



Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr

Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier

Impressum

Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr

Autoren

Patrick Plötz, Daniel Speth, Till Gnann, Aline Scherrer und Uta Burghard (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI)

patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de, daniel.speth@isi.fraunhofer.de, till.gnann@isi.fraunhofer.de

Florian Hacker (Öko-Institut)

f.hacker@oeko.de

Julius Jöhrens (ifeu)

Julius.joehrens@ifeu.de

Beteiligte Institute

Öko-Institut e.V.

Borkumstraße 2, 13189 Berlin

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Wilkenstraße 3, 69120 Heidelberg

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Bildnachweis

Deckblatt: BOLD-Projekt

Zitierempfehlung

P. Plötz, F. Hacker, J. Jöhrens, D. Speth, T. Gnann, A. Scherrer, U. Burghard (2021): Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr: Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg: Fraunhofer ISI, Öko-Institut, ifeu

Veröffentlicht

Juni 2021

Hinweise

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

Danksagung

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Summary	9
1 Einleitung und Motivation	13
2 Elektrische Lkw und ihre Infrastruktur im Vergleich	15
2.1 Elektrische Antriebe für Lkw.....	16
2.2 Marktübersicht.....	17
2.2.1 Nutzeranforderungen und veränderte Rahmenbedingungen	17
2.2.2 Batterie-Lkw	19
2.2.3 Oberleitungs-Lkw	22
2.3 Infrastrukturen zur Stromaufnahme auf Fernstrecken	23
2.3.1 Allgemeine Anforderungen.....	23
2.3.2 Oberleitungen.....	24
2.3.3 Hochleistungsschnellladen.....	27
2.4 Akteursstrukturen und Akzeptanz.....	29
2.5 SWOT-Analyse der Technologien	31
2.5.1 Oberleitungen.....	32
2.5.2 Hochleistungsladen	33
3 Gemeinsamer Ausbau der Infrastrukturen	34
3.1 Gemeinsame elektrische Infrastruktur.....	34
3.2 Kosten der Infrastruktur	38
3.3 Perspektive Gesamtsystem öffentliche elektrische Infrastruktur für Lkw	39
4 Fazit und Forschungsbedarf	41
5 Literaturverzeichnis	42

Zusammenfassung

Im Straßengüterverkehr besteht erheblicher Handlungsbedarf zur Einführung alternativer Antriebe.

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

Alle elektrischen Antriebsoptionen für Lkw im Fernverkehr erfordern den Aufbau einer Energieversorgungsinfrastruktur.

Derzeit wird die Serienproduktion von Batterie-Lkw von vielen Herstellern geplant und erste Fahrzeugmodelle eingeführt. Elektro-Lkw werden nach aktuellen Prognosen eine erhebliche Marktdurchdringung in kurzer Zeit erfahren und benötigen neben dem regelmäßigen Laden im Depot zusätzliche Infrastruktur zum Nachladen für ihren Einsatz im Fernverkehr. Derzeit werden Hochleistungsladen und Oberleitung als Infrastrukturen für Elektro-Lkw im Fernverkehr diskutiert und getestet. Der existierende *Combined Charging System* (CCS) Standard erlaubt Ladeleistungen von bis 350 kW womit ca. 300 km Reichweite in 60 min nachgeladen werden könnten. Ein Ladestandard mit höherer Ladeleistung von bis zu 1 MW, das sog. *Megawatt Charging System* (MCS) ist derzeit in Planung und könnte ab 2025 bis zu 400 km Reichweite innerhalb der gesetzlichen Pausenzeit von 45 min Nachladen ermöglichen. Parallel dazu werden derzeit Oberleitungs-Lkw auf mehreren öffentlichen Straßen in Deutschland und Europa erprobt, die elektrisches Fahren und perspektivisch auch das Nachladen der Batterie während der Fahrt ermöglichen.

Tabelle 1: Übersicht Elektro-Lkw Varianten

	Batterie-Elektrischer Lkw	Oberleitungs-Lkw
Aktive Hersteller	Daimler Trucks, MAN, Volvo, Renault, Scania, DAF	Scania für Lkw (und Siemens für Stromabnehmer)
Technische Varianten	Bis 26t, 200 – 300 km Reichweite angekündigt	Bis 40 t, Diesel-Hybrid-Lkw, Stromabnehmer ausfahrbar
Derzeitige Einsatzgebiete	Überwiegend Nah- und Regionalverkehr	Überwiegend Pendelverkehre
Infrastruktur Fernverkehr	Schnellladen (350 kW, CCS-Standard verfügbar) Hochleistungsladen (bis zu 1 MW, geplanter MCS-Standard)	Oberleitung derzeit auf drei Teststrecken (4 – 5 km auf Autobahnen und Bundesstraße) Zielnetz 1000 – 4000 km in Deutschland wäre notwendig

Quelle: Eigene Darstellung.

Beide Infrastrukturen für Elektro-Lkw im Fernverkehr haben Vor- und Nachteile.

Vor allem in einer Anfangsphase bei wenigen elektrischen Lkw ist der dezentrale Aufbau von Schnellladestationen im Vergleich zu Oberleitungskorridoren flexibler möglich und mit geringeren Hürden verbunden. Zudem liegen bei Batterie-Lkw mit stationärer Ladung bereits konkrete Serienankündigungen der Hersteller auch für den Fernverkehr vor. Bei einem hohen Anteil von Batterie-Lkw, die auf Hochleistungszwischenladen angewiesen sind, ist jedoch mit erheblichen Herausforderungen vor allem hinsichtlich der betrieblichen Flexibilität (Ladezeiträume), des Platzbedarfs für entsprechende Ladeparks sowie der Belastung des Stromnetzes zu rechnen. Oberleitungsinfrastruktur kann damit auf stark befahrenen Strecken die Skalierbarkeit von Batterieantrieben im Fernverkehr verbessern.

Tabelle 2: Übersicht Stärken und Schwächen von Schnellladen und Oberleitung.

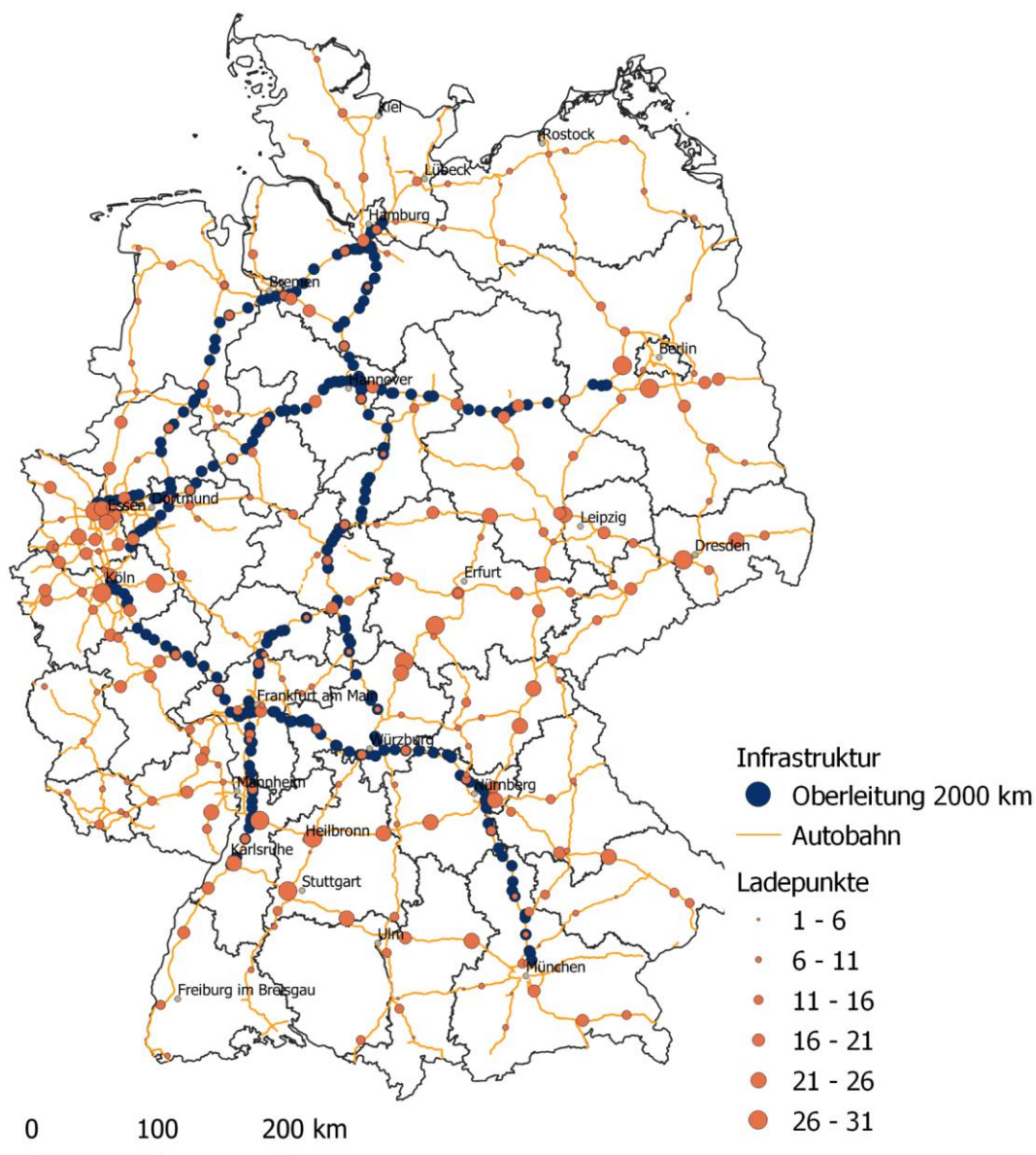
Infrastruktur	Stärken	Schwächen
Schnellladen	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Insellösungen und gradueller Aufbau mit großem Abstand und wenig Punkten pro Standort möglich. • Gradueiler Ausbau möglich (Basisnetz kann an Orten hoher Nachfrage verstärkt werden). 	<ul style="list-style-type: none"> • Batterien für nennenswerte Reichweite erhöhen Leergewicht und damit Energiebedarf bzw. verringern die Nutzlast. • Laden mit hoher Leistung erhöht den Batterieverschleiß und geht mit Energieverlusten einher. • Laden im Fernverkehr nur während der gesetzlichen Pausenzeiten möglich oder teure zusätzliche Fahrerpausen notwendig. • Lokal sehr hohe Netzbelastung mit entsprechenden Netzanschlusskosten. Nur leichte Flexibilisierung des Lastprofils möglich.
Oberleitung	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kapazität, d.h. viele Fahrzeuge können gleichzeitig geladen werden. • Kaum zusätzlicher Platzbedarf für Infrastruktur auf den Verkehrsflächen. • Etablierte Technologie aus Bahnbereich, überschaubare Anpassungen für die Straße notwendig. • Gewisse zeitliche Flexibilität beim Lastprofil, abhängig von der Auslegung der Fahrzeuge. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhebliche Netzwerkeffekte zu erwarten, Kostenbilanz des Systems daher erst bei gewissem Mindestausbau positiv. • Höhere Einstiegshürden, da nennenswerte Strecke für wirtschaftlichen Lkw-Betrieb elektrifiziert werden muss (z.B. längere Pendelstrecke mit großen Verkehrsströmen). • Vor- und Nachlauf der Lkw mit zusätzlichem Speicher (z.B. Batterie) oder Antrieb. Dadurch technisch komplexer. • Technische Reife der Fahrzeuge geringer als bei Batterie-Lkw. • Platzbedarf durch Pantographen verlängert Zugmaschine.

Quelle: Eigene Darstellung.

Beide Infrastrukturen können sich positiv ergänzen und gemeinsam ein leistungsfähiges und skalierbares System zur Stromversorgung schwerer Lkw bilden.

Eine gewisse Grundausstattung mit Schnellladestationen entlang des Fernstraßennetzes erscheint aufgrund der anstehenden Markteinführung batterieelektrischer Lkw aus heutiger Sicht in jedem Fall sinnvoll, und damit auch ein zügiger Aufbau einer solchen Infrastruktur in der Einführungsphase elektrischer Lkw. Mittelfristig bietet bereits die Teilelektrifizierung von Autobahnen mit Oberleitungen die Möglichkeit, batterieelektrische Lkw während der Fahrt zu laden und den Ausbau von Schnellladestandorten zu reduzieren, insbesondere aufgrund der teilweise geringen Platzverfügbarkeit für Lkw an Raststätten und um auch außerhalb der gesetzlichen Pausenzeiten zu laden. Oberleitungsinfrastruktur kann zudem auf stark befahrenen Strecken helfen, die Skalierbarkeit von Batterieantrieben im Fernverkehr zu verbessern, indem die benötigte Anzahl und Größe von Schnellladestationen sowie betriebliche Restriktionen (Ladezeiten) reduziert werden.

Abbildung: Mögliches gemeinsames Schnelllade- und Oberleitungsnetz



Quelle: Eigene Berechnung, Kartenhintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2020

Oberleitungen und Hochleistungsschnellladen können zusammengedacht werden und die Vorteile beider Systeme genutzt werden.

In den nächsten Jahren werden voraussichtlich beide Infrastrukturen für den Fernverkehr in kleiner Menge ausgebaut werden. In der Markteinführungsphase von Elektro-Lkw wird es in der Breite einfacher und kostengünstiger sein, MCS zu errichten. Auf Strecken mit einem hohen Anteil von Pendelverkehren können aber auch in dieser Phase einzelne Oberleitungsstrecken gegenüber stationären Ladesystemen attraktiv sein. Hierbei können für eine ausreichende betriebliche Flexibilität zunächst Oberleitungs-Hybridfahrzeuge zum Einsatz kommen, wie derzeit in den Feldversuchen erprobt werden. Die Erprobungsphase beider Technologien bis 2025 erscheint sinnvoll. Bereits in dieser Phase könnten Synergien auf Seiten der Fahrzeuge oder des Infrastrukturausbaus (wie bspw. ein gemeinsamer Anschluss an das Stromnetz) genutzt werden.

Ab 2025 bis 2030 könnten MCS und Oberleitungen in größerem Maßstab parallel errichtet werden. Oberleitungen könnten dann zunehmend auch als Ladeinfrastruktur für rein elektrische Lkw verwendet werden, wenn diese mit einem Stromabnehmer ausgestattet werden. In diesem Zusammenhang sollte auch die Möglichkeit einer Nachrüstung von Batterie-Lkw mit Stromabnehmern geprüft werden. Für den Bau der Oberleitung heißt dies, dass ab 2030 recht schnell eine nennenswerte Auslastung der Oberleitungsinfrastruktur erfolgen könnte und die Phase unterausgelasteter Infrastruktur kurz ausfallen oder übersprungen würde. Wenn Elektro-Lkw in der zweiten Hälfte der 2030er Jahre dann im Bestand von Lkw im Fernverkehr eine zentrale Rolle einnehmen und ein Basisnetz von MCS in Europa vorhanden wäre, könnte der Ausbau von Oberleitungen in die Breite gehen und sukzessiv das wichtigste Drittel des Europäischen Autobahnnetzes oder ungefähr ca. 25.000 km entlang der TEN-T-Korridore abdecken. Mit dieser gemischten Infrastruktur wären auch gering ausgelastete Strecken durch MCS für Elektro-Lkw abgedeckt und auf den zentralen Achsen könnte unabhängig von Pausenzeiten dynamisch während der Fahrt geladen, der Bedarf an Stellplätzen für MCS begrenzt und gleichzeitig die Belastung des Mittelspannungsnetzes über längere Strecken verteilt werden.

Der gemeinsame Ausbau der Infrastrukturen kann sich auch positiv auf die soziale Akzeptanz auswirken, insbesondere auf der Marktseite, denn mehr Anbieter würden beide Technologien verfolgen, aber auch soziopolitisch und in der Akzeptanz vor Ort, denn je nach Ort könnte die Technologie mit lokal besserer Umsetzbarkeit errichtet werden. Davon profitiert vor allem die Oberleitungstechnologie. Eine proaktive Kommunikation und Partizipation ist jedoch für die breite Akzeptanz beider Technologien wichtig. Sowohl der Ausbau eines Netzes von Hochleistungsladepunkten als auch von Oberleitungen erfordern zudem Europäische Koordination und eine technische Normung und Standardisierung.

Die Möglichkeit einer stationären Ladung über den Stromabnehmer könnte betriebliche Anreize setzen, Lkw mit Stromabnehmern auszustatten und somit beide Infrastrukturen zu nutzen.

Die stationäre Ladung von Lkw über ihren Stromabnehmer hat grundsätzlich das Potential, Abläufe beim Lkw-Betrieb zu vereinfachen (kein Kabelstecken erforderlich), die Sicherheit zu erhöhen (keine Stolperfallen, geringe Manipulationsgefahr) und den Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur zu reduzieren (keine Ladesäule bei engen Platzverhältnissen). Sie könnte somit für die Nutzer Anreize setzen, Lkw mit Stromabnehmern einzusetzen und somit die potentielle Nutzerbasis für eine Oberleitungsinfrastruktur verbreitern. Für Oberleitungs-Lkw wurden Stromabnehmer bereits für die besonderen Anforderungen von Lkw entwickelt und erprobt. Es sollte intensiv geprüft werden, wie Stromabnehmer und entsprechende Ladesysteme auszulegen sind, um auch eine stationäre Stromübertragung mit möglichst hoher Leistung zu ermöglichen.

Summary

There is a requirement for action to introduce alternative drive trains in road freight transport.

The transport sector is under particular pressure to meet climate targets. With more than one third of national greenhouse gas emissions, road freight transport is the second largest emitter in the transport sector - and in view of continuously increasing freight transport, the trend is rather upward. Heavy trucks play a particularly important role in this. In view of limited shift potentials to rail and ship, alternatives are urgently needed that enable climate-neutral road freight transport.

All electric drives for trucks need additional infrastructure, especially in long-distance transport.

