



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schwerpunktpapier #3

Komplementärtechnologien zu BEV-Lkw – ein techno-ökonomischer Vergleich

Julius Jöhrens, Michel Allekotte, Florian Heining | ifeu-Institut
Markus Werner, Martin Ruscher | TU Dresden
Wolf-Peter Schill | DIW Berlin



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG



Heidelberg / Dresden / Berlin, Oktober 2024

Zitierempfehlung: Jöhrens, J.; Werner, M.; Schill, W.; Allekotte, M.; Ruscher, M.; Heining, F. (2024):
Komplementärtechnologien zu BEV-Lkw – ein techno-ökonomischer Vergleich. ifeu, TU Dresden,
DIW Berlin.

Zusammenfassung für Entscheidungsträger



- Stationäre LIS als Energieversorgungsoption für Batterie-Lkw wird zweifellos eine zentrale Rolle spielen, ihr Ausbau stößt dabei in verschiedener Hinsicht auf Herausforderungen (Stromnetzanschluss, Flächenbedarf, schwere und teure Traktionsbatterien), die Anwendungspotential für komplementäre Technologien eröffnen. Als solche betrachten wir in diesem Papier dynamische Stromversorgungssysteme (Electric Road Systems, ERS) sowie Batteriewechselsysteme (BWS).
- ERS haben als Komplementärtechnologie das Potenzial, zentrale Herausforderungen des alleinigen stationären Ladens (v.a. hinsichtlich Flächenbedarf, Batteriegrößen, operationellem Anpassungsbedarf) zu adressieren. Sie können mit Blick auf technische Entwicklung, Zuverlässigkeit und Standardisierung / Normung als weit fortgeschritten gelten (insbesondere Oberleitungs-Technologie). Dagegen gibt es mit BWS für Lkw in Europa noch kaum praktische Erfahrung und auch keine Standards, gleichwohl wird die Technologie in China in relevantem Maße ausgerollt.
- Ein zeitnaher Ausbau der Energieversorgungsnetze entlang der Hauptverkehrsachsen ist für die Versorgung des elektrischen Schwerlastverkehrs technologieunabhängig unbedingt erforderlich, wird nach heutigem Kenntnisstand aber einen Flaschenhals für die erzielbare Hochlaufgeschwindigkeit darstellen.
- BWS haben das Potential, die erforderliche lokale Netzanschlussleistung durch Vorhaltung von Lagerbatterien und intelligentes Lademanagement zu verringern und die Netzanschlussproblematik im Technologiehochlauf zu entspannen. Entsprechende Synergieeffekte sowie Zielkonflikte (z.B. zwischen Erleichterungen beim Netzanschluss und der Vorhaltung zusätzlicher Wechselbatterien) sind in künftigen Untersuchungen quantitativ zu analysieren.

- Bei voll ausgelasteter Energieversorgungsinfrastruktur liegen ERS und BWS bei den Vollkosten für Fahrzeugbetreiber (TCO) im Rahmen der Unsicherheiten auf ähnlichem Niveau wie das stationäre Schnellladen (MCS). In der Einführungsphase sind ERS jedoch absehbar teurer, bei BWS hängt dies zentral von ihrer Auslastung ab.
- Da es bislang keinen herstellerübergreifenden Standard für BWS in Europa gibt und die meisten Hersteller bisher kein Interesse an BWS geäußert haben, dürfte das Erreichen einer mit Schnellladesäulen vergleichbaren Auslastung anspruchsvoll sein. Das wahrscheinlichste Szenario für einen BWS-Hochlauf ist derzeit das „Modell Tesla“, d.h. dass ein einzelner Fahrzeughersteller vorangeht und ein BWS auf eigenes Risiko ausrollt.
- Es ist denkbar, dass sich aus den Unterschieden beim Strombezugsprofil der Infrastrukturen und dem jeweiligen Flexibilitätspotential auch signifikante Unterschiede bei den Energiekosten ergeben. Dies sollten weitere Forschungsarbeiten quantitativ abschätzen.



- Stationary charging stations will undoubtedly play a key role as energy supply for battery-powered trucks. However, expansion of this infrastructure faces challenges in various respects (e.g. grid connection capacity, space requirements, heavy and expensive traction batteries), which open up application potential for complementary technologies. As such, we consider in-motion power supply (electric road systems, ERS) as well as battery swapping systems (BSS) in this paper.
- ERS may be able to address some key challenges of stationary charging (especially in terms of space requirements, battery sizes, and operational adaptation requirements). They can be considered advanced in terms of technical development, reliability, and standardization (especially overhead catenary technology). In contrast, for BSS, there is still little practical experience for trucks in Europe and no standards, although the technology is being rolled out to a relevant extent in China.
- A timely expansion of electricity supply networks along the main transport corridors is essential for powering electric heavy-duty transport, regardless of the charging technology used. Based on current knowledge, this is likely to become a bottleneck for the achievable ramp-up speed of electric trucking.
- BSS can potentially reduce the required local grid connection capacity through the provision of storage batteries and intelligent charging management, thus easing the grid connection problem as the technology scales up. Potential synergetic effects with stationary charging as well as trade-offs (e.g. between reducing peak load for the grid and required additional swap batteries) should be analysed quantitatively in future studies.
- Assuming full capacity utilization for the infrastructure, truck operation with ERS and BSS is somewhat similar to stationary fast charging in terms of full costs for vehicle operators. ERS tend to be significantly more expensive in the introductory phase due to their high up-front invest for initial operation.
- Since there is currently no cross-manufacturer standard for BSS in Europe and most manufacturers have so far expressed little interest in BSS, achieving a comparable utilization rate to fast-charging stations is likely to be challenging in the beginning. The most likely scenario for a BSS ramp-up is currently the “Tesla way”, i.e. a single vehicle manufacturer leading the way and rolling out BSS at its own risk.
- It is conceivable that significant differences in energy costs could arise due to differences in the electricity demand profiles of the infrastructures and their respective demand-side flexibility. Further research should assess this quantitatively.

Ausgangssituation und Zielstellung

Der strategische Schwerpunkt fast aller Lkw-Hersteller in Bezug auf alternative Antriebe liegt derzeit auf der stationären Aufladung von Batteriefahrzeugen. Neben der Aufladung im betrieblichen Depot, über die nach gängiger Einschätzung in vielen Anwendungen ein Großteil der Ladeenergie aufgenommen werden dürfte (Plötz et al. 2024), schließt dies vor allem im Fernverkehr die stationäre Schnellladung an öffentlichen Ladestationen ein. Dazu wird mit dem Megawatt Charging System (MCS) derzeit ein Ladestandard entwickelt und sowohl von den Lkw-Herstellern (Schaal 2022) als auch von staatlicher Seite (BMDV 2022) werden Planungen zum Aufbau eines europa- bzw. deutschlandweiten Netzes öffentlicher Schnellladestationen für Nutzfahrzeuge vorangetrieben. Die europäische AFI-Regulierung enthält entsprechende Vorgaben.

Allerdings zeichnen sich einige Herausforderungen in Szenarien ab, die stark auf stationäre Hochleistungsschnellladung im Fernverkehr setzen, darunter

- die unzureichende Anbindung wichtiger Standorte an das Stromnetz und die lange Vorlaufzeit für den Ausbau von Netzanschlüssen mit hoher Leistung an vorgelagerte Verteilnetze (insbesondere bei Hochspannungsnetzanschlüssen)
- der Flächenbedarf für Ladeplätze entlang der Fernstraßen
- die gegenüber Dieselfahrzeugen verringerte Reichweite sowie verringerte Nutzlast der Fahrzeuge durch das Eigengewicht der Traktionsbatterien
- preisliche Risiken bei den Fahrzeugen, da fluktuierende Weltmarktpreise für Batterierohstoffe hier zu erheblichen Schwankungen führen könnten.

Diese Herausforderungen stellen für einige Lkw-Hersteller eine Motivation dar, parallel die H₂-Brennstoffzellentechnologie für den Lkw-Antrieb zu verfolgen. Aktuelle Studien zeigen jedoch weitgehend übereinstimmend, dass Brennstoffzellen-Lkw kostenseitig in der Regel nicht mit Batterie-Lkw konkurrenzfähig sein dürften (insbesondere aufgrund absehbar hoher Kosten für grünen Wasserstoff) und nur dort zum Einsatz kommen dürften, wo die betrieblichen Vorteile signifikante Mehrkosten rechtfertigen (Göckeler et al. 2023; Jöhrens et al. 2023a). **Daher erscheint die Prüfung weiterer Technologieoptionen angezeigt, die komplementär zur stationären Schnellladung BEV-Lkw mit Strom versorgen können und bekannte Defizite des stationären Schnellladens gezielt ausgleichen.** Solche Technologieoptionen bilden den Fokus des vorliegenden Kurzpapiers.

