



Mögliche Ausbauschritte für eine Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr in Deutschland

Eine kriterienbasierte Analyse

Ort: Berlin, Heidelberg, Karlsruhe

Datum: 22.03.2022

Version 1

Impressum

Mögliche Ausbauschritte für eine Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr in Deutschland. Eine kriterienbasierte Analyse

Danksagung

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projekts *Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland (BOLD)*, das im Rahmen des Förderprogramms *Erneuerbar Mobil* vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 16EM4011-1 gefördert wird.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Erneuerbar
mobil

Autoren

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

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

Daniel Speth (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI), daniel.speth@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

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

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

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

Bildnachweis

Deckblatt: BOLD-Projekt

Zitierempfehlung

Florian Hacker, Julius Jöhrens, Daniel Speth, Robert Wallace (2022):

Mögliche Ausbauschritte für eine Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr in Deutschland. Eine kriterienbasierte Analyse. Hintergrundpapier im Rahmen des Projekts BOLD (Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland). Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

März 2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Summary	7
1 Einleitung und Motivation	9
2 Bisherige Analysen zu Zielnetzen	13
3 Kriterien für die Eignungsbewertung	15
3.1 Fahranteil auf Autobahnabschnitt	15
3.2 Anteil an Pendelverkehren.....	17
3.3 Nähe zu logistischen Umschlagpunkten und Ankernutzern.....	19
3.4 Mögliche Synergien oder Konflikte mit Ausbauvorhaben im deutschen Autobahnnetz	20
3.5 Nationales und grenzüberschreitendes Verkehrsaufkommen	22
3.6 Streckencharakteristik.....	24
3.7 Konkurrenz oder Synergien mit Schiene und Binnenschiff.....	26
3.8 Weitere Bewertungskriterien	28
4 Netzausbau: Bedeutung der Bewertungskriterien im Zeitverlauf und denkbare Ausbaupfade	29
4.1 Bedeutung der Bewertungskriterien im Zeitverlauf.....	29
4.2 Mögliche Ausbaupfade.....	31
5 Fazit und Forschungsbedarf	34
6 Literaturverzeichnis	35

Hinweise

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

Zusammenfassung

Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) werden als eine von drei Lösungsoptionen für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs verfolgt und mögliche Zielnetze wurden bereits identifiziert, mögliche nächste Ausbauschnitte sind aber unklar.

Das Konzept der Bundesregierung für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr verfolgt die Oberleitungstechnologie – neben dem batterieelektrischen und dem Brennstoffzellenantrieb – als eine technische Lösung für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. Bis zum Jahr 2024/25 sollen die Technologien eine Marktreife erlangen, die Pfadentscheidungen möglich macht. Mögliche Zielnetze für Oberleitungsinfrastruktur werden in verschiedenen Studien für ein Kernnetz von Autobahnen mit etwa 4.000 km Gesamtlänge diskutiert. Wie der schrittweise Ausbau – ausgehend von den aktuellen Pilotvorhaben mit nur wenigen Kilometern Oberleitung – erfolgen soll, ist jedoch noch nicht geklärt. Das vorliegende Papier möchte zu dieser Diskussion einen Beitrag mit Blick auf wichtige Bewertungskriterien und geeignete Strecken leisten.

Der frühe Netzausbau sollte sich insbesondere auf Strecken mit bedeutsamen Pendelverkehren und einem hohen Fahrtenaufkommen mit geringen Fahranteilen jenseits der Strecke orientieren.

Der Aufbau initialer Strecken sollte zum Ziel haben, einen hohen Nutzen für Ankernutzer sicherzustellen. So können einerseits umfassende Praxiserfahrungen gesammelt und andererseits eine Grundauslastung der Infrastruktur sichergestellt werden. Angesichts der noch nicht erfolgten Netzbildung sollten dabei insbesondere Pendelverkehre mit nur geringen Fahranteilen jenseits der elektrifizierten Strecke in den Blick genommen werden. Das absolute Verkehrsaufkommen auf dem Streckenabschnitt ist für diesen Ausbauschnitt hingegen noch von nachrangiger Bedeutung. Für die Beurteilung der Integrationsfähigkeit der initialen Strecken in ein späteres Gesamtnetz stellt das Verkehrsaufkommen aber bereits einen wichtigen Indikator dar. Zudem sollten in der frühen Umsetzungsphase mögliche streckenspezifische Hindernisse für die technische Umsetzung mit Blick auf Streckencharakteristik, geplante Bauvorhaben und Netzanschluss sowie hinsichtlich der Planungs- und Genehmigungsprozesse berücksichtigt werden.

Mit zunehmendem Netzausbau gewinnt das absolute Verkehrsaufkommen an Bedeutung. Für die europäische Umsetzung des Systems werden zudem internationale Korridore relevant.

Langfristig entfaltet ein Oberleitungsnetz auf Autobahnen mit hohem Güterverkehrsaufkommen den größten Nutzen. Mit zunehmendem Netzausbau verlieren daher streckenspezifische Einsatzprofile an Relevanz. Angesichts längerer Planungs- und Entwicklungszeiträume für Netzausbauschnitte sollten zudem technische und planerische Umsetzungshemmnisse aus der frühen Realisierungsphase an Bedeutung verlieren. Im Vordergrund sollte beim weiteren Netzaufbau die Erschließung und Verbindung besonders verkehrstarker Einzelabschnitte stehen, um perspektivisch ein leistungsfähiges Fernverkehrsnetz zu erschließen. Angesichts der starken europäischen Verflechtungen des Straßengüterverkehrs in Deutschland werden spätestens zu diesem Zeitpunkt auch internationale Korridore für die Elektrifizierung bedeutsam.

Weitere Umsetzungshürden sollten bei einer zunehmenden Einbettung des Oberleitungs-Lkw-Systems in eine integrierte Verkehrsplanung mit der Zeit an Bedeutung verlieren.

Hat sich das Oberleitungs-Lkw-System einmal hinsichtlich Technologie, betrieblicher Aspekte, Fahrzeugmarkt und Akzeptanz etabliert, so kann die langfristige Infrastrukturplanung mit einem hinreichenden Planungsvorlauf durchgeführt werden. Durch die dann vorhandenen Erfahrungen mit der Planung initialer Strecken können die Planungsverfahren besser vorausgesehen werden. Streckenabschnitte mit bekannten lokalen Hemmnissen können beim Oberleitungsbaue ausgespart bzw. geeignete technische Lösungen entwickelt werden. Gleichzeitig ist mit einer höheren Akzeptanz der Technologie zu rechnen,

wenn ihr Ausbau in eine verkehrsträgerübergreifende Strategie für einen zukünftigen klimaneutralen Güterverkehr eingebettet wird.

Der Mix zwischen stationärer und dynamischer Ladung und somit langfristig sinnvolle Zielzustände eines Oberleitungsnetzes hängen zentral von betrieblichen und energiesystemischen Aspekten ab.

Die direkte Nutzung von Strom für den Straßengüterverkehr weist aus wirtschaftlichen Gründen gegenüber der Nutzung chemischer Energieträger wie Wasserstoff oder synthetischem Diesel deutliche Vorteile auf. Ein hoher zukünftiger Marktanteil von E-Lkw ist daher wahrscheinlich. In welchen Fällen dabei dynamische und in welchen Fällen stationäre Ladung langfristig bevorzugt wird, lässt sich aus heutiger Sicht aber nicht sicher vorhersehen. Sicher ist, dass die Oberleitung ihre Stärken vor allem auf stark befahrenen Strecken ausspielen kann. Diese bei der Netzentwicklung zu priorisieren, stellt somit eine robuste Entscheidung dar. Das angepeilte Zielnetz sollte entsprechend betrieblicher und energiesystemischer Erkenntnisse regelmäßig überprüft werden.

Summary

Overhead catenary trucks are being pursued as one of three solution options for decarbonizing road freight transport and possible target networks have already been identified, but possible next expansion steps are uncertain.

The German government's concept for climate-friendly road freight transport pursues overhead catenary technology - along with battery electric and fuel cell propulsion - as a technological solution for decarbonizing road freight transport. By 2024/25, the technologies should reach a level of market maturity that makes path decisions possible. Possible target networks for overhead catenary infrastructure are discussed in various studies for a core network of highways with a total length of about 4,000 km. However, it has not yet been clarified how the gradual expansion - starting from the current pilot projects with only a few kilometers of overhead line - is to take place. This paper aims to contribute to this discussion regarding important evaluation criteria and suitable routes.

Early network development should be particularly oriented towards routes with a significant amount of shuttle traffic and a high volume of trips with low trip shares beyond the route.

The development of initial routes should aim to ensure a high benefit for anchor users. On the one hand, this will allow comprehensive practical experience to be gained, and on the other hand, it will ensure basic utilization of the infrastructure. Since the network has not yet been established, particular attention should be paid to shuttle traffic with only a small proportion of journeys beyond the electrified sections. The absolute traffic volume on the electrified section, is still of secondary importance for this expansion step. However, the traffic volume is already an important indicator for assessing the integration capability of the initial sections in a later overall network. In addition, possible route-specific obstacles to technical implementation should be considered in the early implementation phase with regard to route characteristics, planned construction projects and network connection, as well as with regard to planning and approval processes.

With increasing network expansion, the absolute traffic volume becomes more important. In addition, international corridors become relevant for the European implementation of the system.

In the long term, an overhead catenary network will have the greatest benefit on highways with high freight traffic volumes. As the network expands, therefore, section-specific deployment profiles become less relevant. In view of the longer planning and development periods for network expansion steps, technical and planning-related obstacles to implementation from the early realization phase should also become less important. In the further development of the network, the focus should be on opening and connecting particularly busy individual sections in order to develop an efficient long-distance network in the long term. In view of the strong European integration of road freight transport in Germany, international corridors will also become important for electrification at this time at the latest.

Other implementation hurdles should become less important over time as the overhead catenary truck system becomes increasingly embedded in integrated transport planning.

Once the overhead catenary system is established in terms of technology, operational aspects, vehicle market and acceptance, long-term infrastructure planning can be carried out with sufficient planning lead time. The experience gained in planning initial routes can then be used to better anticipate planning procedures. Sections with known local obstacles can be omitted from overhead catenary construction or suitable technical solutions can be developed. At the same time, greater acceptance of the technology can be expected if its expansion is embedded in a cross-modal strategy for future climate-neutral freight transport.

The mix between stationary and dynamic charging, and thus the long-term usefulness of an overhead catenary network, depends highly on operational and energy system aspects.

For economic reasons, the direct use of electricity for road freight transport has clear advantages over the use of chemical energy carriers such as hydrogen or synthetic diesel. A high future market share of e-trucks is therefore likely. However, from today's perspective, it is not possible to predict with certainty in which cases dynamic charging will be preferred in the long term and in which cases stationary charging will be preferred. What is certain is that the overhead catenary system can play to its strengths above all on routes with heavy traffic. Prioritizing these in network development is therefore a robust decision. The target network should be regularly reviewed in accordance with operational and energy system findings.

1 Einleitung und Motivation

Das Wichtigste in Kürze:

- Die Ziele der Bundesregierung zur Treibhausgasminderung und Elektrifizierung des Verkehrs erfordern bereits bis zum Jahr 2030 einen Technologiewandel bei schweren Nutzfahrzeugen hin zu alternativen Antrieben.
- Während sich im Regionalverkehr bereits klare Vorteile für batterieelektrische Lkw als Standardlösung abzeichnen, ist der zukünftige Technologiemitmix im Straßengüterfernverkehr noch unklar.
- Oberleitungs-Lkw werden als eine von drei Lösungsoptionen verfolgt und mögliche Zielnetze wurden bereits identifiziert, mögliche nächste Ausbauschritte sind aber unklar.
- Ziel des vorliegenden Papiers ist es, zentrale Bewertungskriterien für den Infrastrukturaufbau zu diskutieren und mögliche Ausbaupfade kriterienbasiert aufzuzeigen.

Antriebsalternativen für den Straßengüterverkehr

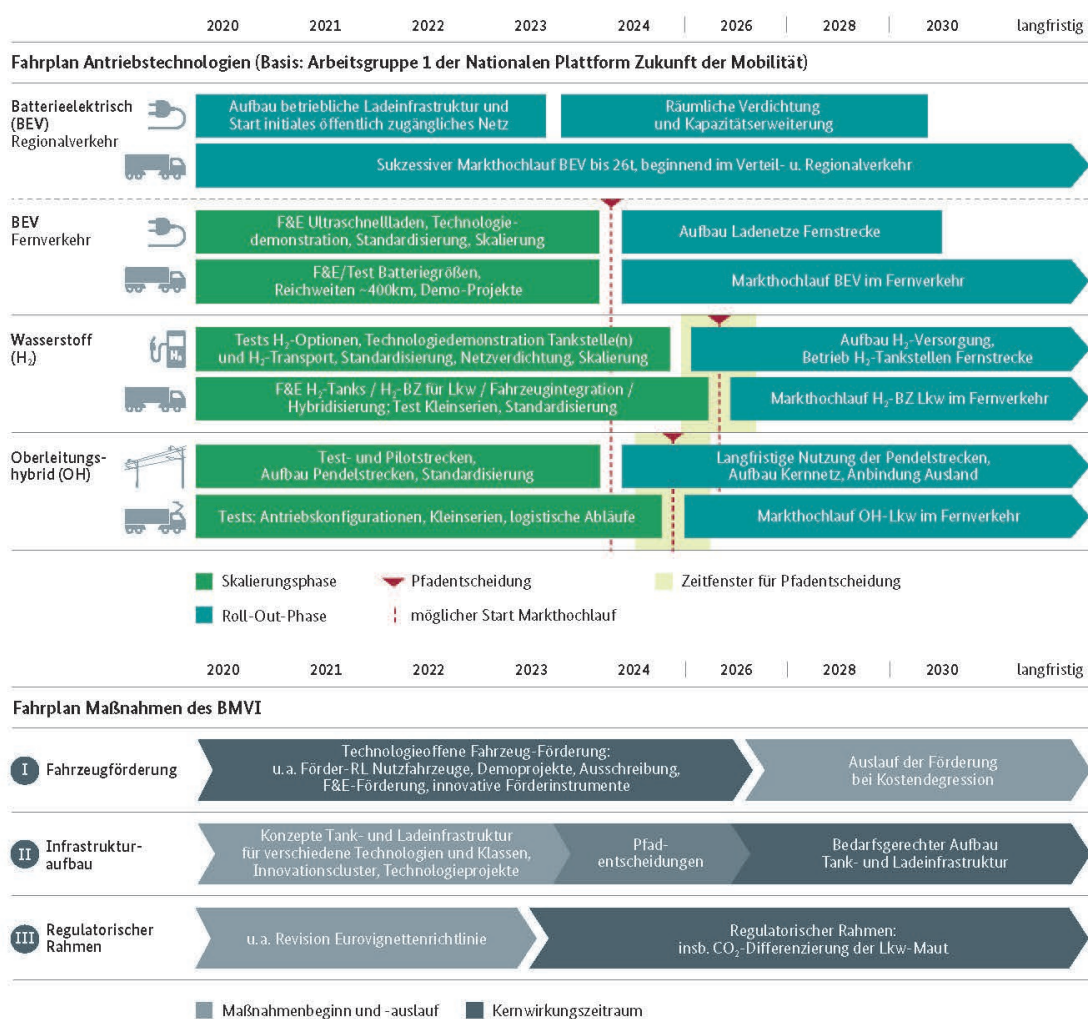
Das im Jahr 2021 novellierte Klimaschutzgesetz zielt in dieser Dekade auf eine Halbierung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen gegenüber dem Referenzjahr 1990 bzw. in etwa dem derzeitigen Niveau (Bundesregierung 2021, Umweltbundesamt (UBA) 2021). Die Erreichung der Klimaschutzziele erfordert im Straßengüterverkehr tiefgreifende Veränderungen und die Abkehr vom Diesel-Antrieb bei Nutzfahrzeugen, hin zu alternativen Antriebsoptionen (Burchardt et al. 2021, Sensfuß et al. 2021, Dambeck et al. 2020). Die Bundesregierung hat für den Straßengüterverkehr das Ziel gesetzt, dass bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Fahrleistung von Lkw auf Basis von Strom erfolgen soll (Bundesregierung 2019). Aktuell sind verschiedene Antriebstechnologien bei schweren Nutzfahrzeugen in der Diskussion.