Currently, the series production of battery trucks is being planned and introduced by many manufacturers. Electric trucks will experience considerable market penetration and, in addition to regular charging at the depot, will need infrastructure for recharging for their use in long-distance transport. High-voltage charging and overhead lines are currently being discussed and tested as infrastructures for electric trucks in long-distance transport. The existing CCS standard allows charging powers of up to 350 kW and approx. 300 km range could be recharged in 60 min. A charging standard with a higher charging power of up to 1 MW (so-called megawatt charging (MCS) is currently being planned) could allow up to 400 km during the statutory break time of 45 min recharging from 2025. In parallel, catenary trucks are currently being tested on several public roads in Germany and Europe.

Table 1: Overview of direct electric trucks

	Battery electric truck	Overhead line catenary truck
Active manufacturers	Daimler Trucks, MAN, Volvo, Renault, Scania	Scania for trucks (Siemens for pantographs)
Technical variants	Up to 26 tons, 200 – 300 km range announced	Up to 40 tons, Diesel hybrid trucks, extendible pantograph
Present day applications	Mainly local and regional transport	Mainly shuttle traffic
Infrastructure for long-distance transport	Fast charging (350 kW, CCS standard available) Megawatt charging (MCS) up to 1 MW power planned, technical standard under development	Overhead lines on three public test tracks (4 – 5 km on highways and national roads) Target of 1000 – 4000 km in Germany discussed

Source: Own illustration.

Both infrastructures electric trucks in long-distance transport have advantages and disadvantages.

However, especially in the initial phase (with a low number of users), the decentralised installation of fast-charging stations is more flexible and involves fewer hurdles. A certain basic equipment with fast-charging stations along the trunk road network is probably sensible in any case, and thus also a rapid development of such an infrastructure in the introduction phase of electric trucks. In the medium term,

the partial electrification of motorways with overhead lines already offers the possibility to charge battery-electric trucks while driving and to reduce the expansion of fast-charging locations, especially due to the sometimes limited space available for trucks along motorways. Overhead line infrastructure can also help to improve the scalability of battery drives in long-distance transport on busy routes. In the longer term, however, infrastructure planning should primarily be oriented towards the sustainability goals pursued with the introduction of alternative drives. In addition to the system costs, interactions with the energy system and resource requirements must be taken into account.

Table 2: Strengths and weakness of high power fast charging and electric road systems.

Technology	Strengths	Weaknesses
High power fast charging	<ul style="list-style-type: none"> • Simple stand-alone solutions and gradual build-up with large spacing and few points per location possible. • Gradual expansion possible (basic network can be expanded at locations of high demand). - Batteries for significant range increase empty weight and thus energy demand or reduce payload. 	<ul style="list-style-type: none"> • Charging at high power increases battery wear and is associated with energy losses. • Charging in long-distance traffic only possible during legal breaks or expensive additional breaks necessary. • Very high local grid load with corresponding grid connection costs. • Hardly any flexibilisation of the load profile possible.
Electric road systems	<ul style="list-style-type: none"> • High capacity, i.e. many vehicles can be charged at the same time. • Hardly any additional space required for infrastructure on the transport areas. • Established technology from the railway sector, manageable adaptations necessary for the road. • Certain temporal flexibility in the load profile, depending on the design of the vehicles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Considerable network effects to be expected, cost balance of the system therefore only positive with a certain minimum expansion. • Higher barriers to entry, as a significant distance must be electrified for economical truck operation (e.g. longer commuting routes with large traffic flows). • Pre- and on-carriage of trucks with additional storage (e.g. battery) or drive. Thus technically more complex. • Technical maturity of the vehicles is lower than for battery trucks. • Space requirement due to pantographs.

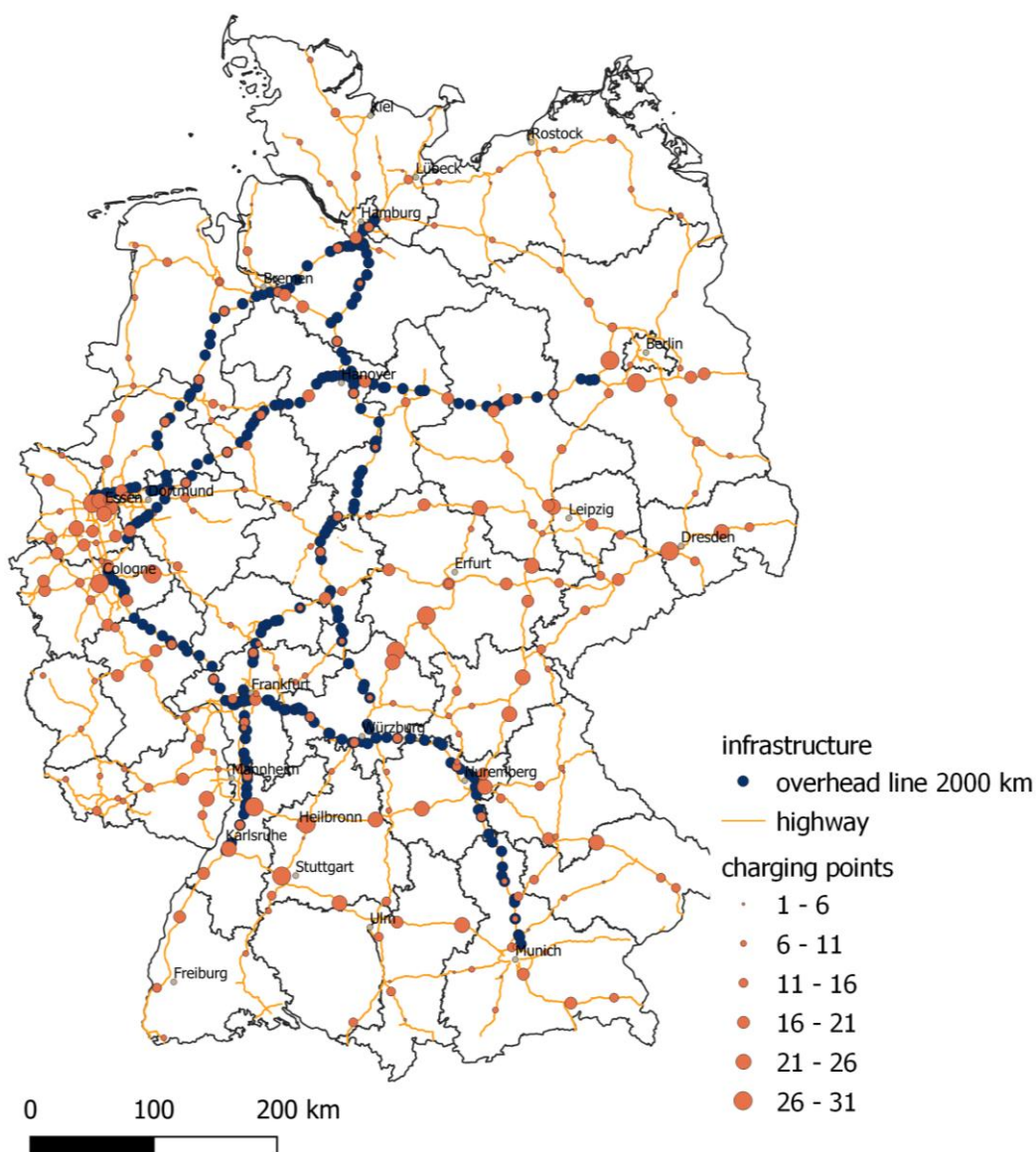
Source: Own illustration.

Both infrastructures can complement each other positively and together form an efficient and scalable system for supplying electricity to heavy trucks.

From today's point of view, a certain basic equipment with fast-charging stations along the trunk road network seems to make sense in any case due to the upcoming market launch of battery-electric trucks,

and thus also a rapid development of such an infrastructure in the introduction phase of electric trucks. In the medium term, the partial electrification of motorways with overhead lines already offers the possibility of charging battery-electric trucks while driving and reducing the expansion of fast-charging locations, especially due to the sometimes limited space available for trucks at service stations and in order to charge outside the statutory break times. Overhead line infrastructure can also help to improve the scalability of battery drives in long-distance transport on busy routes by reducing the required number and size of fast charging stations as well as operational restrictions (charging times).

Figure 1: Joint MCS and ERS network for Germany



Source: Own illustration, map background: © GeoBasis-DE / BKG 2020

Overhead lines and high power fast charging can be thought of together and the advantages of both systems can be used.

In the next few years, both infrastructures for long-distance transport will probably be expanded in small quantities. In the market introduction phase of electric trucks, it will be easier and cheaper to build MCS on a broad scale. On routes with a high proportion of commuter traffic, however, individual overhead lines can also be attractive in this phase compared to stationary charging systems. To ensure sufficient operational flexibility, overhead hybrid vehicles can initially be used, as is currently being tested in field trials. The trial phase of both technologies until 2025 seems reasonable. Already in this phase, synergies on the part of the vehicles or the infrastructure development (such as a common connection to the power grid) could be used.

From 2025 to 2030, MCS and overhead lines could be installed in parallel on a larger scale. Overhead lines could then increasingly also be used as charging infrastructure for purely electric trucks if they are equipped with a current collector. In this context, the possibility of retrofitting battery trucks with pantographs should also be examined. For the construction of the overhead line, this means that from 2030 onwards, a significant utilisation of the overhead line infrastructure could occur quite quickly and the phase of underutilised infrastructure would be short or skipped. If electric trucks were to play a central role in the long-distance truck fleet in the second half of the 2030s and a basic network of MCSs were in place in Europe, the expansion of overhead catenary lines could go wide and gradually cover the most important third of the European motorway network or about 25,000 km along the TEN-T corridors. With this mixed infrastructure, even low utilised routes would be covered by MCS for electric trucks and on the central axes, charging could be done dynamically during the journey, independent of break times, limiting the need for parking spaces for MCS and at the same time spreading the load on the medium voltage network over longer distances.

The joint development of the infrastructures can also have a positive effect on social acceptance, especially on the market side, because more providers would pursue both technologies, but also socio-politically and in terms of local acceptance, because depending on the location, the technology could be built with better local feasibility. Above all, the overhead line technology benefits from this. However, proactive communication and participation is important for the broad acceptance of both technologies. Both the expansion of a network of high-capacity charging points and overhead lines also require European coordination and technical standardisation.

The possibility of stationary charging via the pantograph could provide operational incentives to equip trucks with pantographs and thus use both infrastructures.

Stationary charging of trucks via pantographs has the potential to simplify truck operations (no need to plug in cables), to increase safety (no tripping hazards, low risk of tampering) and to reduce the space required for the charging infrastructure (no charging station in confined spaces). It could thus provide incentives for users to use trucks with pantographs and thus broaden the potential user base for an overhead line infrastructure. For overhead line catenary trucks, pantographs have already been developed and tested for the special requirements of trucks. It should be intensively examined how pantographs and corresponding charging systems are to be designed in order to also enable stationary power transmission with the highest possible performance.

1 Einleitung und Motivation

Das Wichtigste in Kürze:

- Das Klimaschutzgesetz erfordert eine erhebliche Senkung der verkehrsbedingten CO₂ Emissionen bis 2030. Zur Erfüllung des Pariser Klimaschutzabkommens und des Klimaschutzplanes der Bundesregierung muss der Straßenverkehr vor Mitte des Jahrhunderts CO₂-neutral sein.
- Der schwere Straßengüterverkehr über 12 t zulässiges Gesamtgewicht (zGG) hat einen Anteil von circa einem Viertel an den Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland und der EU (und der gesamte Straßengüterverkehr von einem Drittel). Elektro-Lkw können zur Senkung der Emissionen beitragen, brauchen aber zusätzliche Infrastruktur zum Laden im Fernverkehr.
- Stationäres Hochleistungsladen während der Pausenzeiten und Laden während der Fahrt unter einer Oberleitung vergleichbar der Bahn werden als Infrastrukturen für Elektro-Lkw im Fernverkehr derzeit erprobt oder entwickelt.
- Technisch ist der Aufbau beider Infrastrukturen machbar. Er braucht aber wie für alle Infrastrukturen für alternative Antriebe Zeit und muss finanziert werden.

Laut Novelle des Klimaschutzgesetzes müssen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 auf 85 Mio. Tonnen CO₂/a sinken. Eine Verringerung um 48 Prozent im Vergleich zu 1990. Bis 2045 ist angesichts der Ziele von Paris eine vollständige Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs notwendig und dafür dürfen spätestens 2040 nur noch Nullemissionsfahrzeuge neuzugelassen werden (vgl. Plötz et al., 2021; ACEA 2020).

Im Bereich der Fahrzeuganschaffung werden die CO₂-Emissionen der Neufahrzeugflotten von Lkw-Herstellern europaweit ab dem Jahr 2025 reguliert (Verordnung (EU) 2019/1242) (vgl. Rodriguez 2019). Die Fahrzeughersteller müssen die durchschnittlichen Emissionen ihrer neuen Lkw bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30 % gegenüber dem Jahr 2020 reduzieren. Die anstehende Überarbeitung der CO₂-Flottengrenzwerte für Lkw im Lichte des verschärften CO₂-Minderungsziels von 55 statt 40 % bis 2030 ggü. 1990 macht aber eine deutliche Verschärfung der CO₂-Flottengrenzwerte für Lkw sehr wahrscheinlich (Plötz et al. 2021).

Angesichts der hohen Dynamik bei der Batterieentwicklung und der Ankündigungen mehrerer Hersteller in den nächsten Jahren Elektro-Lkw einzuführen, wird der batterieelektrische Antrieb eine ernstzunehmende Alternative zum Diesel im Straßengüterverkehr. Elektro-Lkw im Nah- und Regionalverkehr werden zu großen Teilen in Depots und Logistikzentren geladen werden. Unsicher ist allerdings noch, wie und wo Elektro-Lkw im Fernverkehr geladen werden. Aktuelle Forschungsprojekte untersuchen den Einsatz von Hochleistungs-Schnellladen, sog. *Megawatt Charging* (MCS) (vgl. Plötz et al., 2020), und von Oberleitungssystemen für Lkw (vgl. Jöhrens et al., 2020). Dabei stellt sich die Frage, welche der beiden Infrastrukturen welche Rolle im zukünftigen elektrischen Lkw-Fernverkehr spielen kann. Laut Bundesregierung sollen in Deutschland beide Technologien in den kommenden Jahren weiterverfolgt, erprobt und zur Serienreife entwickelt werden (BMVI, 2020).

Derzeit werden MCS und Oberleitungen vor allem als konkurrierende Systeme diskutiert. Allerdings dienen sie beide zur Versorgung von Batterie-Lkw im Fernverkehr und müssen relativ hohe Leistungen bereitstellen. Viele Lkw-Hersteller konzentrieren sich derzeit auf das Hochleistungsladen aber einzelne Hersteller und Technologieanbieter verfolgen auch Oberleitungsladen aktiv.

Das vorliegende Diskussions-Papier vergleicht Hochleistungsschnellladen und Oberleitungsinfrastruktur als zwei mögliche Infrastrukturen für den elektrischen Straßengüterfernverkehr. Ziel ist es, Vor- und Nachteile beider Systeme zu diskutieren und Felder zu identifizieren, auf denen sich beide Systeme ergänzen könnten. Da der vorliegende Text in weiten Teilen eher qualitativ ist und versucht, sich erstmalig dem Vergleich und Zusammenspiel der Infrastrukturen zu nähern, handelt es sich explizit um ein Diskussionspapier und keine abgeschlossene Studie, in der alle Aspekte beider Technologien umfassend untersucht wurden. Wir hoffen damit einen Beitrag zur aktuellen Diskussion und der Entscheidung über elektrische Infrastrukturen für CO₂ armen Straßengüterverkehr zu leisten.

Der vorliegende Text betrachtet ausschließlich Infrastruktur für die direkte Stromnutzung. Andere alternative Kraftstoffe, insbesondere Wasserstoff, werden hier nicht betrachtet. Dies ist keinerlei Wertung, sondern dem begrenzten Umfang des vorliegenden Diskussionspapiers geschuldet.

