dem autonomen Fahren).

Im Folgenden werden entsprechende Handlungsmöglichkeiten in diesen Bereichen umrissen.

2.2.2 Handlungsfeld A1: Netzausbau planbar vorantreiben

Ziel dieses Handlungsfeldes ist es, ein Basisnetz von Oberleitungen auf besonders geeigneten Autobahnabschnitten zu realisieren und während der Netzausbauphase sukzessive in Betrieb zu nehmen. Verschiedene Studien ergaben eine sinnvolle Länge für ein solches Basisnetz von etwa 3000 bis 4000 km (Hacker et al. 2020; ifeu et al. 2020; Wietschel et al. 2017). Der verlässliche Ausbau des Oberleitungs-Netzes ist Grundpfeiler für das Vertrauen aller Akteure in die O-Lkw-Technologie. Auf Grundlage des politischen Beschlusses für die Erschließung von CO₂-Minderungspotentialen durch O-Lkw muss der Oberleitungs-Ausbau daher in der Netzausbauphase entschieden vorangetrieben werden.

Die Realisierung des Oberleitungs-Ausbaus sollte in einem wettbewerblichen Verfahren erfolgen und die Elektrifizierung einzelner Straßenabschnitte dazu öffentlich ausgeschrieben werden.



Im Detail richtet sich das Vorgehen nach dem im Rahmen der Pilotphase festgelegten Betreibermodell (siehe Pilotphase, Handlungsfeld 3). Von unabhängiger Seite sollte bei den Ausschreibungsverfahren der wettbewerbliche Charakter auf Angebotsseite und die zeitliche Realisierbarkeit überprüft werden. Mögliche Kapazitätsengpässe sollten frühzeitig identifiziert werden, da Verzögerungen bei der Streckenrealisierung das Vertrauen in den Infrastrukturausbau nachhaltig gefährden können.

Für alle Belange des Oberleitungs-Ausbaus sollte für das gesamte Bundesgebiet eine zentrale, ressortübergreifende Koordinierungsstelle eingerichtet werden – ähnlich der kürzlich geschaffenen nationalen Leitstelle für den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Die Koordinierungsstelle sollte folgende Aufgaben erfüllen:

- **Erarbeitung und Bewertung von Vorschlägen** für Oberleitungs-Ausbaumaßnahmen, als Entscheidungsgrundlage für die Politik.
- **Beratung des Oberleitungs-Betreibers** bei der Ausschreibung und Realisierung einzelner Ausbaumaßnahmen.
- **Beobachtung des Fortschritts** beim Netzausbau und Veröffentlichung in regelmäßigen Berichten.
- **Koordination des Dialogs** unter allen für den Netzausbau relevanten Akteuren (Fahrzeugbetreiber, Systemausrüster, Netzbetreiber, Wissenschaft etc.). Aus diesem Dialog sollten regelmäßige Statusberichte hervorgehen, ähnlich wie bei den Arbeitsgruppen der Nationalen Plattform Mobilität.
- **Einbindung wissenschaftlicher Expertise** nach Bedarf, bspw. zur Erstellung der für die Systemplanung notwendigen Modelle und zur Beurteilung verwaltungswissenschaftlicher Fragestellungen beim Ausbauprozess.



Der Netzausbau muss für die Umsetzung in einzelne, klar getrennte Ausbaumaßnahmen aufgeteilt werden, für die jeweils u.a. folgende Eigenschaften definiert und kommuniziert werden sollten:

- Welche Lkw-Verkehre adressiert die Maßnahme?
- Welcher spezifische Nutzen (v.a. Minderung der CO₂-, Luftschadstoff- und Lärmemissionen) wird von der Ausbaumaßnahme erwartet?
- Wie hoch sind die erwarteten Kosten?
- Gibt es Risiken / Unwägbarkeiten bei der Realisierung?
- In welchem Zusammenhang steht die Maßnahme mit anderen Ausbaumaßnahmen?

Um die Oberleitungs-Infrastruktur zielgerichtet ausbauen zu können, ist es erforderlich, **die technischen Anforderungen der aufkommenden O-Lkw-Flotte eng mit den Fahrzeugherstellern abzustimmen**. Hilfreich kann dabei die Einigung auf technische Standards sein (beispielsweise eine elektrische Mindestreichweite abseits der Oberleitung).



Im Zuge des Ausbaus ist es zudem erforderlich, **vor allem die Planungsprozesse der ersten Ausbaustrecken intensiv wissenschaftlich zu begleiten und unklare Prozessschritte sowie administrative Nadelöhre zu identifizieren. Unter Einbezug juristischer und verwaltungswissenschaftlicher Expertise können dann Verbesserungsvorschläge erarbeitet und umgesetzt werden.**



Zur Planung von Infrastrukturprojekten muss stets auch ein frühzeitiger Stakeholder- und insbesondere Bürgerdialog gehören. Aus der Realisierung der ersten Feldversuche (insbesondere des Projekts eWayBW) gibt es bereits Erfahrungen, welche Punkte hier besonders wichtig zu kommunizieren sind. Darüber hinaus kann auf umfangreiche Erfahrungen aus der Projektierung von bspw. Windparks und Stromtrassen zurückgegriffen werden, bei denen teilweise ähnliche Bedenken wie bei Oberleitungen für Lkw bestehen (v.a. optische Beeinträchtigungen).

Die Politik sollte hier den wissenschaftlichen Austausch zur Akzeptanzforschung fördern, z.B. in Form von Konferenzen und Workshops, und dabei vor allem diejenigen Institutionen fördern, die als Organisatoren von Bürgerdialogprozessen in Frage kommen.



Grundsätzlich kann ein Oberleitungs-Ausbau bei entsprechender Planung auch für die an künftige Oberleitungs-Strecken grenzenden Gemeinden einen Mehrwert haben, z.B.

- Umstellung von den Gemeinden ausgehender Güterverkehre auf O-Lkw (in Kooperation mit ortsansässigen Logistikern). So profitieren die Gemeinden von der elektrisch gefahrenen „letzten Meile“ und somit von einer Verringerung der Lärm- und Luftschadstoffemissionen durch Lkw.
- Auch auf der Autobahn werden durch O-Lkw Luftschadstoffemissionen (v.a. NO_x) eingespart. In bestimmten Lagen (z.B. Autobahn in Tallagen) könnte dies auch die Luftqualität in den umliegenden Gemeinden verbessern.
- Durch den Oberleitungsbau kann der Aufwand für die gleichzeitige Umsetzung weiterer Infrastrukturmaßnahmen verringert werden. So könnte bspw. der Ausbau der (Schnell-)Ladeinfrastruktur entlang der Autobahn von der für die Oberleitungen erforderlichen Verstärkung des Stromnetzes profitieren. Auch Lärmschutzwände könnten bei den Arbeiten am Randstreifen gleich mitberücksichtigt werden.