Während im Regionalverkehr auch bei schweren Nutzfahrzeugen der batterieelektrische Antrieb als zukünftig dominierende Standardlösung erwartet wird, die den bisher vorherrschenden Dieselantrieb sukzessive verdrängt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020; Göckeler et al. 2020), ist der zukünftige Technologiemitmix im Fernverkehr mit deutlich anspruchsvolleren Leistungsanforderungen noch unklar (Göckeler et al. 2020). Aktuell werden in Deutschland drei Lösungsoptionen als besonders vielversprechend diskutiert. Diese umfassen batterieelektrische Lkw mit größeren Traktionsbatterien und Hochleistungsladepunkten für lange Tagesfahrten, Oberleitungs-Lkw, die den Bedarf der mobilen Stromspeicherung mittels großer Batterie durch die Elektrifizierung von Fernverkehrskorridoren reduzieren sowie Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw. Allen drei Technologien gemein ist, dass sich diese für die Fernverkehrsanwendung noch nicht in der Serienreife, sondern in unterschiedlichen Technologieentwicklungsstadien befinden (Plötz et al. 2021). Dies betrifft sowohl die Fahrzeugtechnik als auch die zugehörige Energieversorgungsinfrastruktur.

Das Konzept der Bundesregierung für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020) zeigt verschiedene, vielversprechende Technologieansätze auf, die in den kommenden Jahren weiterverfolgt werden sollen. Neben batteriebetriebenen und Brennstoffzellen-Lkw wird dabei auch eine ergänzende Stromversorgung elektrischer Lkw-Antriebe via Oberleitung in Erwägung gezogen. Dadurch könnten einige Herausforderungen der stationären Energieaufnahme im Fernverkehr umgangen werden (Plötz et al. 2021). Die mögliche Rolle des dynamischen Ladens im künftigen dekarbonisierten Straßengüterverkehr wird derzeit im Rahmen einer Task-Force im Verantwortungsbereich des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) diskutiert (Klimafreundliche Nutzfahrzeuge 2021).

Zum jetzigen Zeitpunkt wird – angesichts des frühen Entwicklungsstadiums aller zuvor genannten Technologien – noch keine Empfehlung für eine Einzeltechnologie oder einen zu präferierenden Technologiemix ausgesprochen. Jedoch werden neben der Fahrzeugförderung und der Anpassung des regulatorischen Rahmens, der stufenweise Auf- und Ausbau der notwendigen Energieversorgungsinfrastruktur als zentraler Ansatzpunkt für den Markthochlauf thematisiert. Grundsätzlich soll der Infrastrukturausbau in Stufen geschehen und der jeweiligen Marktreife der Technologie Rechnung tragen. Ziel ist es, bis zum Zeitraum 2024/2025 eine Situation zu erreichen, die es erlaubt, Pfadentscheidungen mit Blick auf die diskutierten Technologien zu treffen und anschließend einen Infrastrukturausbau zu erreichen, der einen Markthochlauf der jeweiligen Technologie ermöglicht. Auch europäische Rahmenbedingungen wie die laufende Revision der Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) sowie die anstehende Revision der CO₂-Flottenzielwerte für Lkw spielen hierbei eine Rolle.

Abbildung 1: Fahrplan „Klimafreundliche Nutzfahrzeuge“ der Bundesregierung für den Markthochlauf alternativer Antriebstechnologien und begleitende Maßnahmen



Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2020)

Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch unklar, ob sich längerfristig ein breiter Technologiemix oder eine Fokussierung auf eine Schwerpunkttechnologie für den Straßengüterverkehr herausbilden wird. Als konkreter nächster Schritt wurde im Herbst 2021 (BMVI 08.09.2021) der Aufbau von drei sogenannten Innovationskorridoren angekündigt, die eine Erprobung unterschiedlicher Technologien auf längeren

Fernverkehrskorridoren in den kommenden Jahren zum Ziel haben. Eine Reihe aktueller Studien deutet allerdings darauf hin, dass die direkte Nutzung von Strom (ohne den Umweg über chemische Energieträger) für das Gros der Anwendungsfälle sehr deutliche Kostenvorteile für die Fahrzeugbetreiber haben und daher die präferierte Variante sein wird (Plötz 2022; Jöhrens et al. 2022, Mingers 2022).

Oberleitungs-Lkw und die erforderliche Energieversorgungsinfrastruktur

Durch den Strombezug mittels Pantograph entlang elektrifizierter Straßen kombinieren Oberleitungs-Lkw im Straßengüterfernverkehr den Effizienzvorteil der direkten Stromnutzung mit dem Verzicht auf die aufwändige mobile Speicherung großer Strommengen in Batterien. Der O-Lkw ist jeweils mit hybridem Antrieb ausgestattet, so dass auch ein Betrieb jenseits der elektrifizierten Strecke – mittels Batterie oder übergangsweise auch einem Verbrennungsmotor – möglich ist und damit ein größeres Einsatzgebiet abgedeckt werden kann bzw. Lücken in der Elektrifizierung von Strecken überbrückt werden können. Die Technologie befindet sich seit etwa 15 Jahren in der Entwicklung. Aktuell werden O-Lkw in drei Feldversuchen auf deutschen Fernstraßen in Hessen, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg erprobt. Diese dienen vorrangig der Technologieerprobung und -weiterentwicklung und sind jeweils auf wenige Kilometer Länge beschränkt.

In der Strategie der Bundesregierung als auch der zugrundeliegenden Analysen der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM 2020) wird eine Weiterentwicklung der Test- und Pilotstrecken bis zum Jahr 2023 als Ziel formuliert. Als Größenordnung wird eine Länge von 300 km genannt und eine mögliche Nutzung als Pendelstrecken angedeutet. Perspektivisch sollen diese im Erfolgsfall nach 2023 in eine langfristige Nutzung überführt und ab 2024 ein darüberhinausgehendes Kernnetz mit Anbindung an das Ausland entwickelt werden. Dieses orientiert sich vermutlich an vorliegenden Studienergebnissen (siehe Kapitel 3) für ein Kernnetz von etwa 4.000 km, ohne allerdings explizit genannt zu werden. Im Herbst 2022 hat das Verkehrsministerium den Aufbau von drei Innovationskorridoren konkretisiert (BMVI 08.09.2021). So wurden neben einem Korridor, der Berlin mit dem Ruhrgebiet verbindet und der mit batterieelektrischen Lkw und stationären Schnellladern betrieben werden soll (Projekt HoLa¹) auch der Auf- bzw. Ausbau zweier Oberleitungsstrecken angekündigt, die allerdings noch konkretisiert werden müssen. So wird einerseits ein Ausbau der bestehenden Teststrecken in Hessen zu einem längeren Korridor angestrebt. Zudem laufen Planungen für eine weitere Oberleitungsstrecke in Bayern, deren Streckenverlauf aber noch nicht endgültig festgelegt ist.

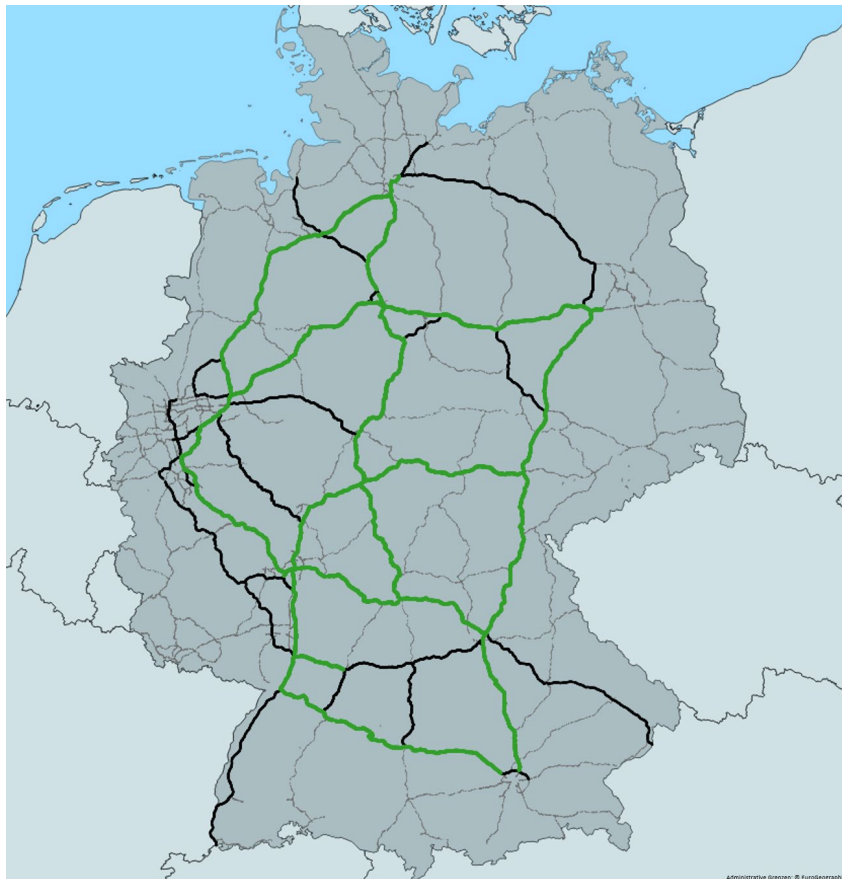
Der zukünftige Betrieb von Oberleitungs-Lkw wird maßgeblich von der Verfügbarkeit der notwendigen Energieversorgungsinfrastruktur abhängig sein. Neben den konkreten Strecken und der möglichen zeitlichen Abfolge, sind dabei auch Fragen zur durchgängigen oder abschnittswisen Elektrifizierung des Straßennetzes und mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologieoptionen (z. B. stationäre Schnellladestationen) zu klären.

Ziel und Aufbau des Papiers

Im Rahmen mehrerer Studien (u. a. in Hacker et al. 2020a, Jöhrens et al. 2020; Wietschel et al. 2017) wurden mögliche Zielnetze für den Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterfernverkehr auf dem deutschen Autobahnnetz identifiziert. Im Rahmen vorangegangener Arbeitspapiere des Projekts BOLD wurde bereits ein Überblick über bisherige Studien zum Netzausbau gegeben (Hacker et al. 2020b), die gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie (Burghard und Scherrer 2020) sowie mögliche Wechselwirkungen von Oberleitung und stationärer Schnelllader im Straßengüterverkehr (Plötz et al. 2021) diskutiert. Die vorliegenden Analysen zeigen, dass für die Oberleitungstechnologie zwar ein relativ klares Zielbild über ein sinnvolles Zielnetz besteht, dass etwa ein Drittel des deutschen Autobahnnetzes umfasst. Mögliche Ausbaupfade, die den Weg von heutigen Pilotstrecken bis hin zu einem zusammenhängenden Netz skizzieren, sind bislang aber weniger gut untersucht.

¹ <https://hochleistungsladen-lkw.de/hola/index.php>

Abbildung 2: Betrachtete Zielnetze in vorliegenden O-Lkw-Studien (in allen Studien betrachtete Korridore = grün / in mindestens einer Studie betrachteter Korridor = schwarz)



Quelle: Eigene Darstellung

Ziel des vorliegenden Papiers ist es, anhand zentraler Bewertungskriterien geeignete Strecken für die Elektrifizierung für unterschiedliche Entwicklungsschritte zu identifizieren und mögliche Ausbaupfade aufzuzeigen. Im Folgenden (Kapitel 3) wird zunächst ein Überblick über bereits vorliegende Analysen zu geeigneten Zielnetzen gegeben. Anschließend (Kapitel 4) werden zentrale Einzelkriterien beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung zu verschiedenen Umsetzungszeitpunkten eingeordnet sowie – wo möglich – mit Blick auf die Bedeutung für konkrete Strecken des Kernautobahnnetzes diskutiert. Bei den Kriterien handelt es sich sowohl um Eignungs- als auch Ausschlusskriterien, die sowohl räumlich begrenzt als auch übergeordnet wirksam sein können. Ihre Wirkung kann zudem in unterschiedlichen Umsetzungsphasen eine unterschiedliche Wirksamkeit oder auch Wirkrichtung haben. Dann (Kapitel 5) werden die diskutierten Bewertungskriterien in ihrem Zusammenspiel und mit Blick auf ihre Bedeutung für unterschiedliche Phasen des Netzaufbaus diskutiert sowie darauf aufbauend besonders geeignete initiale Strecken und mögliche Netzerweiterungen aufgezeigt. Abschließend (Kapitel 6) werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und sich anschließende Forschungsfragen skizziert.

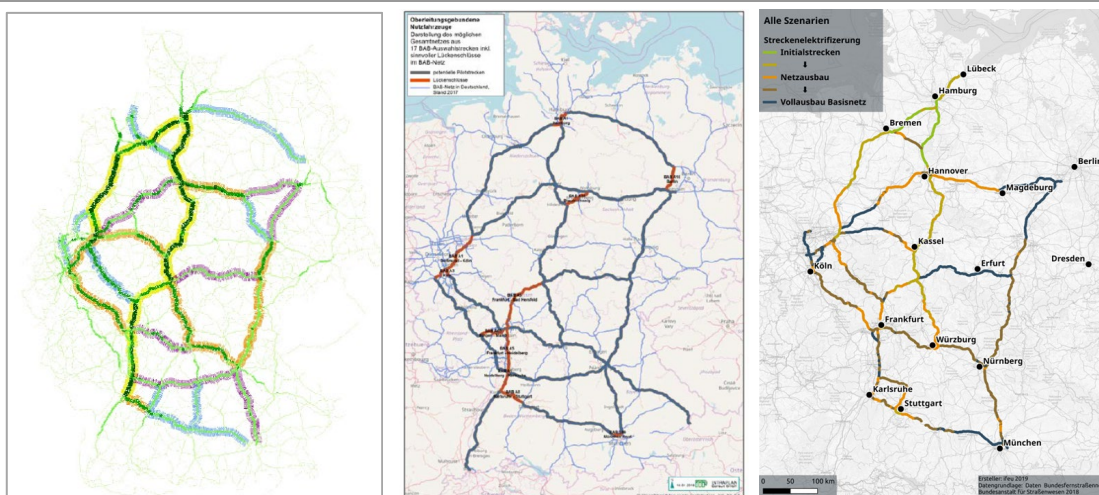
2 Bisherige Analysen zu Zielnetzen

Das Wichtigste in Kürze:

- Vorliegende Analysen weisen auf ein besonders geeignetes Zielnetz für die Oberleitungsinfrastruktur hin, das etwa ein Drittel des deutschen Autobahnnetzes (4.000 km) umfasst und auf dem über 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf Autobahnen stattfindet.
- Perspektivisch kann bei entsprechendem Netzausbau ein elektrischer Fahranteil von etwa einem Drittel bei schweren Nutzfahrzeugen allein mittels O-Lkw (ohne batterieelektrische Lkw) erzielt werden und bis zu 12 Mio. Tonnen CO₂ eingespart werden.
- Die vorliegenden Netzanalysen beruhen insbesondere auf der Berücksichtigung verkehrlicher Analysen. Weitere Einflussgrößen wurden bislang nur eingeschränkt berücksichtigt und nächste Ausbauschnitte – ausgehend vom aktuellen Umsetzungsstatus in Pilotvorhaben – nicht näher betrachtet.