2 Elektrische Lkw und ihre Infrastruktur im Vergleich

Das Wichtigste in Kürze:

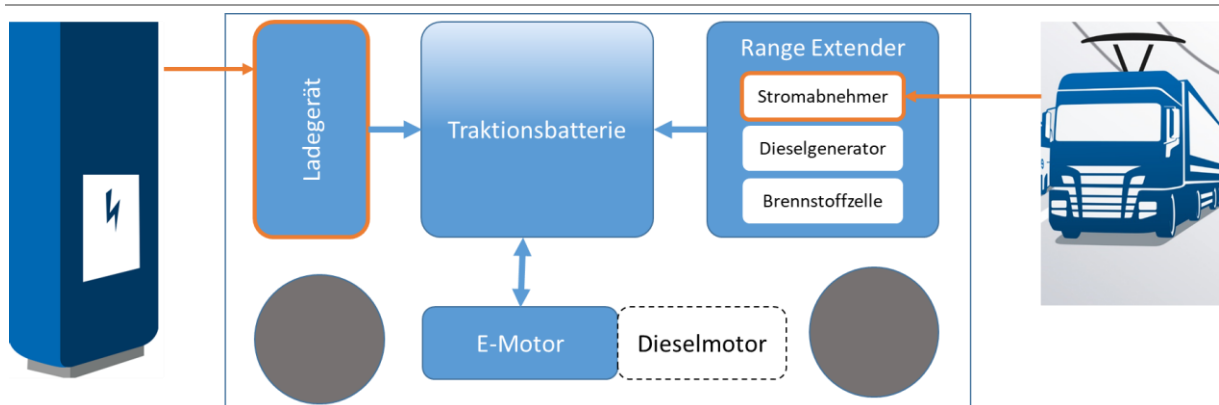
- Elektrisch angetriebene Lkw (Batterie-Lkw) sind im Fernverkehr oftmals auf zusätzliche Energieaufnahme während des Betriebstages angewiesen. Sofern die Energie dafür direkt aus dem Stromnetz bezogen werden soll, kann dies über eine stationäre Schnellladung oder während der Fahrt über eine Oberleitung erfolgen.
- Elektrische Lkw werden im Verlauf der nächsten Jahre schon aufgrund der CO₂-Regulierung mit hoher Wahrscheinlichkeit auch im Fernverkehr notwendig werden. Es wird daher eine Infrastruktur bestehend aus Schnellladepunkten und/oder Oberleitungen erforderlich sein.
- Zwischen Infrastrukturaufbau und Fahrzeugmarkt gibt es Wechselwirkungen: Bei Batterie-Lkw gehen derzeit die ersten Serienmodelle an den Start, Oberleitungs-Lkw befinden sich derzeit in der Demonstration auf öffentlichen Straßen.
- Beide Technologien haben unterschiedliche Vorteile hinsichtlich Handling, initialer Infrastruktur und Ladestrategien. Bei beiden sind aber auch energiewirtschaftliche Herausforderungen zu nennen.
- Schnellladung und Oberleitungen weisen jeweils eine hohe Effizienz der Energienutzung auf. Unterschiede beim Energieverbrauch gehen daher vor allem auf das zusätzliche Batteriegewicht bei Batterie-Lkw mit hoher Reichweite zurück.
- Der Aufbau von Schnellladestationen ist bei geringen Nutzerzahlen mit geringeren Kosten und Aufwand verbunden. Dafür steigen die Herausforderungen für hohe Nutzerzahlen stärker als bei einem Oberleitungssystem (Platzbedarf, Leistungsdichte).
- Anhaltende Kostendegressionen bei Traktionsbatterien lassen mittelfristig einen wirtschaftlichen Betrieb von Batterie-Lkw auf der Langstrecke realistisch erscheinen. Oberleitungs-Lkw wären als Serienmodelle ebenfalls wirtschaftlich konkurrenzfähig, sofern die Infrastruktur bereitgestellt wird.
- Der Bau von Oberleitungsinfrastruktur stellt in der Praxis eine Hoheitsaufgabe der öffentlichen Hand dar und erfordert eine zentrale Koordination. Bei Schnellladestationen kann grundsätzlich dezentraler geplant werden, sofern gewisse Standards eingehalten werden.
- Ein klarer Vorteil von Oberleitungs-Lkw gegenüber Batterie-Lkw ist, dass die Fahrzeuge während der Fahrt geladen werden können. Dies reduziert die Standzeiten zum Laden oder die Anzahl von Ladestopps.
- Aus energiewirtschaftlicher Sicht verursachen Oberleitungs-Lkw eine unflexible Nachfrage, die bei Batterie-Lkw zumindest durch Puffer-Batterien an Tankstellen in Schwachlastzeiten verschoben werden könnten. Die spezifische Nachfrage mit 80-100 kW im Dauerbetrieb ist für einen Oberleitungs-Lkw jedoch deutlich geringer als bei Megawattladern.

2.1 Elektrische Antriebe für Lkw

Zwischen den elektrischen Antriebsoptionen gibt es etliche Gemeinsamkeiten; das grundlegende Schema mit den möglichen Komponenten ist in Abbildung 1 dargestellt. Alle elektrischen Antriebe verfügen über eine Traktionsbatterie, die den Strom für den Betrieb des Elektromotors zur Verfügung stellt. Bei den meisten Fahrzeugmodellen kann diese Batterie über ein entsprechendes Ladegerät direkt aus dem Stromnetz aufgeladen werden. Dies ist mittels Wechselspannung (AC) für niedrige bis mittlere Leistungen (bis 44 kW) oder mittels Gleichspannung für höhere Ladeleistungen möglich.

Für den Fall, dass der Energieinhalt der Traktionsbatterie nicht für die anfallenden Fahrten zwischen den stationären Ladezeiten ausreicht, kann ein sogenannter Range Extender während der Fahrt zusätzlichen Strom für die Batterie bereitstellen. Bei Oberleitungs-Lkw fungiert der Stromabnehmer als Range Extender, indem er auf Oberleitungsstrecken elektrische Energie während der Fahrt aus der Oberleitung aufnehmen kann. Weitere Möglichkeiten sind der Einsatz einer Brennstoffzelle, die aus mitgeführtem Wasserstoff Strom erzeugt, oder der Einsatz eines Diesellaggregats, das mithilfe eines angeschlossenen Generators Strom für die Batterie liefert. Ein Dieselmotor kann allerdings auch gemeinsam („parallel“) mit dem Elektromotor direkt die Antriebsachse antreiben, in diesem Fall spricht man von einem Parallelhybriden.

Abbildung 1: Schematische Darstellung elektrischer Antriebe für Lkw



Quelle: Eigene Darstellung.

Im vorliegenden Papier sollen diejenigen Varianten verglichen werden, bei denen Strom direkt aus dem Stromnetz aufgenommen wird. Dies sind einerseits die stationäre Stromaufnahme über ein Ladegerät und andererseits die Stromaufnahme während der Fahrt über einen Stromabnehmer an einer Oberleitung¹. Fahrzeuge, deren Traktionsbatterie ausschließlich stationär geladen werden kann, bezeichnen wir im Folgenden als Batterie-Lkw. Fahrzeuge, die zusätzlich über einen Stromabnehmer verfügen, bezeichnen wir als Oberleitungs-Lkw. Grundsätzlich kann bei beiden Varianten zusätzlich ein Dieselmotor zum Vortrieb eingesetzt werden; der Batterie-Lkw wird in diesem Fall zum „Plug-in-Hybrid-Lkw“, der Oberleitungs-Lkw zum „Oberleitungs-Hybrid-Lkw“.

Antriebsvarianten, die auf eine Brennstoffzelle zurückgreifen, haben grundlegend andere Infrastrukturanforderungen und erfordern aufgrund ihrer systemisch deutlich geringeren Energieeffizienz eine separate Betrachtung; sie sind daher nicht Gegenstand dieses Papiers.

¹ Grundsätzlich kann ein solcher Stromabnehmer auch für das stationäre Laden im Depot oder an geeigneten öffentlichen Ladepunkten verwendet werden.

2.2 Marktübersicht

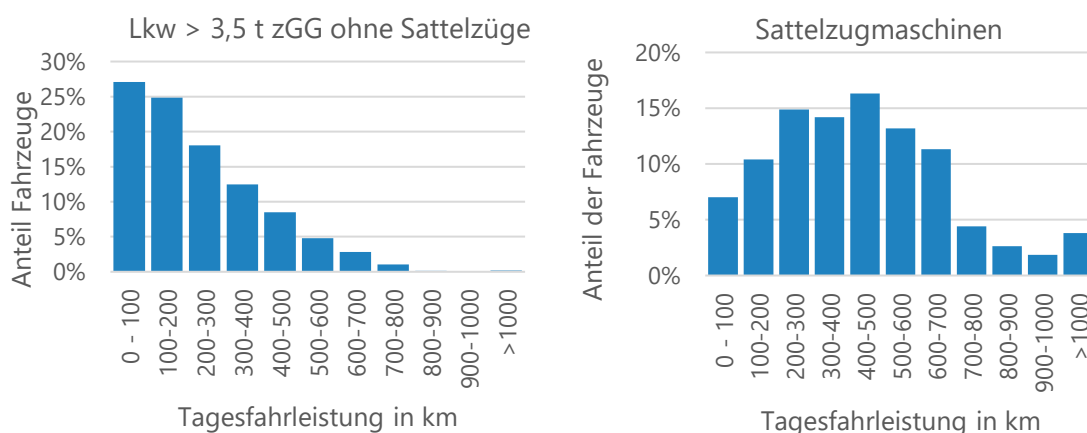
2.2.1 Nutzeranforderungen und veränderte Rahmenbedingungen

Nutzeranforderungen

Im Straßengüterverkehr kommt ein sehr breites Spektrum an Nutzfahrzeugklassen zum Einsatz, welche wiederum sehr unterschiedliche Einsatzanforderungen gewährleisten müssen. So reicht das Spektrum der Fahrzeugklassen von Transportern mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 1 bis 3,5 Tonnen bis hin zu Sattelzügen mit 40 Tonnen Gesamtgewicht. Entsprechend unterschiedlich sind die Nutzungsanforderungen. So kommen im Nah- und Regionalverkehr tendenziell kleinere Fahrzeuge zum Einsatz. Die Tourenlängen in diesen Fahrzeugklassen bewegen sich in der Regel deutlich unter 400 km und eine Rückkehr zum Startpunkt am Ende des Tages ist häufig (Transport & Environment, 2020). Im Güterfernverkehr kommen hingegen vorwiegend Sattel- und Gliederzüge zum Einsatz, die deutlich höhere Tagesfahrleistungen aufweisen und insbesondere auf Fernstraßen, häufig auch im grenzüberschreitenden Verkehr, unterwegs sind.

Insgesamt entfallen nahezu 60% des Verkehrsaufkommens im Straßengüterverkehr auf Fahrten von maximal 400 Kilometer Länge (Transport & Environment, 2020). Mit Blick auf die Relevanz der unterschiedlichen Fahrzeugsegmente zeigt sich, dass zwar Nutzfahrzeuge mit maximal 3,5 Tonnen Gesamtgewicht den Bestand mit etwa 75% dominieren, dass ihr Anteil an der Gesamtfahrleistung aber angesichts geringerer Tagesfahrleistungen unter 50% liegt. Wohingegen schwere Nutzfahrzeuge > 26 Tonnen mit weniger als 10 % am Fahrzeugbestand mehr als ein Viertel der Gesamtfahrleistung erbringen und angesichts des hohen Fahrzeugenergieverbrauchs aktuell für mehr als die Hälfte der Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs verantwortlich sind (Plötz et al., 2018; Timmerberg et al., 2018). So weisen Sattelzugmaschinen, die vorwiegend im Fernverkehr zum Einsatz kommen, besonders hohe Tagesfahrleistungen auf (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Verteilung der Tagesfahrleistung von Lkw in Deutschland



Quelle: Eigene Auswertung von Daten aus (WVI et al. 2010)

Mögliche Technologiealternativen zum in allen Segmenten bisher dominierenden Diesel-Antrieb, müssen den spezifischen Nutzungsanforderungen im jeweiligen Einsatzbereich gerecht werden. Diese umfassen u.a. die tägliche Fahrleistung, die Regelmäßigkeit von Touren sowie die Standzeiten an unterschiedlichen Orten (z.B. auf dem Betriebshof oder im öffentlichen Raum), die Dauer und Häufigkeiten von Standzeiten (u.a. gesetzlich vorgeschriebene Ruhepausen des Fahrers, Be-/Entladevorgänge) sowie die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs und der erforderlichen Zuladung (Volumen und Masse). Vor allem die Relevanz einer derzeit noch geringeren Reichweite von batteriebetriebenen

Fahrzeugen gegenüber Dieselfahrzeugen hängt stark vom jeweiligen Einsatzprofil ab. Werden regelmäßige Touren gefahren und ist die Installation / Nutzung von Ladeinfrastruktur an den Halteorten der Fahrzeuge möglich, so können auch batterieelektrische Lkw mit vergleichsweise geringen Reichweiten eingesetzt werden. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die effektive Reichweite temperaturbedingten Schwankungen unterliegt.

Aufgrund des großen Spektrums an Fahrzeugsegmenten und Anwendungsprofilen kommen voraussichtlich unterschiedliche alternative Antriebstechnologien in Frage bzw. es werden unterschiedliche Anforderungen an die notwendige Energieversorgungsinfrastruktur gestellt. Für den Markterfolg von Antriebsalternativen im Straßengüterverkehr ist von zentraler Bedeutung, ob eine Technologie den Nutzungsanforderungen im jeweiligen Fahrzeugsegment und Anwendungsprofil gerecht wird (v.a. in puncto Zuverlässigkeit) und im Vergleich zu Konkurrenztechnologien wirtschaftlich betrieben werden kann.

Veränderte Rahmenbedingungen und ihre Wirkung

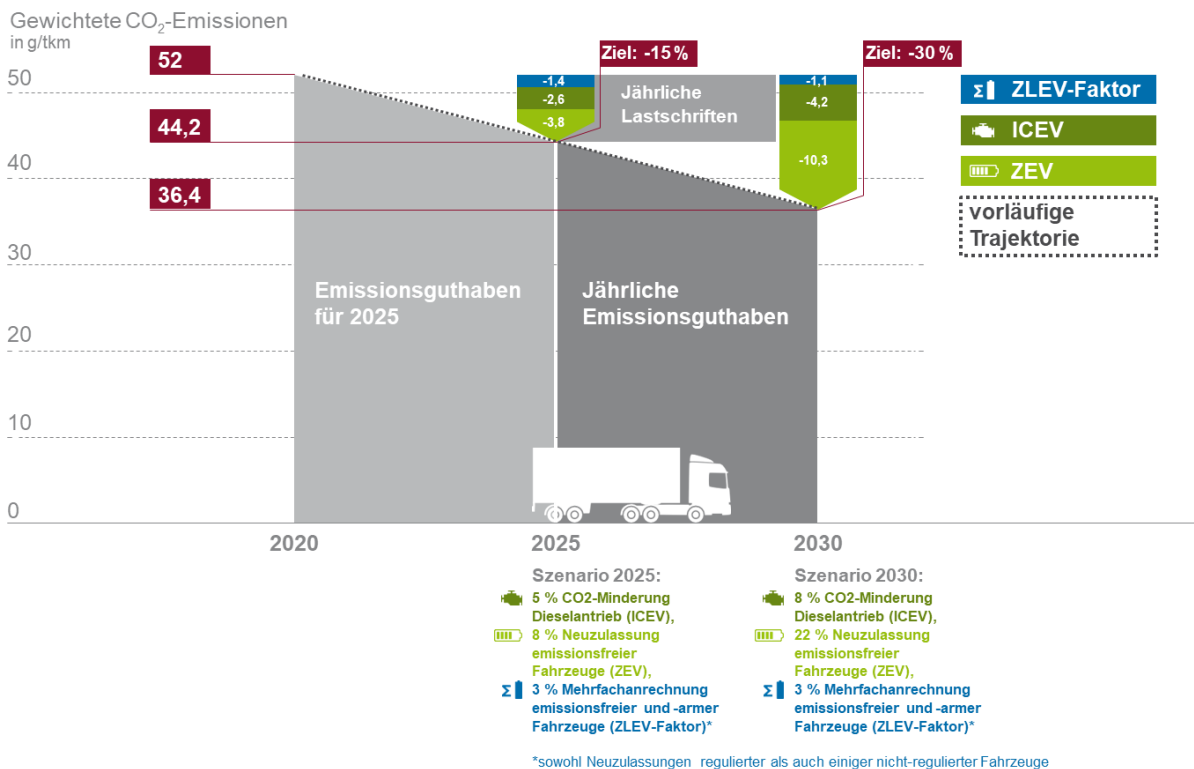
Der notwendige Treibhausgasinderungspfad für Deutschland ist allgemein anerkannt, ein sektorspezifisches Minderungsziel von 48% bis zum Jahr 2030 im Bundesklimaschutzgesetz und eine Zielgröße von einem Drittel an strombasierter Fahrleistung im Straßengüterverkehr ebenfalls bis 2030 im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung verankert. Bislang fehlt ein festgeschriebener Technologiepfad zur Zielerreichung, es zeichnet sich jedoch eine zunehmende Marktbelebung bei alternativen Antrieben im Straßengüterverkehr ab, die einen deutlichen Bruch zur bisherigen Dominanz des Diesel-Antriebs erkennen lässt, und auf mehrere Veränderungen in den Rahmenbedingungen zurückgeht.

Zentrale Änderungen der regulativen Rahmenbedingungen zielen auf das Marktangebot, die Nachfrage und den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit alternativem Antrieb.

Die 2019 in Kraft getretenen CO₂-Emissionsstandards setzen erstmals EU-weite verbindliche Reduktionsziele für die Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge (> 16 Tonnen zGG). Fahrzeughersteller sind verpflichtet, die Tank-to-Wheel-, also die direkten Emissionen der Neufahrzeugflotten ab 2025 um 15 % und ab 2030 um 30 % gegenüber dem Niveau von 2019/2020 zu senken. Zwar wäre eine Erreichung der Zielwerte unter Ausreizung der Optimierungspotenziale des verbrennungsmotorischen Antriebs möglich, jedoch deuten aktuelle Analysen und Verlautbarungen der Hersteller darauf hin, dass diese Option bis zum Jahr 2030 mit weniger als einem Drittel zur Zielerreichung beitragen soll und nicht vollständig ausgereizt wird (Göckeler et al. 2020). Im Umkehrschluss bedeutet dies einen höheren Anteil an erforderlichen Null-Emissions-Fahrzeugen bis zum Jahr 2030 (siehe Abbildung 3). Zahlreiche Herstellerankündigungen aus jüngster Zeit, die zunehmende Investitionen in neue Antriebsoptionen und das Angebot von Serienfahrzeugen sowie das Ende der Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren beinhalten, bestätigen diese Vermutung.

Abbildung 3: EU-CO₂-Flottengrenzwerte für schwere Nfz und Szenarien der Zielerfüllung

Werte im EU-Durchschnitt auf Basis vorläufiger Referenzwerte.



Quelle: Göckeler et al. 2020

Die staatliche Förderung von Null-Emissionsfahrzeugen bei der Beschaffung reduziert die Zusatzkosten von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben und setzt Anreize auf der Nachfrageseite für deren Beschaffung.

Die befristete Befreiung von schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben von der Lkw-Maut (bis 2030) setzt zusätzliche Kostenanreize in der Nutzungsphase bei mautpflichtigen Fahrzeugen (> 12 Tonnen). Die Einführung eines CO₂-Preises für den Kraftstoffeinsatz im Verkehr ab 2021 sowie die Erweiterung der Lkw-Maut um eine CO₂-Komponente im Rahmen der Revision der Eurovignetten-Richtlinie (Göckeler et al. 2020), gibt zudem eine Perspektive für längerfristige Betriebskostenvorteile klimaschonender Antriebe.

Weitere Anreize für einen Technologiewechsel werden durch die zunehmend restriktive Behandlung von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen in urbanen Räumen und eine verschärfte Luftschadstoffregulierung gesetzt. Im Nah- und Regionalverkehr sind diese Maßnahmen besonders relevant.