Bei der Konzeption eines Oberleitungs-Abschnitts sollten gemeinsam mit den betroffenen Gemeinden von Anfang an solche Synergien untersucht und ggf. berücksichtigt werden.



2.2.3 Handlungsfeld A2: Förderkulisse auf den Netzausbau abstimmen

Durch den Ausbau des Oberleitungs-Netzes vergrößert sich die Anzahl potentieller O-Lkw-Nutzer in der Ausbauphase stark und stetig. Zu welchem Teil dieses Potential ausgeschöpft wird, hängt hauptsächlich von dem Angebot an O-Lkw und den finanziellen Rahmenbedingungen für O-Lkw-Betreiber ab. Während in der Pilotphase für die geringe Fahrzeuganzahl noch eine großzügige Förderpolitik möglich ist und die Kosten bei Pilotversuchen ohnehin tendenziell eine geringere Rolle spielen, muss sich die Technologie nun für die Betreiber rechnen und ihre Einführung für die öffentlichen Haushalte längerfristig tragfähig sein. Konkret muss gewährleistet werden, dass

- die Fahrzeugbetreiber über die Nutzungszeit hinweg mit einem stabilen Kostenvorteil kalkulieren können,

- die staatlichen Fördermittel effizient eingesetzt werden und
- staatliche Anreize nicht insgesamt die Transportkosten im Güterverkehr senken und somit absehbar zusätzlichen Güterverkehr induzieren.

Für den Förderrahmen für die Beschaffung von O-Lkw in der Netzausbauphase bieten sich demnach folgende Leitlinien bzw. Bausteine an:

- Um den Fahrzeugbetreibern die nötige Investitionssicherheit zu verschaffen, sollten (analog zur Förderung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz) die Rahmenbedingungen für bereits angeschaffte O-Lkw nicht nachträglich geändert werden.
- Anschaffungsbezogene Förderinstrumente (z.B. Kaufprämien) sollten gegenüber der Pilotphase deutlich abgeschmolzen werden. Eventuelle zeitlich beschränkte Förderinstrumente der Pilotphase sollten auslaufen.
- An die Stelle der vorgenannten Instrumente sollten verstärkt nutzungsbezogene Anreizinstrumente treten, also die tatsächlich elektrisch gefahrenen Kilometer gefördert werden. Um einen Rebound-Effekt (Erhöhung der Gesamtverkehrsleistung) durch die Förderung auszuschließen, sollte die Nutzung konventioneller Lkw gleichzeitig entsprechend verteuert werden. Mit einer Spreizung der Lkw-Maut entsprechend dem CO₂-Ausstoß eines Fahrzeugs auf einem bestimmten Streckenabschnitt könnte dies technisch realisiert werden. Die Voraussetzungen dafür werden durch die Novellierung der Eurovignettenrichtlinie voraussichtlich demnächst vorliegen.
- Bei Kostenbestandteilen, die unvorhersehbaren zeitlichen Schwankungen unterliegen (v.a. Energiepreise) können indexierte Fördersysteme sinnvoll sein. Die Förderung würde sich hierbei z.B. an der Differenz zwischen Strom- und Dieselpreis bemessen.
- Da O-Lkw in der Anschaffung auf absehbare Zeit teurer bleiben werden als Diesel-Lkw, müssen für die Anschaffung günstige Finanzierungsbedingungen sichergestellt werden, z.B. über KfW-Kredite.
- Um die Förderung mengenmäßig an den Fortschritt beim Oberleitungs-Ausbau und das damit einhergehende Marktpotential zu koppeln, können z.B. periodenbezogene Höchstmengen¹ zum Einsatz kommen. Dies kann helfen, Fehlanreize zu vermeiden.
- Bei der zeitlichen Entwicklung der Förderhöhe muss Planbarkeit gewährleistet werden, z.B. eine automatische Anpassung nach festgelegten Schlüsseln.
- Sollte die Aufrüstung von Batterie-Lkw zu O-Lkw sich als technisch sinnvoll erweisen, so sollte dies als Fördertatbestand berücksichtigt werden, da hierdurch eine schnelle Ausweitung des Marktpotentials zu erwarten ist. Sollte sich herausstellen, dass auch Lkw der mittleren Segmente sinnvoll als O-Lkw ausgelegt werden können, so sollte die Förderung ggf. nach Fahrzeugsegmenten differenziert werden.



Die vorgenannten Punkte können allerdings nur dann eine positive Wirkung auf den Markthochlauf von O-Lkw haben und zur Auslastung der neu errichteten Infrastruktur beitragen, wenn rechtzeitig ein attraktives Fahrzeugangebot am Markt verfügbar ist. Dies kann durch

¹ Ein Beispiel hierfür ist das im Jahr 2012 ins Erneuerbare-Energien-Gesetz eingeführte Konzept des „atmenden Deckels“.

staatliches Handeln nur indirekt unterstützt werden. Denkbar wären hier folgende Komponenten:

- Eine Fortsetzung staatlicher F&E-Förderung, um die Marktreife wichtiger Komponenten der O-Lkw-Technologie zu verbessern.
- Staatliche Unterstützung von Investitionsmaßnahmen aufseiten der Lkw-Hersteller und ggf. wichtiger Zulieferer, um die Produktionskapazität auszuweiten¹, soweit europarechtlich zulässig.
- Zusage für die Förderung der Anschaffung von vorbestellten O-Lkw, die noch nicht am Markt verfügbar sind.

2.2.4 Handlungsfeld A3: Anschlussfähigkeit von O-Lkw sicherstellen (geographisch und technologisch)

Die O-Lkw-Technologie wird aufgrund ihrer spezifischen Stärken und Herausforderungen stets nur eine Antriebstechnologie unter mehreren für schwere Nutzfahrzeuge sein – sowohl in Deutschland als auch im europäischen Kontext. Um ihre Klimaschutzpotentiale schnell nutzbar zu machen, ist es daher auch sinnvoll möglich, mit ihrer Implementierung im nationalen Rahmen zu starten. Wissenschaftliche Analysen zur Systemeinführung zeigen, dass dies mit hoher Wahrscheinlichkeit auch kostenseitig sinnvoll ist, wenn ein nationaler Markthochlauf gelingt (ifeu et al. 2020). Dennoch ist es wahrscheinlich, dass durch eine europäische Einführung zusätzliche Netzwerkeffekte genutzt und Marktpotentiale gehoben werden könnten.

Um dies zu ermöglichen, sollten spätestens im Zuge der deutschen Netzausbauphase auf europäischer Ebene Übereinkünfte zu zentralen Fragen im Bereich Standardisierung und (Markt-)Regulierung erzielt werden.