Bereits in frühen Studien (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2012) wurde auf die Potentiale einer Elektrifizierung von Teilen des Autobahnnetzes hingewiesen. Ergebnisse aus umfangreicheren Analysen (Wietschel et al. 2017; Jöhrens et al. 2020; Hacker et al. 2020a) liefern detailliertere Aussagen zu einem besonders geeigneten Zielnetz und dessen Potentialen für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw. Die vorgeschlagenen Zielnetze weisen eine hohe Übereinstimmung auf und umfassen die verkehrstärksten Autobahnen. Dieses Kernnetz umfasst etwa ein Drittel des deutschen Autobahnnetzes, weist aber mit über 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf Autobahnen eine besondere Bedeutung auf. Bei den möglichen Lückenschlüssen, die für die Netzbildung notwendig sind, sowie bei einzelnen längeren Abschnitten (z. B. A24 und A6) gibt es leichte Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Methodik der Studien. Die Länge des Zielnetzes variiert zwischen 3.200 km (Jöhrens et al. 2020), und 4.200 km (Hacker et al. 2020), wobei teilweise auch nur eine Teilelektrifizierung des Netzes angenommen wird. Die vollständige Realisierung des jeweiligen Netzes wird in den Studien für den Zeitraum zwischen 2030 und 2040 unterstellt.

Abbildung 3: Zielnetze in MKS-Machbarkeitsstudie (Wietschel et al. 2017), StratON (Hacker et al. 2020a), Roadmap OH-Lkw (Jöhrens et al. 2020) (v.l.n.r)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Herleitung der Netze erfolgt in den genannten Studien auf der Grundlage von Einzelstreckenanalysen in der Größenordnung von 50 bis 200 km Länge bzw. durch eine virtuelle Elektrifizierung einzelner Autobahnabschnitte und Untersuchung der resultierenden Kostenbilanz (Roadmap OH-Lkw). Entsprechend ihrer verkehrlichen Eignung werden geeignete Einzelabschnitte sukzessive zu einer Netzbildung herangezogen. In den vorliegenden Analysen werden vorwiegend verkehrliche Parameter (u. a. Verkehrsstärke, Profile der auf den Strecken durchgeführten Fahrten) für die Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Eignung der Streckenabschnitte für den O-Lkw-Betrieb herangezogen.

In den vorliegenden Analysen werden Einzelstrecken zwischen bedeutenden Güterumschlagspunkten an Start- und Endpunkt wie die Relationen Hamburg-Ruhrgebiet (A1) oder auch Hamburg-Kassel (A7) unter verkehrlichen Gesichtspunkten als besonders vielversprechend bewertet. Unter der Annahme eines sukzessiven Netzausbaus wird bis zum Jahr 2030 durch den Einsatz von O-Lkw ein elektrischer Fahranteil von 8 bis 17 % bezogen auf die Gesamtfahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen ermittelt, der bei Erreichen des vollen Netzausbaus und einem weiter ansteigenden Markthochlauf von O-Lkw nach 2030 auf etwa ein Drittel ansteigen könnte. Diese Entwicklung würde mit einer Treibhausgasminde rung von 2 bis 6 Mio. Tonnen CO₂ bis 2030 einhergehen und längerfristig auf bis zu 12 Mio. Tonnen ansteigen (Hacker et al. 2020b). Zusätzliche Potenziale durch batterieelektrische Lkw, die zeitgleich erschlossen werden, wurden in den genannten Studien nicht betrachtet.

Auf Basis der vorliegenden Analysen lässt sich konstatieren, dass ein relativ konsistentes Bild über das langfristig besonders geeignete Autobahnnetz für eine Oberleitungsinfrastruktur mit Blick auf die verkehrlichen Aspekte vorliegt. Zugleich stellt sich jedoch die Herausforderung, geeignete Ausbaupfade aufzuzeigen, die einen Brückenschlag herstellen zwischen den heutigen Pilotstrecken, die v.a. der Technikerprobung dienen, und der langfristigen Netzbildung, die einen Standardeinsatz von O-Lkw mit relevantem Marktanteil ermöglicht. Dabei sollten weitere Kriterien jenseits der verkehrlichen in die Streckenbewertung mit einbezogen werden, die bei der zukünftigen Streckenwahl ebenfalls berücksichtigt werden sollten bzw. diese beeinflussen könnten.

3 Kriterien für die Eignungsbewertung

Die folgende Diskussion der Bewertungskriterien bezieht sich auf ein Zielnetz von etwa 4.000 km und baut auf vorliegenden Analysen (u. a. in Hacker et al. 2020a, Jöhrens et al. 2020, Wietschel et al. 2017) auf. In den Studien werden zwar ähnliche, aber nicht deckungsgleiche Kernnetze untersucht (siehe Abbildung 2). Vor diesem Hintergrund liegt für die betrachteten Bewertungskriterien nicht für alle Streckenabschnitte die gleiche Analysetiefe oder eine durchgängig einheitliche Methodik vor. In der Gesamtschau der Kriterien können dennoch fundierte Aussagen zur Priorisierung des Streckennetzes getroffen werden.

3.1 Fahranteil auf Autobahnabschnitt

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Der Aufbau von Oberleitungsinfrastruktur konzentriert sich idealerweise auf hoch frequentierte Straßen des Güterverkehrs. Jenseits dieses Netzes erfolgt der Antrieb entweder in Oberleitungs-Hybrid-Lkw über einen zusätzlich verbauten Verbrennungsmotor oder für rein elektrische Oberleitungs-Lkw über das mitgeführte Batteriesystem. Die Länge der Vor- und Nachlaufstrecken zum Oberleitungsnetz bestimmt im ersten Fall den erzielbaren elektrischen Fahranteil und für rein elektrische Fahrzeuge die erforderliche Dimensionierung des Batteriespeichers. Typische Vor- und Nachläufe sollten bei der Planung von Oberleitungsstrecken berücksichtigt werden, um eine möglichst lange Fahrt an der Oberleitung zu gewährleisten. Neben einer Erhöhung des elektrischen Fahranteils relativieren sich bei entsprechender Ausnutzung die Mehrkosten für den Pantographen am Fahrzeug. Speziell für Kombinationen mit batterieelektrischen Lkw können Einstiegshürden genommen und längere Fahrten über kleinere Batteriesysteme realisiert werden. Die Möglichkeit des dynamischen Ladens während der Fahrt vergrößert den Aktionsradius abseits der Oberleitungsstrecken.

Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

Insbesondere bei der Bestimmung von initialen Strecken kann eine hohe Anzahl an Fahrten mit geringen Vor- und Nachlaufängen auf dem jeweiligen Streckenabschnitt eine frühe Auslastung der Oberleitungsinfrastruktur begünstigen. Bei einem weiteren Ausbau zu einem weiträumig verfügbaren Oberleitungsnetz wird die Anzahl an Fahrten abseits der Oberleitung ohnehin kürzer und es kommt der Effekt der Netzbildung zum Tragen, so dass das Kriterium weniger relevant wird.

Verfügbare Analysen

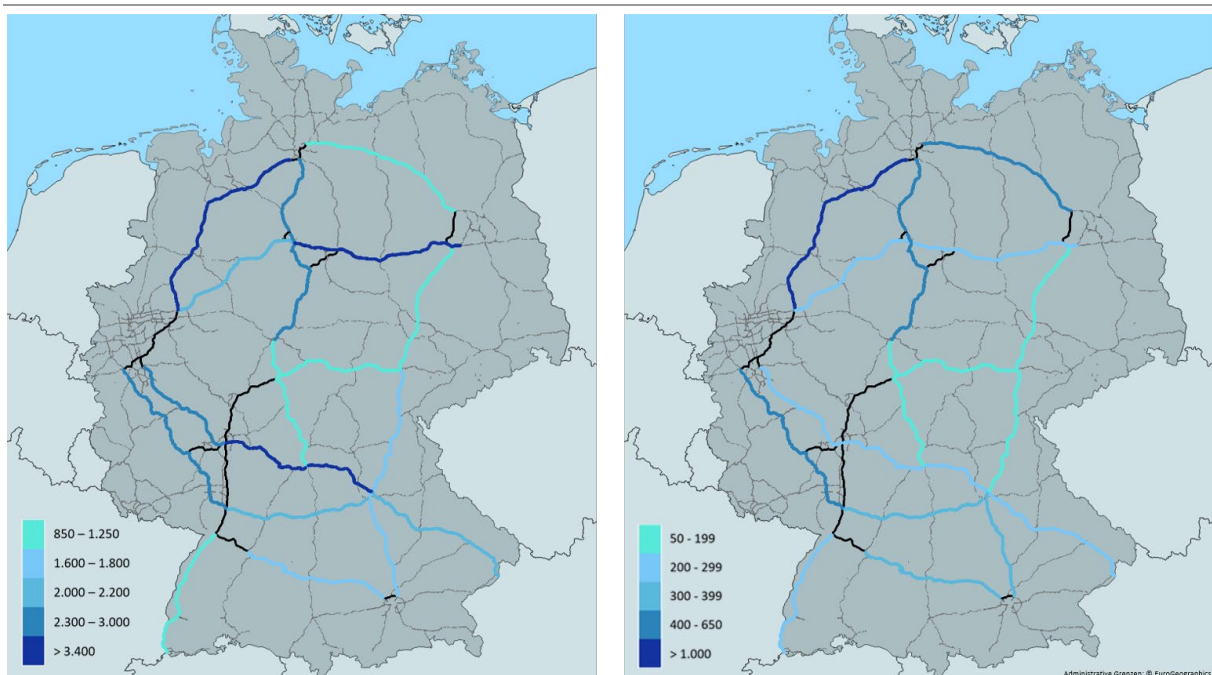
Für die Analyse besonders geeigneter Streckenabschnitte im Netz der Bundesautobahnen (BAB), die einerseits einen hohen Anteil an Fahrten schwerer Lkw aufweisen, die einen hohen Fahranteil auf dem jeweiligen Abschnitt erbringen und sich gleichzeitig durch moderate Vor- und Nachläufe charakterisieren, werden Simulationen des Güterverkehrsflusses innerhalb des deutschen Straßennetzes verwendet. Im Projekt StratON (Hacker et al. 2020a) wurden hierfür auf Basis der Quelle-Ziel-Matrizen, die dem Bundesverkehrswegeplan zu Grunde liegen, und unter Berücksichtigung einer Fortschreibung bis zum Jahr 2050 die Fahrten von vierachsigen Fahrzeugen für 17 Einzelabschnitte des BAB-Kernnetzes von jeweils etwa 200 km Länge analysiert. Betrachtet wurde die Fahrleistung von Fahrzeugen, die mindestens 100 km auf dem jeweiligen BAB-Abschnitt unterwegs sind. Zusätzlich wurde hinsichtlich der Fahrtenlängen jenseits des hypothetisch elektrifizierten Abschnitts (dem sogenannten Vor- und Nachlauf) differenziert. Ähnliche Analysen wurden in den in Kapitel 2 vorgestellten, weiteren Studien zu O-Lkw durchgeführt. Im Folgenden wird die Streckeneignung für dieses Kriterium anhand der Ergebnisse aus dem Projekt StratON diskutiert.

Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 4) zeigen, dass sich die Verkehrsstärken von schweren Nutzfahrzeugen, die mindestens 100 km auf einem BAB-Abschnitt unterwegs sind, im betrachteten Autobahnkernnetz erheblich unterscheiden (Abbildung links). Wird die Betrachtung zusätzlich auf Vor- und Nachlaufängen von maximal 100 km eingeschränkt, reduziert sich zum einen die Gesamtfahrleistung erwartungsgemäß erheblich, zum anderen verändert sich aber auch die Rangfolge der betrachteten Autobahnabschnitte teilweise ebenfalls stark. Die Gesamtverkehrsstärke ist daher kein geeigneter, alleiniger Entscheidungsparameter. So zeichnet sich der Abschnitt Frankfurt – Nürnberg der A3 zwar durch eine vergleichbare Verkehrsstärke zum Abschnitt Hamburg – Dortmund (A1) aus (Abbildung links). Der Anteil von Fahrten mit höchstens 100 km Vor-/Nachlauf fällt mit 8 % im Vergleich zu 28 % angesichts des deutlich höheren Anteils an langlaufenden, internationalen Verkehren auf der A3 jedoch deutlich geringer aus (Abbildung rechts). Bei einem Vor-/Nachlauf von max. 250 km relativiert sich das Verhältnis etwas.

Hinsichtlich der absoluten Zahlen eignen sich in einem frühen Ausbaustadium mit Blick auf die technische Machbarkeit im Falle von batterieelektrischen O-Lkw und mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit, wo voraussichtlich nur geringe Vor- und Nachläufe attraktiv sind, für die betrachteten BAB-Abschnitte insbesondere die **Relationen Hamburg-Dortmund (A1), Hamburg-Kassel (A7) und Köln-Mannheim (A61)**. Ebenfalls hohe Anteile, wenn auch angesichts einer geringeren Gesamtverkehrsstärke auf einem niedrigeren Niveau, erreichen die Relationen Hamburg-Berlin (A24), Karlsruhe – Basel (A5), und Stuttgart-München (A8). Sollten sich auch Vor-/Nachläufe von 250 km perspektivisch als wirtschaftlich tragfähig und z. B. mit Batterien technisch erschließbar darstellen, so gewinnen zudem die Relationen Hannover-Berlin (A2) und Frankfurt-Nürnberg (A3) mit einem höheren Anteil an langlaufenden Verkehren deutlich an Bedeutung.

Abbildung 4: Verkehrspotential [1000 Fzg.-km/DTVw*] auf ausgewählten Streckenabschnitten von schweren Nutzfahrzeugen mit mindestens 100 km auf dem jeweiligen Abschnitt (links) und maximal 100 km Fahrlänge im Vor- bzw. Nachlauf jenseits des Autobahnabschnitts (rechts).



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von StratON (Hacker et al. 2020a)

*DTVw: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken an Werktagen.

3.2 Anteil an Pendelverkehren

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Für einen wirtschaftlichen Betrieb von O-Lkw ist eine jährliche Mindeststrecke unter Oberleitung erforderlich. Pendelverkehre können dieses Kriterium durch die wiederholten Befahrungen bereits auf einer kürzeren Oberleitungsstrecke erreichen. Dadurch ergibt sich zum einen ein günstigeres Verhältnis aus Infrastrukturkosten und wirtschaftlichem Nutzen der Oberleitung für die Lkw-Betreiber. Zum anderen können dadurch auch bei anfänglich geringen Netzausdehnungen wirtschaftliche Anwendungsfälle für O-Lkw realisiert werden.

Die Wirtschaftlichkeit eines Pendelbetriebs mit O-Lkw auf sehr kurzen Initialstrecken von weniger als etwa 100 km Länge hängt zudem von der Anzahl der täglichen Fahrzeugumläufe auf der Pendelstrecke ab (Jöhrens et al. 2018). Bei einer hohen Anzahl täglicher Umläufe kann auch eine besonders gute Wirtschaftlichkeit realisiert werden. Dies erfordert jedoch zum Streckenverlauf sehr passfähige Einsatzprofile und wird daher in der Regel nur durch eine geringe Anzahl an Fahrzeugen realisierbar sein.

Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

Ähnlich dem zuvor genannten Kriterium zielt auch das Kriterium der Pendelverkehre auf eine Auslastung der Oberleitungsinfrastruktur bereits zu einem frühen Zeitpunkt. Je größer das Oberleitungsnetz wird, desto wahrscheinlicher wird es, dass auch Nicht-Pendelverkehre einen wirtschaftlich akzeptablen Fahranteil auf dem Oberleitungsnetz erreichen. Die Bedeutung des Pendelverkehrsanteils für die Streckenauswahl geht dann zurück.