Zum einen kommen hier Technologien zur dynamischen Ladung während der Fahrt in Frage, sogenannte **Electric Road Systems (ERS)**. Die Stromübertragung kann dabei induktiv (über eine Oberleitung oder eine in der Straße verlegte Stromschiene) oder induktiv (mittels im Straßenbelag versenkter Induktionsspulen) erfolgen. Die generelle technische Machbarkeit im Straßenbetrieb wurde für Oberleitungs-ERS in Deutschland in den vergangenen Jahren mittels dreier Feldversuche nachgewiesen (Jöhrens et al. 2023b). Als nächster Schritt in Richtung eines großmaßstäblichen Einsatzes der Technologie wäre nun eine deutlich längere Pilotstrecke erforderlich, die zwar angekündigt wurde, bisher politisch aber nicht weiter verfolgt wird. Eine Rolle dürften dabei unter anderem die hohen erforderlichen Infrastrukturinvestitionen für ERS im Verhältnis zur Energieabgabe und der anfänglich zu erwartenden Auslastung spielen. ERS stellen somit eine Technologie dar, die zwar im Falle eines breiten Ausbaus wünschenswerte Eigenschaften hätte, bei der eine kurzfristige flächendeckende Einführung aber aus heutiger Sicht unwahrscheinlich ist.

Eine andere zum stationären Laden komplementäre Option sind **Batteriewechselsysteme (BWS)**. In China werden diese momentan im Bereich elektrischer Lkw stark verfolgt, dort hat

etwa die Hälfte der im Jahr 2022 neu zugelassenen elektrischen Lkw eine Wechselbatterie (Cui et al. 2023). In Deutschland wurde die Technologie für Lkw erstmals im Projekt RouteCharge untersucht, aktuell wird im Rahmen des Projekts eHaul ein Demonstrator für einen automatisierten Batteriewechsel aufgebaut (eHaul 2021). Batteriewechselsystemen ermöglichen kurze Standzeiten für den Batteriewechsel im Verhältnis zu der erzielbaren Reichweite; ein Wechselvorgang dauert ca. 5 Minuten und ermöglicht damit eine Weiterfahrt über hunderte Kilometer, je nach Batteriegröße. Zudem kann die benötigte Netzanschlussleistung an Batteriewechselstandorten im Vergleich zu Schnellladestandorten potentiell geringer ausfallen, da die Wechselbatterien in der Ladestation zeitlich optimiert geladen werden können. Batteriewechselstationen haben einen gewissen Flächenbedarf, allerdings durch die kurzen Wechselzeiten auch einen hohen Fahrzeugdurchsatz, so dass der Flächenbedarf gegenüber stationären Ladelösungen potentiell geringer ausfallen kann. Beim Bedarf an Batterien und ihrem Einfluss auf das Fahrzeuggewicht ergeben sich bei dieser Technologie hingegen keine Vorteile gegenüber fest verbauten Batterien.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Rolle ERS und BWS als Komplementärtechnologien in einem zukünftig weitgehend elektrischen Straßengüterverkehr sinnvollerweise spielen können. Mit Blick auf die klimapolitisch gebotene, möglichst rasche Flottenumstellung auf elektrische Lkw ist dabei vor allem interessant, inwiefern Batteriewechselstationen helfen könnten, absehbare Probleme bei der Einführung von Batterie-Lkw im Fernverkehr zu adressieren – insbesondere im Hinblick auf die absehbare Problematik unzureichender Stromnetzanschlüsse für Schnellladestationen. **Im vorliegenden Papier ziehen wir daher einen ersten Vergleich von stationärem Schnellladen mit verschiedenen ERS-Varianten und Batteriewechselsystemen in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht. Aus den Ergebnissen leiten wir einige strategische Schlussfolgerungen ab.**

Charakteristika, technologische Reife und Erprobungsgrad der Komplementärtechnologien

Die im Folgenden dargestellten Technologien befinden sich aktuell im Entwicklungs- oder Erprobungsstadium. Somit spiegeln die Ausführungen den Wissensstand zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Schwerpunktpapers wider und sind daher als eine technisch-strategische Bestandsaufnahme zu verstehen.

Unter **Electric Road Systems** werden die Gesamtheit aller öffentlichen straßengebundenen Strukturen verstanden, die es ermöglichen, kontinuierlich elektrische Leistung während der Fahrt an Straßenfahrzeuge zu übertragen. Dies kann entweder leitend wie bei Oberleitungs- und ebenerdigen Stromschienensystemen oder kontaktlos wie bei induktiven Systemen erfolgen. Die übertragene Leistung wird zum dynamischen Laden fahrzeugseitiger Energiespeicher oder technologieabhängig zusätzlich zur gleichzeitigen Traktion genutzt: Der Fahrweg wird zum Ladeweg. Somit bietet das Konzept ERS die Möglichkeit, Fahrzeugreichweiten zu erhöhen respektive den Energieinhalt der Batterien zu senken. Dadurch können stationäre Ladevorgänge an öffentlichen Schnellladestationen reduziert bzw. vermieden, das Batteriegewicht und -volumen verringert und die (relative) Nutzlast der Fahrzeuge erhöht werden. Grundsätzlich werden im vorliegenden Papier drei ERS-Optionen betrachtet:

- Konduktive ERS auf Basis von Oberleitungstechnologie (folgend auch „eHighway“)
- Konduktive ERS auf Basis exponierter Stromleiter im Straßenkörper (Stromschienensysteme)
- Induktive ERS im Straßenkörper (dynamisches induktives Laden)

Batteriewechselsysteme sind (teil-)automatisierte Einrichtungen, die es ermöglichen, standardisierte Wechselbatterien von BEV stationär auszutauschen und nachzuladen. Entsprechende Systeme bestehen aus speziellen Wechselstationen, in denen entladene Batterien der Fahrzeuge mittels Wechselrobotern in kurzer Zeit durch geladene ersetzt werden. Auch BWS bieten somit das Potential, stationäre Ladevorgänge an öffentlichen Schnelladestationen zu verringern und die resultierende („Lade“-)Standzeit signifikant zu verkürzen.

Demnach ermöglichen die betrachteten Komplementärtechnologien (ERS und BWS) Freiheiten in der Lkw-Disposition durch eine flexiblere Gestaltung/Organisation der Lenkpausen. Weiterhin kann bei BWS durch Vorhaltung von Lagerbatterien und bei ERS durch dynamisches Laden während der Fahrt das Nachladen der Batterien mit geringeren Ladeleistungen im Vergleich zum stationären Schnellladen realisiert werden, was einen positiven Einfluss auf die Batteriebensdauer der Fahrzeuge hat.

Eine hohe technologische Reife und eine weitestgehend abgeschlossene Erprobung der Technologie unter Realbedingungen sind mit Blick auf einen schnellen Technologie-RollOut unbedingt erforderlich.

Dem **ERS mit Oberleitungen** wird eine besonders hohe technologische Reife unter den Komplementärtechnologien zugesprochen (TRL 8-9) (Hartwig et al. 2020; Widegren et al. 2022). Nach ersten Pilotstrecken in den USA, Deutschland und Schweden findet seit 2019 in mehreren Feldversuchen eine umfangreiche und intensive Technologieerprobung des eHighway im Realbetrieb auf zwei deutschen Autobahnen und einer Bundesstraße statt. Insbesondere in den beiden Feldversuchen FESH (FeSH 2024) und ELISA (ELISA 2024) wurden und werden dabei essentielle Erfahrungen bei der Integration der Systeme in den Straßenraum Autobahn, die Energieversorgung, die Verkehrsdurchführung und die Logistik gesammelt. Zudem basiert das Energieversorgungssystem auf den langjährigen und umfassenden Erfahrungen mit Oberleitungen in Bahn- und Straßenanwendungen. Weiterhin wurden in den Feldversuchen bereits mehrere Fahrzeuggenerationen und Antriebsstrangkonzepete (Oberleitungs-Hybrid-Lkw und reine O-BEV) erfolgreich getestet und an die technisch-betrieblichen Anforderungen angepasst. Trotz dessen besteht bei den Fahrzeugen noch Optimierungsbedarf.

Die Technologieentwicklung und -erprobung von ERS mit Oberleitungen ist noch nicht vollständig abgeschlossen, aber in allen Teilsystemen (insbesondere der Infrastruktur) weit fortgeschritten (Werner et al. 2024) – auch im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Komplementärtechnologien. Die Oberleitungsinfrastruktur ist bei Bedarf kurzfristig ausrollbar (ELISA 2022).

Die **induktive Ladetechnologie** weist in der stationären Anwendung grundsätzlich eine hohe technische Reife und einen hohen Erprobungsgrad auf (Wendt 2023). Aufgrund anderer Rahmenbedingungen (insbesondere Verkehrsanforderungen, Energieversorgungsstruktur, vorhandener Straßenraum) kann dies jedoch nicht per se auf die dynamische Anwendung im Schwerlastverkehr übertragen werden. Für das dynamische Laden von schweren Straßennutzfahrzeugen mit induktiven ERS existieren bisher ausschließlich kurze Pilotstrecken (z.B. Smartroad Gotland und die 400 m lange Teststrecke des ELINA-Projekts in Balingen). Demnach steht die Erprobung von induktiven ERS unter betrieblichen Realbedingungen auf Autobahnen zum Nachweis der Praxistauglichkeit im schweren Straßengüterverkehr noch aus. Dafür sollen weitere Erkenntnisse und Erfahrungen in den Projekten E|MPower (Deutschland) und ChargeAsYouDrive (Frankreich) (Electreon 2024) gesammelt werden, in denen induktive ERS ab 2024 auf kurzen Teststrecken (1-2 km) in Autobahnen integriert und untersucht werden. Im Vorhaben EMADI werden zudem Mess- und Abrechnungsverfahren für induktive ERS entwickelt und erprobt. Für die **Erprobung von Stromschienensystemen** zur dynamischen Ladung im elektrischen Schwerlastverkehr gibt es bisher lediglich kurze Demonstrations- bzw. Teststrecken (z.B. Göteborg, Schweden) (Duprat 2023). Frei verfügbare Veröffentlichungen und Ergebnisse zum Testbetrieb dieser Systeme sind bisher nicht

bekannt. Bei Straßenbahnanwendungen hingegen existieren fahrbahnintegrierte Stromschienensysteme zur dynamischen Energieversorgung mit hoher technischer Reife im regulären Betrieb (z.B. in Bordeaux) (Alstom 2024). In welcher Weise sich die Eignung und Praxistauglichkeit dieses Systems auf die Anwendung im Schwerlastverkehr übertragen lassen, ist aufgrund anderer systembedingter Randbedingungen und Anforderungen zu prüfen und nachzuweisen.