Abbildung 11 zeigt eine Übersicht der hierbei zu adressierenden Themenbereiche. Die Standardisierung zentraler technischer Komponenten (innerer Kreis) ist bereits Gegenstand von Prozessen innerhalb der CENELEC und könnte voraussichtlich bereits innerhalb der Pilotphase eines O-Lkw-Systems in Deutschland abgeschlossen werden. Die Regulierung im weiteren Umfeld (äußerer Kreis) hat jedoch viele Berührungspunkte mit etablierten Strukturen außerhalb der O-Lkw-Technologie, so dass hier auch nationale Spezifika eine große Rolle spielen. So ist beispielsweise eine wichtige Frage, inwieweit ein O-Lkw-System dem Regulierungsrahmen für Energienetze oder dem für den Straßenverkehr unterliegt (Hartwig / Lehmann 2019).

¹ Eine solche Förderung ist aktuell durch die Bundesregierung bereits für die Kfz-Industrie vorgesehen, und zwar im Rahmen ihres Konjunkturpakets gegen die Corona-Krise (Bundesregierung 2020a).

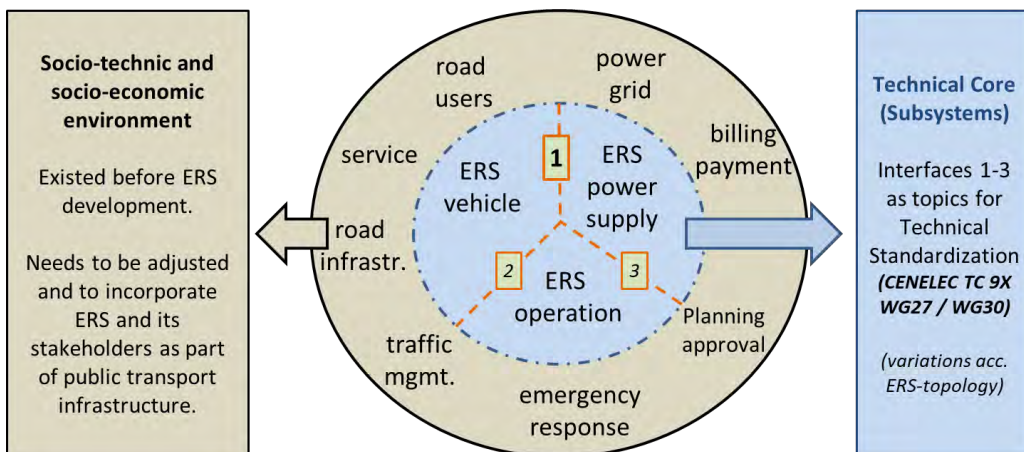


Abbildung 11: Wichtige Themenbereiche in Bezug auf Standardisierung und Regulierung von Electric Road Systems, entnommen aus (Andersson / Lehmann 2019)

In der Praxis birgt der transnationale Ausbau eines O-Lkw-Systems gegenüber einer rein nationalen Implementierung erhebliche zusätzliche Herausforderungen. Grund dafür sind unter anderem nationale Unterschiede in den Bereichen des Planungsrechts, technischer Standards im Energiesystem und im Straßenbau, der Finanzierung von Infrastruktur sowie der Zuständigkeit verschiedener Verwaltungsebenen. Einige dieser Aspekte wurden von einer exemplarischen Machbarkeitsuntersuchung für eine ERS-Strecke zwischen Skandinavien und Deutschland beleuchtet, die im Rahmen des schwedisch-deutschen Kooperationsprojekts „CollERS“ durchgeführt wurde (ifeu / Öko-Institute / et al. 2020).

Analog zur nationalen Pilotierung sollten daher auch internationale Oberleitungs-Strecken zunächst im Pilotmaßstab geplant und realisiert werden.

Da im schweren Lkw-Verkehr zukünftig voraussichtlich mehrere Antriebstechnologien parallel eingesetzt werden, stellt sich zudem die Frage nach Schnittstellen, Abhängigkeiten und Synergien zwischen O-Lkw-Technologie und anderen Antriebstechnologien. Hier sind vor allem reine Batterie-Lkw zu nennen, die in den kommenden Jahren in großem Umfang auf dem Nutzfahrzeugmarkt erwartet werden und von einigen Herstellern auch bereits für den Fernverkehr angekündigt wurden.



Folgende Punkte sollten diesbezüglich während der Netzausbauphase prioritär verfolgt werden:

- **Abstimmung der Kapazitätsplanung für Schnellladeinfrastruktur und Oberleitungen unter Einbezug insbesondere der Fahrzeughersteller und großer Flottenbetreiber.** Dabei ist außerdem zu berücksichtigen, welche Energiemenge Lkw voraussichtlich durch betriebliche Ladeinfrastruktur (Betriebshöfe, Rampen) aufnehmen können.
- **Koordination des Oberleitungs-Ausbaus mit dem Ausbau von Schnellladeinfrastruktur,** um Planungsverfahren zu beschleunigen, Netzanschlusskapazitäten richtig zu dimensionieren und ggf. weitere Synergien zu heben.



- **Entwicklung kostengünstiger Lösungen, um Batterie-Lkw mit einem Stromabnehmer nachzurüsten.** Dies kann ggf. über ein Marktanzreizprogramm gefördert werden, siehe Handlungsfeld A2 (Abschnitt 0).
- **Wissenschaftliche Untersuchung zur Weiterentwicklung des Oberleitungs-Netzes über das Basisnetz hinaus.** Hier ist neben der Entwicklung bei der Punktladeinfrastruktur und bei der Batterietechnologie auch die längerfristige Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie sowie synthetischer Kraftstoffe zu berücksichtigen.

Auch jenseits der Antriebstechnologien sind Einflüsse auf die O-Lkw-Technologie zu erwarten, die wissenschaftlich untersucht werden sollten. Beispielsweise könnten autonom fahrende O-Lkw durch die Stromaufnahme während der Fahrt nahezu kontinuierlich betrieben werden und somit wirtschaftliche und betriebliche Vorteile realisieren. Auch könnte die Stromnachfrage dadurch zeitlich besser gesteuert werden und an die Situation im Stromsystem (Einspeisung fluktuierenden erneuerbaren Stroms) angepasst werden.

2.2.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die Ausbauphase hin zu einem möglichen Oberleitungs-Basisnetz für Lkw skizziert. Ausgangssituation, wichtige Handlungsfelder und resultierende Meilensteine sind in der nachfolgenden Darstellung zusammengefasst.