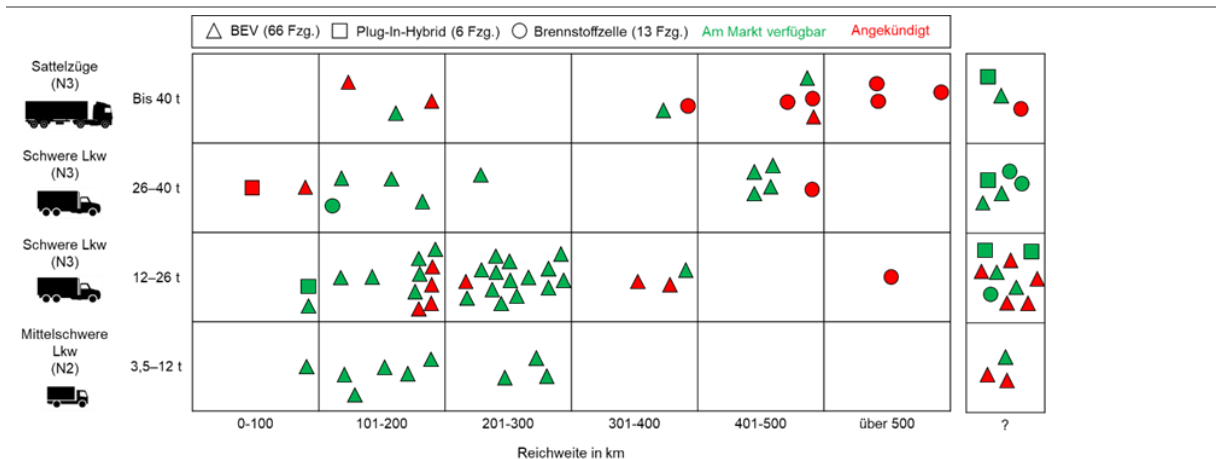
Mit Blick auf den batterieelektrischen Antrieb kann der Nutzfahrzeugsektor zudem verstärkt von den Lernkurveneffekten aus dem Pkw-Markt profitieren, der sich durch eine deutlich fortgeschrittene Technologieentwicklung und -anwendung auszeichnet. Hohe Investitionen in die Entwicklung und Massenfertigung von Batterien für die automobilen Anwendung haben in den vergangenen Jahren zu einer starken Steigerung der Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig sinkenden Kosten geführt.

2.2.2 Batterie-Lkw

Das Fahrzeugangebot bei Batterie-Lkw ist derzeit noch beschränkt. Gegenwärtig existieren auf dem Markt hauptsächlich Lkw mit Elektromotor von kleineren Unternehmen, die konventionelle Lkw zu

Elektro-Lkw umrüsten. Ihre Stückzahlen belaufen sich auf nur wenige Einheiten pro Jahr. Daneben drängen neue Hersteller rein elektrischer Lkw wie Nikola oder Hyzon auf den europäischen Markt, am Markt verfügbar sind die Fahrzeuge der genannten Hersteller jedoch noch nicht.

Abbildung 4: Aufteilung am Markt verfügbarer und angekündigter Elektro-Lkw nach Gewichtsklasse und elektrischer Reichweite



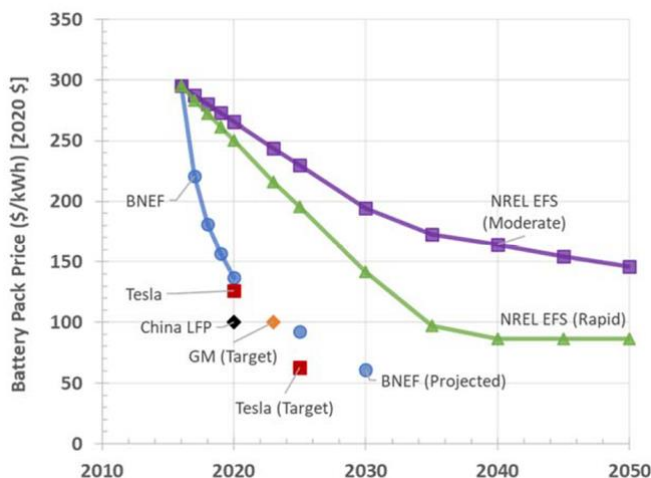
Quelle: Eigene Darstellung.

Die etablierten Hersteller testen seit einiger Zeit Prototypen bzw. Vorserienmodelle mit ausgewählten Kunden. Die ersten elektrischen Modelle stehen hier nun kurz vor dem regulären Markteintritt bzw. sind in kleinen Stückzahlen bereits am Markt verfügbar. Für die kommenden Jahre haben so gut wie alle etablierten Hersteller einen Markteintritt von Batterie-Lkw auf breiter Front angekündigt. Unterschiede gibt es bei der Frage, für welche Einsatzgebiete Elektro-Lkw angeboten bzw. angekündigt werden. Im Bereich der kleinen Lkw-Klassen, die in der Regel vergleichsweise geringe Tagesfahrleistungen erreichen, haben fast alle Hersteller batterieelektrische Modelle angekündigt. Im Bereich der schweren Fernverkehrs-Lkw plant v.a. der Volkswagen-Konzern (MAN und Scania) sowie die US-amerikanischen Firmen Tesla und Nikola batterieelektrische Modelle. Die größten europäischen Lkw-Hersteller verfolgen übereinstimmend allerdings auch im Fernverkehrssegment das Ziel der Dekarbonisierung und haben angekündigt, ab dem Jahr 2040 nur noch Lkw herzustellen, die mit Strom, Wasserstoff oder Biokraftstoffen fahren.²

Ein wichtiger Faktor für den Batterie-Lkw-Markt insbesondere in den größeren Lkw-Klassen ist der Batteriepreis. Stark fallende Batteriepreise in den vergangenen Jahren (siehe Abbildung 5), die deutlich unterhalb der zuvor gemeinhin prognostizierten Werte lagen, haben erst die Voraussetzungen geschaffen, dass Batterie-Lkw für den Einsatz im Fernverkehr nunmehr ernsthaft in Erwägung gezogen werden. Die Anschaffungskosten rücken damit auch für einen breiten Einsatz langsam in einen realistischen Bereich. Allerdings muss auch ein erhöhter Batterieverschleiß bei routinemäßigem Betrieb mit hohen Ladeleistungen beachtet werden (wie beispielhaft in Abbildung 6 gezeigt). Die resultierenden Kosten für einen möglicherweise anfallenden vorzeitigen Batteriewechsel müssen bei der Bestimmung der Gesamtkosten berücksichtigt werden und können (in Kombination mit höheren spezifischen Strompreisen für das Schnellladen) wirtschaftliche Grenzen setzen. Des Weiteren gehen große Batterien mit einem erheblichen Mehrgewicht einher, was den Stromverbrauch spürbar erhöht. Für eine Batterie-Sattelzugmaschine mit einer Reichweite von 100 km ist beispielsweise mit einem Batteriegewicht von etwa 0,7 t zu rechnen, bei einer Reichweite von 400 km sind es hingegen 2,8 t. Der Stromverbrauch erhöht sich dadurch um etwa 6 %.

² <https://www.acea.be/uploads/publications/acea-pik-joint-statement-the-transition-to-zero-emission-road-freight-trans.pdf>

Abbildung 5: Entwicklung der Batteriepreise - Marktpreise, Prognosen und Herstellerziele

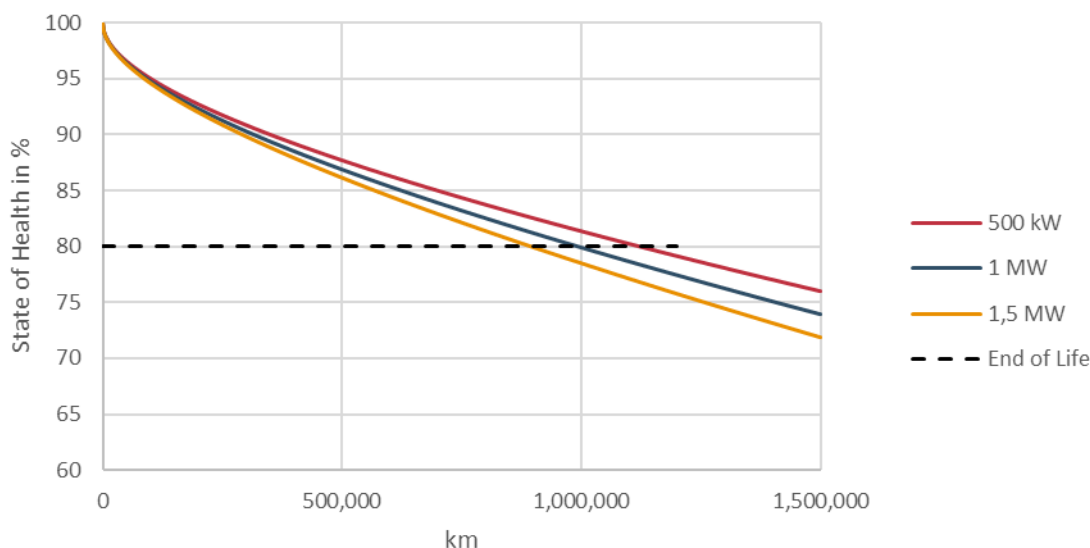


Quelle: Phadke et al. 2021.

Aktuell liegt der Fokus des verfügbaren Marktangebotes überwiegend auf den Gewichtsklassen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 26 t (siehe Abbildung 8). Die überwiegende Anzahl dieser Lkw besitzt nach aktuellen Hersteller-Spezifikationen Batteriekapazitäten von bis zu 350 kWh. Damit können nach den Herstellerangaben teilweise Reichweiten von bis zu 300 km ohne Zwischenladen erreicht werden. Der Einsatzbereich der bisherigen Elektro-Lkw beschränkt sich aus diesem Grund bisher vorrangig auf den städtischen Verteilverkehr bzw. Regionalverkehr. Fahrzeuge mit erzielbaren Reichweiten über 500 km ohne Zwischenladen sind im bisherigen Marktangebot nicht verfügbar. Der Fernverkehr kann deshalb mit dem bisherigen Fahrzeugportfolio ohne Stopp für das Zwischenladen bisher in der Regel noch nicht abgedeckt werden.

Abbildung 6: Abschätzung der Batteriealterung bei verschiedenen Ladeleistungen

für einen BEV400-Lkw mit 640 kWh Batteriekapazität und 600 km Tagesfahrleistung











Quelle: Eigene Berechnung (auf Grundlage des Batteriealterungsmodells von Wang et al. mit Parametrierung aus De Gennaro et al. 2020).

Bei BEV-Lkw ist ein Einsatz im Fernverkehr nur durch das effiziente Zusammenwirken unterschiedlicher Angebotskonzepte von Ladeinfrastruktur möglich. Als zentrale Säule wird von den Herstellern mittelfristig das Übernacht-Laden im Depot angesehen. Zusätzlich kann bei Standzeiten während des Be- und

Entladens Strom nachgeladen werden, sofern dort Ladeinfrastruktur existiert und die Stopps eine gewisse Mindestdauer aufweisen. Darüberhinausgehender Strombedarf auf Fernstrecken kann mittels Hochleistungsschnellladen gedeckt werden, sofern die Fahrzeuge entsprechende Ladeleistungen unterstützen. Ein Standard zur Übertragung von Leistungen > 350 kW ist derzeit in Entwicklung, siehe Abschnitt 2.3.3.

Abbildung 7: Übersicht des derzeitigen Angebots elektrischer Lkw

	 Batterieelektrischer-Lkw	 Oberleitungs-Lkw	 Brennstoffzellen-Lkw
 OEM-Hersteller	Daimler Trucks, MAN Truck and Bus, Volvo Trucks, DAF, Renault Trucks, Scania	Scania (und Siemens)	Scania, Hyundai Truck and Bus
 Fahrzeug-einsatz	Vor-Serienmodelle	Prototypen	Prototypen, Vor-Serienmodelle
 Technische Spezifikationen	Gewicht: bis 26 t E-Motor: bis 250 kW Batterie: bis 240 kWh Reichweite: bis 200 km	Gewicht: bis 40 t E-Motor: 130 kW Diesel-Hybrid Ausfahrbarer Stromabnehmer	Gewicht: bis 36 t E-Motor: bis 350 kW Batterie: bis 73 kWh H ₂ -Tank: 32 kg, 350 bar Reichweite: 400 km
 Derzeitige Einsatzgebiete	Nah- und Regionalverkehr	Pendelverkehr	Nah- und Regionalverkehr in der Schweiz und Norwegen
 Energieinfrastruktur	Depotladen bei unter 150 kW	3 Teststrecken á 4-5 km auf Bundesautobahnen und -fernstraßen	Bislang keine Lkw-H ₂ -Tankstelle in Deutschland

Quelle: Eigene Darstellung.

2.2.3 Oberleitungs-Lkw

Die Problematik des Energiespeichers und der Zeitverluste beim stationären Laden wird beim Oberleitungs-Lkw durch eine direkte Stromversorgung aus einer elektrischen Oberleitung gelöst und bisher insbesondere als Lösung für den schweren Straßengüterverkehr mit hohen Tagesfahrleistungen diskutiert. Die Fahrzeuge werden mit einem ausfahrbaren Stromabnehmer ausgerüstet, ähnlich zu Anwendungen bei Straßenbahnen oder einigen Stadtbussen. Dieser dient auf mit Oberleitungen ausgestatteten Strecken als Range Extender, der die Traktionsbatterie mit zusätzlichem Strom versorgt. Der Stromabnehmer bzw. Pantograph kann während der Fahrt aus- und eingefahren werden, wobei die Erkennung der Oberleitung sensorgestützt erfolgt. So stellen Überholmanöver, Tunnel und Brücken keine Einschränkungen für den Fahrbetrieb von Oberleitungs-Lkw dar.

Derzeit werden mit Stromabnehmern ausgestattete Elektro-Lkw im Rahmen von zwei Feldversuchen auf deutschen Autobahnabschnitten getestet (A5 zwischen Frankfurt und Darmstadt sowie A1 zwischen Hamburg und Lübeck), zuvor fanden bereits Feldversuche auf öffentlichen Straßen in Schweden und Kalifornien statt, die dritte deutsche Strecke auf der Bundesstraße 462 in Baden-Württemberg steht kurz vor der Inbetriebnahme. Bei den aktuell im Einsatz befindlichen Testfahrzeugen handelt es sich um Diesel-Hybridfahrzeuge der Firma Scania (Modell R450 Hybrid), welche über einen Elektromotor mit einer Leistung von 130 kW und einen Verbrennungsmotor mit einer Leistung von 330 kW verfügen (Tabelle 4 4). Für kommende Testfahrzeuge sind leistungsstärkere Elektromaschinen und eine größere Batteriekapazität angedacht. Ein weiterer Schritt wäre dann die Ausstattung rein elektrischer Fahrzeuge mit Stromabnehmern für einen komplett emissionsfreien Betrieb auf der Langstrecke.

Die Zusatzkosten eines O-Lkw gegenüber einem Diesel-Referenzfahrzeug sind maßgeblich von der technischen Auslegung (Größe der Batterie) sowie den erzielbaren Lernkurveneffekten mit zunehmendem Produktionsvolumen (u.a. Kosten des Pantographen) abhängig. So werden die Kosten eines Pantographen aktuell auf etwa 40.000 € geschätzt und eine Kostendegression bei einer Serienfertigung auf Stückkosten von etwa 12.000 € für realistisch gehalten (Kühnel et al. 2018). Durch die tendenziell geringere

Batteriegröße bleiben die Zusatzkosten jedoch deutlich unter dem Niveau von batterieelektrischen Fern-Lkw mit 400 km Reichweite oder mehr. Der Vergleich der Gesamtnutzungskosten zeigt in mehreren Studien, dass O-Lkw dennoch aufgrund der Betriebskostenvorteile des elektrischen Betriebs bereits in den nächsten Jahren – einen entsprechenden Infrastrukturausbau vorausgesetzt – Kostenparität mit Diesel-Lkw erreichen könnten (NPM, 2020; Hacker et al., 2020b).

Abbildung 8: Prinzip des Oberleitungs-Lkw



Quelle: Öko-Institut 2020

Oberleitungs-Lkw sind primär für den Langstreckenbetrieb konzipiert, um Reichweitenbegrenzungen durch die Batterietechnologie zu umgehen. Solange noch kein ausgedehntes Oberleitungsnetz existiert, erfolgt die Erprobung derzeit allerdings im Einsatz bei regionalen Pendelverkehren. Ob solche Verkehre auch perspektivisch ein sinnvoller Anwendungsfall für O-Lkw sein können, ist Gegenstand aktueller Forschung.

2.3 Infrastrukturen zur Stromaufnahme auf Fernstrecken

2.3.1 Allgemeine Anforderungen

Während der im Straßengüterfernverkehr dominierende, dieselmotorische Antrieb ein flächendeckendes und gut ausgelastetes Tankstellennetz vorfindet, ist die Energieversorgungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe bisher als Netz, jenseits von Einzelanlagen, nicht verfügbar. Die Bereitstellung einer bedarfsgerechten, flächendeckenden Versorgungsinfrastruktur ist jedoch die Voraussetzung für den Einsatz von alternativen Antrieben im Straßengüterfernverkehr.

Der Straßengüterfernverkehr zeigt eine starke Konzentration des Verkehrsaufkommens auf das Fernstraßennetz und innerhalb des Autobahnnetzes wiederum eine weitere Konzentration auf zentrale Verbindungsachsen zwischen wichtigen Wirtschaftszentren. So finden 65% des Straßengüterfernverkehrs auf Autobahnen auf nur etwa einem Drittel des Netzes statt. Ein bedarfsgerechter Ausbau alternativer Energieversorgungsinfrastruktur muss also neben der Abdeckung in der Fläche auch der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der Infrastruktur je nach Verkehrsaufkommen gerecht werden. So sind entlang der Hauptachsen des Straßengüterverkehrs perspektivisch sehr leistungsfähige Versorgungsinfrastrukturen erforderlich, die sich vorrangig im öffentlichen Raum befinden. In der Fläche ist hingegen eine weniger leistungsfähige bzw. weniger dichte Infrastruktur notwendig, die sich zudem auf den öffentlichen (z.B. an Fernstraßen) und nichtöffentlichen Raum (z.B. Betriebshöfe, Umschlagzentren) verteilen kann.