Anwendungen von **Batteriewechselsystemen** für schwere Nutzfahrzeuge existieren bisher insbesondere in China. Diese weisen eine hohe technische Reife und einen hohen Erprobungsgrad auf. Aufgrund staatlicher Förderung ist die BWS-Technologie in China seit mehreren Jahren signifikant wachsend. 2022 waren beispielsweise fast 50% aller verkauften elektrischen Lkw „batteriewechselfähig“ (Cui et al. 2023). Die hauptsächliche Anwendung liegt dabei bisher bei schweren Nutzfahrzeugen mit kurzen Reichweiten (Häfen, Minen, städtische Logistik) und nicht im klassischen Langstreckensegment (Bernard et al. 2022). Die chinesische Batteriewechseltechnologie basiert auf einem „Rucksacksystem“, bei dem die Batterien direkt hinter dem Fahrerhaus angeordnet werden (Lihua Liu und Danilovic 2021).

In Deutschland (und Europa) steht die Phase der Technologieerprobung von BWS für den Schwerlastverkehr erst noch bevor. So wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eHaul Ende 2023 eine erste Batteriewechselstation in Betrieb genommen (eHaul 2021). Ziel ist die prototypische Realisation und Erprobung einer automatisierten Batteriewechselstation für schwere elektrische Nutzfahrzeuge. Aufgrund von Längenbeschränkungen der Fahrzeuge ist eine Adoption des chinesischen Systemdesigns für in Europa zugelassene Fahrzeuge nicht zielführend, weshalb in eHaul eine Batterieanordnung an der Fahrzeugunterseite verwendet und erprobt wird. Deshalb besteht bei BWS die Notwendigkeit an umfassender Erprobung unter deutschen Voraussetzungen sowie weiterer Technologieentwicklung (z.B. Wechselroboter, intelligente Energiedisposition).

Weiterhin sind **Normungs- und Standardisierungsaktivitäten** eng mit der technologischen Reife der Gesamtsysteme verknüpft. Bei allen hier betrachteten Komplementärtechnologien existieren Normungs- und Standardisierungsvorhaben, die zum Teil bereits abgeschlossen oder weit fortgeschritten sind. Eine weiterführende Analyse und ein Vergleich der Standardisierungsbestrebungen werden im Rahmen dieser Ausführungen nicht vorgenommen.

Zusammengefasst:

- Für induktive ERS und stromschienenbasierte ERS existieren für die Anwendung im schweren Straßengüterverkehr bisher nur wenige Feldversuche und praxisnahe Tests. Der Nachweis der Praxistauglichkeit unter realen Randbedingungen auf Autobahnen in hinreichend großer Skala steht demnach noch aus.
- ERS mit Oberleitungen weisen eine besonders hohe technologische Reife und aufgrund umfassender mehrjähriger Feldversuche im Schwerlastverkehr den höchsten Erprobungsgrad unter den Komplementärtechnologien in Europa auf. Die Oberleitungsinfrastruktur ist bei Bedarf kurzfristig ausrollbar.
- BWS ist in China bereits breit in der Anwendung und weist eine hohe technologische Reife auf. In Deutschland (und Europa) steht die Phase der Technologieerprobung von BWS mit (im Vergleich zu chinesischen Anwendungen) anderem Systemdesign für den Schwerlastverkehr jedoch erst noch bevor. Dabei besteht die Notwendigkeit an umfassender Erprobung unter gegebenen Voraussetzungen sowie weiterer Technologieentwicklung.

Netzintegration

Entlang stark befahrener elektrifizierter Strecken/Autobahnen entsteht ein hoher zusätzlicher elektrischer Leistungs- und Energiebedarf, der technologieunabhängig durch die vorgelagerte Netzinfrastruktur gedeckt werden muss. Für einen Technologie-Rollout ist es essentiell, dass die vorgelagerten Energienetzstrukturen auf Verteilnetzebene (Mittel- und Hochspannung) die an sie gestellten Leistungsanforderungen zuverlässig erfüllen können. Die Integration der Technologien und deren Ladeinfrastruktur in die Stromnetze ist als eine zentrale Herausforderung für den Hochlauf anzusehen. Der elektrische Schwerlastverkehr wird in der langfristigen Ausbauplanung der Netzbetreiber jedoch bisher nicht maßgeblich berücksichtigt (Kippelt et al. 2022). Bestehende Mittelspannungsnetze weisen bereits heute teilweise hohe Vorbelastungen und somit geringe zur Verfügung stehende (Rest-)Anschluss- bzw. Übertragungskapazitäten auf. Außerdem gehen mittelfristig erforderliche Anschlüsse an Hochspannungsnetze mit langen Planungs- und Realisierungszeiträumen einher (Planungszeitraum HS-Anschluss von 10 Jahren und mehr, für Umspannwerke von 5 Jahren). Die Realisierungszeiten und Randbedingungen variieren zudem standortabhängig stark. Daher ist grundsätzlich die Minderung der erforderlichen Netzanschlussleistung anzustreben. (Kippelt et al. 2022)

Insbesondere BWS weisen systembedingt das Potenzial auf, erforderliche lokale Netzanschlussleistungen zu beschränken (Möglichkeit der Lastspitzenkappung) und somit ggf. einen unmittelbaren Ausbau des Netzanschlusses zu vermeiden (Gobernatz und Marker 2023). Eine Kompensation schwacher Netzanschlüsse erfordert dabei jedoch die Vorhaltung einer entsprechenden Anzahl von Lagerbatterien in den BWS-Stationen, was mit erhöhten Kosten und zusätzlichem Aufwand einhergeht.

Die lokale Skalierbarkeit der Wechselstationen wird gegenüber dem stationären Schnellladen prinzipiell als flexibler angesehen, da bei steigender (Leistungs-)Nachfrage das System zunächst um zusätzliche Batterien erweitert werden kann und daraus nicht zwingend eine höhere erforderliche Netzanschlussleistung resultiert. Dabei unterliegt die Skalierbarkeit jedoch folgenden Restriktionen:

- 1) Der Ausbau von Batteriewechselstationen oder eine Erhöhung deren Lagerbatterieanzahl hat einen zusätzlichen Platzbedarf sowie Zeit- und Kostenaufwand zur Folge.
- 2) Die Skalierbarkeit durch zusätzliche Lagerbatterien ist durch die Leistungsanforderungen des Verkehrs begrenzt. Ab einem bestimmten Punkt übersteigt die temporär erforderliche Gesamtleistung für das gleichzeitige Nachladen der Lagerbatterien die vorhandene Netzanschlussleistung, was ebenso einen Ausbau des Netzanschlusses erforderlich macht.

Bei ERS und beim stationären Schnellladen kann durch Einsatz zusätzlicher stationärer Energiespeicher (sogenannte Pufferspeicher) ebenfalls eine Minderung der erforderlichen Netzanschlussleistung erreicht werden. Die Einführung und der Betrieb solcher Speicher ist jedoch mit großen Herausforderungen hinsichtlich der technischen (anforderungsgerechten) Dimensionierung und der Wirtschaftlichkeit (Anschaffungsinvestition, Effizienzminde- rung durch Ein- und Ausspeichervorgänge, zusätzlicher Flächenbedarf) verbunden. Im eHighway-Feldversuch FeSH wird aktuell ein in die Anlage integriertes Pufferspeicherunterwerk getestet und das entsprechende Speisekonzept auf Praxistauglichkeit untersucht. Ähnliche Erprobungsversuche sind für andere ERS-Technologien nicht bekannt. Diese Konzepte können primär eine überbrückende Lösung im Umgang mit temporären Netzrestriktionen (Verzögerungen bei der Bereitstellung von Netzanschlüssen) darstellen und sind vor allem in frühen Phasen des Hochlaufs denkbar (Kippelt et al. 2022), bis entsprechend starke Netzanschlüsse vorhanden sind.

Zur Quantifizierung der erforderlichen Netzanschlussleistung und der Effekte der Flexibilisierung des Strombezugprofils sollte ein systemischer Vergleich zwischen ERS bzw. stationärem Schnellladen mit Pufferspeichern und BWS mit Lagerbatterien anhand realer Szenarien durchgeführt werden.