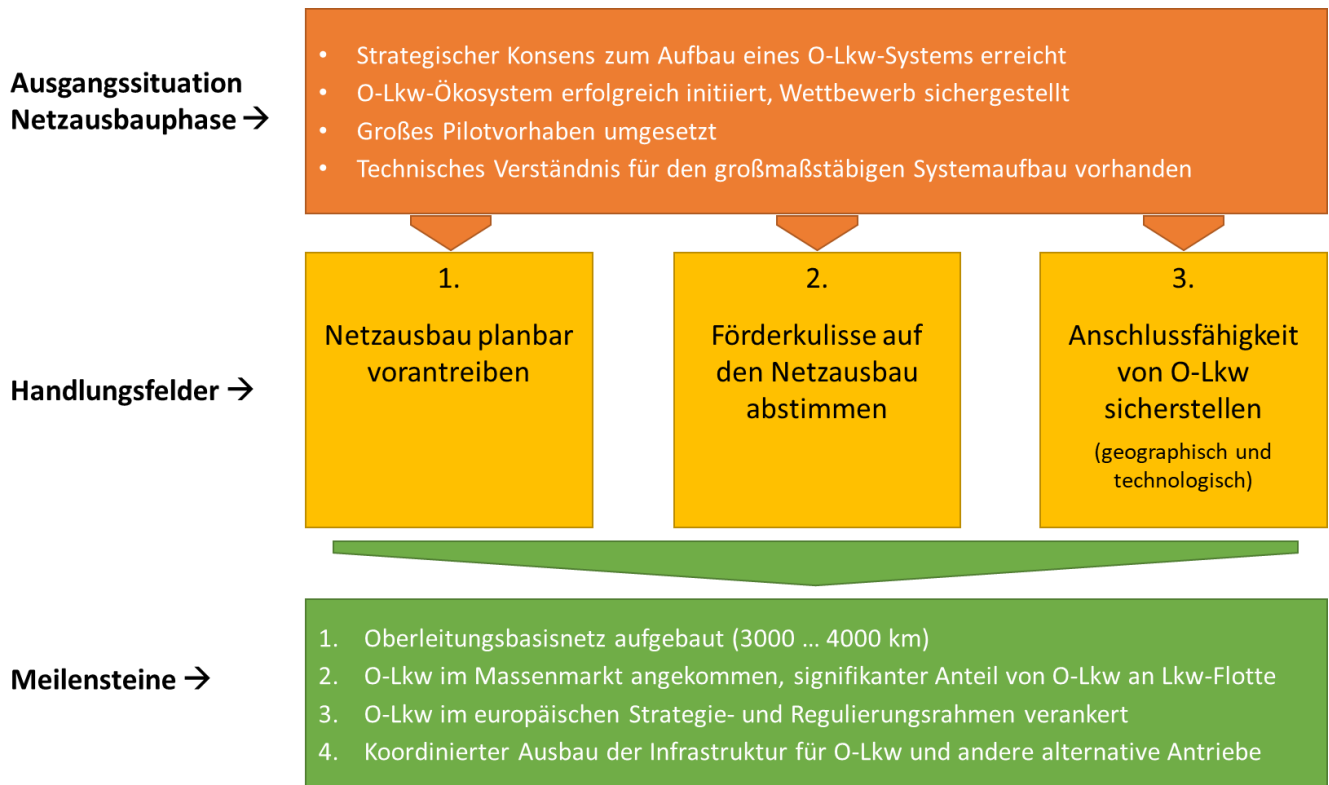


Abbildung 12: Übersicht wesentlicher Elemente der Netzausbauphase

Mit den genannten Meilensteinen ist zum Abschluss der Netzausbauphase ein Zustand erreicht, in dem das Klimaschutzpotential durch Einsatz von O-Lkw für den innerdeutschen Güterfernverkehr zu einem wesentlichen Teil gehoben werden kann. Lkw, die zu einem großen Anteil auf dem Autobahn-Kernnetz unterwegs sind, können dann weitgehend elektrisch betrieben werden. Die Systemkosten dafür werden nach aktuellem Stand des Wissens deutlich geringer sein, als wenn diese Fahrzeuge auf andere alternative Antriebs- oder Kraftstoffoptionen umgestellt würden (ifeu et al. 2020). Von dieser klimapolitisch wie wirtschaftlich sinnvollen Basis ausgehend kann dann in der Folge ergebnisoffen untersucht werden, ob die Oberleitungs-Technologie für weitere Einsatzfelder im Straßengüterverkehr sinnvoll ist oder andere Technologien zum Zuge kommen sollten.

3 Ausblick nach Aufbau eines Basisnetzes

Gelingt es, die beiden oben beschriebenen Phasen erfolgreich zu durchlaufen, stellt die O-Lkw-Technologie eine etablierte Lösung für einen wesentlichen Teil des innerdeutschen Straßengüterverkehrs dar. Das dann bestehende Basisnetz von zwischen 3.000 und 4.000 km Länge ermöglicht einen stabilen wirtschaftlichen Betrieb für die intendierten Anwendungsfälle. Dieser Zustand könnte nach dieser Roadmap etwa 10 Jahre nach dem Beginn der Pilotphase, also dem Ausgangspunkt dieser Roadmap erreicht werden.

Für den weiteren Betrieb sollten dann Modelle gefunden werden, um die staatliche Vorfinanzierung der Oberleitungs-Infrastruktur sukzessive auf eine Nutzerfinanzierung umzustellen. Modellrechnungen innerhalb dieses Vorhabens zeigen, dass dies voraussichtlich bereits wenige Jahre nach Etablierung des Basisnetzes möglich ist (ifeu et al. 2020) – insbesondere unter Berücksichtigung der auch für den Verkehrssektor beschlossenen CO₂-Bepreisung.

Nach Aufbau des Oberleitungs-Basisnetzes werden sich etliche neue Erkenntnisse und Entwicklungen auch bei anderen alternativen Antriebsoptionen, Dekarbonisierungsstrategien auf nationaler und europäischer Ebene sowie dem Güterverkehrssystem insgesamt ergeben haben. Bei der Planung eines möglichen weiteren Oberleitungs-Ausbaus sollte dann die Frage im Vordergrund stehen, wie sich die Oberleitungs-Technologie mit anderen Antriebs- und Kraftstoffoptionen sinnvoll ergänzen kann.

Sollte sich erneuerbarer Strom weiterhin als knappes Gut erweisen und die Preise für erneuerbaren Wasserstoff hoch bleiben, könnte es unter einer bestehenden Oberleitung auch für Brennstoffzellen-Lkw attraktiv sein, mithilfe eines zusätzlichen Pantographen Strom aus dem Oberleitung-System zu beziehen. Dann könnte es sinnvoll sein, Oberleitungs-Systeme als Rückgrat eines elektrifizierten Straßengüterverkehrs europaweit auszubauen, um damit verschiedene Arten von Elektrofahrzeugen mit unterschiedlichen Energiespeichern an Bord effizient versorgen zu können. Essentiell ist es, eine gemeinsame europäische Strategie für diese Fragestellungen zu finden und in die Weiterentwicklung wesentlicher Gesetzeswerke (Infrastrukturrichtlinie AFID, Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED, CO₂-Flottengrenzwerte für Nutzfahrzeuge, etc.) zu übersetzen.