Mit Blick auf den prognostizierten Markthochlauf von alternativ betriebenen Lkw ist zu beachten, dass die erforderliche Energieinfrastruktur im frühen Marktstadium auf eine nur geringe Nachfrage trifft und

zu diesem Zeitpunkt eine verhältnismäßig geringe Leistungsfähigkeit aufweisen kann. Die jeweilige Energieversorgungsinfrastruktur muss aber perspektivisch in der Lage sein – insbesondere entlang der Hauptkorridore – eine hohe Leistungsfähigkeit zu erzielen und entsprechend ausbaufähig zu sein.

2.3.2 Oberleitungen

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

Das Oberleitungssystem besteht aus der Zuleitung und dem Anschluss an das Mittelspannungsnetz, Unterwerken an der Straße sowie dem eigentlichen Fahrleitungssystem über der Straße. Das Fahrleitungssystem setzt sich aus den stromführenden Fahrdrähten sowie Tragseilen und Masten als Tragsystem zusammen. Die technische Auslegung des Systems kann an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden. So ist eine durchgängige Elektrifizierung von Strecken nicht notwendig, da O-Lkw nicht-elektrifizierte Strecken mit dem hybriden Antrieb überbrücken können oder in einer ersten Ausbaustufe zwar ein nennenswerter Teil des Autobahnnetzes abgedeckt aber nur teilweise elektrifiziert wird. Ein solches Lückenkonzept kann z.B. bei zu geringen Durchfahrthöhen (Tunnel, Brücken) oder auch bei weniger frequentierten Abschnitten relevant sein.

Oberleitungen entlang der Autobahn

Der Einsatz von Oberleitungs-Lkw wird insbesondere für den schweren Straßengüterfernverkehr (Lkw >26 t) diskutiert. Ein sinnvolles Basisnetz stellt einen Kompromiss zwischen den Kosten für den Ausbau der Infrastruktur und seinem Nutzen hinsichtlich der Elektrifizierung des Verkehrs dar. Der schwere Straßengüterverkehr konzentriert sich vorwiegend auf Fernstraßen. Ein mögliches Zielnetz, das in verschiedenen Studien identifiziert wird, umfasst etwa 4.000 km Strecke und im Wesentlichen die einstelligen Autobahnen A1 bis A9. Über dieses Kernnetz lassen sich die meisten großen Wirtschaftszentren in Deutschland untereinander vernetzen. Dennoch unterscheiden sich die einzelnen Strecken teilweise deutlich voneinander, u.a. hinsichtlich der Fahrzeugzahlen, der Homogenität des Verkehrsflusses („Korridorcharakter“) sowie parallellaufender Schienengüterverkehre.

Vor diesem Hintergrund bietet sich im Straßengüterfernverkehr die Möglichkeit, mit einer räumlich verhältnismäßig stark konzentrierten Infrastruktur eine große Anzahl an potenziellen Nutzern entlang dieser Korridore zu erreichen und damit perspektivisch eine hohe Infrastrukturauslastung sicherzustellen. Die Genehmigung und der Aufbau für eine Oberleitungs-Infrastruktur über mehrere hundert Kilometer erfordern, wie bei anderen Infrastrukturen für alternative Antriebe auch, einige Jahre, wäre aber voraussichtlich deutlich schneller als der Ausbau vergleichbarer Streckenkilometer im Bahnbereich zu realisieren. Ein Vorteil beim Aufbau entlang von Bundesautobahnen ist, dass diese bereits im Besitz des Bundes sind und kein zeitaufwändiger Erwerb von Konzessionen notwendig ist, der Bau kann nach Planung inkl. Planfeststellungsverfahren und Genehmigung direkt erfolgen.

Abbildung 9 Mögliche erste Oberleitungs-Strecken

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



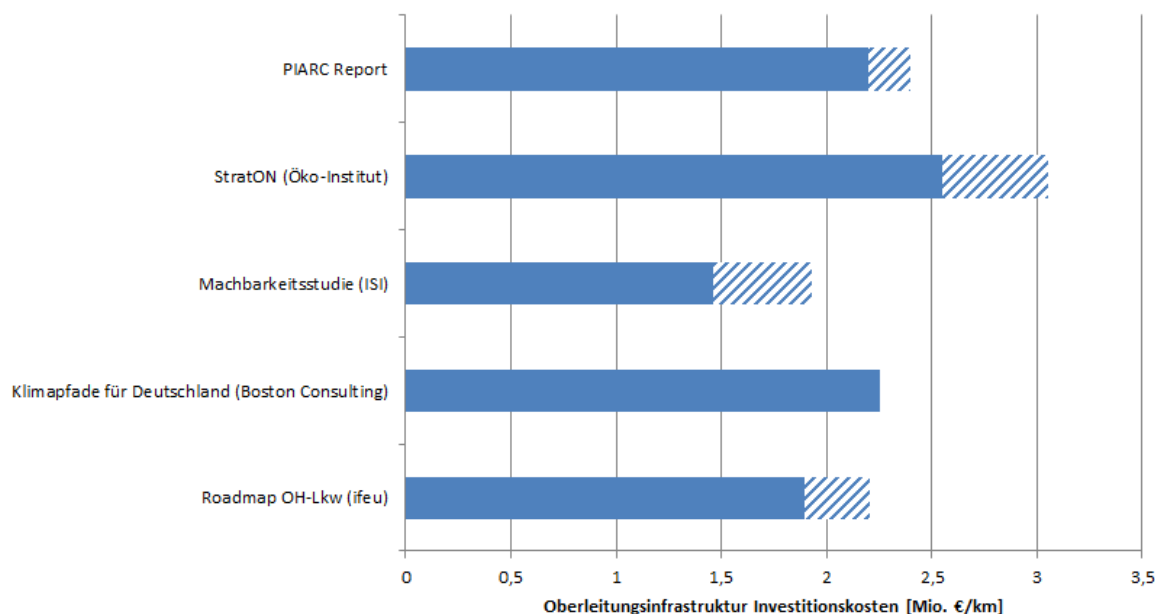
Quelle: (Hacker et al., 2020)

Kosten

In verschiedenen Studien wurden Abschätzungen der Infrastrukturkosten pro elektrifizierter Strecke in beide Fahrtrichtungen durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 10 zusammengefasst und gelten jeweils für ein ausgebautes Netz mit entsprechend hoher Befahrungsstärke. In Wietschel et al. (2017) wurde eine detaillierte Bottom-up-Betrachtung der einzelnen Systemkomponenten durchgeführt, auf die sich auch Kühnel et al. (2018) und Jöhrens et al. (2020) beziehen.

Abbildung 10: Spezifische Infrastrukturkosten für ein Oberleitungssystem

Die sich aus den Studien jeweils ergebende Bandbreite ist schraffiert dargestellt.³



Quelle: Eigene Darstellung

Wichtige Einflussfaktoren auf die Kosten sind der Leistungsbedarf pro Kilometer (d.h. wie viele Oberleitungs-Lkw gleichzeitig auf einem Streckenabschnitt versorgt werden können), das Spannungsniveau sowie die gewählte Art der Netzanbindung⁴. In Kühnel et al. (2018) wurden die spezifischen Infrastrukturkosten für drei verschiedene Ausbaustände eines Oberleitungsnetzes mit jeweils entsprechenden Befahrungsstärken quantifiziert. Es zeigt sich, dass die Kosten pro Streckenkilometer bei einem ausgebauten Oberleitungssystem (und entsprechendem Oberleitungs-Lkw-Verkehr) mit knapp 3 Mio. €/km deutlich höher liegen als in der ersten Phase der Systemeinführung (ca. 1,7 Mio. €/km). Zu Beginn der Systemeinführung, wenn noch wenige Fahrzeuge unterwegs sind, kann das Netz also zu vergleichsweise geringen Kosten aufgebaut werden. Später muss es dann ggf. entsprechend der auftretenden Befahrungsstärken ertüchtigt werden, kann dann aber auch durch höhere Nutzerzahlen besser refinanziert werden.

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

³ Die Studie „Roadmap OH-Lkw“ beschreibt die angegebene Bandbreite den Unterschied zwischen der Abschreibung zzgl. Instandhaltung und den tatsächlich zu tätigen Investitionen (inkl. Instandhaltung) bis zum Jahr 2030.

⁴ Denkbar sind hier die Anbindung der Unterwerke an vorhandene Mittelspannungsnetze sowie der Bau eigener MS-Netze entlang der elektrifizierten Straße zur Versorgung der Oberleitungsinfrastruktur. Untersuchungen des Fraunhofer IEE im Projekt Roadmap OH-Lkw ergaben, dass letzteres Vorgehen in der Regel wirtschaftlicher ist.

2.3.3 Hochleistungsschnellladen

Eine erhebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen schwerer Lkw kann auch durch den Einsatz von Batterie-Lkw erfolgen. Aufgrund der hohen Tagesfahrleistungen vieler schwerer Lkw ist ein regelmäßiges Nachladen solcher Batterie-Lkw im öffentlichen Raum, bspw. an Bundesautobahnen, notwendig.

Anforderungen und Eigenschaften

Für eine Abschätzung der technischen Auslegung der Infrastruktur werden Rahmenannahmen hinsichtlich der Fahrzeuge sowie der Infrastruktur selbst benötigt. Die Batterie ist dabei so ausgelegt, dass die typische Lenkzeit von 4,5 Stunden ohne Pause zurückgelegt werden kann. Für die durchschnittliche Ladeleistung wird als untere Grenze die heutige Leistungsfähigkeit von Pkw-Infrastruktur, ca. 350 kW, angenommen. Dies entspricht, bei einer angenommenen Fahrleistung von 300 km in 4,5 Stunden, einer Ladedauer von einer Stunde. Da eine Verlängerung der Tank- und damit Standzeit von Spediteuren in der Regel nicht akzeptiert wird (Kluschke et al. 2019), sind zukünftig für das Laden in Pausenzeiten der Einsatz von Hochleistungsladern mit einer durchschnittlichen Ladeleistung von 720 kW und eine Spitzenleistung von ca. 1 MW notwendig (*Megawatt charging* – MCS). Dies würde das Nachladen innerhalb der gesetzlichen Pause von 45 Minuten inklusive Wartezeiten ermöglichen.

Derzeit existiert noch kein technischer Standard zum Laden von E-Lkw mit über 350 kW Leistung. Der derzeitige CCS Standard ermöglicht bis zu 350 kW. Es werden derzeit Standards mit bis zu 2 MW Ladeleistung vor allem für den Einsatz bei Lkw entwickelt, die ca. 2023 verabschiedet werden könnten⁵. Ein Konsortium aus Industriepartnern und Forschungseinrichtungen hofft 2023 die ersten Megawatt-Ladesäulen in Deutschland zu betreiben.⁶

Ladenetz entlang der Autobahn

Eine erste Studie hat ein Hochleistungsladenetz entlang der Autobahnen für Deutschland skizziert (Plötz et al., 2020). Bei einem Netz mit einem Abstand von 100 km zwischen benachbarten Ladeorten ergeben sich insgesamt 142 Ladestandorte. Für Szenarien mit einem Abstand von 50 km ergeben sich 262 Ladestandorte. Diese Abstände entsprechen der aktuellen Forderung der Lkw-Hersteller für ein europäisches Netz an Lademöglichkeiten für Elektro-Lkw entlang der Autobahnen (ACEA und T&E, 2021).

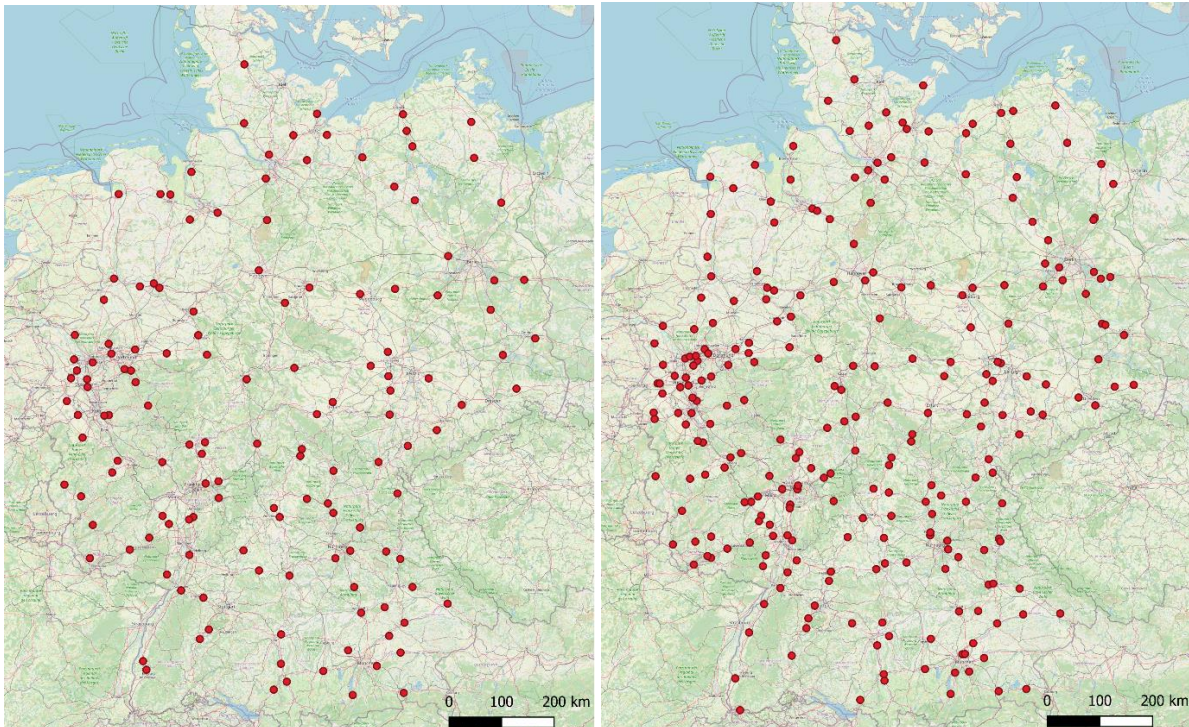
Die Ladenetze sind beispielhaft in Abbildung 11 gezeigt. Man beachte, dass die Karten mögliche Standorte entlang den BAB im gewünschten Abstand von 50 bzw. 100 km zeigen. Das zugrundeliegende Modell ist aber nicht geeignet, Aussagen über den genauen Standort von Ladeinfrastruktur zu machen, da hierfür lokale Besonderheiten wie Verfügbarkeit von Stellflächen für Lkw oder Netzanschlussmöglichkeiten berücksichtigt werden müssen. Dieser Detailgrad kann im vorliegenden Modell nicht direkt integriert werden. Die Karten zeigen daher eine plausible und realistische Verteilung der Ladestandorte über Deutschland, aber die genaue Position der Ladestandorte kann unter Berücksichtigung lokaler Bedingungen auch etwas anders sein, bspw. ein oder zwei Ausfahrten in jede Richtung verschoben oder auf Flächen, die in der Nähe aber nicht direkt an der BAB sind.

⁵ Vgl. <https://insideevs.com/news/372749/charin-hpccv-over-2-mw-power/> und <https://cleantechnica.com/2020/10/13/nrel-charin-test-out-megawatt-charging-system-in-usa/>

⁶ Vgl. <https://www.electrive.net/2021/03/10/buendnis-forciert-aufbau-eines-lkw-ladenetzes-in-deutschland/>

Abbildung 11: Mögliche Standorte Hochleistungsladen in Deutschland 100 km (links) und 50 km (rechts)

Mit einem Abstand von 100 km (links) bzw. 50 km (rechts) zwischen den Ladeorten.

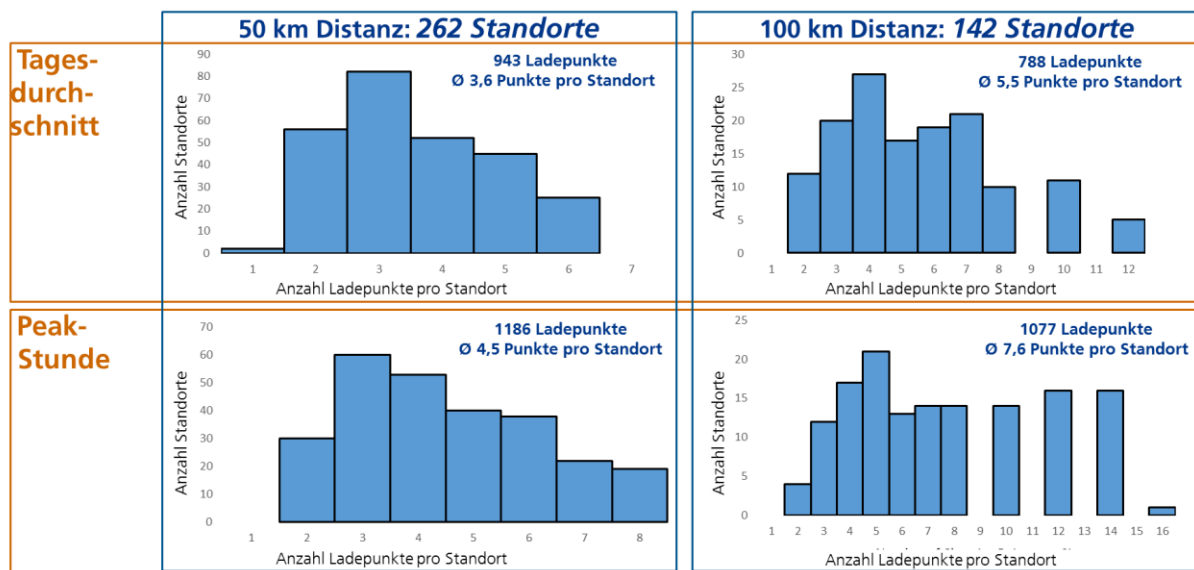


Quelle: Plötz et al. (2020)

Die Anzahl der Ladepunkte je Station hängt vom Anteil der elektrischen Fahrzeuge in der Lkw-Flotte, der angenommenen Ladedauer sowie der Auslegung der Stationen auf den täglichen Durchschnittsverkehr bzw. die Peakstunde eines Tages ab. Im Szenario *Ausbaunetz* (15 % des Lkw-Bestandes über 7,5 t sind BEV, 30 min Ladedauer, 50 km Abstand) werden laut Plötz et al. (2020) bei Auslegung auf den Tagesdurchschnitt 943 Ladepunkte, wiederum verteilt auf 262 Standorte, benötigt. Dies entspricht 3,6 Ladepunkten pro Standort. Bei Peakstundenauslegung werden durchschnittlich 4,5 Ladepunkte pro Standort, benötigt (Plötz et al., 2020). Wird der Abstand der Standorte auf 100 km verdoppelt, so werden für die Auslegung auf den Tagesdurchschnitt 788 Ladepunkte benötigt. Soll zusätzlich das Verkehrsaufkommen auch in den Peakstunden innerhalb der Vorgaben abgefertigt werden können, so werden 1.077 Ladepunkte benötigt. Damit führt eine Verdopplung des Abstandes zu einem leichten Rückgang der benötigten Ladepunkte. Allerdings verdoppelt sich in diesem Fall die maximale Anzahl Ladepunkte je Standort von sechs auf zwölf (Tagesdurchschnittsauslegung) bzw. acht auf 16 (Peakauslegung). Damit werden an den einzelnen Standorten deutlich höhere Leistungen benötigt (Plötz et al. 2020).