Hinsichtlich der erforderlichen Netzanschlussleistung ist weiterhin anzumerken, dass Autobahnen in der Regel über weite Distanzen eine annähernd lineare, nicht-zirkulare Struktur aufweisen. Daher könnte die erforderliche **Stromnetzinfrastruktur bei ERS** im Gegensatz zu stationären Ladevorrichtungen **über eine weite Fläche verteilt** und so lokale Netzüberlastungen durch verkehrliche Leistungsanforderungen vermindert werden (Akermann 2023). Weiterhin könnten die Anschlüsse an die Netzinfrastruktur örtlich flexibler gewählt werden, da sie im Gegensatz zu stationärer LIS nicht durch Park- und Rastanlagen geographisch determiniert sind (Hein et al. 2024). Netzanschlusspunkte und Einspeisungen werden demnach dort realisiert, wo die Stromnetze einfacher erschließbar und leichter zugänglich sind. Das bringt potenzielle Zeit- und Kostenvorteile bei der Integration der Ladeinfrastruktur in bestehende Netze mit sich. Diese Effekte sind in weiteren Untersuchungen zu analysieren und quantifizieren. Zudem sollte die technisch-ökonomische Umsetzbarkeit von ERS-Infrastruktur begleitenden „systemeigenen“ Mittelspannungsnetzen geprüft werden.

Ein weiterer Aspekt der Netzintegration ist, dass die elektrische Ladeinfrastruktur sowohl bei den Komplementärtechnologien als auch beim stationären Schnellladen bedarfsgemäß ertüchtigt werden kann. Der **inkrementelle Ausbau der Ladeinfrastruktur** (z.B. weitere Unterwerke bei ERS, Erweiterung Wechselstationen bei BWS, zusätzliche Ladepunkte beim stationären Schnellladen) ist beim Systemdesign und der Infrastrukturauslegung mitzudenken. Das kann den Konflikt mit zeitaufwändigen Netzausbauverfahren zunächst abschwächen. Dabei ist es essentiell, den Zielzustand des Technologiehochlaufs in der Entwurfsgrundlage des Netzausbaus zu berücksichtigen (respektive einen solchen im Sinne eines übergeordneten Infrastrukturplans zunächst zu definieren), um vermeidbare Zwischenschritte und den daraus resultierenden Mehraufwand in Zeitbedarf und Kosten auszuschließen. Mittel- bis langfristig ist für hohe Verkehrsaufkommen ein erforderlicher Anschluss an das HS-Netz erwartbar. Wichtig ist, dass eine strategisch abgestimmte und zeitnahe Planung mit den Netzbetreibern auf Basis konkreter (Lade-)Infrastrukturkonzepte stattfindet – das bedarf politischer Unterstützung. (Kippelt et al. 2022)

Grundsätzlich besteht bei allen Technologien das Potenzial respektive die Möglichkeit zur **Netzdienlichkeit und Bidirektionalität** (bspw. durch Bereitstellung von Primärregelleistung). Neben erforderlicher bidirektionaler Leistungselektronik und einem entsprechenden Energiemanagementsystem würde die Realisierung bei BWS mittels der Lagerbatterien, die integrale Bestandteile des Systems sind, erfolgen. Bei ERS und stationärem Schnellladen sind dafür zusätzliche Pufferspeicher notwendig. Die konkrete Eignung der Ladeinfrastruktur für die Erbringung von Netzdienstleistungen ist weiterführend zu prüfen. Dabei sind unter anderem folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Möglicher Zielkonflikt zwischen priorisierter Anwendung im Schwerlastverkehr (Abdeckung verkehrsbedingter Ladeanforderung) und Bereitstellung von PRL
- Aufwändige Präqualifizierungsverfahren bei Netzbetreibern
- Gewährleistung Netzdienstleistungserbringung bedingt entsprechend hohe Netzanschlussleistung (Mindest-PRL: ± 1 MW)
- Wirtschaftlichkeit

Batteriewechselsysteme könnten, sofern genügend Batterien vorgehalten würden, theoretisch ein komplett gleichmäßiges Ladeprofil (Grundlastprofil) erreichen. Dadurch könnte die erforderliche Anschlussleistung auf ein Minimum sinken. Allerdings kommt es auch dabei zum bereits erwähnten Trade-Off: Je gleichmäßiger geladen werden soll, desto mehr Batterien müssten vorgehalten werden; dies wiederum verursacht zusätzliche Kosten und einen

wachsenden Aufwand für die Lagerhaltung. Zudem könnten bei einem gleichmäßigen Netzstrombezug mögliche Vorteile eines zeitlich flexiblen Ladens nicht mehr realisiert werden. Dazu gehört die Verlagerung des Strombezugs in Stunden mit besonders hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und günstigen Großhandelspreisen (Gaete-Morales et al. 2024). Stattdessen müsste dann auch in Stunden mit niedriger Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und ggf. sehr hohen Großhandelspreisen geladen werden. Ein solches Grundlastverhalten wird bei steigenden Anteilen von Wind- und Solarenergie im System immer unvorteilhafter.

Zusammengefasst:

- Ein zeitnahe Ausbau der Energieversorgungsnetze entlang der Hauptverkehrsachsen ist für die Versorgung des elektrischen Schwerlastverkehrs technologieunabhängig unbedingt erforderlich. Mittel- bis langfristig ist für hohe Verkehrsaufkommen ein erforderlicher Anschluss an das HS-Netz erwartbar, was jedoch mit zeitaufwändigen Planungs- und Genehmigungsprozessen einhergeht. Um trotzdem eine bedarfsgerechte Leistungsverfügbarkeit im Technologiehochlauf bis hin zum Zielzustand zu gewährleisten, sind ein frühzeitig mit den Netzbetreibern abgestimmter Ladeinfrastruktur- und Netzausbauplan notwendig und Konzepte zur Minderung der erforderlichen Anschlussleistung umzusetzen.
- BWS weisen das Potential auf, die erforderliche lokale Netzanschlussleistung durch Vorhaltung von Lagerbatterien und intelligentes Lademanagement zu verringern. Komplementär zu stationären Lademöglichkeiten bzw. ERS besteht so die Möglichkeit, die Netzanschlussproblematik im Technologiehochlauf zu entspannen. Entsprechende Synergieeffekte sowie der Trade-Off zwischen Erleichterungen beim Netzanschluss und der Vorhaltung zusätzlicher Wechselbatterien sind in künftigen Untersuchungen zu quantifizieren.
- Bei ERS kann einerseits durch eine räumliche Verteilung der benötigten Leistung und andererseits durch Einsatz zusätzlicher Pufferspeicher eine Minderung der erforderlichen lokalen Netzanschlussleistung erreicht werden. Das Infrastrukturkonzept von ERS ermöglicht zudem eine gewisse Flexibilität bei der Wahl der Netzanschlusspunkte (lageoptimierte Auswahl). Die Eignung der Pufferspeicherlösungen ist aufgrund großer Herausforderungen hinsichtlich der anforderungsgerechten Dimensionierung und Wirtschaftlichkeit zu prüfen und vor allem partiell in frühen Phasen des Hochlaufs denkbar.

Aspekte der Systemzuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Infrastruktur

Vor dem Hintergrund der technischen, aber auch ökonomisch-betrieblichen Praxistauglichkeit der Gesamtsysteme ist es von essentieller Bedeutung, dass die Infrastruktur eine hohe Systemzuverlässigkeit sowie -verfügbarkeit aufweist und die an sie gestellten Leistungsanforderungen erfüllen kann.

In den eHighway-Feldversuchen ELISA und FeSH konnte durch die wissenschaftliche Begleitforschung bereits eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Oberleitungsanlage nachgewiesen werden (Größenordnung Dauerverfügbarkeit >99 %) (ELISA 2022; Jöhrens et al. 2023b). Im Testbetrieb wurde zudem eine Instandhaltungsstrategie erprobt, welche auch im Rollout eine hohe Anlagenverfügbarkeit gewährleisten kann.

Konkrete Zahlen zur Zuverlässigkeit oder Dauerverfügbarkeit der induktiven und stromschienenbasierten ERS sind bei Schwerlastverkehrsanwendung nicht bekannt. Der zuverlässige Anlagenbetrieb dieser Systeme muss unter den entsprechenden Rahmenbedingungen des schweren elektrischen Straßengüterverkehrs erst noch nachgewiesen werden.

Der Nachweis des zuverlässigen Batterielade- und -wechsellvorgangs ist für das Systemdesign der BWS in den deutschen Projekten (mit Batterieposition an Fahrzeugunterseite) im Pilotbetrieb noch zu erbringen.

Eine anforderungsgerechte Leistungsfähigkeit der Infrastruktur zur Versorgung der schweren elektrischen Lkw ist eine Prämisse für die zuverlässige Erfüllung der Transportaufgabe.

Beim eHighway-System können den Fahrzeugen während der Fahrt so hohe elektrische Leistungen über die Oberleitung zugeführt werden, dass **sowohl der fahrzeugseitige Energiespeicher geladen als auch der Traktionsleistungsbedarf gedeckt werden kann** (paralleler Lade- und Traktionsleistungsbezug). Daraus folgt, dass die Traktionsleistung während der Fahrt unter der Oberleitung nicht aus den Batterien bezogen werden muss und der Energieinhalt dieser somit kleiner dimensioniert werden kann.