Unabhängig von Fragen des Antriebs muss es in dieser Phase aber auch darum gehen, das Wachstum des Straßengüterverkehrs insgesamt zu begrenzen – nicht zuletzt um „Rebound-Effekte“ durch die Einführung elektrischer Antriebe zu verhindern und die (direkten wie gesellschaftlichen) Kosten des Straßengüterverkehrs zu begrenzen. In dem Maße, wie der CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge abnimmt, sollten daher Gebühren eingeführt werden, die sich an der Straßennutzung orientieren („road pricing“) und dann auch die Finanzierung der Energieversorgungsinfrastruktur für einen zukünftigen effizienten Technologiemix ganzheitlich abdecken können.

Der Aspekt der Einbindung eines zunehmend elektrifizierten Verkehrssektors ins Stromsystem wird langfristig an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden daher durch das Fraunhofer IEE Abschätzungen getroffen, wie sich Oberleitungs-Lkw im Energiesystem des Jahres 2050 auswirken könnten. Dafür wurde mithilfe des Energiesystemmodells

SCOPE ein Szenario betrachtet, in dem knapp 50 % der Fahrleistung im schweren Güterverkehr in Deutschland durch Strom aus Oberleitungen betrieben wird, sowie ein weiteres, in dem kein O-Lkw-System existiert. Bei beiden Modellrechnungen wird eine EE-Vollversorgung und damit eine Klimaneutralität im Energiebereich für das Jahr 2050 angenommen. Weitere Annahmen und Rahmenbedingungen sind im Anhang beschrieben.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass der Energiebedarf des O-Lkw-Systems am effizientesten durch zusätzlichen Ausbau der PV-Stromerzeugung gedeckt werden kann, da sich deren Erzeugungsprofil relativ gut mit dem durch den Tagesgang des Lkw-Verkehrs bestimmten Lastprofil von O-Lkw deckt. Um die vergleichsweise unflexible Nachfrage sicher decken zu können, ist dabei ein überproportionaler Ausbau der nominellen Erzeugungleistung notwendig¹. Im Szenario ganz ohne elektrisch betriebene Lkw müssen für die Lkw hingegen fast 50 TWh an PtL-Diesel jährlich importiert werden, um die Klimazielerreichung sicherzustellen. Beim angenommenen PtL-Gestehungspreis von 102 €/MWh (etwa 1 €/Liter Diesel) im Jahr 2050 verursacht dies reale annuitätische Mehrkosten von ca. 2,5 Mrd.€ pro Jahr. Aus heutiger Sicht kann die direkte Stromnutzung durch Lkw somit die Kosten im zukünftig dekarbonisierten Energiesystem begrenzen.

Angesichts vielfältiger Unsicherheiten bei der technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung kann die optimale langfristige Rolle von O-Lkw im Verkehrssystem heute noch nicht definiert werden. Die vorliegende Roadmap beschreibt vielmehr den Weg hin zu einem robusten Zwischenzustand, in dem die geeignetsten Potentiale für den Betrieb mit Oberleitungs-Lkw durch den Aufbau eines Oberleitungs-Basisnetzes gehoben wurden. Nach heutigem Kenntnisstand stellt dieser Aufbau, sofern er von den in dieser Roadmap beschriebenen flankierenden Aktivitäten begleitet wird, eine sogenannte „No-regret“-Maßnahme dar, er ist also auch dann sinnvoll, wenn die O-Lkw-Technologie darüber hinaus langfristig nicht weiter ausgebaut werden sollte. Mit einem längerfristigen CO₂-Einsparpotential von etwa 9 Mio. Tonnen (vgl. Jöhrens et al. 2020, Abschnitt 1.2) stellt er eine sehr wirkmächtige Klimaschutzmaßnahme dar.

¹ Im betrachteten Szenario müssen etwa 10 GW PV-Kapazität und 4 GW Windkraftkapazität gegenüber dem Szenario ohne O-Lkw zusätzlich installiert werden. Die gesamten installierten Kapazitäten liegen in den Szenarien für beide Energieträger bei je etwa 200 GW.

Literaturverzeichnis

- Andersson, H.; Lehmann, M. (2019): Round table Standardization & Regulation for ERS -. 3rd Electric Road Systems Conference 2019 Frankfurt am Main, Germany.
- Arminas, D. (2020): Sweden nears decision on electric road pilot. In: *ITS International*. <https://www.itsinternational.com/its9/news/sweden-nears-decision-electric-road-pilot>. (27.07.2020).
- Beckers, D. T.; Gizzi, D. F.; Jöhrens, J.; Liedtke, G. (2019): Zentrale Ausgestaltungsfragen hinsichtlich eines Förderregimes für Oberleitungs-Hybrid-LKW (OH-Lkw) – Eine (institutionen-)ökonomische Analyse. Berlin. <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/IKEM-2019-09-kurzstudie-zentrale-ausgestaltungsfragen-hinsichtlich-foerderregime-fuer-oh-lkw-web.pdf>.
- BMVI (2018): BMVI, Pressemitteilung. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2018/036-scheuer-umweltfreundliche-lkws.html>. (13.07.2020).
- BMVI (2019): 13 Klimamaßnahmen für öffentlichen Personen-, Fuß- und Radverkehr. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/klimamassnahmen.pdf?__blob=publicationFile (13.07.2020).
- BMVI (2020): Webseite BMVI, LKW Maut. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html>. (13.07.2020).
- Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung.
- Bundesregierung (2016): Regierungsprogramm Wasserstoff-und Brennstoffzellentechnologie 2016-2026 - von der Marktvorbereitung zu wettbewerbsfähigen Produkten. https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/2863/live/lw_file/nip-regierungsprogramm.pdf (10.06.2020).
- Bundesregierung (2020a): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken (Eckpunkte eines Konjunkturpakets gegen die Corona-Krise). https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile&v=9 (15.06.2020).
- Bundesregierung (2020b): Die Nationale Wasserstoffstrategie. <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf> (10.06.2020).
- Bundesregierung; Government of Sweden (2017): Innovation and cooperation for a sustainable future - A German & Swedish partnership for innovation. <https://www.government.se/490ab0/contentassets/a1b5e6f6c4154a9a402d25343e26f/innovation-and-cooperation-for-a-sustainable-future.pdf> (29.10.2019).