Abbildung 12 fasst die Ladepunktverteilung bei 15 % BEV und einer durchschnittlichen Ladedauer von 30 Minuten zusammen (Plötz et al. 2020). Wird die durchschnittliche Ladedauer von 30 min auf 60 min verdoppelt, so steigt auch die Anzahl der Ladepunkte an, allerdings wiederum unterproportional. Bei einem Abstand von 50 km werden hier 2.338 Ladepunkte benötigt, bei einem Abstand von 100 km werden 2.236 Ladepunkte benötigt. Allerdings liegt die Peakleistung hier bei ca. 500 kW je Ladepunkt während sie in einem Szenario mit einer durchschnittlichen Ladedauer von 30 min bei 1.000 kW liegt (Plötz et al. 2020).

Abbildung 12: Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 30 Minuten Ladedauer



Quelle: Plötz et al. (2020).

Kosten

Für die Ladeinfrastruktur wird, basierend auf der durchschnittlichen Ladeleistung der Fahrzeuge, eine Peakleistung zwischen 500 kW und 1.000 kW angenommen. Für eine erste Kostenkalkulation der Infrastruktur werden Kosten in Höhe von 400.000 €/MW Peakleistung unterstellt⁷. Darin enthalten sind die Installation der Ladestation, der Netzanschluss sowie der Transformator (Kühnel et al., 2018). Es handelt sich dabei um eine Kostenschätzung für eine Serienproduktion, erste Prototypen können zu deutlich höheren Kosten führen (heute ca. 1 Mio. €/Ladepunkt). Zusätzlich fallen Kosten für den Erwerb geeigneter Flächen an. Diese sind jedoch deutlich standortabhängig. Da die Netzanschlusskosten von den örtlichen Gegebenheiten teilweise abhängig sind, unterliegen auch sie deutlichen Schwankungen.

Ein langfristiges Gesamtsystem mit einem dichten MCS-Netz (alle 25 km eine MCS-Lademöglichkeit) und 100 % BEV würde ca. 500 Standorte entlang der Autobahnen umfassen und hätte im Mittel ca. 24 Ladepunkte pro Standort (bzw. 12 Punkte pro Richtung). Bei 0,4 Mio. € pro Ladepunkt ergeben sich ca. 5 Mrd. € Gesamtinvestition.

2.4 Akteursstrukturen und Akzeptanz

Damit eine Innovation sich durchsetzen und verbreiten kann, muss sie gesellschaftlich unterstützt werden. Relevant für diese Unterstützung sind zum einen Akteure am Markt, wie beispielsweise Kaufinteressierte auf der Nachfrageseite oder Hersteller auf der Angebotsseite. Darüber hinaus nimmt aber auch eine Vielzahl anderer Akteursgruppen Einfluss auf die Entwicklung und Verbreitung von Innovationen – im sogenannten Innovationssystem rund um die neue Technologie. Bei der Betrachtung der Infrastruktur für elektrische Lkw und dem Vergleich zwischen mehreren Optionen, wie Hochleistungsschnellladen und Oberleitungen, müssen daher neben Akteuren am Markt auch weitere Akteursgruppen in die Betrachtung mit einbezogen werden, wie bspw. politische Akteure, Akteure aus Forschung und Entwicklung, Beeinflusser, wie große Geldgeber sowie als Fundament oder Reflektion der allgemeinen Öffentlichkeit unter anderem Journalisten oder Wähler. Eine Unterstützung oder zumindest Toleranz – hier als soziale

⁷ basierend auf Wietschel et al. (2017), Kühnel et al. (2018), NPE (2015), Gnann (2017) sowie Expertenschätzungen.

Akzeptanz bezeichnet – durch alle diese für das Innovationssystem relevanten Akteursgruppen ist notwendig, damit sich Infrastrukturen für elektrische Lkw durchsetzen und verbreiten können (Burghard und Scherrer 2020).

Abbildung 13: Leifragen zu Akteuren und Akzeptanz von Oberleitungen und Hochleistungsladen.



Quelle: Eigene Berechnung

Zunächst lassen sich einige gemeinsame Merkmale der Akteursstrukturen zu Oberleitungen und Hochleistungsladen feststellen. Beide Innovationen verbinden das Energiesystem mit dem Transportsystem. Straßeninfrastruktur und Energieinfrastruktur müssen koordiniert werden, was dazu führt, dass Akteure aus dem Energiesektor eine zentrale Rolle im Innovationssystem einnehmen. Zudem verfolgt die Einführung dieser beiden Innovationen die gleichen Ziele: Beide Systeme sollen einen elektrifizierten Straßengüterverkehr über lange Strecken ermöglichen und sprechen damit potenziell dieselben Nutzergruppen an. Im Detail unterscheiden sich die Technologien jedoch: Die Infrastrukturen sind unterschiedlich stark sichtbar im Straßenraum, fahrzeugseitig bestehen unterschiedliche Anforderungen und Geschäftsmodelle können anders aussehen. Trotz großer Überschneidungen in den Akteurssystemen kann daher davon ausgegangen werden, dass sich die Akteure zu beiden Technologien unterschiedlich positionieren. Um diese Positionen zu vergleichen, fassen wir die einzelnen Akteursgruppen in drei übergeordnete Akzeptanzdimensionen zusammen: lokale Akzeptanz, Marktakzeptanz, sowie soziopolitische Akzeptanz. Für jede Dimension diskutieren wir relevante Akteure sowie bereits erforschte oder mögliche Akzeptanzausprägungen und -einflüsse.

Lokale Akzeptanz und Akteure meint hier die Reaktionen von lokal betroffenen Akteuren auf die Errichtung von Infrastruktur für elektrische Lkw, wie Anwohner, Verkehrsteilnehmer oder Autobahnmeisterei, Polizei und Rettungsdienst. Häufige Reaktionen bei der Errichtung von Oberleitungsinfrastruktur sind vermutete Verkehrsprobleme in der Bauphase, aber auch Windgeräusche und optische Vorbehalte (Burghard und Scherrer 2020). Gleichzeitig haben die bisherigen Erfahrungen aus den Feldversuchen gezeigt, dass die Errichtung von Oberleitungsinfrastruktur den Verkehr kaum beeinträchtigt. Bei der Installation von Hochleistungsschnellladesäulen sind weniger Akzeptanzvorbehalte hinsichtlich möglicher Verkehrsbelastungen zu erwarten, da hier kein direkter Eingriff in die Straßeninfrastruktur erfolgt. Außerdem führt die geringere Sichtbarkeit dieser Infrastruktur möglicherweise zu einer geringeren öffentlichen Wahrnehmung und weniger Vorbehalten. Sicherheitsthemen könnten bei beiden Infrastrukturen eine Rolle spielen – bei Oberleitungen beim Fahren unter der Infrastruktur, wie bisherige Ergebnisse zeigen, und bei MCS die Kabel und hohen Ströme an den Ladestationen. Insofern gilt es, bei der Errichtung beider Infrastrukturen die Themen Kommunikation und Partizipation mitzudenken.

Marktakzeptanz und -akteure können sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite betrachtet werden. Hier müssen weiterhin Infrastruktur und Fahrzeuge unterschieden werden. Auf der Angebotsseite der Fahrzeuge sind die zentralen Akteure bei beiden Technologien etablierte Fahrzeughersteller. Ihre Akzeptanz für die jeweilige Art des Ladens entscheidet mit, ob fahrzeugseitig Pantographen für die Nutzung an Oberleitungen, Ladebuchsen oder beide Möglichkeiten verbaut und angeboten werden. Aktuell lässt sich dieser Akzeptanzvergleich noch nicht abschließend anstellen. Auf Angebotsseite der Infrastruktur ist noch offen, ob Oberleitungsinfrastruktur und Schnellladesäulen zukünftig von unterschiedlichen Akteursgruppen bereitgestellt werden. Bei der Bereitstellung der Oberleitungsinfrastruktur sind momentan überwiegend etablierte Akteure aus dem System der Bahn aktiv. Gleichzeitig lässt sich feststellen, dass sich das Akteurssystem rund um Oberleitungen insgesamt erst in den letzten Jahren neu gebildet hat (Burghard und Scherrer 2020; Scherrer et al. 2020). Während das Schnellladen im Straßengüterverkehr noch am Anfang steht, so ist es doch möglich, dass dieses Innovationssystem von schon etablierten Akteursbeziehungen im Bereich (Schnell-)Ladeinfrastruktur von Pkw profitieren kann.

Auf der Nachfrageseite nehmen am Markt Speditionen die zentrale Akteursposition ein; für diese spielen insbesondere die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge, die Weiterführung bisheriger Betriebsabläufe, die Befriedigung der Kundenbedürfnisse und die Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle (Burghard und Scherrer 2020; Kluschke et al. 2019). Beide Infrastrukturen bieten den Vorteil, dass durch das Zwischenladen kein Zeitverlust entsteht. Bei Oberleitungen bestehen jedoch größere Einstiegshürden, da für einen wirtschaftlichen Lkw-Betrieb größere Strecken elektrifiziert werden müssen. Insofern könnten hier Speditionen (aber auch Lkw-Hersteller) zunächst noch stärker eine abwartende Haltung einnehmen.

Die dritte Dimension stellt die soziopolitischen Akteure und Akzeptanz dar. Darunter fällt das allgemeine gesellschaftliche Klima bzgl. Infrastruktur für elektrische Lkw; betrachtete Akteure sind bspw. die Gesamtgesellschaft, politische Akteure oder NGOs und Verbände. Bisher hat die Wahrnehmung der breiten Öffentlichkeit für den Straßengüterverkehr kaum eine Rolle gespielt – durch die Errichtung neuer Infrastrukturen und eine sich wandelnde Kultur in Bezug auf Bürgerbeteiligung ändert sich dies. Insbesondere die Kosten (Umfang und Träger der Kosten) für den Aufbau der Infrastruktur sind dabei von Interesse für die Bürger – neben weiteren Aspekten, zu denen für die Oberleitungs-Technologie Ergebnisse vorliegen. So haben Oberleitungen in der Gesellschaft teilweise mit Vorbehalten hinsichtlich der wahrgenommenen Innovativität der Technologie zu kämpfen – begünstigt durch die starke optische Ähnlichkeit mit Oberleitungen des Schienenverkehrs oder für Busse (Burghard und Scherrer 2020). Für Ladestationen könnte das Image positiver ausfallen, wenn diese als innovativer wahrgenommen werden. Möglicherweise ist die voranschreitende Verbreitung von elektrischen Pkw förderlich für die Akzeptanz eines Schnellladenetzes für Lkw. Ein mögliches zukünftiges Narrativ könnte Oberleitungen und Schnellladestationen gemeinsam als integrierte Infrastruktur für Lkw denken (BOLD 2020).

2.5 SWOT-Analyse der Technologien

Im Folgenden werden die jeweiligen Stärken und Schwächen der Konzepte „Stromaufnahme aus Oberleitung“ sowie „stationäres Hochleistungs-Zwischenladen“ gegenübergestellt. Des Weiteren werden Chancen und Risiken der jeweiligen Konzepte dargestellt, die sich aus dem Umfeld (Nutzeranforderungen, Markt, politischer Rahmen) ergeben.

Die dargestellten Punkte lassen sich dabei grob in fünf Bereiche einteilen:

- Betriebliche Aspekte: Inwiefern können die Technologien die Nutzeranforderungen abbilden?
- Wirtschaftlichkeit: Welche Kosten gehen mit dem Infrastrukturaufbau einher, welche Kosten ergeben sich aus Systemsicht?
- Skalierbarkeit: Ändern sich Vor- und Nachteile einer Technologie mit der Marktdurchdringung von Elektro-Lkw?

- Energiewirtschaftliche Aspekte: Welche Herausforderungen bestehen bei der Integration der jeweiligen Infrastruktur in das Energiesystem?
- Akzeptanz: Welche politischen Risiken birgt der Aufbau der jeweiligen Infrastruktur?

2.5.1 Oberleitungen

Es ergeben sich folgende Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken für Oberleitungen.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kapazität, d.h. viele Fahrzeuge können gleichzeitig geladen werden. • Kaum zusätzlicher Platzbedarf für Infrastruktur auf den Verkehrsflächen. • Etablierte Technologie aus Bahnbereich, überschaubare Anpassungen für die Straße notwendig. • Gewisse zeitliche Flexibilität beim Lastprofil, abhängig von der Auslegung der Fahrzeuge. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhebliche Netzwerkeffekte zu erwarten, Kostenbilanz des Systems daher erst bei gewissem Mindestausbau positiv. • Höhere Einstiegshürden, da nennenswerte Strecke für wirtschaftlichen Lkw-Betrieb elektrifiziert werden muss (z.B. längere Pendelstrecke mit großen Verkehrsströmen). • Vor- und Nachlauf der Lkw mit zusätzlichem Speicher (z.B. Batterie) oder Antrieb. Dadurch technisch komplexer. • Technische Reife aufseiten der Fahrzeuge geringer als bei Batterie-Lkw. • Platzbedarf durch Pantographen an der Zugmaschine.
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Kein Pausenbedarf, da das Laden direkt während der Fahrt stattfindet. Vorteil auch im Hinblick auf zukünftige autonome Fahrzeuge. • Nutzung grundsätzlich für alle elektrischen Antriebe möglich, Mehrkosten für Ausrüstung mit Pantograph überschaubar (für den Serienfall). • Pantograph kann perspektivisch auch eine betrieblich attraktive Lösung für stationäres Laden sein. 	<ul style="list-style-type: none"> • Derzeit geringes Interesse bei den meisten Fahrzeugherstellern. • Anpassung der maximalen Fahrzeuglänge notwendig, um Technologie bei SZM mit Schlafkabine in Kombination mit Standard-Aufliegern einsetzen zu können. • Image einer „alten“ Technologie sowie Assoziation mit Oberleitungsbussen und Schienenverkehr. • Wenig Erfahrungen bzgl. Planungs- und Umsetzungszeiträumen, da ausschließlich im öffentlichen Straßenraum (vgl. Stromtrassen-Ausbau).

Insgesamt kann die Oberleitung ihre Stärken vor allem in einem stark ausgebauten Zustand mit einer großen Zahl von Elektro-Lkw ausspielen. D.h. Oberleitungen sind in der Fläche eher langfristig attraktiv und aus heutiger Sicht wäre es vor allem geboten, Oberleitungs-Lkw durch eine heutige Pfadentscheidung nicht grundsätzlich auszuschließen, sondern die Schnittstelle zu batterieelektrischen Lkw weiter auszubauen.

2.5.2 Hochleistungsladen

Es ergeben sich folgende Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken für Hochleistungsladen.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Insellösungen und gradueller Aufbau mit großem Abstand und wenig Punkten pro Standort möglich. • GradueUer Ausbau möglich (Basisnetz kann an Orten hoher Nachfrage erweitert werden). 	<ul style="list-style-type: none"> • Batterien für nennenswerte Reichweite erhöhen Leergewicht und damit Energiebedarf bzw. verringern die Nutzlast. • Laden mit hoher Leistung erhöht den Batterieverschleiß und geht mit Energieverlusten einher. • Nebenverbraucher müssen aus der Batterie betrieben werden, was die Reichweite einschränken kann. • Laden im Fernverkehr nur während der gesetzlichen Pausenzeiten möglich oder teure zusätzliche Pausen notwendig. • Lokal punktuell sehr hohe Netzbelastung mit entsprechenden Netzanschlusskosten. • Kaum Flexibilisierung des Lastprofils möglich.
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Ruhepausen für Fahrer vorgeschrieben, in diesem Fall kein Zeitverlust durch Zwischenladen. • Kosten und Leistungsparameter von Traktionsbatterien verbessern sich nach wie vor schnell, auch für viele Fernverkehrsanwendungen ist mittelfristig mit einer positiven Kostenbilanz zu rechnen. • Gewisse Synergien mit dem Ausbau DC-Ladeinfrastruktur für Pkw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stationäres Laden reduziert die Flexibilität des Fahrzeugeinsatzes, ist aber für die Betreiber wichtig. • Bedingt durch Mehrgewicht der Batterien höhere Straßenabnutzung (Vierte-Potenz-Gesetz) und entsprechend höhere Mautsätze. • Langfristig mögliche Platzprobleme an Autobahnen, da heute bereits zu wenig Parkplätze für Lkw im Fernverkehr vorhanden sind und dann teilweise für genügend Ladepunkte zusätzliche Flächen erschlossen werden müssten.