Verfügbare Analyse

Im Projekt "Roadmap OH-Lkw" wurde der Pendelverkehrsanteil auf verschiedene Arten abgeschätzt:

- Für jede Güterabteilung wurde anhand des für diese Güterabteilung relevanten Logistikteilmarkts abgeschätzt, wie hoch jeweils die Wahrscheinlichkeit von Pendelverkehren ist. Beispiele für „pendelaffine“ Logistikteilmärkte sind Stückgutverkehre, Konsumgüterdistribution, Kontraktlogistik sowie die Hauptläufe der KEP-Logistik (Jöhrens et al. 2018).
- Zudem wurden für jede Güterabteilung typische Standortfunktionen untersucht. Import-Logistik, Netzwerklogistik und Produktionslogistik erwiesen sich hier als tendenziell „pendelaffin“.
- Auf Basis der Verkehrsverflechtungen wurde zudem der bezüglich der transportierten Güterabteilungen "symmetrische" Anteil der Transporte in den Relationsdaten ermittelt (d.h. der Anteil an der Transportleistung einer Gütergruppe, der auf einer bestimmten Relation in beide Richtungen erfolgt). Dieser entspricht etwa 40 % der gesamten Transportleistung (Jöhrens et al. 2020).

Die Analyse der gütergruppenspezifischen Pendelaffinität eignet sich in erster Linie, um potentielle Nutzergruppen zu identifizieren und gezielter ansprechen zu können. Zusammen mit weiteren Kriterien können die Ergebnisse auch genutzt werden, um absehbar ungeeignete Verkehre aus Verkehrsflussanalysen für die Planung von Oberleitungsstrecken auszuschließen. Um Aussagen über die Dichte von Pendelverkehren auf einzelnen Streckenabschnitten zu treffen, eignet sich hingegen eher das letztgenannte Verfahren (d. h. die Eingrenzung auf „symmetrische“ Verkehrsströme), das nachfolgend näher diskutiert wird. Freilich kann auch dieses Verfahren nur Anhaltspunkte auf makroskopischer Ebene liefern, da für einzelne Strecken nicht bekannt ist, in welchem Maße die Abwicklung der symmetrischen Transporte als Pendelverkehre betrieblich realisierbar ist bzw. für beide Richtungen in der Hand derselben Akteure liegt.

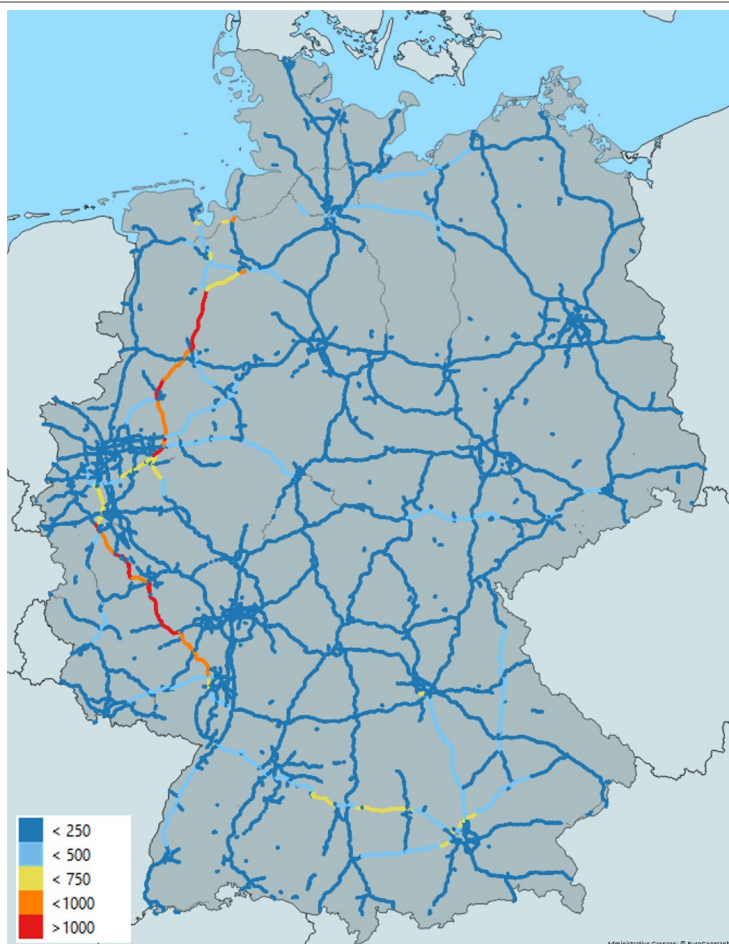
Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Auf Grundlage von Auswertungen des Verkehrsmodells PTV Validate für das Vorhaben „My eRoads“ wurde das durch „Pendelfahrten“ nach o.g. Definition verursachte Verkehrsaufkommen für einzelne Stre-

ckenabschnitte des Zielnetzes bestimmt. Die Betrachtung wurde auf Fahrten eingegrenzt, die mindestens 100 km auf Autobahnen verlaufen und eine Gesamtlänge von 300 km nicht überschreiten. Die Eingrenzung entspricht somit in etwa den in Abschnitt 4.2.1 betrachteten Verkehren.

Hinsichtlich der potentiellen Pendelverkehre stehen vor allem die Verbindung zwischen Bremen und dem Ruhrgebiet entlang der A1 sowie die A61 zwischen dem Ruhrgebiet und Mannheim hervor. Weitere Schwerpunkte sind auf der A8 sowie auf der A99 bei München erkennbar. Ein Vergleich des selektierten Verkehrsaufkommens mit Abbildung 4 zeigt eine weitgehende Übereinstimmung bei den genannten Abschnitten von A1 und A61 – ein großer Teil der hinsichtlich Vor- und Nachlaufwegen geeigneten Lkw-Transporte hat somit auch eine hohe Chance, als Pendelverkehr realisiert werden zu können. Hinsichtlich der A61 ist einschränkend hinzuzufügen, dass es hier mit der A3 (und z. T. auch der A45) wichtige Parallelstrecken gibt, die ebenfalls Verkehre der beitragenden Relationen aufnehmen. Es bedarf daher einer feineräumigen Analyse, um zu eruieren, inwieweit sich die identifizierten potentiellen Pendelverkehre tatsächlich auf die A61 konzentrieren.

Abbildung 5: Befahrungsstärke [Pendelfahrten/Tag] einzelner BAB-Abschnitte mit potentiellen Pendelverkehren (Relationslänge 100 km - 300 km, davon mind. 100 km auf BAB, gleiche Güterabteilung in beide Richtungen).



Quelle: Analyse des ifeu auf Basis von Daten des Verkehrsmodells PTV Validate²

² Die zugrundeliegenden Daten des Verkehrsmodells PTV Validate wurden durch die PTV Transport Consult im Rahmen der Forschungsprojekte „Roadmap OH-Lkw“ (FKZ 16EM3153-1) und „My eRoads“ (FKZ 16EM4006-1) erstellt und werden für die vorliegende Untersuchung freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

3.3 Nähe zu logistischen Umschlagpunkten und Ankernutzern

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Konzentriert sich das für O-Lkw geeignete Verkehrsaufkommen auf einer bestimmten Strecke auf einige wenige Akteure, so kann die Auslastung einer ersten Oberleitungsinfrastruktur sicherer abgeschätzt werden. Dazu sollten die Akteure gut in den Planungsprozess eingebunden und zu „Ankernutzern“ werden. Das ist eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzbarkeit erster kommerzieller Anwendungen, da es das Risiko von „stranded invests“ verringert und die Chancen eines sichtbaren Leuchtturms erhöht.

Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

Dieses Kriterium zielt insbesondere auf die Realisierung erster längerer Einzelstrecken, die noch nicht zu einem überregionalen Netz verbunden sind. Die Sicherstellung einer hohen Nutzung solcher Strecken durch Ankernutzer mit geeigneten Einsatzprofilen kommt sowohl einem schnellen praktischen Erkenntnisgewinn als auch der Akzeptanz des Systems bei Dritten zugute. Mit zunehmendem Netzausbau, Verbindung initialer Teilnetze und dadurch steigenden Nutzerzahlen treten dann bei der Planung übergeordnete Erwägungen in den Vordergrund und die spezifischen Bedürfnisse einzelner Nutzer verlieren an Bedeutung.

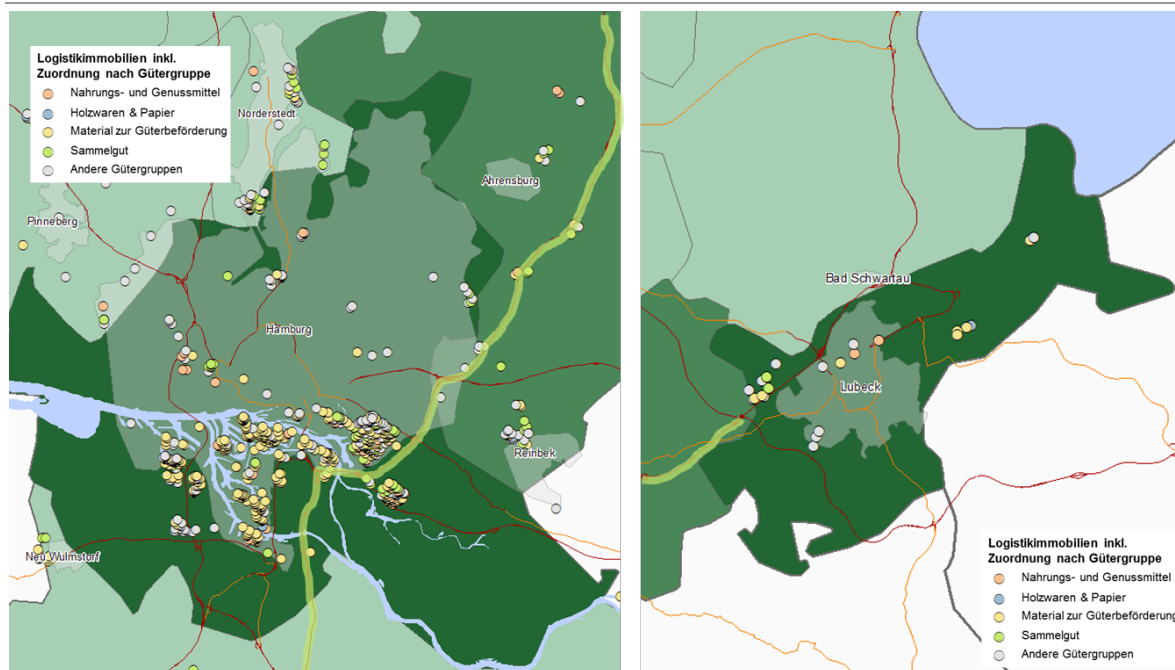
Verfügbare Analyse

Im Vorhaben „Roadmap OH-Lkw“ wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem für konkrete Streckenabschnitte potenzielle Ankernutzer für Oberleitungsinfrastruktur identifiziert werden können. Es besteht aus den folgenden Schritten:

1. Grundlage sind Informationen über die tägliche Fahrtenanzahl auf bestimmten Quell-Ziel-Beziehungen (Relationen), die aus gängigen Verkehrsmodellen extrahierbar sind.
2. Die Relationsdaten werden zunächst vorgefiltert, um ungeeignete Profile (v. a. sehr kurze Strecken und für O-Lkw ungeeignete Aufbauten) zu entfernen.
3. Für den zu betrachtenden Streckenabschnitt wird eine Strombündelanalyse durchgeführt. Damit kann festgestellt werden, welche der angrenzenden Gebiete als starke Quellen bzw. Senken von Lkw-Verkehr auf der Strecke fungieren.
4. Für diese Gebiete wird anschließend ermittelt, ob sich die Verkehre auf bestimmte Güterabteilungen konzentrieren.
5. Für stark vertretende Güterabteilungen werden schließlich mittels einer georeferenzierten Logistikdatenbank³ in den identifizierten Gebieten Logistikimmobilien gesucht. Stellt sich auch hier eine Konzentration auf einen oder wenige Betreiber heraus, so kommen diese potenziell als Ankernutzer für die Oberleitungsstrecke in Frage.

Exemplarisch wurde eine solche Auswertung im o.g. Vorhaben für einen Streckenabschnitt auf der A1 zwischen Hamburg und Lübeck durchgeführt, auf dem sich auch die Oberleitungs-Teststrecke des FESH-Projekts befindet.

³ wie beispielsweise die durch das Fraunhofer IIS entwickelte Datenbank Limmo (<https://www.limmo-online.de/>)

Abbildung 6: Logistikimmobilien in den relevanten Quell- und Ziellandkreisen an der Strecke Hamburg-Lübeck.

Quelle: Fraunhofer IIS in Jöhrens et al. (2018)

Eine solche Herangehensweise ist insbesondere zur Auswahl erster Ausbaustrecken sinnvoll, da sie eine zielgerichtete Ansprache potenzieller Nutzer ermöglicht und relativ effizient für eine größere Auswahl von Strecken durchgeführt werden kann (Screening).

Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Das Verfahren erfordert nach aktuellem Stand eine Einzelbetrachtung der Logistikimmobilien und ihrer Betreiber. Es eignet sich daher in erster Linie dazu, potenzielle Ankernutzer für solche Strecken zu identifizieren, die aufgrund anderer Kriterien in die engere Auswahl kommen. Flächendeckend wurde das Verfahren daher bislang nicht angewendet, es können somit keine Rückschlüsse auf die Eignung einzelner Abschnitte im betrachteten potenziellen Oberleitungsnetz gezogen werden.

3.4 Mögliche Synergien oder Konflikte mit Ausbaivorhaben im deutschen Autobahnnetz

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur entlang von Autobahnen ist in der Bauphase mit temporären Einschränkungen, insbesondere mit Blick auf die Nutzung des rechten Fahrstreifens, verbunden. Inwiefern sich Synergien oder aber Konflikte mit bereits vorgesehenen Ausbaivorhaben ergeben, lässt sich nicht pauschal beurteilen. So könnten einerseits durch den zeitgleichen Ausbau eines Autobahnabschnitts und die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur Synergien in der Bautätigkeit entstehen und die damit verbundene Einschränkung der Nutzung minimiert werden. Andererseits könnten auch Konflikte entstehen, wenn beispielsweise eine frühzeitige Elektrifizierung eines Streckenabschnitts angedacht wird, der perspektivisch auch für eine Erweiterung der Fahrstreifenanzahl (siehe hierzu auch Abschnitt 4.6) vorgesehen ist.

Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

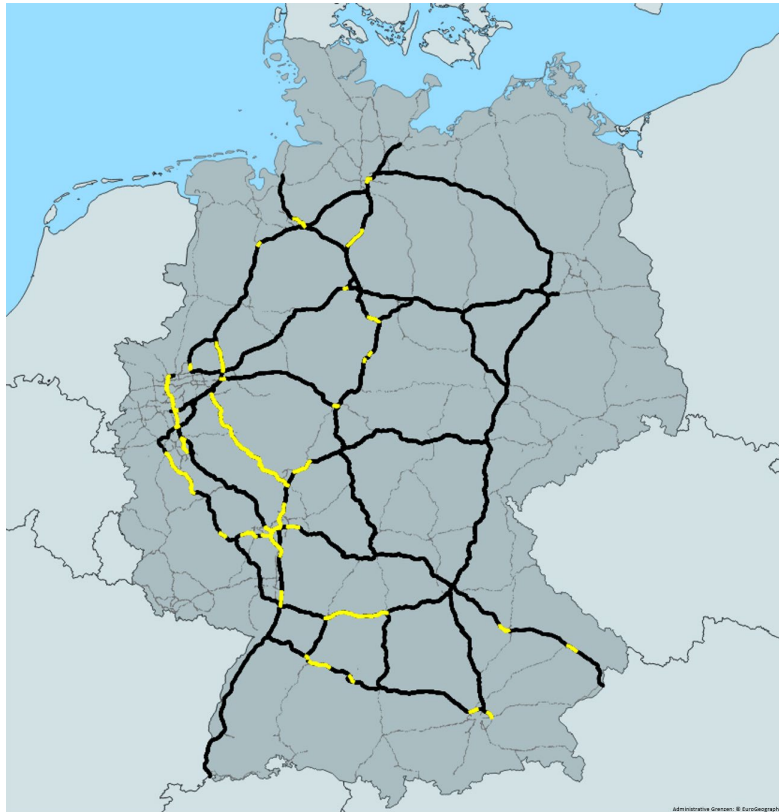
Die folgenden Analysen sind daher von der Annahme getragen, dass die Errichtung von initialen Strecken vorrangig auf Strecken umgesetzt werden sollte, die in den kommenden Jahren nicht von anderen Ausbauprojekten betroffen sind, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Planungsstudium befinden. Dabei sollte u. a. sichergestellt werden, dass eine Erhöhung der Fahrstreifenanzahl auch mittelfristig nicht geplant ist. Längerfristig – für den weiteren Netzausbau nach 2025 – könnte eine gemeinsame Planung des Oberleitungsausbaus mit anderen Ausbauprojekten auf dem jeweiligen Abschnitt bei frühzeitiger Koordinierung Synergien bergen, so dass sich die hinderliche Wirkung des Kriteriums auflöst oder gar als Vorteil zeigt.

Verfügbare Analysen

Der Bundesverkehrswegeplan (BVWP) stellt das wichtigste Instrument der Verkehrsinfrastrukturplanung in Bundesverantwortung und damit auch für die Fernstraßen dar. Es umfasst sowohl das Bestandsnetz als auch Aus- und Neubauprojekte. Im BVWP werden Projekte nach ihrer Dringlichkeit bewertet und damit der Rahmen für die Umsetzung der nächsten 10 bis 15 Jahre gesetzt (BMVI 2017). Die Bedarfspläne in den Ausbaugesetzen legen die Dringlichkeit der Vorhaben fest. Hierfür werden jeweils 5-Jahrespläne aufgelegt und die Investitionsschwerpunkte in Investitionsrahmenplänen (IRP) definiert. Insbesondere für die kommenden Jahre lässt sich daraus ein relatives klares Bild über Aus- und Neubauprojekte auf Bundesfernstraßen erlangen und mögliche Synergien oder Konflikte mit dem Ausbau eines möglichen Oberleitungsnetzes identifizieren. Die aktuelle Bundesregierung hat in ihrem Koalitionsvertrag allerdings festgelegt, die Prioritäten bei der Umsetzung des derzeit gültigen BVWP 2030 zu überprüfen und für die Erstellung des BVWP 2040 gänzlich neue Kriterien einzuführen. Dieser Prozess sollte auch bei Planungen zur Oberleitungsinfrastruktur berücksichtigt werden (SPD et al. 2021, 48f).

Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Abbildung 6 stellt die nach derzeitigem BVWP geplanten Bautätigkeiten im betrachteten Autobahnkernnetz bis zum Jahr 2030 dar. Häufig sind die Bautätigkeiten im Bestandsnetz mit einer Erhöhung der Fahrstreifenanzahl verbunden (siehe Abbildung 9). Mit Blick auf die oben identifizierten und aus verkehrlicher Sicht präferierten Strecken für die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur zeigen sich lediglich auf der Strecke **Köln-Mannheim (A61)** potenziell Konflikte auf längeren Streckenabschnitten. Zudem könnten größere Bautätigkeiten auf den Strecken **Stuttgart – München (A8) und Heidelberg – Nürnberg (A6)**, die allerdings eine geringere verkehrliche Eignung (siehe Abschnitt 4.1) zeigen, potenzielle Konflikte bei einer frühzeitigen Realisierung hervorrufen. Die abschnittswisen Bautätigkeiten auf der sehr geeigneten Strecke **Hamburg – Kassel (A7)** fallen trotz ihres fortgeschrittenen Planungsstadiums womöglich weniger stark ins Gewicht, da auch eine Elektrifizierung mit Lücken eine Realisierungsoption darstellt, die kritische, von anderen Bautätigkeiten geprägte Abschnitte ggf. aussparen kann.

Abbildung 7: Geplante Bautätigkeiten (gelb) im betrachteten Autobahnnetz bis zum Jahr 2030

Quelle: Eigene Auswertung/Darstellung auf Basis von NEMO-BfStr⁴

3.5 Nationales und grenzüberschreitendes Verkehrsaufkommen

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Um den wirtschaftlichen Betrieb einer Oberleitungsinfrastruktur sowie hohe CO₂-Reduktionen zu erreichen, ist eine möglichst hohe Auslastung der Infrastruktur anzustreben. Dabei ist (nahezu) jeder Lkw, der auf dem entsprechenden Autobahnabschnitt unterwegs ist, ein potenzieller Nutzer der Oberleitungsinfrastruktur. Je höher also das Lkw-Verkehrsaufkommen auf einem Streckenabschnitt ist, desto höher die potenzielle Auslastung einer dort installierten Oberleitungsinfrastruktur. Dementsprechend beinhalten die in verschiedenen Studien vorgeschlagenen Zielnetze (vgl. Abbildung 2) primär Netzabschnitte mit hohem Verkehrsaufkommen. Wie bereits in den Abschnitten 4.1 und 4.2 erläutert, spielt jedoch auch der Fahranteil einzelner Routen auf elektrifizierten Strecken sowie die Art des Verkehrs - beispielsweise Pendelverkehr, bei dem Lkw nahezu ausschließlich auf einer elektrifizierten Strecke eingesetzt werden – zumindest in der initialen Phase des Netzaufbaus eine entscheidende Rolle. Analysen zeigen, dass Fahrzeuge im Langstreckenverkehr (Einsatz deutschland- beziehungsweise europaweit) in der Regel auch eine überdurchschnittlich hohe Fahrleistung erreichen (Wietschel et al. 2017). Daher sind diese Fahrzeuge für einen überproportional hohen Anteil des CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Ein möglichst hoher elektrischer Fahranteil in dieser Gruppe ist daher für die Erreichung der Klimaziele im Verkehr mittel- bis langfristig von zentraler Bedeutung.

⁴ Die Auswertungen zum aktuellen Zustand und zu geplanten Veränderungen der Bundesfernstraßen (hier und in den folgenden Abschnitten) wurden auf Grundlage des Netzmodells für die Bundesfernstraßen (NEMO-BFStr) durchgeführt. Die Datennutzung wurde für die Analysen im Rahmen des Forschungsvorhabens BOLD freundlicherweise durch das BMDV ermöglicht und durch die, das Netzmodell betreuende, SSP Consult bereitgestellt.

Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

Das Kriterium **Verkehrsaufkommen** sollte sowohl in der kurz- als auch in der langfristigen Perspektive berücksichtigt werden. Um initiale Strecken auch längerfristig nutzbar zu machen, sollten sich die heute ausgewählten Strecken später in ein deutschlandweites Netz integrieren lassen. Ein hohes Verkehrsaufkommen ermöglicht dann eine hohe Auslastung. Kurzfristig ist ein allgemein hohes Verkehrsaufkommen also ein wichtiges, jedoch nicht das zentrale Kriterium. Um langfristig einen hohen Anteil des Straßengüterverkehrs mit Oberleitungen zu elektrifizieren, sollte das Verkehrsaufkommen langfristig das zentrale Entscheidungskriterium werden.

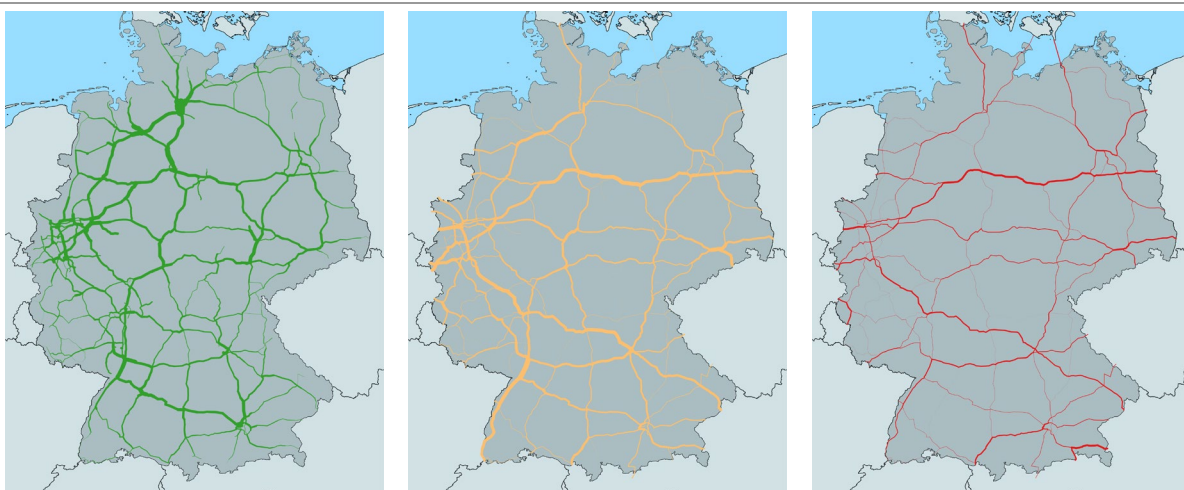
Das Kriterium **grenzüberschreitendes Verkehrsaufkommen** spielt kurzfristig eine untergeordnete Rolle. Allerdings sollten im Rahmen von ersten grenzüberschreitenden Strecken - analog zum nationalen Verkehrsaufkommen - ebenfalls Strecken mit hohem Verkehrsaufkommen gewählt werden, um ihre zukünftige Integration in ein europaweites Netz zu ermöglichen. Entsprechende Initiativen sind relevant, um langfristig eine europäische Lösung zu ermöglichen. Mittelfristig müssen in Deutschland internationale Korridore mit hohem Verkehrsaufkommen ausgebaut werden, um die Elektrifizierung internationaler Transporte zu ermöglichen.

Verfügbare Analysen

Analysen des Verkehrsaufkommens liegen in verschiedenen Systemstudien vor und werden in Abschnitt 3 dargestellt. Eine Aufteilung des Verkehrsaufkommens in nationale und internationale Verkehre ermöglicht der Datensatz „*Synthetic European road freight transport flow data*“ (Speth et al. 2022), der das europäische Verkehrsaufkommen als Quell-Ziel-Verkehre darstellt. Internationale Korridore wurden auch in Wietschel et al. (2017) mit dem Verkehrsmodell PTV-Validate identifiziert.

Abbildung 8 stellt das Lkw-Verkehrsaufkommen auf den wichtigsten deutschen Autobahnen nach Herkunft des Verkehrs dar. Innerdeutsche Verkehre sind dabei grün dargestellt, wobei Verkehre innerhalb eines Kreises nicht berücksichtigt sind. Gelbe Verkehre haben ihren Ursprung oder ihr Ziel in Deutschland. Rote Verkehre sind internationale Durchgangsverkehre mit Ursprung und Ziel im Ausland.

Abbildung 8: Straßengüterverkehr in Deutschland nach Herkunft der Verkehre (grün: national, gelb: Verkehre mit Quelle oder Ziel Deutschland, rot: Durchgangsverkehre)



Quelle: Eigene Auswertung/Darstellung basierend auf Speth et al. (2022) und EuroGeographics bezüglich der Verwaltungsgrenzen

Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Hinsichtlich des in einer ersten Phase des Markthochlaufs relevanten nationalen Verkehrsaufkommens sind insbesondere die Strecken **Hamburg - Bremen (A1)**, **Hamburg - Hannover (A7)** sowie die Verbindungsstrecken **Hamburg - Ruhrgebiet (A1 beziehungsweise A7, A2)** relevant. Hohe innerdeutsche

Verkehrsaufkommen im Süden Deutschlands treten vor allem auf der Achse **Mannheim-Stuttgart (via Karlsruhe oder Heilbronn) - Ulm - München (A61, A6, A5 und A8 beziehungsweise A6 und A81, A8)** auf. Im Osten Deutschlands ist das innerdeutsche Güterverkehrsaufkommen meist geringer. Sehr hohes Verkehrsaufkommen tritt hier insbesondere auf der **A9 bei Leipzig** auf.

Unter Berücksichtigung des langfristig relevanten internationalen Verkehrsaufkommens sowie von Verkehren mit Ursprung oder Quelle in Deutschland ist insbesondere die West-Ost-Verbindung **Niederlande - Polen (A2)** über das Ruhrgebiet und Berlin relevant. Auch die Achse **Niederlande - Österreich**, wahlweise über Nürnberg und Regensburg oder München wird stark durch internationale Verkehre genutzt. Als dritte international stark frequentierte Achse dient die Verbindung **Niederlande - Schweiz** über das Ruhrgebiet, Frankfurt, Karlsruhe und Freiburg. Ein wesentlicher Treiber der internationalen Verkehre sind dabei die großen Häfen in den Niederlanden (Amsterdam, Rotterdam) und Belgien (Antwerpen). Auch der Hamburger Hafen erzeugt internationale Verkehre, die für die Auswahl internationaler Oberleitungsstrecken von Bedeutung sind. Die hier vorgestellten Strecken decken sich mit Erkenntnissen aus Wietschel et al. (2017) und sind außerdem Teil des TEN-T Kernnetzes.

3.6 Streckencharakteristik

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Ob auf einem Streckenabschnitt eine Oberleitung baulich platziert werden kann, mit welchem planerischen und technischen Aufwand die Elektrifizierung verbunden ist und welche Implikationen für den späteren Fahrzeugbetrieb damit einhergehen, hängt maßgeblich von der Streckencharakteristik ab. Aus bautechnischer Sicht sind Einschränkungen in der Höhe bzw. dem Seitenraum (an Knoten, Anschlussstellen, bei Fahrzeugrückhaltesystem, Lärmschutzwände, v.a. aber auch bei Tunneln) relevant, die den Planungs- und Umsetzungsaufwand erhöhen. Aus straßenbetrieblicher Sicht sind die Gewährleistung von Schwer-/Großraumtransporten sowie des Einsatzes von Rettungshubschraubern zu erwähnen. Aber auch die dynamische Seitenstreifenfreigabe könnte ein Hinderungsgrund für die Elektrifizierung des rechten Fahrstreifens darstellen bzw. diese zumindest erschweren. Energietechnische Aspekte wie z. B. der Abstand zum Mittelspannungsnetz und die Möglichkeit zur Platzierung von Unterwerken sind ebenfalls relevante Faktoren, die den Umsetzungsaufwand maßgeblich beeinflussen. Zudem sind planungsrechtliche Aspekte zu berücksichtigen, die je nach Streckenverlauf unterschiedlich umfangreich sein können (z. B. UVP-Pflicht in naturschutzfachlich sensiblen Gebieten) und damit Auswirkungen auf den Umsetzungsaufwand, aber auch den Realisierungszeitraum haben können (Rolko et al. 2021). Im Folgenden wird ein Überblick über grundsätzliche Hemmnisse und mögliche Lösungsansätze für besonders kritische Abschnitte und ausgewählte Einflussfaktoren gegeben.