Die Höhe der übertragbaren Leistung pro Fahrzeug hängt von verschiedenen Faktoren wie Infrastrukturdimensionierung, Antriebsstrangkonfigurationen und dem Betrieb ab. In der Literatur werden Werte von ca. 400 kW pro Lkw angegeben (Akermann 2023). Im Feldversuch FeSH wird beispielsweise ein O-BEV mit 260kW Antriebsleistung und 200 kW Ladeleistung betrieben (in Summe beträgt die theoretisch übertragbare Leistung für dieses Fahrzeug also >400 kW) (FeSH 2024). Die konkrete Ausgestaltung der Infrastruktur in Abhängigkeit der (betrieblichen) Leistungsanforderung ist ein Auslegungsthema. Aktuelle Untersuchungen weisen beim eHighway-System eine hohe Leistungsfähigkeit nach, die bei entsprechender Dimensionierung auch hohe Verkehrsaufkommen (mit mehreren MW/km) technisch zuverlässig mit Leistung versorgen kann (Kestler 2023).

Es ist davon auszugehen, dass die Leistungsfähigkeit von **stromschienenbasierten ERS** prinzipbedingt in einer ähnlichen Größenordnung wie bei ERS mit Oberleitungen liegt (Duprat 2023). Demnach ist der parallele Bezug von Lade- und Traktionsleistung und die damit einhergehenden Vorteile auch bei Stromschienensystemen gegeben. Die konkrete Leistungsfähigkeit ist abhängig von der Auslegung der Infrastruktur (Unterwerksabstand, etc.).

Bei **induktiven ERS** können aufgrund des physikalischen Wirkprinzips und anwendungsbedingter restriktiver Randbedingungen deutlich geringere Leistungen im Vergleich zu den konduktiven ERS übertragen werden. Gemäß Herstellerangaben sollen dynamische induktive Ladesysteme mit dem aktuellen Stand der Technik (induktive Resonanzübertragung (Panchal et al. 2018)) mittlere Übertragungsleistungen von bis zu 180 kW bei einer Frequenz im mehrstelligen kHz-Bereich übertragen können (Wendt 2023). Ob Leistungswerte in dieser Größenordnung unter realistischen Randbedingungen bei der Schwerlastverkehrsanwendung erreicht werden können, ist kritisch zu hinterfragen und umfangreich zu prüfen (z.B. mit Blick auf fahrzeugseitigen Platzbedarf Empfängerspulen, die kontinuierlich veränderliche Ausrichtung und den vertikalen Abstand Sender- und Empfängerspule, etc. (Bernard et al. 2022)). Falls die genannten Leistungen übertragen werden können, ist der gleichzeitige Bezug von Lade- und Traktionsleistung dennoch nicht gewährleistet respektive ein Laden mit nur äußerst geringer Ladeleistung zu erwarten (Wietschel et al. 2017). Damit können die aus der Reduktion der erforderlichen Batteriegröße resultierenden Vorteile im Vergleich zu Oberleitungs- und Stromschienensystemen weniger ausgeschöpft werden.

Die **Leistungsfähigkeit des Batteriewechselsystems** skaliert mit der Anzahl der Wechselroboter, der Anzahl der vorgehaltenen Lagerbatterien und dem zur Verfügung stehenden Netzanschluss (darüber wird die mögliche Ladeleistung für die Batterien bestimmt).

Zusammengefasst:

- Für ERS mit Oberleitung konnte in den deutschen eHighway-Feldversuchen bereits eine hohe infrastrukturelle Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit nachgewiesen werden. Dieser Nachweis ist für die Anwendung im Schwerlastverkehr für die anderen Komplementärtechnologien noch zu erbringen.
- Die Leistungsfähigkeit von ERS mit Oberleitungen und Stromschienen ist im Vergleich zu induktiven ERS höher. Die gleichzeitige Versorgung der Fahrzeuge mit Lade- und Traktionsleistung kann bei induktiven ERS wie dem eHighway auch in Hochlastszenarien realisiert werden. Eine hinreichende Leistungsfähigkeit von induktiven ERS für die Schwerlastanwendung ist in Feldversuchen entsprechender Skalierung erst nachzuweisen.
- Die Leistungsfähigkeit von BWS skaliert mit der Anzahl der Wechselroboter, der Anzahl der Lagerbatterien und dem zur Verfügung stehenden Netzanschluss. Eine allgemeingültige Aussage zur Leistungsfähigkeit kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht getroffen werden.

Integration in den bestehenden Straßenraum

Die **bauliche Integration** der Technologien (insbesondere ERS) **in den Straßenraum ist eine signifikante Herausforderung**. Die Straße ist ein abgeschlossenes und mit Blick auf die Instandhaltung sensibles Subsystem. Daher ist eine möglichst geringe Beeinflussung des Straßenkörpers durch Ladeinfrastruktur anzustreben. Bei induktiven ERS und ERS mit Stromschienen wird die Ladeinfrastruktur direkt in den Fahrweg (Autobahn) eingebracht (baunetzwerk.biz 2023). Das birgt betrieblich und instandhaltungstechnisch Risiken (Stephan und Werner 2024). Es ist zu prüfen, inwiefern die Lebensdauer der Straßeninfrastruktur als hochbelastetes Teilsystem durch das Einbringen der Energieinfrastruktur in den Straßenaufbau reduziert wird. Dies ist Gegenstand aktueller Forschung. Die Akzeptanz seitens der Straßenbetreiber könnte zudem eine Hürde für den Technologiehochlauf darstellen. Beim eHighway-System wird die Ladeinfrastruktur lediglich entlang der Straßen geführt (Maststellung im Grünstreifenbereich), was keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Fahrbahn hat.

Die Flächenverfügbarkeit für Ladeinfrastrukturanlagen entlang der Verkehrsachsen ist begrenzt. Bereits jetzt gibt es überbelegte Lkw-Parkplätze, insbesondere auf Park- und Rastanlagen an den Bundesautobahnen (Kippelt et al. 2022). Das Bundesamt für Straßenwesen (BASt) gab schon für 2018 einen Lkw-Stellplatzmangel von über 20.000 fehlenden Stellplätzen an (Irzik 2019), Abschätzungen des BGL gehen sogar von bis zu 40.000 fehlenden Lkw-Stellplätzen aus (BGL 2019). Ladeplätze weisen aufgrund der notwendigen technischen Infrastruktur und Manövrierflächen einen größeren Platzbedarf als normale Stellplätze auf. Planerische Untersuchungen gehen von einer Vergrößerung von aktuell ca. 70 m² pro Lkw-Parkfläche auf dann 100...200 m² pro Lkw-Ladesäulenplatz aus, andere Analysen rechnen mit einem durchschnittlichen Faktor für eine Flächenvergrößerung von 1,5 Lkw-Parkplätzen je E-Ladesäule (Bundesanstalt für Straßenwesen 2021; d-fine 2024; Gerstein et al. 2023). Demnach wird trotz entsprechender Förderprogramme zum Neu- und Ausbau von Lkw-Stellplätzen das Flächenproblem durch die Integration stationärer Schnellladeinfrastruktur auf den Park- und Rastanlagen verschärft. Ein zu großer zusätzlicher Flächenbedarf kann ein Hemmnis für den Infrastrukturaufbau und somit für den Technologiehochlauf darstellen.

ERS haben das Potenzial, das Flächenverfügbarkeitsproblem zu entspannen, da sie aufgrund der dynamischen Ladung während der Fahrt den Bedarf an stationärem Laden an öffentlichen Stationen entlang der Verkehrsachsen mindern (Deutscher Bundestag WD 5 2023) und selbst kaum zusätzlichen Platzbedarf auf den Verkehrsflächen erforderlich machen (Plötz et al. 2021). Für die Errichtung von ERS ist lediglich mit zusätzlichen Flächen für

Unterwerke, Netzanschlusspunkte und speziell beim eHighway ggf. für Rettungshubschrauber (entsprechende Konzepte wurden bereits untersucht (Grosse et al. 2022)) entlang der Verkehrsflächen zu rechnen.

Der (zusätzliche) **Flächenbedarf von Batteriewechselstationen** in Abhängigkeit der Skalierung ist in künftigen Untersuchungen zu quantifizieren. Zielführend ist hier die Nutzung von Bestandsflächen (perspektivisch z.B. von Tankstellen, Autohöfen). Bei BWS ist eine Vorhaltung entsprechender Flächen für mögliche/geplante Erweiterungen wie die Erhöhung des Ladebatteriebestandes im Hochlauf in die Planung zu integrieren. Das Potenzial zur Senkung des Platzbedarfs gegenüber stationärer Schnellladung ist zu analysieren.

Zusammengefasst:

- Es ist eine möglichst geringe Beeinflussung des Straßenkörpers durch die bauliche Integration der Ladeinfrastruktur anzustreben.
- Eine Integration des eHighway-Systems in den Straßenraum geht ohne unmittelbare Beeinflussung der Fahrbahn einher. Die Installation der Ladeinfrastrukturkomponenten für induktive ERS und Stromschienensysteme ist mit einem eminenten Eingriff in den Straßenkörper verbunden und birgt Risiken. In welchem Maße sich die Lebensdauer der Fahrbahn dabei unter Realbedingungen verringert, ist weiterführend in Forschungsvorhaben zu untersuchen.
- ERS können das Flächenverfügbarkeitsproblem entlang der Verkehrsachsen entspannen, da sie den Bedarf an stationärem (öffentlichen) Laden mindern und selbst kaum zusätzlichen Platzbedarf auf den Verkehrsflächen erforderlich machen.

Technologiekosten und Wirtschaftlichkeit

Für die Entscheidung von Lkw-Betreibern zwischen verschiedenen Antriebstechnologien spielen die aus Sicht der Betreiber zu erwartenden Vollkosten (TCO⁵) eine zentrale Rolle. In diesem Abschnitt vergleichen wir daher die Vollkosten von Batterie-Lkw (BEV) mit stationärer Schnellladung („Ladesäulen-BEV“, LS-BEV), mit dynamischer Ladung während der Fahrt (je nach Übertragungstechnologie OL-BEV, Stromsch.-BEV oder Ind.-BEV) und mit Batteriewechselsystem (BWS-BEV) für einen exemplarischen Anwendungsfall im Fernverkehr.

Die bei der TCO-Analyse berücksichtigten Kostenpunkte sind in Tabelle 1 dargestellt. Einige Kostenkomponenten, die unabhängig von der Antriebstechnologie sind (z.B. Fahrer, Auflieger etc.), werden nicht berücksichtigt. Kosten für Ladeinfrastruktur (LIS) werden zunächst unter der idealtypischen Annahme berechnet, dass alle Infrastrukturen voll ausgelastet sind. Bei BWS werden die Wechselbatterien als Teil der Ladeinfrastruktur erachtet. Die verwendeten Eingangsgrößen gehen auf eine Literaturrecherche zurück, die für BWS durch aktuelle Werte aus dem Vorhaben eHaul ergänzt wird (eHaul 2021). Die Anschaffungskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur basieren hauptsächlich auf dem Vorhaben My eRoads (ifeu 2023), für den Strompreis wurden veröffentlichte Werte des BDEW zugrunde gelegt. Alle Werte sind in Tabelle 2 inklusive der vorgefundenen Unsicherheitsbandbreiten dokumentiert.

⁵ Total Cost of Ownership

Tabelle 1: Berücksichtigte Kostenpunkte bei der TCO-Analyse

| Kostenkomponente | Kostenart | Wichtige Einflussparameter |
|--|---|---|
| Fahrzeugkosten (exkl. Traktionsbatterie) | CAPEX | Fahrzeugpreis, Wertverlust, Kreditkonditionen |
| Batteriekosten | OPEX (bei BWS, da Teil der Ladeinfrastruktur) CAPEX (bei sonstigen Techn.) | Batteriep Preis, Lebensdauer/Wertverlust, Kreditkonditionen |
| Energiekosten (ohne LIS-Umlage) | OPEX | Strompreis, Verbräuche, Ladeprofil, Ladeverluste |
| Sonstige Betriebskosten | OPEX | Steuer, Versicherung, Wartung, Maut etc. |
| LIS-Kosten | OPEX (öff. LS / ERS / BWS) CAPEX (betriebliche LIS) | Auslegung der Infrastruktur, Auslastung |

Tabelle 2: Annahmen für die TCO-Berechnung

| Komponente | Preise/Kosten (Bandbreite in Klammern) |
|---|--|
| Strompreis* | 28 ct ₂₀₂₀ /kWh (16-39 ct ₂₀₂₀ /kWh) |
| Fahrzeugpreis (bei BWS-BEV exkl. Traktionsbatterie) | BWS-BEV: 108.000 € ₂₀₂₀ (86.000-158.000 € ₂₀₂₀) |
| | LS-BEV: 148.000 € ₂₀₂₀ (117.000-220.000 € ₂₀₂₀) |
| | OL-BEV: 130.000 € ₂₀₂₀ (101.000-202.000 € ₂₀₂₀) |
| | Stromsch.-BEV: 125.000 € ₂₀₂₀ (96.000-202.000 € ₂₀₂₀) |
| | Ind.-BEV: 130.000 € ₂₀₂₀ (101.000-202.000 € ₂₀₂₀) |
| Batteriep reise | 91 € ₂₀₂₀ /kWh (81-120 € ₂₀₂₀ /kWh) |
| BWS-Station** (inkl. Traktionsbatterien) | 5,8 Mio. € ₂₀₂₀ (3.9-9.8 Mio. € ₂₀₂₀) |
| Öffentliche Schnellladestation** | 475.000 € ₂₀₂₀ /LP (273.000-731.000 € ₂₀₂₀ /LP) |
| ERS mit Oberleitung** | 3,1 Mio. € ₂₀₂₀ /km (2,2-6,8 Mio. € ₂₀₂₀ /km) |

| | | |
|------------------------------|---|--|
| ERS mit Stromschiene** | 4,2 Mio. € ₂₀₂₀ /km (2,4-7,8 Mio. € ₂₀₂₀ /km) | |
| Induktive ERS** | 4,1 Mio. € ₂₀₂₀ /km (3,3-9,4 Mio. € ₂₀₂₀ /km) | |
| Max. Infrastrukturauslastung | BWS: | 69 Lkw/Tag (55-72 Lkw/Tag) |
| | LS: | 19 Lkw/Tag (17-21 Lkw/Tag) |
| | ERS: | 18.000 Lkw/Tag (16.200-19.200 Lkw/Tag) |

Anmerkungen: ERS-Kosten/-Auslastung beziehen sich auf einen Doppel-km. *ab Mittelspannung exklusive Kostenumlage für Ladeinfrastruktur. **inkl. Mittelspannungsanschluss.

Der betrachtete exemplarische Anwendungsfall ist ein Sattelzug mit einer Fahrleistung von 110.000 km/a. Die elektrische Reichweite der LS-BEV und BWS-BEV beträgt ca. 360 km (entspricht 550 kWh Brutto-Batteriekapazität). ERS-BEV können während der Fahrt laden und sind daher auf nur ca. 100 km elektrische Reichweite ausgelegt. In allen Fällen steht eine nächtliche (Langsam-)Ladung auf dem Betriebshof als komplementäre Option zur Verfügung.

Im Ergebnis zeigen sich nur geringe Kostenunterschiede zwischen den Technologien (Abbildung 1). Für BWS-BEV liegen die Kosten ohne Berücksichtigung der Ladeinfrastruktur niedriger, da die Traktionsbatterien hier der Infrastruktur zugerechnet werden. Damit verbunden ist ein niedrigerer Anteil des CAPEX an den TCO von BWS-BEV, da das Fahrzeug ohne Traktionsbatterie günstiger in der Anschaffung ist. Müssen die Infrastrukturkosten allerdings von den Fahrzeugbetreibern getragen werden, so gleicht sich dieser Unterschied weitgehend aus.

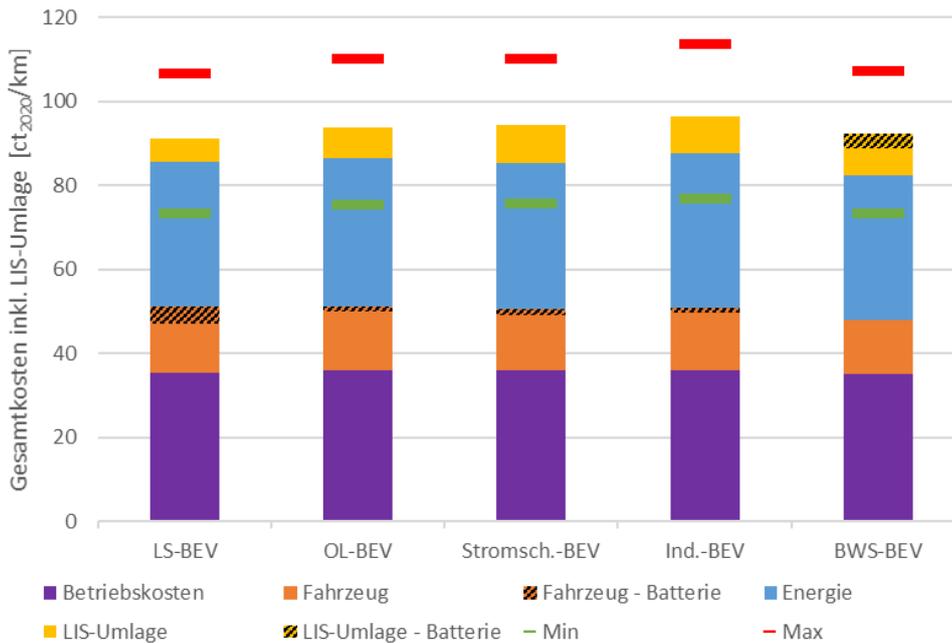


Abbildung 1: Vergleich der Vollkosten inklusive Infrastrukturkosten (Quelle: eigene Berechnungen). Die grünen und roten Striche geben die Unsicherheitsbandbreite an.

Im Vergleich zu den Unterschieden der TCO zwischen den Technologien ist die Unsicherheitsbandbreite der Kostenschätzungen sehr groß. Allerdings wird diese Bandbreite hauptsächlich durch technologieübergreifende Unsicherheiten verursacht, allen voran dem Fahrzeug-/Batteriepreis⁸ (-3 bis +7 ct/km) sowie dem Strompreis (-12 bis +19 ct/km).

Mit Blick auf die Vollkosten in einem eingeschwungenen Zustand (voll ausgelastete Infrastruktur) gibt es also zunächst einmal keinen Anhaltspunkt für signifikante wirtschaftliche Unterschiede zwischen den Technologien. Allerdings können sich Abweichungen von diesen idealtypischen Gegebenheiten bei den Technologien durchaus unterschiedlich stark auswirken, was wir im Folgenden an zwei Beispielen illustrieren.

Das erste Beispiel betrifft die Auslastung der Infrastruktur. Zum einen ist zu erwarten, dass die jeweiligen Ladeinfrastrukturen mindestens in einer Einführungsphase nicht voll ausgelastet sein werden. Gleichzeitig gibt es je nach Technologie unterschiedliche Hemmnisse, eine volle Auslastung der Infrastruktur zu erreichen. Stationäre Ladeinfrastruktur und Batteriewechselstationen sind punktförmig und ihr Ausbau lässt sich daher vergleichsweise gut mit einem wachsenden Bedarf in der Fläche skalieren. ERS-Infrastruktur hingegen ist linienförmig und erfordert vergleichsweise hohe infrastrukturelle Vorleistungen, um eine signifikante Zahl von Einsatzfällen abzudecken.

Um die Sensitivität dieser Faktoren zu untersuchen, sind in Abbildung 2 die Zusatzkosten in den TCO durch die Infrastruktur über deren Auslastung für die einzelnen Technologien aufgetragen. Abbildung 2Es zeigt sich, dass der Infrastrukturanteil an den Kosten sowohl bei LS-BEV als auch bei BWS-BEV relativ gering ist, bei ERS-BEV hingegen deutlich höher. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass ERS vor allem in einer Einführungs-/Hochlaufphase im Schnitt nur geringere Auslastungen wird realisieren können als Schnellladeinfrastruktur (aufgrund der besseren Skalierbarkeit der letztgenannten Technologien). Zum einen liegt dies an der vergleichsweise besseren räumlichen Skalierung der Schnellladeinfrastruktur – Infrastruktur

⁸ Hier spielen auch Unsicherheiten bei der Lebensdauer der Batterie hinein.

und mögliche Einsatzprofile sind hier weniger eng gekoppelt. Zum anderen stellt Schnellladung derzeit aus Sicht der Hersteller die zentrale strategische Säule der Elektrifizierung im Fernverkehr dar. Eine Kompatibilität der in den nächsten Jahren in die Flotte kommenden BEV-Lkw mit Schnellladeinfrastruktur (vgl. MCS-Standard) kann erwartet werden. Die Kompatibilität mit ERS-Infrastruktur ist hingegen in der Breite fraglich. In Summe bedeutet dies, dass die Infrastrukturkosten pro Fahrzeugkilometer für LS-BEV mit hoher Wahrscheinlichkeit unter denen von ERS liegen werden.

Für BWS kann dies nach momentanem Stand noch nicht eindeutig beantwortet werden. Wie Abbildung 2 zeigt, liegen die Infrastrukturkosten hier bei gegebener Auslastung in der gleichen Größenordnung wie bei Schnellladeinfrastruktur. Zudem hat auch die BWS-Technologie prinzipiell ein flächiges Einzugsgebiet und ist nicht an die Nutzung bestimmter Straßen gebunden. Andererseits gibt es für BWS derzeit noch keinen herstellerübergreifend akzeptierten Standard. Welche Auslastung von Batteriewechselstationen sich in einer Einführungsphase allerdings realisieren lässt, ist somit derzeit offen. Es wird u.a. stark davon abhängen, ob ein einzelner Fahrzeughersteller in dieser Situation bereit sein wird, ein initiales Netzwerk von Batteriewechselstationen zu errichten und in welcher Zahl er dazu kompatible Fahrzeuge in den Markt bringen kann.

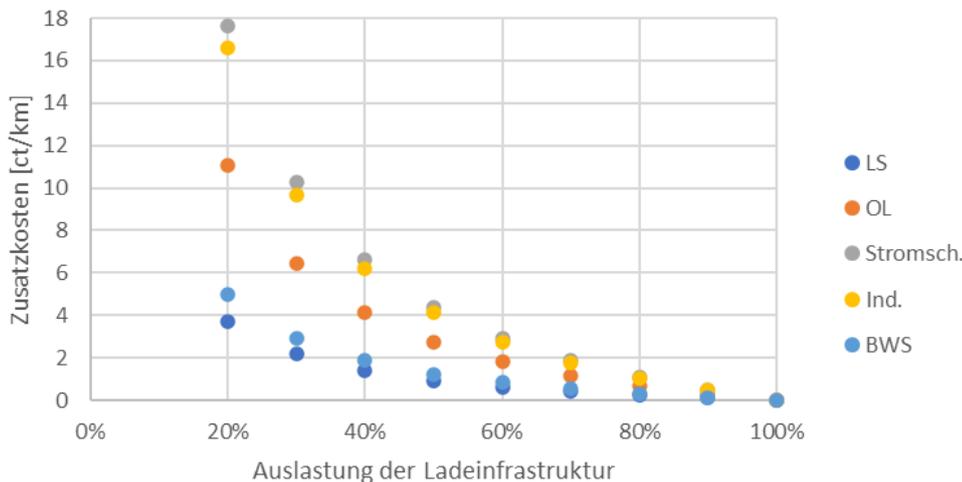


Abbildung 2: Aus der Infrastruktur resultierender TCO-Beitrag (Zusatzkosten LIS-Umlage) in Abhängigkeit der Auslastung (Quelle: eigene Berechnungen).

Das zweite Beispiel betrifft den Strompreis. Es gibt unterschiedliche Faktoren, die den Strompreis für Gewerbekunden beeinflussen können. So spielen hier die maximale Leistung, das Zeitprofil des Strombezugs und eine mögliche zeitliche Verschiebung von Ladevorgängen eine Rolle. Tendenziell gilt: Je flexibler der Strombezug, d.h. je mehr er sich dem zunehmend fluktuierenden Stromangebot anpassen kann, desto geringer ist der Strompreis. Nach (Gaete-Morales et al. 2024) können BEV-Optionen mit höherer zeitlicher Flexibilität des Strombezugs (und erst recht im Fall, dass auch noch Rückspeisungen möglich sind) deutlich geringere durchschnittliche Stromkosten realisieren.

Zusammengefasst:

- Bei Umlage der Kosten für Energieversorgungsinfrastruktur auf die Nutzer und unter der idealtypischen Annahme einer vollständigen Infrastrukturauslastung liegen die Vollkosten der betrachteten Technologien im Rahmen der Unsicherheiten auf etwa gleichem Niveau.
- Die Infrastrukturkosten für ERS skalieren gegenüber denen für stationäre Ladesysteme deutlich „flacher“ mit den Nutzerzahlen, wodurch ERS bei geringer Auslastung überproportional teuer sind. Dies erschwert die Einführung solcher Systeme.
- BWS liegen bei den Infrastrukturkosten (bei gleicher Auslastung) auf einem vergleichbaren Niveau wie stationäre Schnelllader. Da es bislang keinen herstellerübergreifenden Standard für BWS in Europa gibt, dürfte das Erreichen einer mit Schnellladesäulen vergleichbaren Auslastung allerdings anspruchsvoll sein.
- Zeitliche Profile der Stromnachfrage und deren Flexibilität unterscheiden sich prinzipiell bei den betrachteten Technologien, mit potentiell erheblichen Auswirkungen auf die Stromgestehungskosten und damit die TCO. Dies sollte näher untersucht werden.

Schlussfolgerungen

- Stationäre LIS als Energieversorgungsoption für Batterie-Lkw wird zweifellos eine zentrale Rolle spielen, ihr Ausbau stößt dabei in verschiedener Hinsicht auf Herausforderungen (Stromnetzanschluss, Flächenbedarf, schwere und teure Traktionsbatterien). Ein genauer Bedarf an Komplementärtechnologien kann naturgemäß nicht abgeleitet werden. Das vorliegende Papier versucht daher, verschiedene Optionen hauptsächlich qualitativ zu bewerten.
- Dynamische Stromversorgungssysteme (ERS) wurden in den vergangenen Jahren intensiv beforscht und können mit Blick auf technische Entwicklung, Zuverlässigkeit und Standardisierung / Normung als weit fortgeschritten gelten (insbesondere die oberleitungsgebundene Technologie). Dagegen gibt es mit Batteriewechselsystemen für Lkw in Europa noch kaum praktische Erfahrung und auch keine Standards, gleichwohl wird die Technologie in China in relevantem Maße ausgerollt.
- Alle Technologien haben relevante Vor- und Nachteile. Während beispielsweise ERS mehr (bodengebundene Technologien) oder weniger (Oberleitung) starke Eingriffe in den Straßenraum darstellen, aber kaum zusätzlichen Flächenbedarf generieren, verhält es sich bei Ladesäulen und BWS umgekehrt.
- Ein zeitnahe Ausbau der Energieversorgungsnetze entlang der Hauptverkehrsachsen ist für die Versorgung des elektrischen Schwerlastverkehrs technologieunabhängig unbedingt erforderlich, wird nach heutigem Kenntnisstand aber einen Flaschenhals für die erzielbare Hochlaufgeschwindigkeit darstellen.
- BWS weisen das Potential auf, die erforderliche lokale Netzanschlussleistung durch Vorhaltung von Lagerbatterien und intelligentes Lademanagement zu verringern. Komplementär zu stationären Lademöglichkeiten bzw. ERS besteht so die Möglichkeit, die Netzanschlussproblematik im Technologiehochlauf zu entspannen. Entsprechende Synergieeffekte sowie Zielkonflikte (z.B. zwischen Erleichterungen beim Netzanschluss und der Vorhaltung zusätzlicher Wechselbatterien) sind in künftigen Untersuchungen quantitativ zu analysieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch für MCS stationäre Pufferbatterien vorgehalten werden können.

- Bei voll ausgelasteter Energieversorgungsinfrastruktur liegen ERS und BWS bei den Vollkosten für Fahrzeugbetreiber (TCO) im Rahmen der Unsicherheiten auf ähnlichem Niveau wie das stationäre Schnellladen (MCS). Die Infrastrukturkosten für ERS skalieren gegenüber denen für stationäre Ladesysteme dabei deutlich „flacher“ mit den Nutzerzahlen, wodurch ERS bei geringer Auslastung überproportional teuer sind. Dies erschwert die Einführung solcher Systeme.
- BWS liegen bei den Infrastrukturkosten (bei gleicher Auslastung) auf einem vergleichbaren Niveau wie stationäre Schnelllader. Für den Kostenvergleich in der Praxis ist somit die zu erwartende Auslastung der BWS-Infrastruktur entscheidend. Da es bislang keinen herstellerübergreifenden Standard für BWS in Europa gibt und die meisten Hersteller bisher kein Interesse an BWS geäußert haben, dürfte das Erreichen einer mit Schnellladesäulen vergleichbaren Auslastung anspruchsvoll sein. Das wahrscheinlichste Szenario für einen BWS-Hochlauf ist derzeit das „Modell Tesla“, d.h. dass ein einzelner Fahrzeughersteller vorgeht und ein BWS auf eigenes Risiko ausrollt.
- Es ist denkbar, dass sich aus den Unterschieden beim Strombezugsprofil der Infrastrukturen und dem jeweiligen Flexibilitätspotential auch signifikante Unterschiede bei den Energiekosten ergeben. Dies sollten weitere Forschungsarbeiten quantitativ abschätzen.

Quellenverzeichnis

- Akermann, P. (2023): Reaching goals in time - The potential of dynamic charging of HDVs on motorways. *Präsentation*, Berlin.
- Alstom (2024): APS: Service-proven catenary-free tramway operations. In: *Alstom*. <https://www.alstom.com/solutions/infrastructure/aps-service-proven-catenary-free-tramway-operations>. (11.01.2024).
- baunetzwerk.biz (2023): Induktives Laden auf Autobahnen. Schlütersche Fachmedien GmbH. <https://www.baunetzwerk.biz/induktives-laden-auf-autobahnen>. (12.01.2024).
- Bernard, M. R.; Tankou, A.; Cui, H.; Ragon, P.-L. (2022): Charging solutions for battery electric trucks. *Whitepaper*, ICCT.
- BGL (2019): 35.000 bis 40.000 Lkw-Stellplätze fehlen an deutschen Autobahnen. In: *Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.* <https://www.bgl-ev.de/35-000-bis-40-000-lkw-stellplaetze-fehlen-an-deutschen-autobahnen/>. (27.08.2024).
- BMDV (2022): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2021): Parkplatzdetektionssysteme mit flächenhafter Erfassung: Funktionale Kriterien. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Cui, H.; Xie, Y.; Niu, T. (2023): China is propelling its electric truck market by embracing battery swapping. International Council on Clean Transportation.
- Deutscher Bundestag WD 5 (2023): Elektrische Straßensysteme (ERS) – Simultanes Laden und Fahren von Elektrofahrzeugen - Einsatzmöglichkeiten, Durchsetzung und Regulierung. Deutscher Bundestag.
- d-fine (2024): Bedarfs- und Standortanalyse zum flächendeckenden Laden von E-Lkw in Baden-Württemberg. d-fine, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg.
- Duprat, P. (2023): Alstoms vision on Electric Road Systems. *Präsentation*, Berlin.
- eHaul (2021): eHaul - elektrischer LKW-Fernverkehr. <https://www.ehaul.eu>. (11.01.2024).
- Electreon (2024): ElectreonProjects. <https://electreon.com/projects>. (11.01.2024).
- ELISA (2022): Evidenzbasierte Forschungsergebnisse ELISA.
- ELISA (2024): E-Highway ELISA. *Die Autobahn GmbH des Bundes*. <https://www.autobahn.de/planen-bauen/projekt/e-highway#news>. (11.01.2024).
- FeSH (2024): eHighway.SH – Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein. <https://ehighway-sh.de/>. (11.01.2024).
- Gaete-Morales, C.; Jöhrens, J.; Heining, F.; Schill, W.-P. (2024): Power sector effects of alternative options for de-fossilizing heavy-duty vehicles—Go electric, and charge smartly. In: *Cell Reports Sustainability*. Vol. 1, No. 6, S. 100123. DOI: 10.1016/j.crsus.2024.100123.
- Gerstein, D.; Sorayaei, M.; Wagner, P. L. (2023): Hintergrundpapier - Status quo und Anforderungen an den Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur für klimafreundliche Nutzfahrzeuge in Deutschland. *Hintergrundpapier*, dena.
- Gobernatz, M.; Marker, S. (2023): Batteriewechsel (eHaul, UniSwapHD). Online Workshop for Charging Technologies.
- Göckeler, K.; Steinbach, I.; Görz, W. K.; Hacker, F.; Mottschall, M. (2023): StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Öko-Institut.
- Grosse, B.; Claes, F.; Lehmann, M.; Kühnel, C.; Götz, J. (2022): Einsatz von Rettungshubschraubern im Bereich von eHighways. IKEM, Autobahn GmbH des Bundes.
- Hartwig, M.; Bußmann-Welsch, A.; Lehmann, M. (2020): Leitbilder für den Aufbau von -elektrischen Straßensystemen in Europa. Zenodo.
- Hein, C. R.; Wauri, D.; Först, B.; Hepp, A.; Khan, S.; Köhler, I.; Petermann, D.; Turgut, P. (2024): Potentialanalyse Synergieeffekte dynamischer und stationärer Ladesysteme entlang von Fernstraßen.
- ifeu (2023): My eRoads. <https://www.my-e-roads.de/szenarien/>. (09.10.2024).

- Irzik, M. (2019): Lkw-Parksituation im Umfeld der BAB 2018. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Klimke, J.; Pelzeter, J.; Räder, D. (2023a): My eRoads - Der Weg zu einem klimaneutralen Lkw-Verkehr. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- Jöhrens, J.; Lehmann, M.; Bramme, M.; Brauer, C.; Werner, M.; Bulenda, A. (2023b): Current technical findings on the eHighway system from field tests and accompanying research in Germany. *Working Paper*, AG Technikbewertung (eHighway), Deutschland.
- Kestler, W. (2023): Technisch-ökonomische Untersuchungen zur Ausgestaltung der elektrischen Infrastruktur bei elektrifizierten Autobahnen. Technische Universität Dresden, Dresden.
- Kippelt, S.; Probst, F.; Greve, M. (2022): Einfach laden an Rastanlagen – Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NOW).
- Lihua Liu, J.; Danilovic, M. (2021): Electrification of the Transportation System in China : Exploring Battery Swapping for Heavy Trucks in China 1.0. Sweden-China Bridge Collaborative Academic Platform for the Electrification of Transportation Systems.
- Panchal, C.; Stegen, S.; Lu, J. (2018): Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Vol. 21. DOI: [10.1016/j.jestch.2018.06.015](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015).
- Plötz, P.; Speth, D.; Gnann, T.; Scherrer, A.; Burghard, U.; Hacker, F.; Jöhrens, J. (2021): Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr. BOLD.
- Plötz, P.; Speth, D.; Kappler, L.; Klausmann, F.; Satvat, B. (2024): Megawatt-Laden im Lkw-Fernverkehr: Erste Erkenntnisse zu Herausforderungen und Lösungsansätzen. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Schaal, S. (2022): Lkw-Lade-Joint-Venture geht als Milence an den Start. In: *electrive.net*. <https://www.electrive.net/2022/12/06/lkw-lade-joint-venture-geht-als-milence-an-den-start/>. (09.10.2024).
- Stephan, A.; Werner, M. (2024): Autobahn unter (Gleich-)Strom - Was kommt auf uns zu? In: *eb - Elektrische Bahnen*. No. 7–2024.
- Wendt, A. (2023): Wireless Electric Road Systems. *Präsentation*, Berlin.
- Werner, M.; Schiebel, M.; Stephan, A. (2024): DC-Elektrifizierung von Autobahnen - Einblicke in die Begleitforschung des Feldversuchs FeSH. In: *eb - Elektrische Bahnen*. Vol. 122, No. Heft 1-2.
- Widgren, F.; Helms, H.; Hacker, F.; Andersson, M.; Gnann, T.; Eriksson, M.; Plötz, P. (2022): Ready to go? Technology readiness and life-cycle emissions of electric road systems.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, Dr. P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J.; Boßmann, Dr. T.; Stütz, Dr. S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, H.; Waßmuth, Dr.-Ing. V.; Paufler-Mann, D.; Rödl, Dr. A.; Schade, Dr. W.; Mader, S. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE, M-Five, Karlsruhe.