Insgesamt profitiert das Hochleistungsladen vor allem in einer frühen Marktphase, da es dezentral aufgebaut werden kann und teilweise von Erfahrungen im Schnellladen von Pkw profitiert.

3 Gemeinsamer Ausbau der Infrastrukturen

Das Wichtigste in Kürze:

- Hochleistungsladesäulen ermöglichen einen vergleichsweise einfachen flächendeckenden Aufbau. Oberleitungsaufbau an stark befahrenen Strecken kann aber die Installation großer stationärer Ladestationen vermeiden bzw. reduzieren.
- Auch an Oberleitungsstrecken werden stationäre Ladepunkte für batterieelektrische Fahrzeuge ohne Pantographen benötigt.
- Falls batterieelektrische Lkw zukünftig an Bedeutung gewinnen, sollte über einen abschnittsweisen Aufbau von Oberleitungen nachgedacht werden, um Oberleitungen gezielt entlang einzelner Autobahnabschnitte zum Nachladen zu nutzen. Falls Oberleitungs-Diesel-Fahrzeuge einen signifikanten Marktanteil erreichen, sind längere durchgehende Strecken mit Oberleitungen entlang wichtiger Korridore die attraktivere Lösung.
- Hochleistungsladesäulen werden weiterhin auf weniger stark frequentierten Autobahnen und abseits davon erforderlich sein.
- Die Vorteile beider Infrastrukturen können genutzt werden, in dem das Laden im Fernverkehr stets über Stromabnehmer erfolgt. Für Oberleitungs-Lkw wurden diese bereits für die besonderen Anforderungen von Lkw entwickelt und erprobt, allerdings müssten Stromabnehmer für die hohen Leistungen während der kurzen Pausenzeiten weiterentwickelt werden.
- Wenn Stromabnehmer Standard zum Laden im Fernverkehr sind, kann der Ausbau beider Infrastrukturen parallel erfolgen und für Synergien sorgen. Dann kann sowohl während der Fahrt als auch in den Pausen geladen werden und eine anfangs dezentrale mit einer platzsparenden Infrastruktur verbunden werden.

3.1 Gemeinsame elektrische Infrastruktur

Um eine vollständige Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs zu erreichen, ist es denkbar, dass sich Oberleitungen und Schnellladeinfrastruktur langfristig ergänzen. Dabei könnte die Oberleitungsinfrastruktur insbesondere auf hochbefahrenen Strecken zum Einsatz kommen, auf denen ein hoher Energiebedarf und damit eine leistungsfähige Infrastruktur benötigt wird. Schnellladeinfrastruktur könnte das Oberleitungsnetz ergänzen und eine vergleichsweise kostengünstige Lösung zum Erschließen der Fläche darstellen. Im Folgenden wird ein mögliches gemeinsames Netz skizziert, um erste Erkenntnisse für eine gemeinsame Infrastruktur abzuleiten. Dafür wird das oben beschriebene Modell für Schnellladeinfrastruktur erweitert.

Anforderungen und Rahmenparameter

Analog zum oben beschriebenen Schnellladenetz wird davon ausgegangen, dass im Abstand von 50 km eine Schnellladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt werden muss. Es ist davon auszugehen, dass dies auch an Strecken mit Oberleitung erfolgt, um Fahrzeugen ohne Pantographen eine Nachlademöglichkeit zur Verfügung zu stellen. Wie bereits oben beschrieben, erfolgt das Nachladen an der Schnellladeinfrastruktur innerhalb von 30 Minuten. Außerdem wird davon ausgegangen, dass 75 % des Lkw-Bestandes elektrifiziert ist. Dabei handelt es sich bei 45 % der Fahrzeuge um batterieelektrische Lkw und bei 30 % der Fahrzeuge um Oberleitungs-Lkw. Da Oberleitungs-Lkw vermehrt auf Strecken eingesetzt werden, die mit einer entsprechenden Infrastruktur ausgestattet sind, wird im Basisszenario unterstellt, dass 50 %

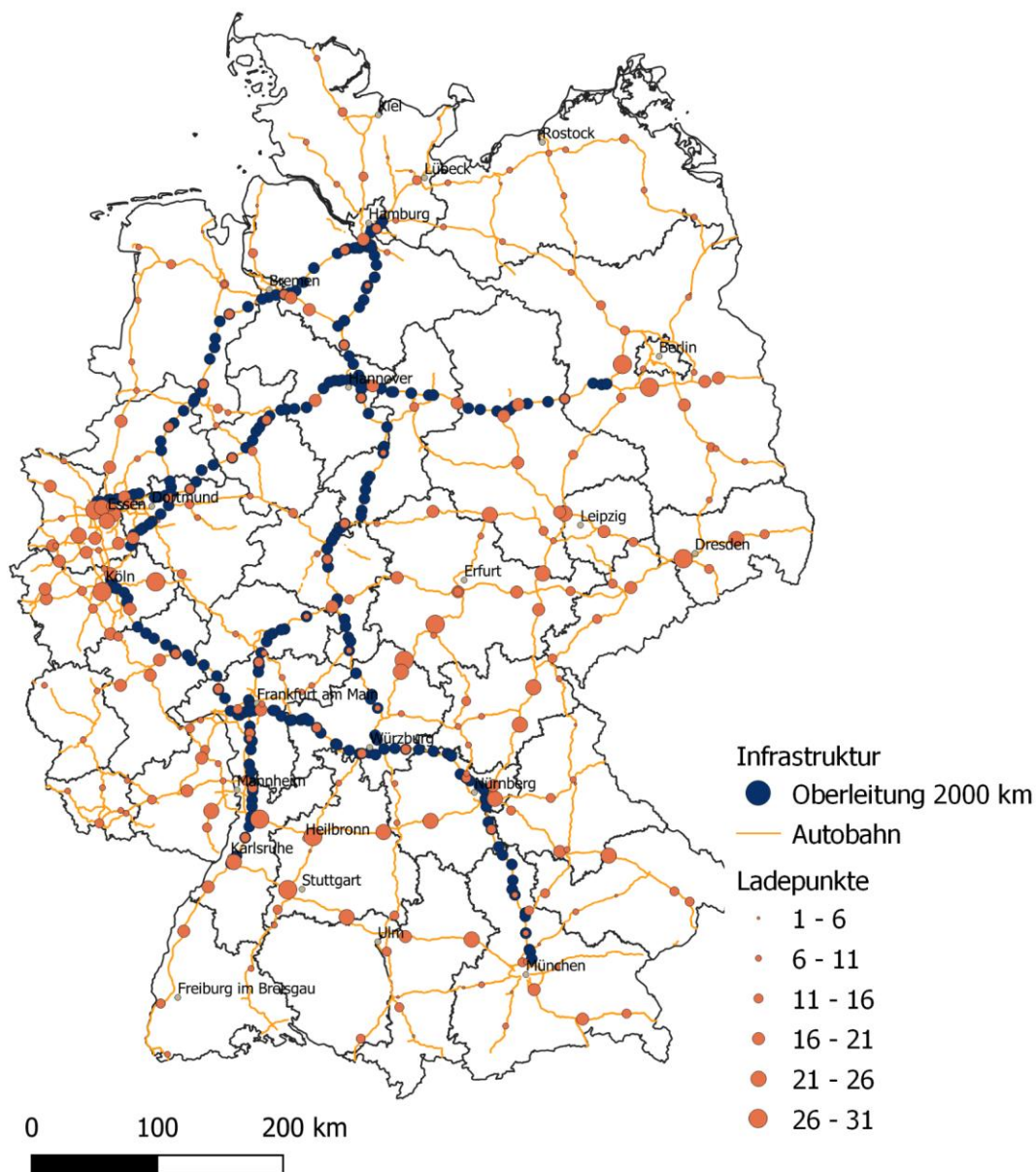
der Elektro-Lkw unter der Oberleitung diese nutzen. Außerdem werden drei Ausbauszenarien für die Oberleitung betrachtet:

- Startnetz 1000 km: Hamburg - Dortmund (A 1), Hamburg - Karlsruhe (A 7, A 5)
- Basisnetz 2000 km: Startnetz, Dortmund - München (A 3, A 9), Bad Hersfeld - Würzburg (A 7), Duisburg - Berlin (A 2)
- Ausbaunetz 4000 km: Basisnetz, Köln - Nürnberg (A 61, A 6), Karlsruhe - München (A 8), Dortmund - Gießen (A 45), Dortmund - Kassel (A 44), Bad Hersfeld - Hermsdorf (A 4), Berlin - Nürnberg (A 9), Heilbronn-Stuttgart (A 81)

Als Basisszenario dient dabei der Ausbau von 2000 km Oberleitung.

Abbildung 14 stellt ein entsprechendes Netz für das Basisszenario dar.

Abbildung 14: Gemeinsames Schnelllade- und Oberleitungsnetz

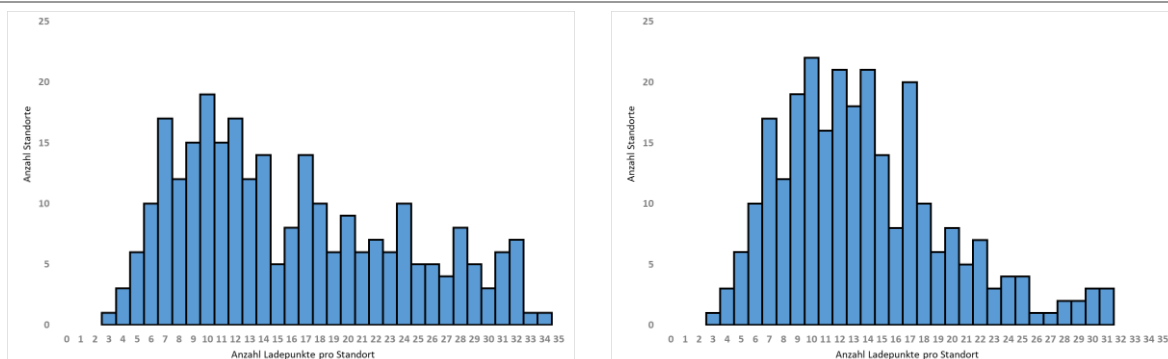


Quelle: Eigene Berechnung, Kartenhintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2020

Der Aufbau von 2.000 km Oberleitung ermöglicht es auf den ausgebauten Strecken auf sehr große Ladestationen zu verzichten. Dies gilt beispielsweise für die größten Ladestationen des Schnellladenetzes an der A3 am Kreuz Bonn (34 Ladepunkte) sowie an der A2 (33 Ladepunkte) bei Hannover. Im beschriebenen Oberleitungs-Szenario werden beide Standorte auf 18 Ladepunkte reduziert. Die Erhöhung des Anteils der mit Pantographen ausgestatteten Fahrzeuge könnte diesen Effekt weiter verstärken. Abbildung 15 zeigt die Anzahl der Ladepunkte ohne und mit Oberleitung für das Basisszenario. Trotz eines Ausbaus von 2.000 km Oberleitung verbleiben jedoch Standorte mit großen Schnellladestationen. Eine Ursache hierfür ist, dass die Oberleitung in den beschriebenen Szenarien insbesondere zur dauerhaften Energieversorgung während der Fahrt gedacht ist. Dies ermöglicht es Oberleitungs-Lkw mit Verbrennungsmotor große Strecken elektrisch zurückzulegen. Bei einer starken Verbreitung von batterieelektrischen Oberleitungs-Lkw könnte die Ladeinfrastruktur dahingehend gestaltet werden, dass nur Streckenabschnitte ausgebaut werden, die dann zum Nachladen genutzt werden können. In diesem Fall könnten Oberleitungen noch gezielter an hochbefahrenen Streckenabschnitten platziert werden und das Hochleistungsnetz damit weiter reduziert werden. Die hier modellierten Entwicklungen sollen erste Einblicke für eine mögliche kombinierte Infrastruktur bieten. Eine möglichst effiziente Lösung bleibt hier Gegenstand weiterer Forschung.

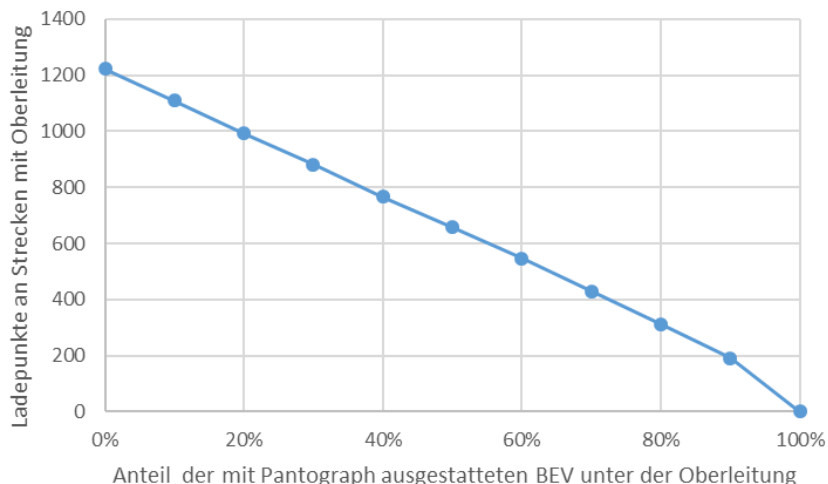
Im angenommenen Basisszenario, in dem 50 % der BEV unter der Oberleitung mit einem Pantographen ausgestattet sind, können durch die Oberleitung insgesamt 565 Ladepunkte eingespart werden. Würden alle elektrischen Fahrzeuge unter der Oberleitung diese nutzen, würden insgesamt 1.222 Ladepunkte weniger benötigt (vgl. Abbildung 16). Ohne Oberleitung werden im Basisszenario 4.238 Ladepunkte benötigt. Der Aufbau von 2.000 km Oberleitung (ca. 15 % der deutschen Autobahn) würde dann zu einer Reduktion der Ladepunkte von bis zu 30 % führen.

Abbildung 15: Anzahl Ladepunkte ohne (links) und mit (rechts) 2.000 km Basisnetz Oberleitung



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 16: Ladepunkte an Strecken mit Oberleitung in Abhängigkeit von der Nutzung der Oberleitung

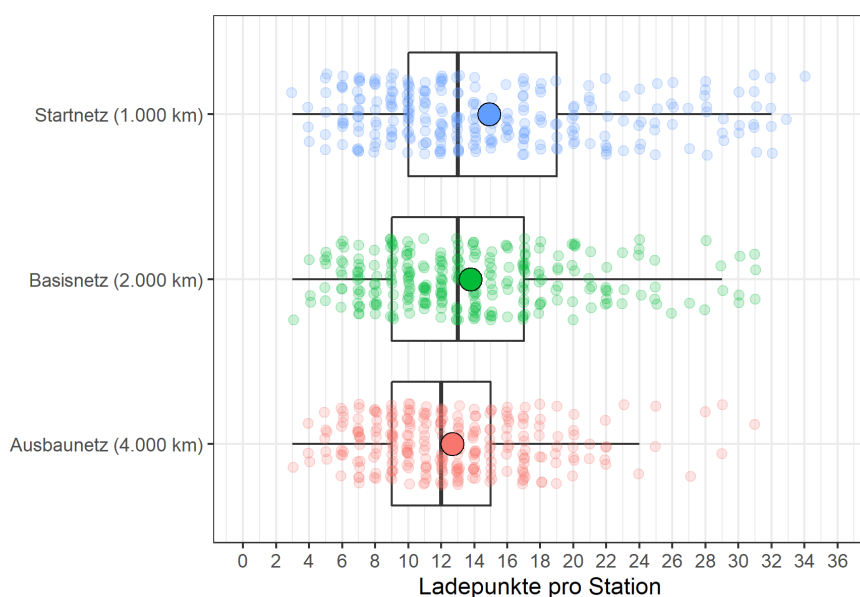


Quelle: Eigene Berechnung

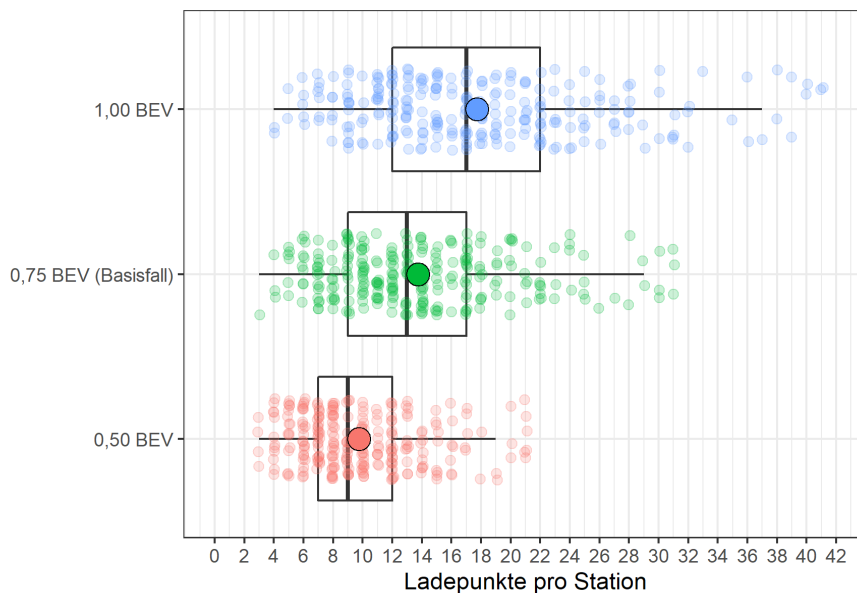
Die Anzahl der benötigten Schnellladepunkte variiert in Abhängigkeit vom Ausbau des Oberleitungsnetzes. Im Basisfall mit 2.000 km Oberleitung werden insgesamt 3.673 Ladepunkte benötigt. Dies entspricht bei insgesamt 267 Stationen durchschnittlich 13,8 Ladepunkten pro Station.