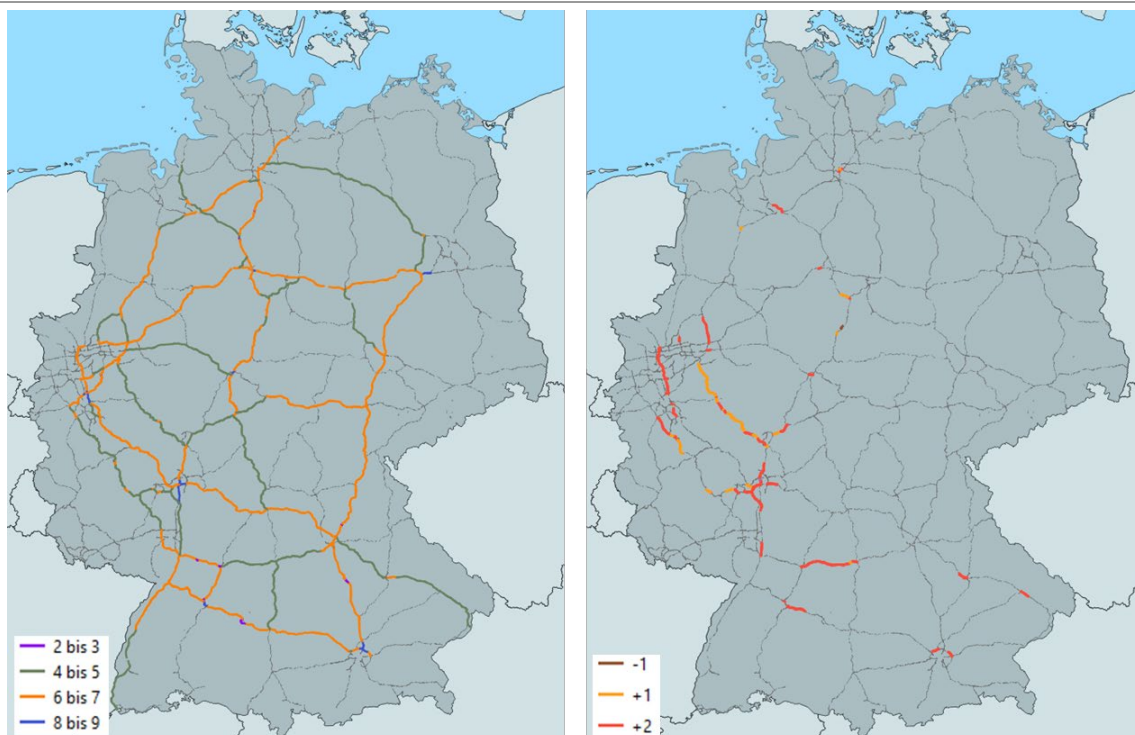
Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass insbesondere für die Elektrifizierung von ersten Strecken die diskutierten Einschränkungen durch die Straßencharakteristik von besonderer Bedeutung sind, da nur geringe Planungsvorläufe zur Verfügung stehen und mögliche technische Lösungen für anspruchsvolle Streckenabschnitte womöglich noch nicht ausgereift und zugelassen sind. Im Falle, dass zahlreiche der oben genannten Hemmnisse angesichts der Streckencharakteristik ausgeschlossen werden können, ist eine einfache und schnelle Realisierung anzunehmen. Im frühen Ausbaustadium sollten daher möglichst Abschnitte mit geringen bautechnischen und betrieblichen Einschränkungen gewählt werden. Längerfristig können durch ein geeignetes Lückenkonzept auch schwierigere Abschnitte mit einbezogen werden. Kürzere Unterbrechungen (z. B. Knoten, Anschlussstellen) können auch in einem späteren Stadium ausgespart bleiben, da sie mit geringen an Bord gespeicherten elektrischen Energiemengen überbrückt werden können.

Verfügbare Analysen

In früheren Analysen wird der angesichts von Talbrücken, Tunneln und Abschnitten mit eingeschränkten Durchfahrtshöhen oder Seitenräumen nicht oder nur schwer elektrifizierbare Anteil am Gesamtnetz auf etwa 6 % quantifiziert (siehe u.a. Kühnel et al. 2018). Es wird darauf verwiesen, dass sich dieser Anteil bei Berücksichtigung weiterer - unter ökologischen und Akzeptanzaspekten - kritischer Abschnitte etwas erhöhen könnte. In diesem Kontext wird jedoch auch darauf verwiesen, dass ein Lückenkonzept, das kritische Abschnitte von der Elektrifizierung freihält und dennoch einen hohen elektrischen Fahranteil durch den Hybridantrieb sicherstellt, die Problematik in diesen Fällen entschärfen könnte und damit keinen grundsätzlichen Ausschluss des betreffenden Abschnitts von der Elektrifizierung zur Folge haben müsste. Aus betrieblicher Sicht sollte der Bau als auch der anschließende Betrieb der Oberleitung den sonstigen Verkehr möglichst nicht einschränken und auch den Betrieb in Ausnahme- und Notfällen ermöglichen (u.a. Einsatz von Rettungshubschraubern, Schwertransporten). Vor diesem Hintergrund kommt auch der Anzahl der Fahrstreifen als auch der temporären Seitenstreifenfreigabe eine relevante Bedeutung bei der Eignungsbewertung zu. So ist mit zunehmender Anzahl der Fahrstreifen der Einsatz von Großraum-/Schwertransporten und Rettungshubschraubern voraussichtlich mit weniger Einschränkungen gewährleistet und die Einschränkungen in der Bauphase voraussichtlich weniger gravierend. Bei einer temporären Seitenstreifenfreigabe ist die Elektrifizierung möglicherweise schwieriger, da Oberleitungs-Lkw in diesem Fall nicht auf der üblichen, äußersten Spur fahren würden. In einer Analyse der Fahrstreifenanzahl im betrachteten Autobahnnetz (Abbildung 6) zeigt sich, dass sich die unter verkehrlichen Gesichtspunkten als prioritär identifizierten Autobahnabschnitte (siehe Abschnitt 4.1) zumeist mindestens durch eine 3-Streifigkeit pro Richtung auszeichnen bzw. diesbezüglich bis 2030 ausgebaut werden sollen. Ausnahmen bilden v.a. die Strecken Hamburg – Berlin (A24) und teilweise Köln – Mannheim (A61)

Abbildung 9: Fahrstreifenanzahl im betrachteten Zielnetz aktuell (links) und geplante Veränderung der Fahrstreifenanzahl bis zum Jahr 2030 (rechts)



Quelle: Eigene Auswertung/Darstellung auf Basis von NEMO-BfStr und EuroGeographics bezüglich der Verwaltungsgrenzen

Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Mit Blick auf die diskutierten Strecken lassen sich auf Basis der vorliegenden Analysen keine klaren Präferenzen bezüglich der konkreten Streckeneignung ableiten. Die Beurteilung der Umsetzbarkeit würde eine tiefergehende Analyse des jeweiligen Streckenabschnitts erfordern. Im Rahmen des Pilotversuchs ELISA in Hessen wurde hierfür ein Bewertungstool entwickelt, das eine Analyse der Streckeneignung in hoher räumlicher Auflösung ermöglicht (Rolko et al. 2021). Die vorliegenden Analysen auf Netzebene legen nahe, dass vermutlich keine längeren Abschnitte von einer Elektrifizierung aufgrund ihrer Streckencharakteristik grundsätzlich ausgenommen werden müssten.

3.7 Konkurrenz oder Synergien mit Schiene und Binnenschiff

Grundsätzliche Bedeutung des Kriteriums

Die Frage, ob O-Lkw dem Schienengüterverkehr zukünftig Konkurrenz machen könnten und somit das erklärte politische Ziel der Verlagerung von Güterverkehr auf Schiene und Wasserstraßen gefährden könnten, wird sehr häufig gestellt. Empirisch lässt sich zunächst konstatieren, dass aktuell etwa drei Viertel der Güterverkehrsleistung in Deutschland auf der Straße abgewickelt wird. Während die Schiene in den vergangenen 20 Jahren ihren Anteil am Modal Split in Tonnenkilometern um rund zwei Prozentpunkte auf 18,9 % (2019) leicht erhöhen konnte, nahm die Bedeutung der Binnenschifffahrt ab (7,3 % in 2019) (Umweltbundesamt (UBA) 2022). Auch bei deutlich intensivierten Bemühungen um eine Verkehrsverlagerung weg von der Straße ist somit eine drastische Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs und ein entsprechender Infrastrukturaufbau für alternative Antriebe zur Erreichung der gesteckten Klimaziele notwendig. Es stellt sich zudem die Frage, wie sich ein künftig deutlich zu stärkender Schienenverkehr mit emissionsfreien Lkw optimal ergänzen kann.

Dass O-Lkw mehr als andere Lkw-Antriebe die Frage nach einer Konkurrenz insbesondere zum Schienenverkehr aufwerfen, liegt zum einen an den technischen Ähnlichkeiten zum elektrifizierten Schienenverkehr (Pantograph und Oberleitungssystem) und zum anderen an der Tatsache, dass die O-Lkw-Technologie primär als eine Lösung für den Fernverkehr konzipiert ist, bei dem die Schiene gegenüber der Straße generell vergleichsweise wettbewerbsfähiger ist. Ob in einem konkreten Fall eine Konkurrenzsituation vorliegt, hängt vor allem davon ab, ob

- die Kosten des Schienentransports inklusive aller notwendiger Vor- und Nachlaufprozesse nicht über denen des Straßentransports liegen und
- der Schienentransport für diesen Fall ein hinsichtlich der Transportdauer für den in Frage stehenden Logistikprozess akzeptables Angebot machen kann (Verladezeiten bei ggf. multimodalem Transport eingeschlossen).

Bedeutung des Kriteriums im Zeitverlauf

Wie oben erwähnt, ist in erster Linie auf langen Strecken eine Konkurrenzsituation zwischen Oberleitungs-Lkw und dem Schienengüterverkehr denkbar. Lange Strecken können durch O-Lkw aber erst bei fortgeschrittenem Netzausbau bedient werden. Zudem ist der Anteil des Schienenverkehrs am Modal Split derzeit im Wesentlichen durch technische und kapazitive Faktoren begrenzt; die Kapazität erhöhende Erweiterungen und Ertüchtigungen der Schieneninfrastruktur können erst mittelfristig wirksam werden. Das Kriterium gewinnt daher im Laufe der Zeit an Relevanz und sollte vor allem bei der Entwicklung langfristiger infrastruktureller Zielbilder im Sinne einer systemisch effizienten Nutzung aller Verkehrsträger berücksichtigt werden.

Verfügbare Analysen

Für den Kostenvergleich zwischen Straße und Schiene sind vor allem energie- und infrastrukturpolitische Rahmenbedingungen ausschlaggebend (v. a. Energiepreise und Trassenpreise), deren Wirkung auf kon-

krete Relationen nicht allgemein bestimmt werden kann. Ob der Schienenverkehr ein betrieblich attraktives Angebot auf einer bestimmten Strecke machen kann, hängt eng mit den im Schienennetz verfügbaren Kapazitäten zusammen. Engpässe im deutschen Schienennetz wurden in existierenden Studien analysiert und der Aufwand ihrer Behebung abgeschätzt. Eine Studie von KCW kam zu dem Ergebnis, dass sich durch eine Reihe von kosteneffizienten Infrastrukturmaßnahmen im Gesamtvolumen von gut 7 Mrd. € der Anteil des Schienengüterverkehrs am gesamten Güterverkehr bis zum Jahr 2035 in etwa verdoppeln ließe. Die Schaffung entsprechender Kapazitäten im deutschen Schienennetz setzt jedoch eine Vielzahl von Maßnahmen voraus, welche zum Teil erhebliche Planungs- und Bauzeiten nach sich ziehen (Berschlin et al. 2019). Der Katalog umfasst Großprojekte wie den finalen Ausbau der Rheinschiene als Zulauf zu den Schweizer Alpentransversalen oder die Betuwe-Linie nach Rotterdam, viele kleine Maßnahmen zu Lückenschlüssen, Knotenpunkten und Aufwertungen von Streckenstandards, sowie eine umfassende Digitalisierung des Schienengüterverkehrs. Investive Maßnahmen im Netz sind unter anderem im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 gelistet. Aus der Untersuchung lässt sich aber nicht direkt ableiten, welche Relationen dadurch wie stark für eine Verlagerung von Verkehren auf die Schiene erüchtigt würden. Zudem hängt die betriebliche Attraktivität des Schienengüterverkehrs auch von der Umsetzung technischer Innovationen beim Rollmaterial sowie einer leistungsfähigeren Infrastruktur zum intermodalen Güterumschlag ab (Lobig et al. 2016).

Für die Infrastrukturplanung des Straßengüterverkehrs ist die Frage zentral, welche Lkw-Verkehre auf mittleren und langen Distanzen die Schiene auch mittelfristig und bei politisch forcierter Verlagerung nicht aufnehmen können wird, weil die Vorlaufzeiten für die notwendigen Anpassungen im Schienensystem zu lang sind (Clausen et al. 2019). Diese Frage kann auf Basis existierender Untersuchungen nicht beantwortet werden und sollte vertieft analysiert werden mit dem Ziel, ein verkehrsträgerübergreifendes Konzept für emissionsfreien Güterverkehr zu erarbeiten. Oberleitungen für Lkw könnten insbesondere dort sinnvoll sein, wo hohe Lkw-Transportleistungen bestehen, die auf langfristige Kapazitätsengpässe im Schienennetz treffen, aufgrund ihrer Kleinteiligkeit nicht effizient im Schienenverkehr umgeschlagen werden können oder aufgrund zeitlicher Anforderungen über die Straße transportiert werden müssen. Somit sollten Wechselwirkungen mit dem Schienenverkehr vor allem beim späteren Ausbau eines Oberleitungsnetzes für Lkw berücksichtigt werden, für erste Einführungsstrecken ist die Relevanz hingegen eher gering.

Während die Bahn sich mittels technischer Innovationen, vornehmlich Digitalisierung und intermodale Angebote, dem Wandel der Güterstruktur hin zu kleineren Sendungen prinzipiell anpassen und somit einen nennenswerten Teil des Gütervolumens auf der Straße potenziell aufnehmen kann, sind derartige Potenziale bei der auf Massengüter spezialisierten Binnenschifffahrt sehr begrenzt. Nicht nur für die Einführung von O-Lkw gilt, dass Verlagerungspotenziale hauptsächlich zwischen Binnenschiff und Bahn einerseits, sowie Bahn und Lkw andererseits bestehen. Für die Infrastrukturplanung im Straßengüterverkehr ist in einem integrierten Güterverkehrskonzept entsprechend die Schiene vorrangig zu berücksichtigen.

Ergebnisse mit Blick auf präferierte Strecken

Aufgrund der vorgenannten Zusammenhänge (v. a. der begrenzten Kapazitäten im Schienennetz) hat die Möglichkeit eines Modal Shifts auf die Schiene für die Auswahl initialer Oberleitungsstrecken für Lkw keine Relevanz. Mittel- bis langfristig hat der Schienengüterverkehr bei entsprechendem Infrastrukturausbau und verbesserten Rahmenbedingungen das Potential, in erheblichem Maße Verkehre von der Straße aufzunehmen. Für die Entwicklung eines Oberleitungs-Zielnetzes auf Autobahnen sollte daher die Berücksichtigung zukünftig realisierbarer Kapazitäten im Schienennetz und realistisch verlagerbarer Verkehrsanteile eine zentrale Rolle spielen. Es sollte also zunächst ein realistischer Ausbauplan für das Schienennetz entwickelt werden, um darauf basierend dann die Strecken eines Zielnetzes für Lkw-Oberleitungen in ihrer Priorität zu überprüfen.

3.8 Weitere Bewertungskriterien

Anbindung an das Stromnetz

Die Stromnetzanbindung der Oberleitungsinfrastruktur in den laufenden Pilotvorhaben erfolgt über das lokal vorhandene Mittelspannungsnetz. Die Anbindung erfolgt über Leitungen von den jeweiligen Netzanschlusspunkten zu den Unterwerken an der Strecke. Dieses Konzept ist allerdings nur für wenig leistungsfähige Systeme, die nur wenige Fahrzeuge im jeweiligen Streckenabschnitt versorgen können, ausreichend. Mit Blick auf größere und leistungsfähigere Oberleitungsabschnitte, die entlang einer längeren Strecke perspektivisch eine hohe Anzahl an Fahrzeugen mit Strom versorgen sollen, sind Anlagen mit Unterwerken in engen Abständen erforderlich. Eine solche Anlage erfordert voraussichtlich eine Anbindung an das Hochspannungsnetz und einen streckenbegleitenden Mittelspannungsring, an den die Unterwerke angeschlossen werden – vergleichbar zum Energieversorgungsnetz von elektrischen Nahverkehrssystemen (Lehmann et al. 2021).

Mit Blick auf die kurzfristige Umsetzung von Oberleitungsabschnitten können der Abstand zum Mittelspannungsnetz und der damit einhergehende planerische und bauliche Aufwand eine relevante Rolle spielen. Strecken mit einfach realisierbarer Anbindung an das Mittelspannungsnetz sollten daher – bei gleicher verkehrlicher Eignung – präferiert werden. Perspektivisch ist jedoch mit der Elektrifizierung des Autobahnnetzes – per Oberleitung und auch mittels stationärer Ladepunkte für Pkw und voraussichtlich auch Lkw – ohnehin eine leistungsfähige Anbindung an das Stromnetz notwendig, die eine integrierte Planung für das gesamte Netz erfordert, so dass dieses Kriterium mit Blick auf die Streckenwahl zunehmend an Bedeutung verlieren sollte.

Administrative Vorerfahrung

Die Umsetzung und der Betrieb eines Oberleitungssystems ist bislang im Bundesfernstraßengesetz nicht geregelt (Hönig 2021). Wertvolle Erfahrungen zur planungsrechtlichen Umsetzung konnten zwischenzeitlich in den Pilotvorhaben in Hessen, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg gesammelt werden. In diesen Fällen wurde jedoch zunächst jeweils nur eine zeitlich auf die Projektlaufzeit befristete Zulassung erwirkt. Für die nächsten Ausbauschritte können die bisherigen Erfahrungen mit der planungsrechtlichen Umsetzung vorteilhaft für eine schnelle Umsetzung sein. Durch die Bündelung der Verwaltung der Bundesautobahnen seit dem 01.01.2021 bei der Autobahn GmbH des Bundes und unter der Annahme, dass der Ausbau und Betrieb von Oberleitungssystemen Eingang in Bundesgesetze finden, ist anzunehmen, dass der weitere Ausbau zunehmend zentral organisiert wird und die administrative Vorerfahrung aus den Pilotversuchen darin Eingang findet, aber für die regionale Umsetzung an Bedeutung verlieren wird. Perspektivisch ist es erforderlich, die Planung des Oberleitungsausbau in die bestehenden Planungsprozesse der Straßenbauverwaltung zu integrieren.

4 Netzausbau: Bedeutung der Bewertungskriterien im Zeitverlauf und denkbare Ausbaupfade

Das Wichtigste in Kürze:

- Bei der Wahl von initialen Strecken, die über bisherige Pilotstrecken hinausgehen, ist vor allem eine kritische Menge an geeigneten Fahrzeugeinsatzprofilen entlang der Strecke relevant, die eine Grundlast erzeugen. Ein hoher Anteil an Pendelverkehren, idealerweise in Verbindung mit Ankernutzern sowie Fahrten mit geringen Fahranteilen jenseits der Strecke sind dafür wichtige Bewertungskriterien.
- Mit zunehmendem Netzausbau gewinnt das absolute Verkehrsaufkommen als Bewertungskriterium an Bedeutung. Mit einer europäischen Umsetzung des Systems werden zudem internationale Korridore relevant.
- Mögliche Hürden mit Blick auf die Stromnetzanbindung, eine herausfordernde Streckencharakteristik, Konflikte mit anderen Bauvorhaben sowie mögliche administrative Hürden sollten bei einer zunehmenden Einbettung des O-Lkw-Systems in eine integrierte Verkehrsplanung mit der Zeit an Bedeutung verlieren.
- Als besonders günstige für den initialen Streckenausbau zeigen sich die Verbindungen Hamburg-Ruhrgebiet, Hamburg-Kassel sowie Ruhrgebiet-Rhein-Main/-Neckar-Gebiet.
- Ein Lückenschluss der initialen Strecken könnte ein erstes Teilnetz zwischen Hamburg, Ruhrgebiet und der Rhein-Main-Neckar-Region herstellen und damit wichtige Wirtschaftszentren über verkehrsstarke Autobahnen verbinden.

4.1 Bedeutung der Bewertungskriterien im Zeitverlauf

Aktuelle Pilotversuche dienen vor allem der Technikerprobung unter Realbedingungen im öffentlichen Straßenraum. Eine hohe Auslastung und ein wirtschaftlicher Betrieb ist dabei noch kein Ziel. Angesichts der kurzen Strecken ist auch die Weiternutzung und Integrationsfähigkeit in ein zukünftiges Fernverkehrsnetz kein zentrales Kriterium. Mit dem zunehmenden Ausbau des Netzes und angesichts der übergeordneten Zielstellung einer weitreichenden Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs in relativ kurzer Zeit, gewinnt jedoch die Erschließung relevanter Verkehrsmengen und die Netzbildung der aufzubauenden Infrastruktur zunehmend an Bedeutung.

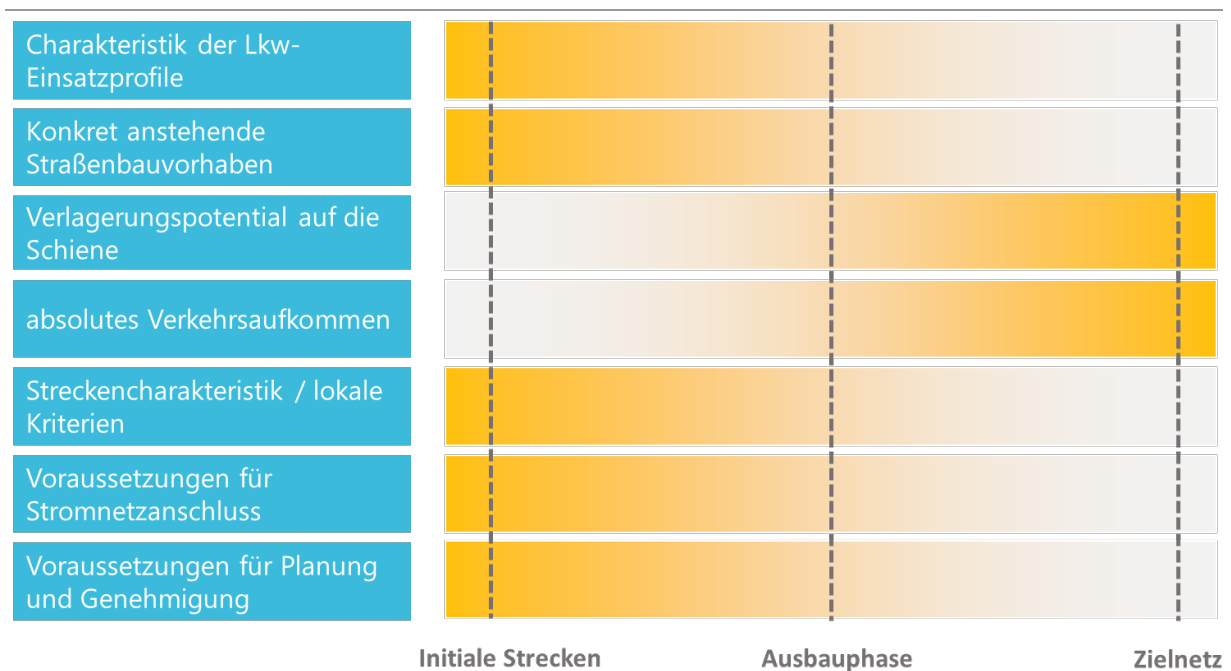
Im vorliegenden Papier wurden eine Reihe möglicher Kriterien für die Eignungsbewertung von Oberleitungsstrecken vorgestellt und hinsichtlich ihrer Relevanz zu verschiedenen Zeitpunkten diskutiert (Kapitel 4). Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (siehe auch Abbildung 10):

- **Charakteristika der Fahrzeugeinsatzprofile** auf den in Frage stehenden Strecken sind vor allem für die Wahl initialer Strecken von hoher Relevanz. Bei diesen Strecken geht es primär darum, einen hohen Nutzen der Infrastruktur für ausgewählte Ankernutzer sicherzustellen. Dies ermöglicht bei Pilotstrecken die zügige Sammlung von Praxiserfahrungen und bei initialen Ausbaustrecken eine verlässliche Grundauslastung der Infrastruktur. Geeignete Einsatzprofile sind idealerweise hochfrequente Pendelverkehre und weisen generell geringe Vor- und Nachläufe abseits des elektrifizierten Straßenabschnitts auf. Vorteilhaft ist vor allem, wenn eine größere Anzahl solcher geeigneten Verkehre bei einzelnen Ankernutzern gebündelt ist. Mit zunehmendem Netzausbau, Verbindung initialer Teilnetze und dadurch steigenden Nutzerzahlen treten

dann bei der Planung übergeordnete Erwägungen (u.a. absolutes Verkehrsaufkommen, internationale Anbindung) in den Vordergrund und die spezifischen Bedürfnisse einzelner Nutzer verlieren an Bedeutung.

- Bereits **konkret geplante Straßenbauvorhaben** (Sanierung/Ausbau) können vor allem kurz- bis mittelfristig die Eignung einzelner Strecken für den Oberleitungsbau beeinflussen: Können Arbeiten an der Fahrbahn und der Oberleitung zusammengelegt werden, so kann die Beeinträchtigung des Verkehrs insgesamt vermindert werden.
- Die **Koordination des Oberleitungsaufbaus mit anderen Infrastrukturmaßnahmen** im Straßen- wie auch im Schienenverkehr ist vor allem für die mittel- bis langfristige Planung relevant. Hier geht es vor allem um die Entwicklung langfristiger infrastruktureller Zielbilder im Sinne einer systemisch effizienten Nutzung aller Verkehrsträger.
- Das **Verkehrsaufkommen** auf in Frage stehenden Strecken ist ein guter Indikator für das Nutzerpotential einer Strecke in einem eingeschwungenen System bzw. bei ausgebautem Netz. Es sollte daher primär zur Priorisierung des Netzausbaus jenseits initialer Strecken herangezogen werden. Das grenzüberschreitende Verkehrsaufkommen im Besonderen gewinnt an Relevanz, sobald in den Nachbarländern konkretes Interesse an einem internationalen Systemausbau besteht.
- Die **Streckencharakteristik** als Kriterium fasst Einflüsse auf die Realisierbarkeit von Oberleitungen auf lokaler Ebene zusammen. Erste Abschätzungen zeigen, dass nur auf etwa 6 % der Gesamtstrecke auf dem betrachteten Kernnetz dem Bau von Oberleitungen erhebliche Hürden entgegenstehen. Darüber hinaus gibt es jedoch eine Reihe weiterer Faktoren, die Planungs- und Genehmigungsprozesse bzw. den Betrieb auf einzelnen Strecken erschweren können. Diese sind vor allem als Hemmnisse für die Realisierung initialer Strecken relevant. Beim späteren Netzausbau können besonders schwierige Abschnitte bei der Elektrifizierung ausgespart werden, für die makroskopische Planung eines Ausbaunetzes haben die lokalen Faktoren daher voraussichtlich nur geringe Relevanz.
- Der **Anschluss des Oberleitungssystems ans Stromnetz** ist als Kriterium ähnlich wie die Streckencharakteristik zu bewerten: Bei initialen Strecken können Schwierigkeiten beim Netzan-schluss Planung und Realisierung deutlich verzögern und sollten daher möglichst umgangen werden. Längerfristig müssen allein wegen des notwendigen Ausbaus der Schnellladeinfrastruktur für Pkw und Lkw erhebliche zusätzliche elektrische Anschlussleistungen an die Bundesfernstraßen gebracht werden; eine Oberleitungsinfrastruktur muss hier in den Planungen lediglich angemessen berücksichtigt werden.
- **Administrative Kriterien** betreffen in erster Linie den zeitlichen Vorlauf von Planungs- und Genehmigungsverfahren. Dieser ist für initiale Strecken naturgemäß am relevantesten, zudem können Anpassungen des rechtlichen Rahmens zukünftige Planungsprozesse vereinfachen.

Abbildung 10: Relevanz verschiedener Bewertungskriterien zur Auswahl von Oberleitungstrecken im Zeitverlauf



Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Mögliche Ausbaupfade

Mit Blick auf die oben diskutierten Kriterien und deren Bedeutung im Zeitverlauf lassen sich die analysierten Strecken priorisieren. Als besonders vorteilhaft stellen sich Strecken dar, die sowohl den kurzfristigen Anforderungen an eine Elektrifizierung gerecht werden als auch eine hohe Bedeutung in einem potenziellen zukünftigen Gesamtnetz einnehmen könnten.

Vor diesem Hintergrund eignen sich für **initiale Oberleitungskorridore** besonders die Strecken **Hamburg-Dortmund (A1)** sowie die Verbindung zwischen den Industriezentren **Rhein/Ruhr und Rhein/Main (A3) bzw. Rhein/Neckar (A61)**. Bei letzterer lässt sich durch den weitgehend parallelen Streckenverlauf keine klare Präferenz äußern, da sich bei der Elektrifizierung einer Strecke auch Verlagerungseffekte einstellen könnten. Mit gewissen Abstrichen folgt die Strecke **Hamburg – Kassel, ggf. bis Fulda (A7)**. Diese hoch priorisierten Strecken zeichnen sich durch bedeutende Güterumschlagspunkte (u. a. Hafen) an den Start- bzw. Zielpunkten aus und einem daraus resultierenden hohen Anteil von Fahrten mit geringen Vor- und Nachläufen jenseits der betrachteten Strecken sowie starken Pendelbeziehungen. Angesichts der bedeutsamen Industrie- und Logistikzentren an Start- und Zielpunkt sowie entlang der Strecke erscheint eine Gewinnung von frühen Ankernutzern mit signifikanter Transportleistung auf der Strecke wahrscheinlich. Zudem ist angesichts der Kapazitätsengpässe der parallelen Schienenverkehrskorridore eine unmittelbare Konkurrenz zur Verlagerung auf die Schiene eher unwahrscheinlich.

Als **mögliches Teilnetz** würde sich ein Lückenschluss der oben genannten Strecken anbieten, der eine **Verbindung zwischen Hamburg, dem Ruhrgebiet und dem Raum Rhein/Main bzw. Rhein/Neckar** schafft. Mit diesem Teilnetz entlang der verkehrsstärksten Autobahnen in Deutschland könnte bereits ein hoher Anteil der innerdeutschen Verkehre erreicht werden und relevante Fernverkehrskorridore für den Einsatz von O-Lkw erschlossen werden.

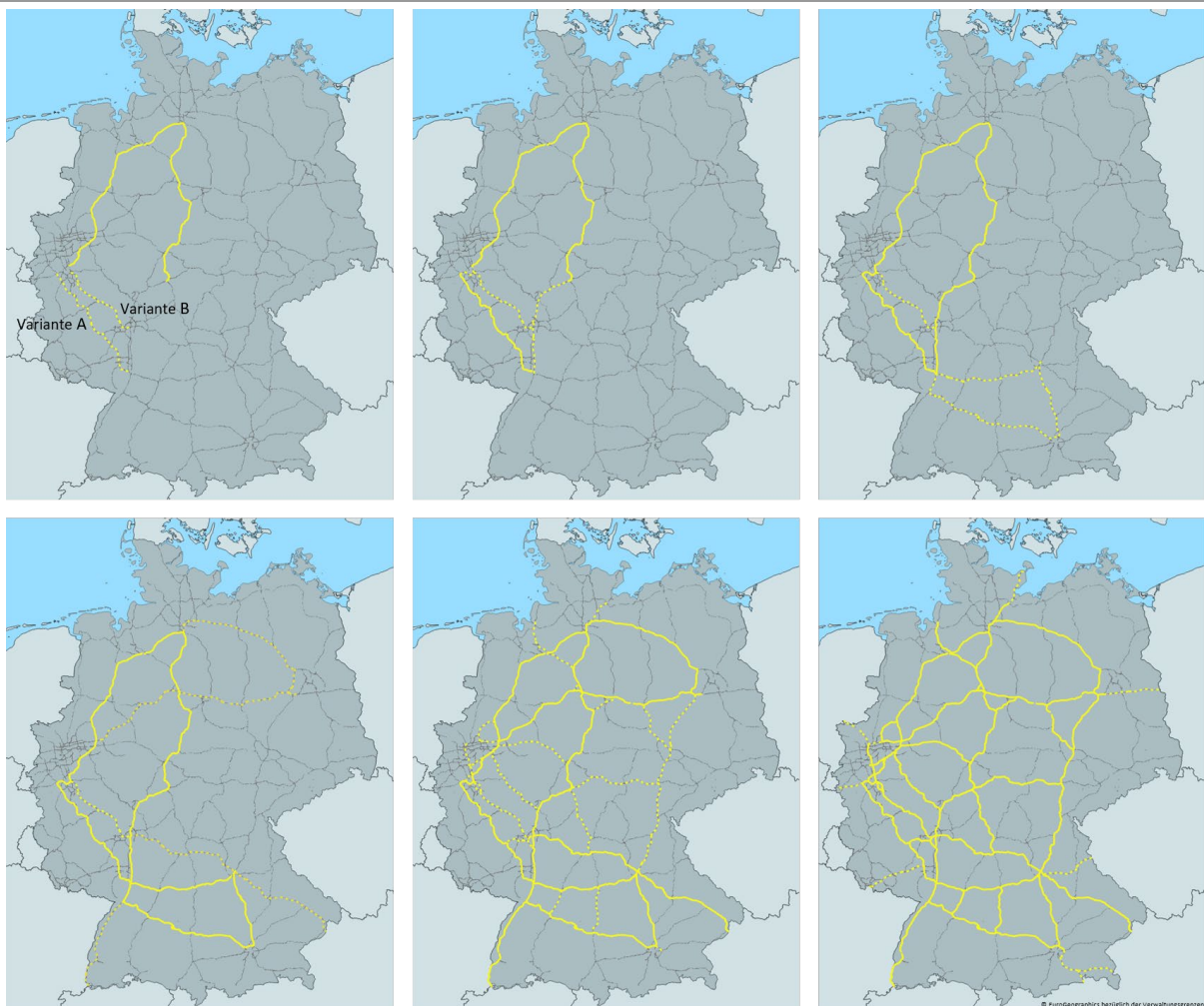
In der Folge könnte die **Anbindung des Rhein/Neckar-Raums nach München (A8) bzw. Nürnberg (A6 und A9)** folgen, die sich ebenfalls durch einen hohen Pendelanteil zwischen den Industriezentren

auszeichnen. Durch die zunehmende Netzbildung könnten zudem Verkehre mit längeren Vor- und Nachläufen jenseits des jeweiligen Abschnitts erschlossen werden.

Vor dem Hintergrund einer europäischen Integration der Oberleitungstechnologie werden **internationale Verkehre** bedeutsam und es würde sich die Netzausweitung auf die Strecken **Ruhrgebiet-Hannover-Berlin (A2)**, **Karlsruhe – Basel (A5)**, **Rhein/Main – Nürnberg – Passau (A3)** sowie möglicherweise **Hamburg – Berlin (A24)** anbieten.

Die **weiteren Strecken des Zielnetzes** sind mit Blick auf die verkehrlichen Potentiale – sowohl innerdeutsch als auch im internationalen Verkehr nicht prioritär. Als **Lückenschlüsse für ein durchgängiges Zielnetz** können sie dennoch perspektivisch von Bedeutung sein.

Abbildung 11: Geeignete initiale Strecken mit zwei Varianten A und B (gestrichelt), Strecken mit hoher Eignung für den weiteren Ausbau, hin zu einem Zielnetz inkl. möglicher internationaler Anbindung (von links oben nach rechts unten)



Quelle: Eigene Darstellung

Die dargestellte Eignung konkreter Strecken für die Oberleitungsinfrastruktur zu unterschiedlichen Zeitpunkten muss mit einigen Einschränkungen versehen werden. So liegen nicht für alle diskutierten Kriterien streckenspezifische Auswertungen vor bzw. für manche Kriterien nicht für alle Abschnitte des Zielnetzes Informationen aus derselben Quelle vor. Die Analysen sind daher teilweise lückenhaft – besonders geeignete Strecken können identifiziert werden; es ist aber nicht auszuschließen, dass auch weitere Strecken im Zielnetz diese Kriterien erfüllen, aber im Rahmen der zugrunde liegenden Studien nicht explizit betrachtet wurden. Zudem wurde nur das sogenannte Zielnetz detaillierter betrachtet. Insbesondere mit

Blick auf Ankernutzer und Pendelverkehre können – bezogen auf die Gesamtverkehrsstärke – weniger bedeutsame Strecken in der frühen Phase attraktiv sein (z. B. Rostock-Lübeck (A20), Dortmund – Kassel (A44), Chemnitz – Erfurt (A4), Regensburg – Hof (A93), München – Memmingen (A96)). Diese wurden hier aber nicht näher untersucht. Im Fokus standen die Strecken des möglichen Zielnetzes, der am stärksten befahrenen Autobahnen in Deutschland. Zudem wurden mögliche Wechselwirkungen mit anderen alternativen Energieversorgungsinfrastrukturen (z. B. Schnellladenetz) nicht berücksichtigt (siehe hierzu u.a. Plötz et al. 2021).

5 Fazit und Forschungsbedarf

Das vorliegende Papier geht der Frage nach, wie verschiedene Strecken im deutschen Fernstraßennetz beim Aufbau eines Oberleitungssystems priorisiert werden könnten und welche Kriterien dabei eine Rolle spielen. Die Frage, welche Vorteile generell mit der Nutzung des dynamischen Ladens verbunden sind und unter welchen Bedingungen diese in Deutschland zum Tragen kommen, ist nicht Teil dieser Analyse.

Über die streckenbezogenen Empfehlungen dieses Papiers hinaus sollten folgende Aspekte bei der Planung eines Oberleitungsausbaus berücksichtigt bzw. vertieft untersucht werden:

- Insbesondere im frühen Ausbaustadium kann das Dilemma der geringen Ausdehnung des Oberleitungssystems bei gleichzeitig besonderer Eignung des Systems auf Langstrecken nicht vollständig aufgelöst werden. Zwar können Ankernutzer eine frühe Auslastung von Teilstrecken ermöglichen, eine schnelle Bildung von Teilnetzen ist jedoch erforderlich, um auch die besonders relevanten Fernverkehre zu erschließen.
- Die Weiterentwicklung des Systems und der Aufbau der Infrastruktur sollte unter Berücksichtigung der Entwicklung der weiteren Antriebs- und Energieversorgungskonzepte erfolgen, um mögliche Synergien – insbesondere mit batterieelektrischen Lkw und stationären Lademöglichkeiten – zu erschließen und das Gesamtkonzept bei Bedarf an neue Gegebenheiten anpassen zu können.
- Angesichts der hohen Bedeutung von internationalen Güterverkehren auf dem deutschen Fernstraßennetz, ist der Austausch mit den europäischen Nachbarländern beim Netzaufbau – insbesondere mit Blick auf die bedeutsamen internationalen Güterverkehrskorridore – wichtig.
- Der Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur ist ein zentraler, aber nicht der alleinige Erfolgsfaktor für den Markthochlauf von O-Lkw. Begleitend zum Infrastrukturaufbau sind daher gezielte Maßnahmen zur fahrzeugseitigen Marktaktivierung und ein engmaschiges Monitoring von praktischen Nutzungsmustern und -hürden der Oberleitungsinfrastruktur notwendig.
- Die vorliegende Analyse kann nur erste Hinweise zur Eignung möglicher nächster Ausbaustrecken geben. Detailliertere Analysen sind für ausgewählte Abschnitte erforderlich, um die technische Eignung der Strecke zu prüfen und die verkehrlichen Potenziale, z. B. mit Blick auf Ankernutzer, zu konkretisieren.

6 Literaturverzeichnis

- Berschin, Felix; Maarfield, Simon; Przesang, André; Naumann, René (2019): Güter auf die Schiene. Netz-entwicklung für den Schienengüterverkehr. Gutachten. KCW GmbH. Online verfügbar unter https://www.netzwerk-bahnen.de/assets/files/news/2019/2019_05_06_bericht_klima_plus_programm_fuer_mehr_gueter_auf_der_schiene.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- BMVI (2017): Bundesverkehrswegeplan 2030. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Bundesverkehrswegeplan-2030/bundesverkehrswegeplan-2030.html>, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- BMVI (08.09.2021): BMVI bringt Innovationscluster für klimafreundliche Lkw-Antriebstechnologien auf den Weg. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/104-scheuer-innovationscluster-strassennutzverkehr.html>, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hg.) (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. BMVI. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.10.2021.
- Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.
- Bundesregierung (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG, vom 12.05.2021.
- Burchardt, Jens; Franke, Katharina; Herhold, Patrick; Hohaus, Maria; Humpert, Henri; Päiväranta, Joonas et al. (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Hg. v. Bundesverband der deutschen Industrie (BDI). BDI.
- Burghard, Uta; Scherrer, Aline (2020): Der eHighway aus gesellschaftlicher Perspektive. Erkenntnisse zur sozialen Akzeptanz und den Akteuren rund um Oberleitungs-Lkw-Systeme in Deutschland und Europa. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/2020-Bericht-Akzeptanz_BOLD_eHighways.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Clausen, Uwe; Klukas, Achim; Stütz, Sebastian; Eiband, Agnes; Rüdiger, David; Zimmermann, Patrick et al. (2019): Integrierte Maßnahmen zur Verlagerung von Straßengüterverkehren auf den Kombinierten Verkehr und den Schienengüterverkehr. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrate. Technische Universität Hamburg (TUHH); Fraunhofer IML. Dortmund. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-verlagerung-strassengueterverkehr-kombinierter-verkehr-schienengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Dambeck, Hans; Ess, Florian; Falkenberg, Hanno; Kemmler, Andreas; Kirchner, Almut; Kreidelmeyer, Sven et al. (2020): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Unter Mitarbeit von Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut. Hg. v. Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Prognos.
- Göckeler, Katharina; Hacker, Florian; Mottschall, Moritz; Blanck, Ruth; Görz, Wolf; Kasten, Peter et al. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr - 1. Teilbericht. Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strate-

- gie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr". Unter Mitarbeit von Öko-Institut und Hochschule Heilbronn. Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oeko-doc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Görz, Wolf (2020a): StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Unter Mitarbeit von Öko-Institut, HHN, Fraunhofer IAO und ITP. Öko-Institut.
- Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Plötz, Patrick (2020b): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese. Hg. v. Öko-Institut, ifeu und Fraunhofer ISI.
- Hönig, Dietmar (2021): Planungsrechtliche Einordnung. In: Manfred Boltze, Michael Lehmann, Gerd Riegelhuth, Holger Sommer und Danny Wauri (Hg.): Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des System eHighway. Bonn: Kirschbaum Verlag.
- Jöhrens, Julius; Allekotte, Michel; Heining, Florian; Helms, Hinrich; Räder, Dominik; Köllermeier, Nadine; Waßmuth, Volker (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Bus-verkehrs My eRoads“. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU); PTV Transport Consult (PTV). Heidelberg, Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2022.
- Jöhrens, Julius; Rücker, Julius; Kräck, Jan; Allekotte, Michel; Helms, Hinrich; Biemann, Kirsten et al. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kosten und Umwelteffekten in der Einführungsphase - Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Unter Mitarbeit von Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), PTV, Fraunhofer IEE. ifeu.
- Jöhrens, Julius; Rücker, Julius; Kräck, Jan; Allekotte, Michel; Jamet, Marie; Keller, Marc et al. (2018): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw Analyse im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Unter Mitarbeit von ifeu, PTV, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS. Hg. v. ifeu.
- Klimafreundliche Nutzfahrzeuge (2021): Ad-hoc-Task-Force zum dynamischen und stationären Laden mithilfe der Oberleitungstechnologie. Hg. v. NOW GmbH. Online verfügbar unter <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/ad-hoc-task-force-zum-dynamischen-und-stationaeren-laden-mithilfe-der-oberleitungstechnologie/>, zuletzt aktualisiert am 22.02.2022, zuletzt geprüft am 22.02.2022.
- Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Görz, Wolf (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Hg. v. Öko-Institut.
- Lehmann, Michael; Sommer, Holger; Hahn, G.; Dietrich K.; Schemmel, A. (2021): Energieversorgung des eHighways. In: Manfred Boltze, Michael Lehmann, Gerd Riegelhuth, Holger Sommer und Danny Wauri (Hg.): Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des System eHighway. Bonn: Kirschbaum Verlag.
- Lobig, A.; Liedtke, G; Lischke, A.; Wolfermann, A.; Knörr, W. (2016): Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland. Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-verkehrsverlagerungspotenzial-schienengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 08.02.2018.
- Mingers, Nadine (2022): Why the future of long-haul trucking is battery electric And how the EU truck CO2 standards can make or break the transition; Transport & Environment, online verfügbar unter

- https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/02/2022_02_battery_electric_trucks_HDV_factsheet.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2022.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) (2020): Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge. Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung. Arbeitsgruppe 1: Klimaschutz im Verkehr, online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nfz.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2022
- Plötz, Patrick (2022): Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. In: *Nature Electronics* (5), S. 8–10. DOI: 10.1038/s41928-021-00706-6.
- Plötz, Patrick; Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Speth, Daniel; Gnann, Till; Scherrer, Aline; Burghard, Uta (2021): Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr. Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich - ein Diskussionspapier. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Öko-Institut (ÖI); ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU). Karlsruhe, Berlin, Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/BOLD_Truck_charging_discussion%20paper.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Rolko, Kevin; Linke, Regina; Boltze, Manfred; Lehmann, Michael; Dietrich, K.; Hahn, G. (2021): Planung und Errichtung des eHighway. In: Manfred Boltze, Michael Lehmann, Gerd Riegelhuth, Holger Sommer und Danny Wauri (Hg.): Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des System eHighway. Bonn: Kirschbaum Verlag.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2012): Umweltgutachten 2012. Verantwortung in einer begrenzten Welt. Online verfügbar unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_2016/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Sensfuß, Frank; Maurer, Christoph; Krail, Michael; Speth, Daniel; Gnann, Till; Wietschel, Martin et al. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr. Unter Mitarbeit von Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Consentec GmbH, Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) und Technische Universität Berlin (TU Berlin). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Fraunhofer ISI.
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (Hg.) (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 zwischen SPD, Bündnis 90/ Die Grünen und FDP. Online verfügbar unter https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2021.
- Speth, Daniel; Sauter, Verena; Plötz, Patrick; Signer, Tim (2022): Synthetic European road freight transport flow data. In: *Data in brief* 40, S. 107786. DOI: 10.1016/j.dib.2021.107786.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2021): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2019. UBA. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_cc_43-2021_nir_2021_1.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2021.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022): Fahrleistungen, Verkehrsleistung und "Modal Split". Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split>, zuletzt aktualisiert am 08.02.2022, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik (Fraunhofer ISI); Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (Fraunhofer IML); PTV Transport Consult (PTV); TU Hamburg-Harburg; M-Five. Karlsruhe.