- Fraunhofer IEE (2018): SCOPE - Sektorenübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems. https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschuren/2018_F_SCOPE_Einzelseiten.pdf (16.03.2020).
- Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A.; Wunsch, M. (2018): Klimapfade für Deutschland. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf (25.11.2019).
- Gustavsson, M.; Hacker, F.; Helms, H. (2019): Overview of ERS concepts and complementary technologies.
- Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W.; Bernecker, T.; Speiser, J.; Röckle, F.; Schubert, M.; Neubauer, G. (2020): Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn, Fraunhofer IAO, Intraplan Consult GmbH, Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf> (25.02.2020).
- 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. Frankfurt am Main, Germany.
- ifeu et al. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Heidelberg. <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw-Bericht-Einfuehrungsszenarien-web.pdf>.
- ifeu; M-Five (2017): Roadmap OH-Lkw: SWOT-Analyse. ifeu, M-Five, Heidelberg, Karlsruhe.
- ifeu; M-Five (2018): Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf.
- ifeu; Öko-Institute; RISE Research Institutes of Sweden; Intraplan Consult GmbH (2020): Connecting countries by Electric Roads - Feasibility Analysis of a Swedish-German ERS corridor.
- ifeu; PTV Transport Consult; Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS (2018): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/2018-12-20-ifeu-PTV-SCS-Potentialanalyse-Roadmap-OH-Lkw.pdf>.
- Jelica, D. (2019): Electric road demonstrations in Sweden. https://mozees.no/wp-content/uploads/2019/10/Jelica_Electric-road-demonstrations-in-Sweden.pdf (03.05.2020).
- Lehmann, P.; Korte, K.; Gawel, E.; Jöhrens, J.; Lambrecht, U. (2020): Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende - Kritische Beleuchtung eines Postulats. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Technologieneutralitaet/33_Technologieneutralitaet_LANGFASSUNG_WEB.pdf.
- Norman Gerhardt; Mareike Jentsch; Michael von Bonin; Sarah Becker; Diana Böttger (2018): ENTWICKLUNG DES STRASSENVERKEHRS UND RÜCKKOPPLUNG MIT DEM ENERGIESYSTEM IN -95%THG-KLIMAZIELSZENARIEN. *Teilbericht*, Fraunhofer IEE.

http://www.energieversorgung-elektromobili-taet.de/includes/reports/Endbericht_Strassenver-kehr_Energiesystem_FraunhoferIEE.pdf (13.07.2020).

NPM (2019a): Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf> (08.07.2020).

NPM (2019b): Elektromobilität. Brennstoffzelle. Alternative Kraftstoffe - Einsatzmöglichkeiten aus technologischer Sicht (AG 2). Berlin. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/11/NPM-AG-2-Elektromobilit%C3%A4t-Brennstoffzelle-Alternative-Kraftstoffe-Einsatzm%C3%B6glichkeiten-aus-technologischer-Sicht.pdf> (01.05.2020).

NPM (2020): Einsatzmöglichkeiten unter realen Rahmenbedingungen - AG2: Alternative Antriebe und Kraftstoffe für nachhaltige Mobilität. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/06/NPM-AG-2_Einsatzm%C3%B6glichkeiten-unter-realen-Rahmenbedingungen.pdf (09.06.2020).

Öko Institut; ifeu; Fraunhofer ISI (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland - eine Synthese. https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Stand_desWissens_OH-Lkw_Zusammenfassung_final_2020-05-25.pdf.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)“ Berlin / Karlsruhe.

Öko-Institut; ifeu; Fraunhofer ISI (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland - Eine Synthese.

Scandria Webseite (2018): <https://scandria-corridor.eu/index.php/de/>. (13.07.2020).

Trafikverket (2017): National Roadmap for electric road systems. Trafikverket (Swedish Transport Administration).

Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; (...) (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE, M-Five, Karlsruhe. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile.

Zoll online (2020): Zoll online - Elektrofahrzeuge. In: *Webseite Zoll Deutschland*. https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/Steuervergünstigung/Elektrofahrzeuge/elektrofahrzeuge_node.html. (27.04.2020).

Anhang: Langfristige Integration des Oberleitungs-Lkw in das Gesamtenergiesystem

Zur Bewertung von Auswirkungen von O-Lkw im zukünftigen Energiesystem wurden durch das Fraunhofer IEE entsprechende Szenarien für das Jahr 2050 betrachtet. Dabei wurde ein Szenario mit und ein Szenario ohne O-Lkw mit Hilfe der kostenbasierten sektorenübergreifenden Ausbau- und Einsatzoptimierung SCOPE (Fraunhofer IEE 2018) berechnet. Im Modell hinterlegt sind dabei neben Strom- und Wärmesektor im Verkehr die Fahrzeuganschaffungskosten, Betriebskosten (inkl. Energiekosten) als auch Infrastrukturkosten für jede Antriebstechnologie.

Um den Effekt des O-Lkw auf das Gesamtsystem zu sehen, sind beide Szenarien grundsätzlich identisch aufgebaut:

- Grundsätzlich wird als europäisches Langfristziel eine Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 um 95 % bis 100 % $\text{CO}_{2\text{eq}}$ in Bezug auf 1990 betrachtet (Europäische Kommission 2018b). Dabei wird unterstellt, dass noch 5 % Emissionen in der Landwirtschaft und den nicht vermeidbaren Emissionen aus Industrieprozessen im nichtenergetischen Bereich verbleiben, bzw. diese durch zusätzliche Senken und negative Emissionen kompensiert werden. In jedem Fall führt dies zu einer EE-Vollversorgung und zu einer Klimaneutralität im Energiebereich bis 2050.
- In beiden Szenarien können etwa bis zu 1/3 der Fahrleistungen von Last- und Sattelzügen (>40t) mithilfe batterieelektrischer Lkw im Nah- bzw. Pendelverkehr (im Modell grundsätzlich abgebildet als PHEV¹) zurückgelegt werden, die einen elektrischen Fahranteil von 65 Prozent erreichen. Dies wurde auf Basis von KID-Tagesfahrprofilen und einer typischen Ladeinfrastrukturverfügbarkeit je nach Haltestandort abgeleitet. Der Rest des Verkehrsaufkommens von Last- und Sattelzügen wird mit PtL-Diesel betrieben (Langstreckenverkehr auf Autobahnen ohne Oberleitungen), der in diesen Szenarien vollständig aus dem außereuropäischen Ausland importiert wird (national wird H₂ für die Industrie und anteilig PtG für Industrie und Gaskraftwerke hergestellt). Für PtL-Diesel wird ein Importpreis von 102 €/MWh unterstellt, der angenommene Strompreis für Elektrofahrzeuge ergibt sich modellendogen und ergibt sich aus den Investitionen in Windkraft und Photovoltaik, Stromnetzausbau und Ausgleichskraftwerke (Gasturbinen und Batteriespeicher).
- Der Brennstoffzellenantrieb ist für schwere Nutzfahrzeuge im Modell ebenfalls hinterlegt. Aufgrund der unterstellten PtL-Preise von 102 €/MWh im Vergleich zu unterstellten Flüssig-Wasserstoffimporten von 94 €/MWh² kommt diese Technologie in den Szenarien aus Kostensicht jedoch nicht zum Einsatz. Eine vertiefte Betrachtung der Potentiale von Brennstoffzellenantrieben unter Berücksichtigung weiterer Kriterien war nicht Gegenstand des Vorhabens.

¹ BEV-Lkw im Bereich >40t-Lkw im Pendelverkehr wurden vernachlässigt, da dies detailliertere Untersuchungen zu Fahrprofilen und Ladeinfrastruktur bedarf um dies im Modell abbilden zu können.

² Hier entsteht ein vergleichsweise hoher Aufwand und damit Kosten für die Verflüssigung.

- Die Rahmenbedingungen für das Modell im übrigen Verkehrsbereich (kleinere SNF, Pkw+LNF, andere Verkehrsträger) variiert nicht zwischen den Szenarien und wurde auf Basis der in 2018 getroffenen Annahmen abgebildet (Norman Gerhardt et al. 2018).

Im Oberleitungs-Szenario wird nun unterstellt, dass langfristig 3.800 km des deutschen Autobahnnetzes mit Oberleitungen ausgebaut werden¹. Mithilfe dieser Annahme wird abgeleitet, dass knapp 50 Prozent der Fahrleistung im schweren Güterverkehr auf deutschem Boden (Fzg-km in der Klasse >40t; Last- und Sattelzüge - LZ/SZ) mit O-Lkw bedient werden kann, wobei der durchschnittliche elektrische Fahranteil mit 78 Prozent angenommen wurde. Die O-Lkw-Flotte besteht hierbei aus rein elektrischen Fahrzeugen (O-BEV) sowie Diesel-Hybridfahrzeugen (O-HEV). Der elektrische Fahranteil wurde auf Basis des Referenzszenarios „Infrastruktur“ des Berichts „Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030“ aus demselben Vorhaben abgeleitet (ifeu et al. 2020); dort wurde für 2030 ein Netz von etwa 3.200 km Länge angenommen. Da das für 2050 zugrunde gelegte Netz hier aber mit 3.800 km um rund 600 km länger ist, wurde der elektrische Fahranteil demgegenüber angepasst: Analysen zeigen, dass mit einer Ausweitung des Oberleitungs-Netzes sowohl der elektrische Fahranteil von O-HEV als auch der Anteil von O-BEV an O-Lkw steigen. Demnach wurde der Wert von 63 % auf 78 % angepasst.

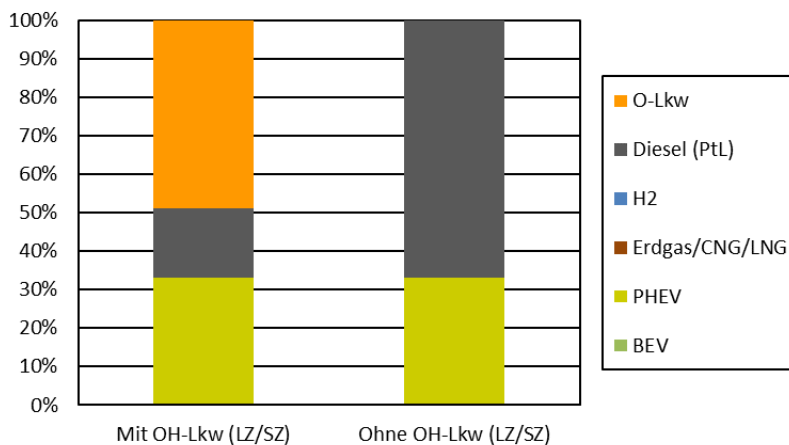


Abbildung 13: Ausbau- und Einsatzoptimierung (SCOPE): Zusammensetzung des Fahrzeugmarktes der Last- und Sattelzüge (eigene Berechnungen)

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abbildung 13 bis Abbildung 15 visualisiert. Die nationale Stromerzeugung liegt in beiden Szenarien bei über 900 TWh pro Jahr. Die installierten Leistungen von PV liegen im Bereich über 200 GW und Wind Onshore bei ca. 150 GW und Offshore bei 40 GW.

Die wichtigsten Unterschiede im Ergebnis der Optimierungsrechnung der beiden Szenarien sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die zentralen Aussagen der Berechnungen sind folgende:

- Das im Modell vorgegebene Potential für Oberleitungs-Lkw bei der Fahrleistung wird bei der Kostenoptimierung vollständig ausgeschöpft. Das bedeutet, dass der Einsatz von O-Lkw unter den angenommenen Rahmenbedingungen niedrigere Systemkosten verursacht als der Einsatz von Verbrenner-Lkws mit PtL-Diesel.

¹ Dies entspricht der im Vorhaben „StratOn“ für das Jahr 2040 getroffenen Annahme, siehe (Hacker et al. 2020)

2. Der zusätzliche Strombedarf durch O-Lkw wird hauptsächlich durch PV und Wind (On-shore) gedeckt. Eine zusätzliche Stromerzeugung aus Gaskraftwerken durch Rückverstromung von (teurem) PtG-Methan ist fast nicht notwendig.
3. O-Lkw erfordern mehr installierte Leistungen zur Stromerzeugung und nur wenig zur Speicherung, insbesondere PV Anlagen, vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**
4. Auf der anderen Seite müssen ca. 49 TWh weniger PtL importiert werden.
5. Vergleicht man die jährlichen Investitionskosten des deutschen Energiesystems und die Betriebskosten, die sich aus den jährlichen Betriebskosten des Energiesystems inklusive der Kosten für den PtL-Import zusammensetzen, sinken die jährlichen Gesamtsystemkosten in Summe, wenn O-Lkw im Schwerlastverkehr eingesetzt werden, um ca. 2,5 Mrd. €/a reale annuitätische Kosten im Jahre 2050, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Langfristig können Oberleitungs-Lkw im Energiesystem also die Gesamtsystemkosten senken. Auch kann der Importbedarf strombasierter Flüssigkraftstoffe signifikant gesenkt werden, was angesichts des ungewissen zukünftigen Weltmarktangebots solcher Kraftstoffe langfristig die Versorgungssicherheit in Deutschland erhöhen dürfte. Angesichts absehbarer erheblicher PtX-Bedarfe in Bereichen, in denen fossile Energieträger nicht oder nur sehr begrenzt durch Strom ersetzt werden können (z.B. im Flugverkehr oder auch etlichen Industrieprozessen), kann diese Technik auch die Klimazielerreichung vereinfachen.

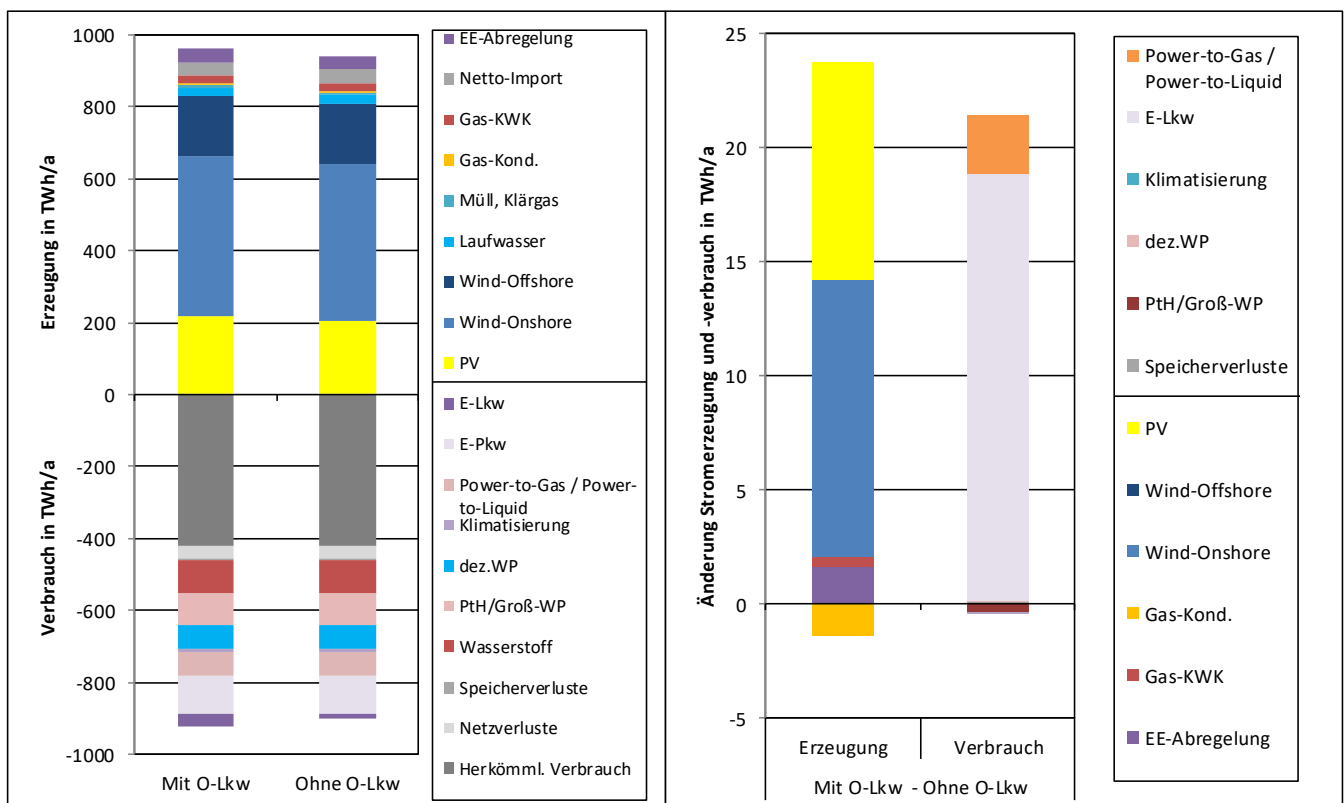


Abbildung 14: Ausbau- und Einsatzoptimierung (SCOPE): Ergebnisse der Szenarien mit- und ohne O-Lkw in 2050, Strombilanz (links) und Änderung der Strombilanz (Differenz) im Vergleich der beiden Szenarien (rechts) (eigene Berechnungen IEE)

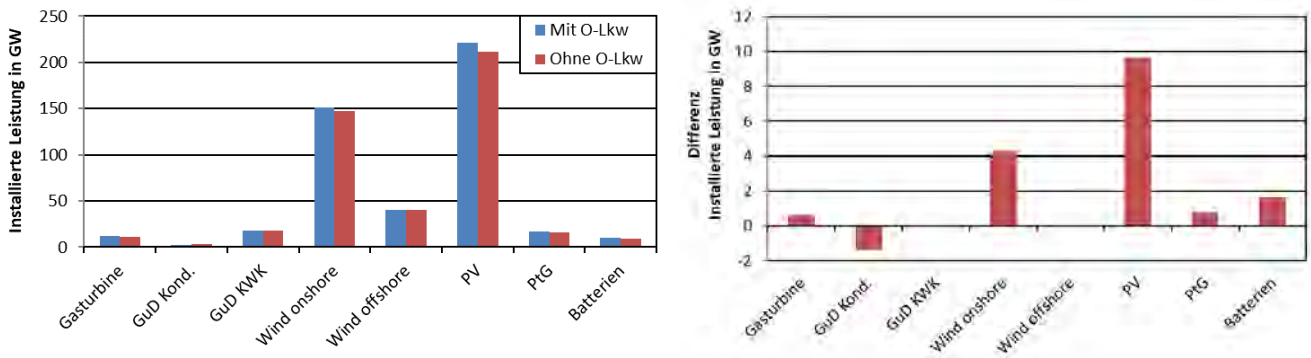


Abbildung 15: Ausbau- und Einsatzoptimierung (SCOPE): Ergebnisse der Szenarien mit- und ohne O-Lkw in 2050, installierte Kapazitäten (links) und die Differenz rechts (eigene Berechnungen IEE)

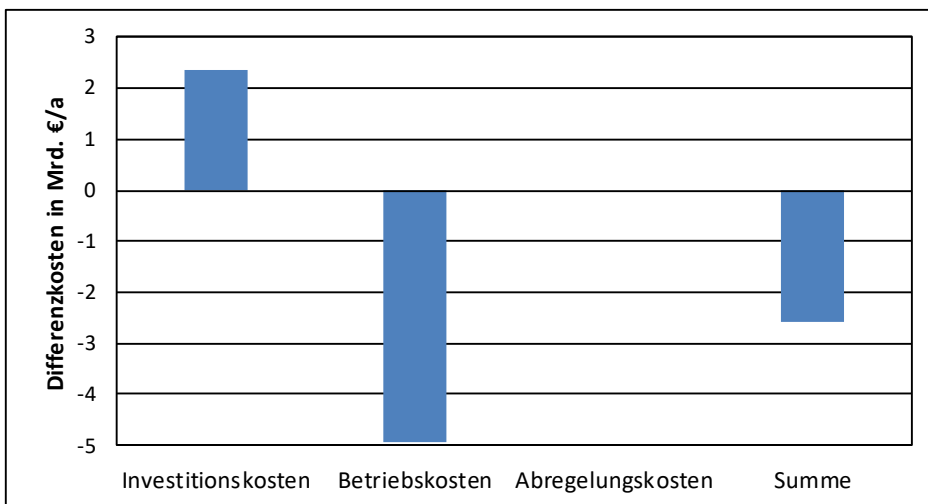


Abbildung 16: Ausbau- und Einsatzoptimierung (SCOPE): Differenzkosten der Szenarien mit- und ohne O-Lkw in 2050 nach Kostenpunkten. Die Abregelungskosten sind in beiden Szenarien fast identisch und die Differenz damit nahe null (eigene Berechnungen IEE).