Bei Annahme lediglich eines OL-Startnetzes werden, bei der gleichen Anzahl an Stationen, durchschnittlich 14,9 Ladepunkte pro Station benötigt. Vergleicht man beide Ausbaustufen in Abbildung 17, so ist zu erkennen, dass insbesondere sehr große Stationen an hochbefahrenen Strecken hinzukommen, die im Basisfall durch Oberleitungen deutlich kleiner ausgelegt werden konnten. Insgesamt werden im Startnetz 3.982 Ladepunkte benötigt.

Abbildung 17: Ladepunkte pro Station bei verschiedenen Stufen des Oberleitungsnetzausbaus



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 18: Ladepunkte pro Station, wenn 50 %, 75 % und 100 % der Flotte elektrifiziert sind

Quelle: Eigene Berechnung

Durch den Aufbau des Ausbaunetzes mit 4.000 km Oberleitung wird die Anzahl der Ladepunkte auf 3.382 reduziert. Dies entspricht durchschnittlich 12,7 Ladepunkten je Station. Sehr große Stationen mit über 25 Ladepunkten treten nur noch in Einzelfällen auf.

Der Anteil elektrischer Fahrzeuge am Gesamtfahrzeugbestand hat einen deutlichen Einfluss auf den Bedarf an Ladepunkten. Bei vollständiger Elektrifizierung ergeben sich im Modell 4.733 Ladepunkte, wenn gleichzeitig 2.000 km Oberleitung zur Verfügung stehen. Die größte Ladestation verfügt dabei über 41 Ladepunkte. Abbildung 18 zeigt die Anzahl der Ladepunkte je Station in Abhängigkeit vom elektrifizierten Anteil der Lkw-Flotte.

3.2 Kosten der Infrastruktur

Neben der geographischen Verteilung und der Leistungsfähigkeit der Infrastruktursysteme, sind auch die Gesamtkosten relevant. Die Kosten für eine Oberleitungsinfrastruktur liegen nach (Wietschel et al., 2017) bei ca. 1 – 2 Mio. €/km, d.h. für einen Ausbau von 2.000 km Oberleitung ergeben sich ca. 5 Milliarden € Gesamtkosten. Für Hochleistungsladepunkte wird mittelfristig in der Literatur von Investitionen von ca. 0,4 Mio. € pro MW-Peak-Leistung-Ladepunkt ausgegangen (NPE, 2015; Kühnel et al., 2018), so dass sich für ein Zielsystem auch Gesamtinvestitionen in Höhe mehrerer Mrd. € ergeben.

Die Gesamtkosten für den Ausbau eines Startsystems (nicht Zielsystem bei 100% BEV-Lkw) öffentlicher Hochleistungsladesäulen entlang der Autobahnen könnte sich im Bereich 250 – 500 Mio. € bewegen, je nach Marktdurchdringung der BEV-Lkw. Legt man diese Investition auf 30 Jahre bei 5% Verzinsung um, erhält man bspw. eine Annuität von 32,5 Mio. € bei 500 Mio. € Investition. Bei zusätzlich jährlichen Wartungskosten von 10 % ergeben sich insgesamt 36 Mio. € pro Jahr. Wenn durch 15 % BEV-Lkw im Bestand circa 15 % einer Gesamtfahrleistung von 30,5 Milliarden Fzg.-km zurückgelegt werden, könnten die Kosten auf 4,575 Mrd. Fzg.-km umgelegt werden. Wenn nach obiger Annahme in der Auslegung der Ladinfrastruktur die Hälfte davon öffentlich nachgeladen wird, ergeben sich Kosten für die öffentliche Ladinfrastruktur von 0,016 €/km bzw. 1,6 Cent/km und damit bspw. klar unter den aktuellen Mautsätzen. Für eine größere langfristige Bestandsdurchdringung ergeben sich höhere Gesamtinvestitionen.

Tabelle 3: Kosten Ladeinfrastruktur für Elektro-Lkw

Mögliche bestände und Kosten öffentlicher DC-Ladepunkte und Oberleitungen.

Jahr	Variable	Öffentlich DC	Oberleitungen
2030	Bestand	0 – 2 Tsd.	2.000 – 4.000 km
2050	Bestand	3 – 20 Tsd.	2.000 – 4.000 km
2030	Kosten	0 – 0,8 Mrd. €	5 – 10 Mrd. €
2050	Kosten	1,5 – 8 Mrd. €	5 – 10 Mrd. €

Bzgl. des genauen langfristigen Bedarfes und möglicher Kostensenkungspotenziale bestehe große Unsicherheiten bei beiden Technologien. Tabelle 3 fasst mögliche Szenarien zum Ausbau von DC-Laden und Oberleitung für Lkw zusammen. Es zeigt sich, dass die Gesamtkosten beider Systeme nach heutigem Stand in der Größenordnung einiger Mrd. € liegen könnten. Je nach Verbreitung und Verfügbarkeit von Oberleitungs-Lkw könnte ein Ausbau von Oberleitung den Bedarf an öffentlichem Hochleistungsladen für Lkw reduzieren. Der nächste Abschnitt stellt erste Überlegungen vor, wie viele Ladepunkte durch den Ausbau von Oberleitungen eingespart werden könnten.

3.3 Perspektive Gesamtsystem öffentliche elektrische Infrastruktur für Lkw

Derzeit liegt eine hohe Marktdynamik in der Einführung batterie-elektrischer Lkw und stationärem Laden für den Einsatz im Regional- und Fernverkehr vor. Da sowohl Oberleitungen als auch MCS beides Energieversorgungsoptionen für Elektro-Lkw mit direkter Stromnutzung sind, ist diese Dynamik positiv für die weitere Entwicklung und Verbreitung von Elektro-Lkw.

Ähnlich wie bei Pkw wird das private Laden eine wichtige Rolle für Elektro-Lkw spielen, d.h. Laden mit eher geringer Leistung im eigenen Depot. Der zweite wichtige Ladeort für Elektro-Lkw wird das Laden beim Kunden oder in Logistikzentren sein, d.h. beim Be- und Entladen von Ware. Das Laden für den Einsatz im Fernverkehr, welches den Schwerpunkt dieses Textes bildet, ist erst der dritte aber langfristig aufwändigste Ladeort. Aufgrund der langen Tagesstrecken von Lkw im Fernverkehr werden hier sehr hohe Ladeleistungen benötigt.

Wie könnte eine zukünftige öffentliche Ladeinfrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr aussehen, die beide Technologien zusammenbringt? Der wichtigste Schritt, um sich die Nutzung beider Infrastrukturen offenzuhalten und langfristig die Vorteile beider Infrastrukturen zu nutzen, ist das Laden im Fernverkehr stets über Stromabnehmer zu erlauben. Ein Stromabnehmer bietet Vorteile im stationären Laden während der Pausenzeiten (kein Platzbedarf für Ladesäule, schwer zur manipulieren) und im dynamischen Laden während der Fahrt unter einer Oberleitung. Allgemeines Laden über Pantographen oder die Einführung einer Nachrüstlösung mit Pantographen könnten die Voraussetzungen für die Nutzung beider Infrastrukturen wesentlich verbessern. Allerdings besteht hierfür noch Entwicklungsbedarf bei den übertragbaren Leistungen über Stromabnehmer im Stand von heute bis zu 150 kW auf bis zu 750 kW Dauerleistung. Für mögliche Synergien zwischen den Technologien sind daher allgemeines Laden über Pantographen und höhere Ladeleistungen über Pantographen im Stand wichtige Aspekte der weiteren Förderung und Entwicklung.

In den nächsten Jahren werden voraussichtlich beide Infrastrukturen für den Fernverkehr in kleiner Menge ausgebaut. Der Europäische Verband der Automobilindustrie hat sich für die Errichtung von MCS entlang wichtiger Fernverkehrskorridore stark gemacht und gleichzeitig planen mehrere Länder die Errichtung weiterer Oberleitungsabschnitte. In der Markteinführungsphase von Elektro-Lkw wird es in der Breite einfacher und kostengünstiger sein, MCS zu errichten. Ab 2025 bis 2030 könnten MCS und Oberleitungen in größerem Maßstab parallel errichtet werden. Oberleitungen könnten dann zunehmend auch als Ladeinfrastruktur für rein elektrische Lkw verwendet werden, wenn diese mit einem Stromabnehmer

ausgestattet werden. In diesem Zusammenhang sollte auch die Möglichkeit einer Nachrüstung von Batterie-Lkw mit Stromabnehmern geprüft werden. Für den späteren Bau der Oberleitung heißt dies, dass recht schnell eine nennenswerte Auslastung der Oberleitungsinfrastruktur erfolgt und die Phase unterausgelasteter Infrastruktur kurz ausfällt oder – je nach Zeitverlauf – übersprungen wird. Ein gemeinsamer Standard für die Stromzufuhr via Stromabnehmer für stationäres und dynamisches Laden (bzw. eine Nachrüstlösung) wären dafür sehr hilfreich. Wenn Elektro-Lkw in der zweiten Hälfte der 2030er Jahre dann im Bestand von Lkw im Fernverkehr eine zentrale Rolle einnehmen und ein Basisnetz von MCS in Europa vorhanden ist, kann der Ausbau von Oberleitungen in die Breite gehen und sukzessiv das wichtigste Drittel des Europäischen Autobahnnetzes von ca. 25.000 km entlang der TEN-T-Korridore abdecken. Mit dieser gemischten Infrastruktur wären auch gering ausgelastete Strecken durch MCS für Elektro-Lkw abgedeckt und auf den zentralen Achsen könnte auch unabhängig von Pausenzeiten dynamisch während der Fahrt geladen werden, der Bedarf an Stellplätzen für MCS begrenzt und gleichzeitig die Belastung des Mittelspannungsnetzes über längere Strecken ausgedehnt werden.

Der gemeinsame Ausbau der Infrastrukturen kann sich auch positiv auf die soziale Akzeptanz auswirken, insbesondere auf der Marktseite, denn mehr Anbieter würden beide Technologien verfolgen, aber auch soziopolitisch und in der Akzeptanz vor Ort, denn je nach Ort könnte die Technologie mit lokal besserer Umsetzbarkeit errichtet werden. Davon profitiert vor allem die Oberleitungstechnologie. Eine proaktive Kommunikation und Partizipation ist jedoch für die breite Akzeptanz beider Technologien wichtig. Das schrittweise Vorgehen mit einer Einführung von Elektro-Lkw im ersten Schritt und dem zeitlich leicht verzögerten Ausbau von Oberleitungen könnte ein Weg in Richtung eines rein elektrischen Straßengüterverkehrs sein.

4 Fazit und Forschungsbedarf

Es lassen sich folgende Punkte festhalten

- Derzeit wird die Serienproduktion von Batterie-Lkw von vielen Herstellern geplant und eingeführt. Elektro-Lkw werden eine erhebliche Marktdurchdringung erfahren und benötigen neben dem regelmäßigen Laden im Depot Infrastruktur zum Nachladen für ihren Einsatz im Fernverkehr.
- Sowohl der Ausbau eines Netzes von Hochleistungsladepunkten als auch von Oberleitungen erfordern europäische Koordination.
- Beide Infrastrukturen zum Nachladen von Elektro-Lkw im Fernverkehr haben Vor- und Nachteile. Es besteht die Möglichkeit, sich beide Wege offen zu halten um langfristig die Vorteile beider Infrastrukturen zu nutzen.
- Vor allem in einer Anfangsphase (bei geringen Nutzerzahlen) ist der dezentrale Aufbau von Schnellladestationen flexibler möglich und mit geringeren Hürden verbunden. Eine gewisse Grundausstattung mit Schnellladestationen entlang des Fernstraßennetzes ist voraussichtlich in jedem Fall sinnvoll, und damit auch ein zügiger Aufbau einer solchen Infrastruktur in der Einführungsphase elektrischer Lkw.
- Mittelfristig bietet bereits die Teileelektrifizierung von Autobahnen mit Oberleitungen die Möglichkeit batterieelektrische Lkw während der Fahrt zu laden und den Ausbau von Schnellladestandorten zu reduzieren, insbesondere aufgrund der teilweise geringen Platzverfügbarkeit für Lkw entlang der Autobahnen. Oberleitungsinfrastruktur kann zudem auf stark befahrenen Strecken helfen, die Skalierbarkeit von Batterieantrieben im Fernverkehr zu verbessern (geringerer Platzbedarf, Leistungsbezug aus dem Mittelspannungsnetz über weitere Strecke verteilt, Batteriegröße in Lkw könnte reduziert werden).
- Längerfristig sollte sich die Infrastrukturplanung primär an den mit der Einführung alternativer Antriebe verfolgten Nachhaltigkeitszielen orientieren. Neben den Systemkosten sind hier Wechselwirkungen mit dem Energiesystem und Ressourcenbedarfe zu berücksichtigen. Auch die Passfähigkeit mit einem zunehmend digitalisierten Güterverkehr (autonomes Fahren) ist mittel- bis langfristig zu bedenken.
- Bei einer Kostenbetrachtung müssen neben den Infrastrukturkosten auch Kostenunterschiede für verschiedene Fahrzeugkonzepte (mit/ohne Pantograph, unterschiedliche Batteriegrößen) berücksichtigt werden. Zudem stellt der Verschleiß der Traktionsbatterie einen Kostenpunkt dar. Hier ist weitere Forschungsarbeit erforderlich.
- Der gemeinsame Ausbau der Infrastrukturen kann sich positiv auf die soziale Akzeptanz auswirken, insbesondere auf der Marktseite, aber auch soziopolitisch und in der Akzeptanz vor Ort. Davon profitiert v.a. Oberleitungs-Technologie. Eine proaktive Kommunikation und Partizipation ist jedoch für die breite Akzeptanz beider Technologien wichtig.
- Eine interessante Option stellt die Weiterentwicklung des Pantographen zur stationären Ladung dar. So könnte der Stromabnehmer sowohl für das Laden im Stand an geeigneten Schnellladestationen als auch zur Stromaufnahme während der Fahrt genutzt werden. Dadurch könnte eine Reihe betrieblicher Vorteile realisiert werden. Allgemeines Laden über Pantographen sowie auch die Einführung einer Nachrüstlösung mit Pantographen könnten wichtige Bausteine für die Nutzung beider Infrastrukturen sein.

5 Literaturverzeichnis

- ACEA and T&E (2021): Zero-emission trucks: Industry and environmentalists call for binding targets for infrastructure. Press release. <https://www.acea.be/press-releases/article/zero-emission-trucks-industry-and-environmentalists-call-for-binding-target>
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin,
- BMVI / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018): Scheuer: Ministerium fördert umweltfreundliche Lkw. Pressemitteilung vom 04.06.2018. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2018/036-scheuer-umweltfreundliche-lkws.html>, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- BMVI / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge – Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile
- Burghard, U.; Scherrer, A. (2020): Der eHighway aus gesellschaftlicher Perspektive Erkenntnisse zur sozialen Akzeptanz und den Akteuren rund um Oberleitungs-Lkw-Systeme in Deutschland und Europa. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- EC (European Commission) (2018): EU Transport in Figures - Statistical Pocketbook 2018. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2018_en, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Gnann, T. (2018): Technologiebericht 7.2 Elektromobilität – Hybrid-Oberleitungs-LKW (energiewirtschaftliche Aspekte). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Göckeler, K., Hacker, F., Mottschall, M., Blanck, R., Görz, W., Kasten, P., ... & Heinzelmann, J (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf>
- Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W.; Bernecker, T.; Speiser, J.; Röckle, F.; Schubert, M. ; Nebauer, G. (2020a): StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Berlin.
- Hacker, F.; Jöhrens, J.; Plötz, P. (2020b): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5897855.pdf
- Hartwig, M.; Lehmann, M. (2019): Regulative framework for overhead contact lines for trucks on motorways – The AMELIE project aiming at a European approach of financing and billing for ERS. Proceedings of the 3rd Electric Road Systems Conference 2019. Frankfurt am Main, Germany.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Helms, H.; Schade, W.; Hartwig, J. (2018): Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. Analyse technischer und logistischer Hemmnisse der OH-Lkw-Technologie im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg: Ifeu. Online verfügbar unter

- https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf, zuletzt geprüft 13.05.2020.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Helms, H.; Biemann, K.; Schillinger, M.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D. (2020): Einführungsszenarien 2020-2030 - Optimierung des Infrastrukturaufbaus für Oberleitungs-Lkw und Analyse von Kosten- und Umwelteffekten in der Einführungsphase. Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Jamet, M.; Keller, M.; Lambrecht, U.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Veres-Homm, U.; Schwemmer, M. (2017): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030 – Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH von OHOH von OH-Lkw. Analyse im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg, Karlsruhe.
- Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W. (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Öko-Institut, Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- NPM (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität) (2020): Werkstattbericht Antriebswechsel – Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nfz.pdf
- Plötz, P.; Wachsmuth, J.; Gnann, T.; Neuner, F.; Speth, D.; Link, S. (2021): Net-zero-carbon transport in Europe until 2050 – Targets, technologies and policies for a long-term EU strategy. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI
- Plötz, P.; Speth, D., & Rose, P. (2020): *Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw*. Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA). http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-6086668.pdf
- Rodriguez, F. (2019): CO₂ standards for heavy-duty vehicles in the European Union.
- Scherrer, A.; Burghard, U.; Brunzema, I. (2020): Actor networks around catenary hybrid trucks in central Europe: An analysis over time. 4th Electric Road Systems Conference 2020. Lund, Sweden, 12th to 13th May 2020.
- SRU / Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012): Umweltgutachten 2012. Verantwortung in einer begrenzten Welt.
- Transport & Environment (2020): *Unlocking Electric Trucking in the EU: recharging in cities*. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_07_Unlocking_electric_trucking_in_EU_recharging_in_cities_FINAL.pdf
- Transport & Environment (2021): *Unlocking Electric Trucking in the EU: long-haul trucks*. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/202102_pathways_report_final.pdf
- UBA; BMU (2018): Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Klimabilanz 2017: Emissionen gehen leicht zurück. Umweltbundesamt; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D. et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Hg. v. Fraunhofer ISI.
- WVI, IVT, DLR und KBA (2010): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD2010). WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, Braunschweig, IVT Institut für

angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V., Heilbronn, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Verkehrsforschung, Berlin, KBA Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg