

Aktuelle technische Erkenntnisse zum eHighway-System aus Feldversuch und Begleitforschung

Arbeitspapier des Arbeitskreises Technik (AK Technik) der Feldversuchs- und Forschungsprojekte

Stand: Februar 2022

Autorinnen und Autoren:

Julius Jöhrens | ifeu-Institut Heidelberg (koordinierend)
Michael Lehmann | Fachhochschule Erfurt (koordinierend)
Matthias Bramme | Hochschule Heilbronn
Clemens Brauer | Fraunhofer ISI Karlsruhe
Alexander Bulenda | Fachhochschule Kiel
Uta Burghard | Fraunhofer ISI Karlsruhe
Tobias Burgert | Fraunhofer ICT Karlsruhe
Claus Doll | Fraunhofer ISI Karlsruhe
Eva Kaßens-Noor | Technische Universität Darmstadt
Regina Linke | Technische Universität Darmstadt
Özgür Öztürk | Technische Universität Darmstadt
Ferdinand Schöpp | Technische Universität Darmstadt
Markus Staub | Siemens Mobility Erlangen
Markus Werner | Technische Universität Dresden
Jürgen Wilke | Technische Universität Darmstadt
Markus Worbs | Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel

Inhalt

Einleitung	3
Teil I Systemüberblick eHighway	4
1 Welche Herausforderungen werden durch das eHighway-System adressiert?	4
2 Aus welchen Teilsystemen besteht das eHighway-System?	5
3 Wie ist die Energieversorgung des Systems eHighway aufgebaut?	6
4 Wie ist der Antriebsstrang der Oberleitungs-Lastkraftwagen im Feldversuch aufgebaut?	7
Teil II Forschung und erste Ergebnisse im Feldversuch	10
5 Wie sieht das interdisziplinäre Evaluationskonzept im Feldversuch aus?	10
6 Welche Zustände kann der Antriebsstrang einnehmen und wie unterscheiden sich diese?	13
7 Wie lässt sich das eHighway-System in logistische Betriebsabläufe integrieren? ...	15
8 Wie hoch ist die Verfügbarkeit der Oberleitungsinfrastruktur?	18
Teil III Ausblick auf die weitere Entwicklung	20
9 Welche internationalen Perspektiven bestehen für einen grenzüberschreitenden elektrifizierten Straßengüterverkehr?	20
10 Welche Synergiepotenziale bestehen zu anderen ERS- und alternativen Antriebs-Technologien?	22
Literaturverzeichnis	24
Autoren, Institutionen und zugehörige Projekte	26

Einleitung

Abgesehen von städtischen Oberleitungsbussen ist die Energieversorgung von Nutzfahrzeugen auf öffentlichen Straßen während der Fahrt über Oberleitungen oder Stromschienen mit nur etwa 10 Jahren Forschungs- und Entwicklungserfahrung eine noch relativ neue Technologie. Sie kann aber bei Einsatz erneuerbarer Energien einen wesentlichen Beitrag zur Emissionsreduzierung des schweren Straßengüterverkehrs und damit zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten. Nach kürzeren Pilotstrecken in Schweden und Kalifornien findet im Rahmen des Feldversuchs in Deutschland derzeit eine intensive Erprobung der Oberleitungsinfrastruktur und von etwa 15 Lkw mit Stromabnehmern auf zwei Autobahnen des Bundes und einer Bundesstraße statt. Daneben werden in anderen europäischen Ländern intensiv Machbarkeitsstudien zu sogenannten ERS – Electric Road Systems (dt. etwa elektrifizierte Straßensysteme) mit Oberleitungen oder anderen Übertragungstechnologien vorangetrieben.

Die Ziele dieses Kurzberichts sind:

- die Beschreibung des Gesamtsystems, seiner wesentlichen Teilsysteme sowie die Darstellung der wichtigsten Motive der intensiven Forschung und Entwicklung,
- die kompakte Aufbereitung aktueller Erkenntnisse aus der praktischen Technologieerprobung auf den Feldversuchsstrecken einschließlich des betrieblichen Umfelds bei den Logistikern und Speditionen sowie
- ein Ausblick auf die nächsten Schritte und die noch offenen Forschungsfragen.

Durch den Fokus auf die Erkenntnisse des deutschen Feldversuchs dominiert in der Darstellung der ERS die Variante zur Energieversorgung schwerer Nutzfahrzeuge mittels Oberleitungen. Dies hat einerseits gute Gründe, da die technologische Reife basierend auf über 130 Jahren Entwicklungs- und Einsatzerfahrung mit Oberleitungen in Bahn- und Straßenanwendungen besonders groß ist. Andererseits laufen auch zu anderen Übertragungstechnologien im europäischen und außereuropäischen Ausland teilweise intensive Bemühungen, für die jedoch auf die einschlägigen Studien und Projekte verwiesen wird.

Beim vorliegenden Arbeitspapier handelt es sich um einen Zwischenstand, der den aktuellen Erkenntnisstand des Feldversuchs in Deutschland prägnant zusammenfasst sowie den Austausch in der Fachwelt und interessierten Öffentlichkeit anregen möchte.

Das Arbeitspapier entstand als Gemeinschaftswerk des Arbeitskreises Technik (AK Technik), der sich als Austauschplattform der Feldversuchs- und Entwicklungsprojekte etabliert hat. Der Dank gilt allen Forscherinnen und Forschern sowie Beteiligten am Feldversuch, die zur Gewinnung und Aufbereitung der Erkenntnisse beigetragen haben.

Teil I Systemüberblick eHighway

1 Welche Herausforderungen werden durch das eHighway-System adressiert?

Autor: J. Jöhrens

Nach dem im Juni 2021 novellierten Klimaschutzgesetz sollen die Emissionen des gesamten Verkehrssektors von 146 Mt im Jahr 2021 bis zum Jahr 2030 auf 85 Mt CO₂ jährlich nahezu halbiert werden [Agora Energiewende 2022]. Für den Straßengüterverkehr, auf den derzeit etwa ein Drittel der Emissionen entfallen, bedeutet dies enorme Herausforderungen. Auch bei äußerst ambitionierten Maßnahmen zur Verlagerung von Teilen des Güterverkehrs auf die Schiene¹ werden voraussichtlich im Jahr 2030 etwa zwei Drittel der Transportleistung weiterhin auf der Straße abgewickelt werden müssen und brauchen Lösungen für eine effiziente Dekarbonisierung.

Aktuelle Energiesystemstudien (z.B. [Prognos et al. 2021]), ergaben übereinstimmend, dass eine direkte Nutzung von (zu möglichst großen Teilen erneuerbarem) Strom die kostengünstigste und hinsichtlich CO₂-Einsparungen wirksamste Lösung für alle Anwendungen darstellt, wo dies technisch möglich ist. Langfristig sollte möglichst vollständig Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt werden. Im Straßengüterverkehr geschieht die Elektrifizierung zunächst mittels Batterie-Lkw. Zumindest für den Lieferverkehr und für kleinere Lkw steigt das Fahrzeugangebot hier bereits kontinuierlich. Für den Fernstreckenverkehr gibt es allerdings erhebliche technische, organisatorische und ressourcenseitige Herausforderungen für Batterie-Lkw:

- Die benötigten Batterien (für eine Reichweite von 500 km bei einer Sattelzugmaschine etwa 650 kWh Energieinhalt bzw. 4-5 t Gewicht) stellen einen erheblichen Kostenfaktor dar und schränken die Nutzlast ein. Ebenso gibt es kaum Erfahrungen zu Lebensdauern in diesem Anwendungsprofil, da größere Flottenversuche mit E-Lkw erst vor kurzem gestartet sind.
- Für die Zwischenladung solcher Batterien mit Leistungen im Bereich von 1 MW sind entsprechende Flächen entlang der Autobahnen und sehr hohe punktuelle Netzanschlusskapazitäten notwendig [Plötz et al. 2020]. Auch jenseits der Autobahnen sind öffentliche oder private Ladeinfrastrukturen erforderlich [Beckers/Bieschke 2021].
- Der Rohstoffbedarf für die benötigten hohen Batteriekapazitäten birgt Risiken hinsichtlich der Verfügbarkeit, der Weltmarktpreise und der nachhaltigen Bereitstellung.

Diese Herausforderungen können durch den Einsatz von Systeme zur dynamischen Energiezuführung während der Fahrt gelöst oder zumindest abgeschwächt werden. [Plötz et al. 2021] bietet eine detaillierte Übersicht der Chancen und Risiken beider Systeme. Ein Vergleich der Nutzerkosten auf Ebene einzelner Einsatzprofile zeigt zudem, dass vor allem bei langlaufenden Verkehren durch eine Stromzuführung per Oberleitung zum Teil signifikante Kosteneinsparungen gegenüber dem Einsatz rein stationär geladener Batterie-Lkw erzielt werden können [Jöhrens et al. 2022]. Oberleitungssysteme können dabei vor allem auf stark befahrenen

¹ In (KCW 2019) wurde für das Jahr 2035 ein Anstieg des SGV-Anteils von derzeit 19 % auf 35 % der Transportleistung als realistisch angesehen und mit Maßnahmen hinterlegt.

Strecken ihre Vorteile ausspielen. Bisherige Studien sehen langfristig ein sinnvolles Anwendungspotential für ein Oberleitungsnetz von 3.000 bis 4.000 km Länge auf Autobahnen in Deutschland [Hacker et al. 2020].

Während grundsätzlich auch eine Energieübertragung über Bodenstromschienen oder induktive Kopplung mittels im Straßenkörper eingebetteter Spulen möglich ist, weist die Übertragung per Oberleitung derzeit die höchste technische Reife auf² und steht daher im Sinne einer schnellen Implementierbarkeit im Fokus der deutschen Forschung.

Eine Stromzuführung über Oberleitungen können prinzipiell alle Antriebssysteme mit Elektromotor nutzen, neben Batteriefahrzeugen also auch Hybrid- oder Brennstoffzellenantriebe. Auf die sich daraus ergebenden Synergiepotenziale geht insbesondere Abschnitt 10 ein.

2 Aus welchen Teilsystemen besteht das eHighway-System?

Autor: M. Lehmann

Das System eHighway besteht wie andere leistungsfähige Verkehrs- und Bahnsysteme aus einer Reihe von Teilsystemen und einer erweiterten Systemumgebung. Abbildung 1 zeigt das Gesamtsystem, die Teilsysteme und ihre wichtigsten Komponenten. Im Mittelpunkt dieser Elektrifizierungslösung steht eine abschnittsweise externe Energieversorgung der Fahrzeuge mittels Oberleitungen sowie die Ausrüstung der Lkw mit einem Elektroantrieb sowie einem Stromabnehmer (Pantograph), der den Fahrzeugen den Energiebezug aus der Oberleitung während der Fahrt ermöglicht. Eine detaillierte Systembeschreibung enthält [Boltze et. al. 2021].

Für den Stromabnehmer und insbesondere die Oberleitung wurden aus dem Bahnwesen bewährte und erprobte Komponenten übernommen und auf den Anwendungsfall Straße angepasst. Dadurch weist das System eine hohe technologische Reife auf und wird bereits im später thematisierten Feldversuch durch Speditionen erprobt. Neben Bahnanwendungen kann auch auf umfassende Erfahrungen mit Oberleitungen in Straßenanwendungen zurückgegriffen werden, die z. B. bei über 300 Oberleitungsbusbetrieben weltweit sowie mit mehreren Schwerlastverkehren in Tagebauen bestehen.

Durch die Nachrüstung und Integration der Oberleitungsanlage (OLA) in bestehende Straßeninfrastrukturen erschließt das System dem Lkw-Verkehr die umfassende Nutzung von erneuerbaren Energien. Die Nachladung erfolgt flexibel während der Fahrt und nicht nur mit betrieblichen Restriktionen während Lenkpausen, Be- und Entladevorgängen oder sonstigen Fahrzeugabstellungen. Die für nicht elektrifizierbare Abschnitte und den Vor- und Nachlauf zu den Autobahnen mitzuführenden Energiespeicher können bedarfsgerecht kleiner ausgelegt werden. Zum Gesamtsystem eHighway gehört auch die Systemperipherie mit einerseits der technischen Integration in Verkehrsmanagement- sowie die Energieversorgungs- und Abrechnungssysteme. Andererseits müssen auf der regulatorischen Seite auch die nationalen und europäischen Planungs-, Finanzierungs- und Genehmigungsregime angepasst und weiterentwickelt werden, s. z. B. [Hartwig et. al. 2020a] und [Hartwig 2020b].

² Dies hängt u.a. damit zusammen, dass für die Oberleitungs- und Stromabnehmertechnologie auf langjährige Erfahrungen aus dem Bahnbereich zurückgegriffen werden kann, vgl. Abschnitt 2.

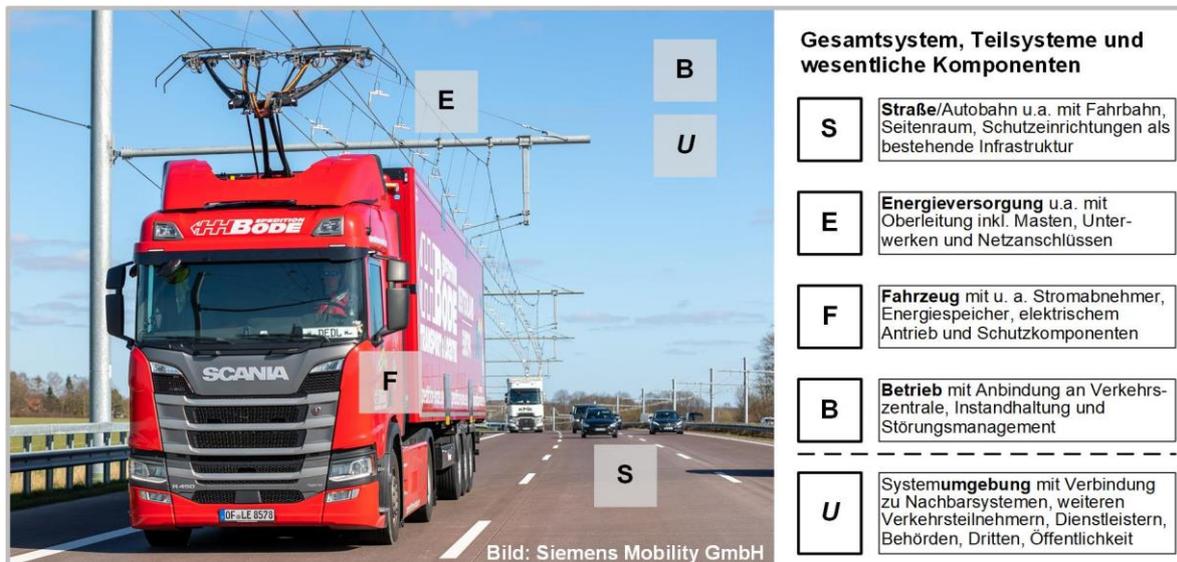


Abbildung 1: Aufbau und Teilsysteme des Systems Oberleitungs-Lkw (Bildquelle: Siemens Mobility GmbH mit Ergänzungen durch den Autor)

3 Wie ist die Energieversorgung des Systems eHighway aufgebaut?

Autoren: M. Werner, M. Staub

Das grundlegende Prinzip der Energieversorgung des eHighway-Systems ist mit den Bestandteilen der Energieübertragung im Verteil-/Übertragungsnetz, der Energieverteilung durch Unterwerke sowie der Energiezuführung und Rückstromführung über die Oberleitung in Abbildung 2 schematisch dargestellt ([Werner 2020] nach [Biesenack et al. 2006]). Das Energieversorgungssystem des eHighway basiert auf den langjährigen Erfahrungen im Eisenbahn- und Nahverkehrsbereich und ist demnach grundsätzlich bekannt und erprobt. Im Gegensatz zu Bahnanwendungen kann der Rückstrom jedoch nicht über den Fahrweg (Schiene) zurückgeführt werden, weshalb sowohl die Energiezuführung als auch die Rückstromführung über eine zweipolige DC-Oberleitung realisiert werden.

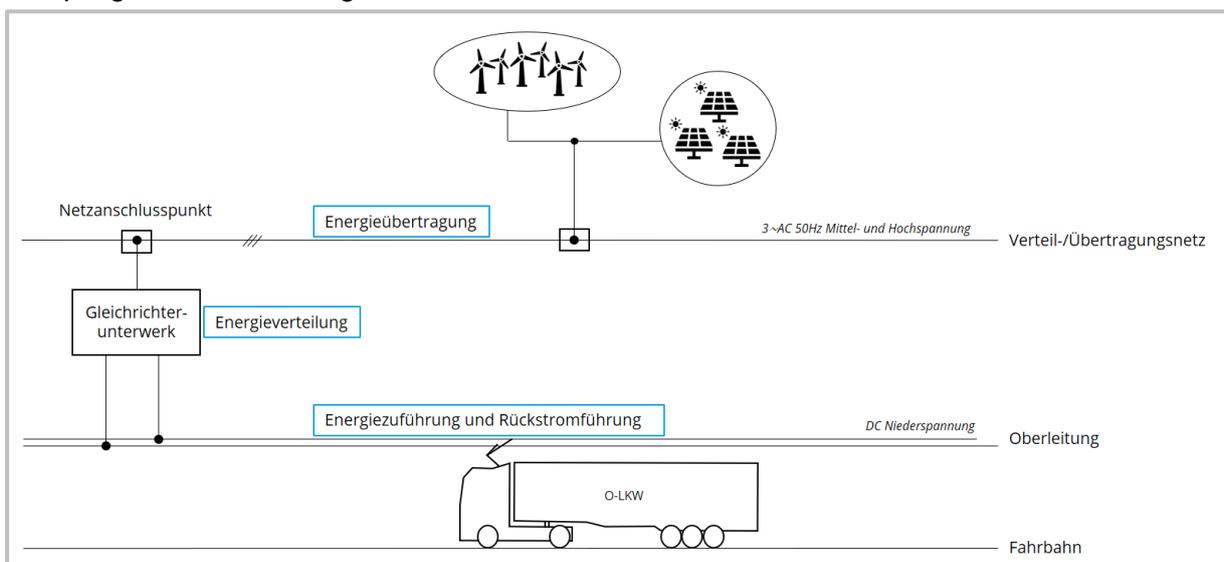


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Energieversorgung des eHighway ([Werner 2020] nach [Biesenack et al. 2006])

Die Traktions- und Ladeleistung für die Versorgung der Fahrzeuge wird aus einem Energieversorgungsnetz auf Mittel- oder Hochspannungsebene bezogen. Zu diesem Zweck werden an definierten Netzanschlusspunkten (NAP) entlang der Strecke verteilte Gleichrichterunterwerke (GUw) an die übergeordnete Netzebene angeschlossen³, was gleichzeitig die Systemgrenze zum eHighway darstellt. Die GUw sind in Containerbauweise oder als Betonfertighäuser ausgeführt, was eine kompakte Bauweise und einfache Integration in die Umgebung ermöglicht. Die GUw haben die Aufgabe, die dreiphasige Wechselspannung aus dem übergeordneten Verteil-/Übertragungsnetz auf das (Nieder-)Spannungsniveau der Oberleitungsanlage mit einem Transformator herunterzusetzen und mittels eines Gleichrichters (meist Diodengleichrichter) gleichzurichten. Soll durch Fahrzeuge hervorgerufene Bremsenergie mittels Rekuperation in das Verteil-/Übertragungsnetz zurückgespeist werden, können die GUw mit einem bidirektionalen Gleich- bzw. Wechselrichter ausgestattet werden. Die Unterwerke werden über Speise- und Rückleiterkabel mit den Einspeisepunkten an der Oberleitung verbunden. Dabei bilden mehrere GUw, die gemeinsam in die Oberleitung einspeisen, einen Speiseabschnitt. Die konkrete Anzahl, der Abstand und die Leistungsklasse der Unterwerke sind projektspezifisch und maßgeblich von der Streckentopographie und der Anzahl der zu versorgenden Fahrzeugen abhängig. Mögliche Synergien mit stationären Ladesystemen (sog. Megacharger für Lkw bzw. Ladesäulen für Pkw) an Parkplätzen und Rasthöfen sollten bereits bei der Dimensionierung und Systemauslegung der Netzanschlüsse berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 10).

Die Energiezuführung zu den Fahrzeugen sowie die Rückstromführung zum Unterwerk erfolgt in der aktuell erprobten Systemauslegung durch eine zweipolige DC-Oberleitung mit zwei parallel geführten (Hoch-)Kettenwerken, bestehend aus jeweils einem hochfesten Kupferfahrdraht mit Magnesiumlegierung und einem Tragseil (vgl. Abbildung 1). Dabei wird der Fahrdraht über stromfeste Hänger in kurzen Abständen am Tragseil aufgehängt.

Die Energieversorgung des eHighway-Systems zeichnet sich, auch im Vergleich zu anderen alternativen Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr, durch einen hohen Gesamtwirkungsgrad aus und kann unter dem Slogan „Effizient vom Windrad zum Fahrdraht“ zusammengefasst werden, wenn das Windrad stellvertretend für die Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien betrachtet wird [Lehmann et al. 2014].

4 Wie ist der Antriebsstrang der Oberleitungs-Lastkraftwagen im Feldversuch aufgebaut?

Autoren: F. Schöpp, M. Worbs, A. Bulenda, T. Burgert, Ö. Öztürk, R. Linke

Alle bislang im Feldversuch eingesetzten Oberleitungs-Lkw sind Prototypen. Konkret handelt es sich dabei um Oberleitungs-Hybrid-Lkw – kurz OH-Lkw. Sie basieren auf Fahrzeugen der Scania-Baureihe R450 A4x2NB R17N und verfügen dabei je nach Konfiguration über einen parallelen oder leistungsverzweigten Hybridantrieb. Die Fahrzeuge sind mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor, mit einer oder zwei elektrischen Maschinen (E-Maschinen), einem

³ Sollte dieser Anschluss aufgrund der Unverfügbarkeit eines öffentlichen Energieversorgungsnetzes oder aus anderen projektspezifischen Gründen nicht möglich sein, besteht ebenfalls die Option, die Unterwerke an eine systemeigene Mittelspannungsebene anzubinden.

Stromabnehmer (Pantograph) und einem elektrochemischen Energiespeicher (Batterie) ausgestattet. Sobald ein Streckenabschnitt über eine Oberleitungsinfrastruktur verfügt, nutzt der OH-Lkw den Pantographen, um elektrische Energie von der Oberleitung für den Antrieb und die Batterieladung zu beziehen. Fährt ein OH-Lkw auf Streckenabschnitten ohne Oberleitungsinfrastruktur, wird die zuvor geladene elektrische Energie aus der Batterie genutzt. Sobald die in der Batterie vorhandene Energie aufgebraucht ist, übernimmt der Verbrennungsmotor den Antrieb [Boltze et al. 2020; Schöpp et al. 2021a]. Der Betrieb eines OH-Lkws bildet dabei grundsätzlich ein Zusammenspiel der Komponenten Oberleitung, Pantograph, Batterie, E-Maschine und Verbrennungsmotor [Schöpp et al. 2022] (siehe Abbildung 3).

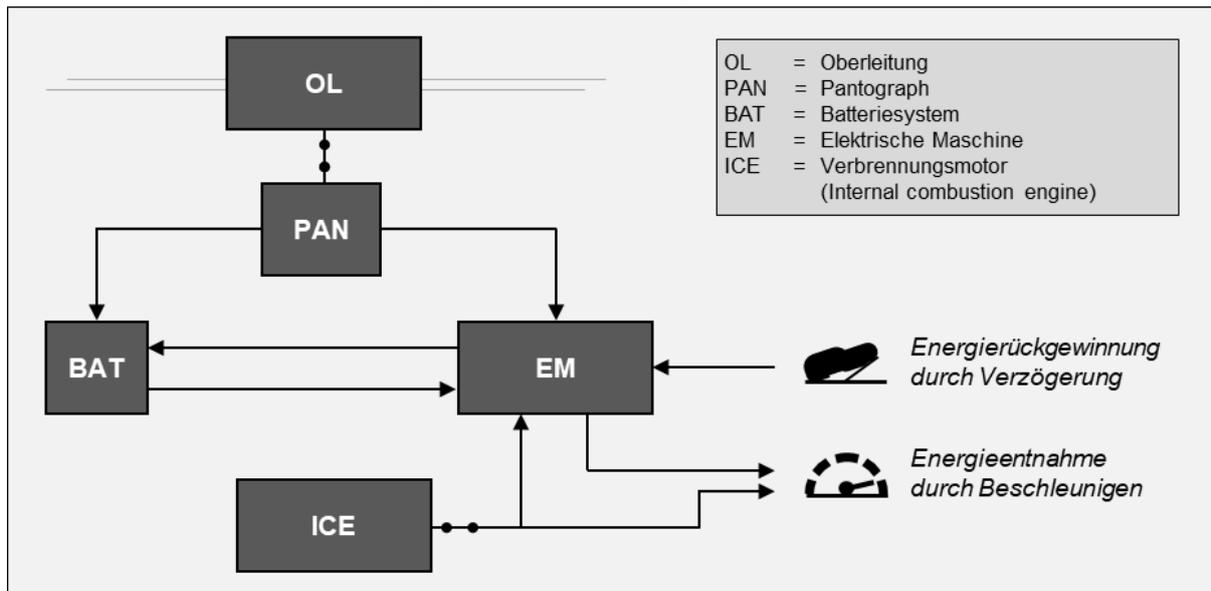


Abbildung 3: Vereinfachte, schematische Darstellung des Antriebsstrangs eines OH-Lkws [nach Schöpp et al. 2022]

Zum aktuellen Zeitpunkt werden OH-Lkw mit verschiedenen technischen Konfigurationen im Feldversuch erprobt. Deren Merkmale werden in Tabelle 1 verglichen. Im **Feldversuchsprojekt ELISA** (Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen) befinden sich fünf OH-Lkw der *Konfiguration 1* im Betrieb. Fünf Transportunternehmen mit unterschiedlichen Einsatzprofilen agieren als assoziierte Partner und setzen den ihnen jeweils zur Verfügung gestellten OH-Lkw in ihrem Tagesgeschäft ein [Boltze et al. 2020]. Die ersten beiden OH-Lkw werden seit Mai und September 2019 durch die Spedition Hans Adam Schanz GmbH & Co. KG und die Ludwig Meyer GmbH & Co. KG betrieben. Drei weitere OH-Lkw starteten im Juli 2020 den Betrieb bei der Contargo GmbH & Co. KG (in Kooperation mit Rhenus Trucking), der Knauf Gips KG sowie der Merck KGaA. Die mit Oberleitungen elektrifizierte Strecke beträgt in beide Fahrrichtungen ca. 5 km und wird derzeit in Fahrtrichtung Darmstadt um 7 weitere Kilometer verlängert.

Im **Feldversuchsprojekt FESH** (Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein) sind OH-Lkw in allen drei Konfigurationen im Einsatz. Sie werden ausschließlich von der Spedition Bode GmbH und Co. KG im (kombinierten) Shuttleverkehr im Umkreis von 30 km zum Standort Reinfeld eingesetzt. Das erste Fahrzeug in der *Konfiguration 1* ist seit Dezember 2019 im Einsatz. Im Jahr 2021 folgten im Juni ein Fahrzeug der *Konfiguration 2* und im September zwei Fahrzeuge der *Konfiguration 3*. Die Übergabe des letzten Fahrzeuges der *Konfiguration 3* fand

Anfang März 2022 statt. Die mit Oberleitungen elektrifizierte Strecke beträgt in beide Fahrrichtungen ca. 5 km.

Tabelle 1: Kennzahlen und technische Daten zu den aktuell im Feldversuch betriebenen OH-Lkw-Konfigurationen

Kennzahlen zum/zur...	Konfiguration 1		Konfiguration 2		Konfiguration 3	
Leistung Verbrennungsmotor	450 PS (331 kW)					
EURO-Klasse	EURO VI					
Leistung E-Maschine	1 x 130 kW		2 x 130 kW			
Bauart Getriebe	Automatik, 12 Gänge		DHT ¹ , kupplungslos, 6 Gänge			
Energieinhalt Batterie	18,5 kWh (brutto)				4 x 18,5 kWh (brutto)	
Leergewicht der Sattelzugmaschine	9,2 t				10,5 t	
zGG des Sattelzugs (Sonderzulassung) ³	41,786 t (KV ² 44 t)					
Länge des Sattelzugs	16,85 m				17,50 m (um 0,4 m verlängerter Radstand)	
Zusammensetzung Fahrzeugflotte auf den Feldversuchstrecken	ELISA	5	ELISA	0	ELISA	0
	FESH	1	FESH	1	FESH	3
	eWayBW	0	eWayBW	5	eWayBW	0
¹⁾ DHT dedicated hybrid transmission						
²⁾ KV kombinierter Verkehr						
³⁾ zGG zulässiges Gesamtgewicht						

Im Feldversuchsprojekt eWayBW (Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B 462) sind nur OH-Lkw der *Konfiguration 2* im Einsatz. Diese werden von den Speditionen Huette-mann und Fahrner betrieben. Sämtliche OH-Lkw werden dabei im Shuttle-Betrieb eingesetzt und pendeln zwischen zwei Papierfabriken und dem jeweiligen Logistikzentrum in Kuppenheim. Gestartet mit zwei Sattelzugmaschinen im September 2021, werden ab 2022 voraussichtlich ebenfalls fünf OH-Lkw auf der Pendelstrecke eingesetzt. In jeder Fahrtrichtung stehen dabei zwei jeweils gegenüberliegende Abschnitte mit Oberleitungsladeinfrastruktur zur Verfügung. Der Elektrifizierungsbereich 1 ist in jeder Fahrtrichtung 2,6 km lang (mit einer aktuell noch nicht realisierten Verlängerungsoption um 600 m) und der Elektrifizierungsbereich 2 ist in jeder Fahrtrichtung 750 m lang.

Vorrangig resultierend aus dem Feldversuchsstatus und der dadurch begrenzten Verfügbarkeit an Oberleitungsinfrastruktur sind die aktuell eingesetzten OH-Lkw-Konfigurationen noch auf Verbrennungsmotoren zur Überwindung auch größerer Distanzen angewiesen. Perspektivisch erscheinen neben einem Verbrennungsmotor aber auch andere Antriebstechnologien möglich und sinnvoll. In Abhängigkeit des zukünftig verfügbaren Oberleitungsnetzes sowie stationärer Lkw-Ladeinfrastruktur wird darüber hinaus immer wahrscheinlicher, dass auch rein elektrische Varianten die Anforderungen erfüllen und auf komplexere Antriebsstränge gänzlich verzichtet werden kann, siehe hierzu beispielsweise Abschnitt 10.

Teil II Forschung und erste Ergebnisse im Feldversuch

5 Wie sieht das interdisziplinäre Evaluationskonzept im Feldversuch aus?

Autoren: R. Linke, M. Werner, T. Burgert, F. Schöpp, M. Worbs, U. Burghard, E. Kaßens-Noor

Beim Vergleich der Evaluationskonzepte der drei Teststrecken in Deutschland zeigen sich einerseits gemeinsame Inhalte sowie andererseits signifikante Unterschiede. Diese resultieren aus baulichen Randbedingungen der Teststrecken und unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen der wissenschaftlichen Begleitforschung. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über das interdisziplinäre Evaluationskonzept des Feldversuchs, das anschließend erläutert wird. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Verortung der eHighway-Teststrecken in Deutschland.

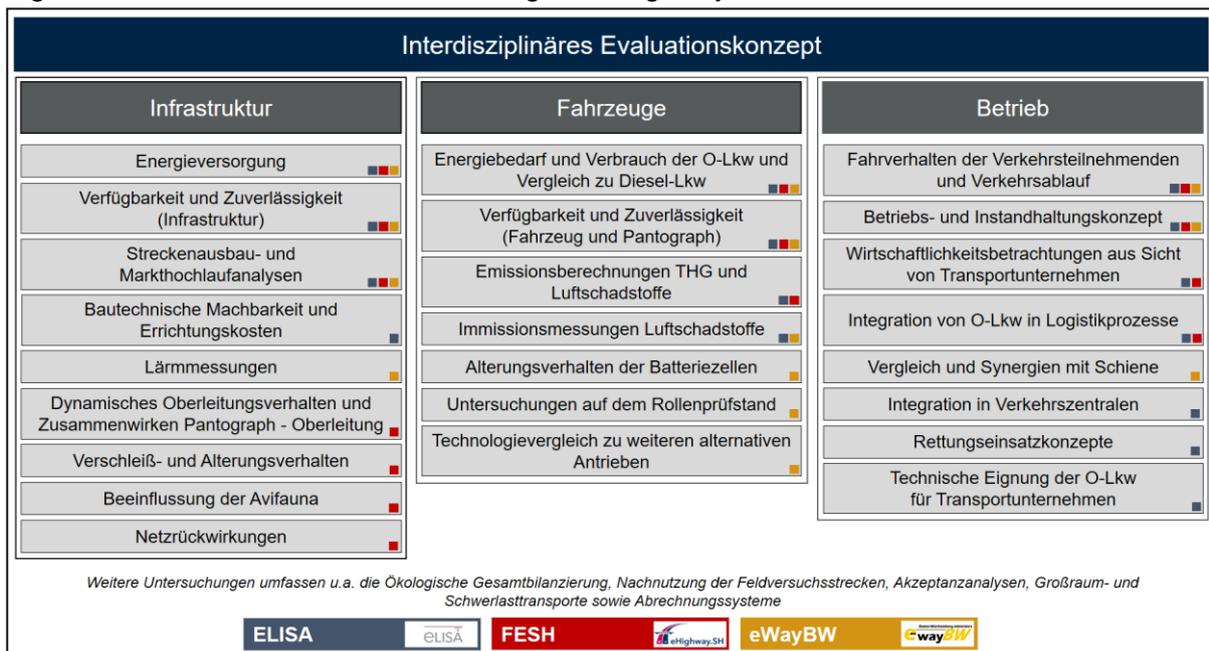


Abbildung 4: Interdisziplinäres Evaluationskonzept des Feldversuchs



Abbildung 5: Verortung der eHighway-Feldversuchsstrecken in Deutschland [Schöpp et al. 2021c]

ELISA – Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen

Die ELISA-Teststrecke zeichnet sich durch ihre zentrale Lage im Rhein-Main-Gebiet aus, einer wichtigen Verkehrsdrehscheibe in Deutschland. So liegt die Teststrecke auf einer 8-streifigen Autobahn mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen von ca. 140.000 Kfz (Stand: 2019) und einem Schwerverkehrsanteil von ca. 10 % in einem dicht besiedelten Gebiet in der Nähe des Frankfurter Kreuzes und des Frankfurter Flughafens. Diese Eigenschaften ermöglichen eine Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf weitere Autobahnabschnitte, eine herausfordernde Betriebsumgebung mit öffentlicher Sichtbarkeit sowie das Potenzial des häufigen Einsatzes der Oberleitungs-Lkw auf der Teststrecke.

Die Begleitforschung des Projekts ELISA umfasst die Vorbereitung, Durchführung und Evaluation eines realitätsnahen Probetriebs von OH-Lkw auf der Pilotanlage. Es werden wertvolle Erkenntnisse zu planerischen, verkehrlichen, straßenbaulichen und straßenbetrieblichen Aspekten geliefert. Im besonderen Fokus der Evaluation stehen Analysen zum Kraftstoff- und Stromverbrauch von OH-Lkw, die Überprüfung der Funktionalität und Zuverlässigkeit der Fahrzeug- und Infrastruktursysteme im Realbetrieb, die Integrationsfähigkeit der Fahrzeuge in bestehende logistische Prozesse sowie die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von OH-Lkw für Transportunternehmen. Darüber hinaus wird das System eHighway nach straßenbaulichen und straßenbetrieblichen Kriterien im realen Verkehrssystem und im Zusammenwirken mit bestehenden Strategien des Verkehrsmanagements evaluiert und die Auswirkungen des elektrifizierten, schweren Güterverkehrs auf die Verkehrssicherheit, den Verkehrsablauf und die Verkehrsteilnehmer unter verschiedenen Last-, Witterungs- und Verkehrsbedingungen untersucht.

FESH – Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein

Auf der Feldversuchsstrecke FESH werden die Praxistauglichkeit und die Potenziale der Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs mit Oberleitungen unter realen Betriebsbedingungen auf der Bundesautobahn A1 untersucht. Dabei steht in der wissenschaftlichen Begleitforschung eine ganzheitliche Systemevaluation unter technischen, ökonomischen, ökologischen, verkehrlichen und psychologischen Aspekten im Fokus. Es werden umfangreiche Erfahrungen und Erkenntnisse zur Integration und Migration der Technologie in den Straßenraum, die Energieversorgung, die Verkehrsdurchführung und die Logistik der Transportunternehmen generiert. Die 2 x 5 km lange eHighway-Teststrecke befindet sich zwischen Reinfeld und Lübeck auf der BAB 1 und wird durch die am Projekt beteiligte Spedition Bode im täglichen Shuttlebetrieb in mehreren Umläufen mit unterschiedlichen OH-Lkw-Typen genutzt, was die Schaffung einer validen Datengrundlage für die Auswertungen ermöglichen soll.

Die Begleitforschung zeichnet sich insbesondere durch eine tiefgreifende Evaluation der technischen Eignung der Oberleitungsinfrastruktur und deren Schnittstellen zu den Fahrzeugen sowie dem Energieversorgungsnetz unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussparameter aus. Die Untersuchungen umfassen unter anderem das dynamische Verhalten der Oberleitung, das Verschleiß- und Alterungsverhalten relevanter Komponenten, Energiebedarfs- und Verbrauchsanalysen der OH-Lkw sowie die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur. Darüber hinaus wird ein separates Forschungsunterwerk mit Wechselrichter und Zwischenspeicher für die Analyse der Themen Netzurückwirkungen und Netzsta-

bilität betrieben. Weitere Forschungsschwerpunkte liegen auf der Wirtschaftlichkeit (aus Speditionssicht), der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie auf den ökologischen Auswirkungen des eHighway-Systems im Hinblick auf beispielsweise Luftreinhaltung, Ressourceneinsatz, Flächenbedarf und Beeinflussung der Avifauna. Insgesamt werden wertvolle Erfahrungen beim Betrieb einer eHighway-Anlage gesammelt, empirische Daten zur Bewertung der Praxistauglichkeit und Funktionalität des eHighway generiert, Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert und darauf aufbauend Empfehlungen für einen Rollout der Technologie abgeleitet.

eWayBW – Feldversuch zur Erprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen auf Bundesfernstraßen in Baden-Württemberg

Die eWayBW-Pilotstrecke verläuft zwischen den Städten Kuppenheim und Gernsbach-Obertsrot im Murgtal in Baden-Württemberg auf der B 462 und hat eine Gesamtlänge von etwa 18 Kilometern. Auf der Pilotstrecke werden jährlich bis zu 500.000 t Papier im vollkontinuierlichen 24-Stunden-Betrieb an sieben Tagen pro Woche von drei Papierherstellern in Obertsrot zu zwei Logistikzentren in Kuppenheim verbracht. Dabei ergeben sich pro Tag bis zu 64 Umläufe.

In der Begleitforschung der Teststrecke eWayBW wird aus techno-ökonomischer Sicht betrachtet, wie sich Bundesstraßen- und Autobahnnetz in Baden-Württemberg für eine Elektrifizierung eignen, wie hoch die zusätzlichen Strombedarfe durch OH-Lkw in verschiedenen Markthochlaufszenarien sind und welche Transporte im Murgtal besser auf der Schiene und welche besser mit dem Oberleitungs-Lkw abgewickelt werden können. Des Weiteren werden die Auswirkungen des Einsatzes von Oberleitungs-Lkw auf Lärmbelastung und Luftschadstoffe durch Messungen an der Strecke sowie auf einem Rollenprüfstand und Modellierung ermittelt. Zusätzlich erfolgt die Untersuchung der Auswirkungen des Einsatzes von Oberleitungs-Lkw auf Straßenplanung, Straßenbetrieb und Nutzerverhalten u. a. mittels eines Vergleichs des Verkehrsverhaltens vor und nach Aufbau der Oberleitung. Der Aufbau einer oberleitungsähnlichen Ladeinfrastruktur ermöglicht den realitätsnahen Betrieb von Oberleitungs-Lkws am Rollenprüfstand und gewährt somit, ergänzend zu den Messungen auf der Straße, weiterführende Untersuchungen verschiedener Fahrprofile und Elektrifizierungsszenarien.

Die techno-ökonomischen Arbeiten in eWayBW berücksichtigen insofern in besonderer Weise die speziellen Bedingungen einer derartigen Teststrecke im Murgtal im Schwarzwald wie beengte Platzverhältnisse, enge Kurvenradien, Brücken und Tunnel sowie Lärmschutzanforderungen. Damit können gegenüber den anderen beiden Pilotstrecken in Hessen und Schleswig-Holstein zusätzliche wertvolle Erkenntnisse gesammelt werden. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal des Projektes ist, dass es in der jetzt startenden Phase zusätzlich zur Erprobung der OH-Lkw einen Technologievergleich mit allen derzeit in Betracht kommenden alternativen Antriebsformen für schwere Nutzfahrzeuge geben wird. Dafür werden in der Betriebsphase reale Daten zu den Fahrzeugen, z. B. zum Energieverbrauch oder zu den Tank- bzw. Ladedauern erhoben, um die Oberleitungs-Lkw bezüglich ihrer wirtschaftlichen und ökologischen Daten zu analysieren, mit anderen Lkw-Typen zu vergleichen und hinsichtlich der Erfüllung der Logistikaufgaben zu untersuchen.

Weitere Themen der Begleitforschung in eWayBW sind eine umfassende Erforschung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Technologie, sowohl lokal vor Ort als auch in der regionalen und überregionalen Wahrnehmung. Daneben erfolgt eine enge Vernetzung mit Akteuren in angrenzenden Ländern hinsichtlich deren Aktivitäten im Bereich eHighway.

6 Welche Zustände kann der Antriebsstrang einnehmen und wie unterscheiden sich diese?

Autoren: F. Schöpp, A. Bulenda, M. Worbs, Ö. Öztürk, R. Linke

Die Antriebe der OH-Lkw im Feldversuch operieren in verschiedenen sogenannten *Betriebsmodi*. OH-Lkw können grundsätzlich in einem hybriden Modus unterwegs sein, bei dem der Verbrennungsmotor maßgeblich an der Traktion des Fahrzeugs beteiligt ist, oder aber auch in einem rein elektrischen Modus, bei dem die elektrische Maschine allein für den Vortrieb sorgt. In Abhängigkeit der Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage ergeben sich weitere Kombinationen, welche in Abbildung 6 dargestellt sind.⁴

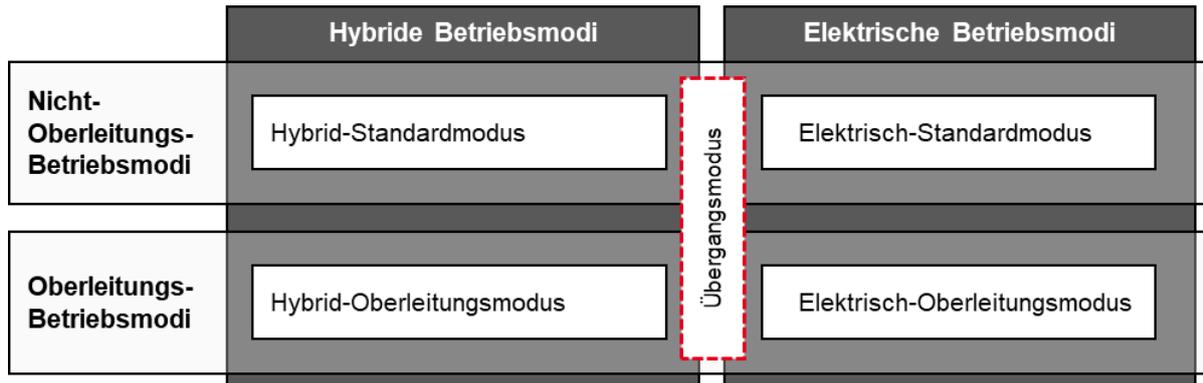


Abbildung 6: Zusammenspiel der Betriebsmodi eines OH-Lkws [nach Schöpp et al. 2021b]

Abseits einer Oberleitung sind der Hybrid- und der Elektrisch-Standardmodus möglich. Die Antriebssteuerung entscheidet entsprechend des Anforderungsprofils eines Fahrtabschnitts und der Zustandsdaten des Antriebs über das optimale Betriebsprogramm und den zu wählenden Betriebsmodus. Im **Hybrid-Standardmodus** ist der Verbrennungsmotor immer aktiv. Das Zusammenspiel aus Verbrennungsmotor und E-Maschine stellt die Traktion sicher, wobei der Verbrennungsmotor hierbei den Hauptanteil übernimmt. Der Pantograph findet in diesem Betriebsmodus keine Anwendung. Eine Ladung der Batterie kann durch Leistungsüberschüsse sowie Rekuperation erfolgen. Die maßgebenden Energiequellen sind Dieselkraftstoff als primäre Energiequelle sowie elektrische Energie aus der Batterie als sekundäre Energiequelle. Im **Elektrisch-Standardmodus** ist der Verbrennungsmotor nicht aktiv. Ausschließlich die E-Maschine ist für die Traktion verantwortlich. Der Pantograph wird in diesem Betriebsmodus wiederum nicht verwendet. Eine Ladung der Batterie kann durch Rekuperation erfolgen. Die ausschließliche Energiequelle für diesen Betriebsmodus ist elektrische Energie aus der Batterie als primäre Energiequelle.

Erreicht ein OH-Lkw eine Oberleitungsanlage (OLA), entscheiden bislang die OH-Lkw-Fahrerinnen und -Fahrer eigenständig über die Nutzung der Oberleitung mittels Knopfdrucks. Wird der Pantograph ausgefahren und die Verbindung zur OLA hergestellt, sind entweder der rein elektrische Oberleitungsmodus möglich, oder in manchen Situationen der hybride Oberleitungsmodus, in dem der Verbrennungsmotor die Traktion unterstützt oder betriebsrelevante Funktionen übernimmt. Auch hier entscheidet die Antriebssteuerung entsprechend des Anforderungsprofils, ob der Verbrennungsmotor aktiviert oder abgeschaltet wird. Operiert der OH-Lkw im **Elektrisch-Oberleitungsmodus**, ist der Verbrennungsmotor nicht aktiv. Ausschließ-

⁴Geringfügige Unterschiede in den Betriebsmodi-Definitionen auf den einzelnen Feldversuchstrecken sind möglich.

lich die E-Maschine ist dann für die Traktion verantwortlich. Der Pantograph ist in diesem Betriebsmodus mit der Oberleitung verbunden und überträgt elektrische Energie. Diese wird einerseits für die Traktion verwendet, andererseits wird zeitgleich die Batterie geladen. Auch Rekuperation kann zusätzlich zur Ladung der Batterie beitragen. In manchen Fällen ist es zusätzlich möglich, dass der Verbrennungsmotor die Traktion unterstützt oder aus betriebsrelevanten Gründen mitläuft, beispielsweise für Heizung oder Lüftung. In diesem Fall operiert der OH-Lkw im **Hybrid-Oberleitungsmodus**. Dabei ist auch ein geringer Dieselmotorkraftstoffverbrauch festzustellen. Überdies finden in geringem Umfang **Übergänge** zwischen dem Wechsel zweier Betriebsmodi statt. [Schöpp et al. 2021a]

Abseits der Oberleitungsanlage haben die OH-Lkw-Fahrerinnen und -Fahrer zusätzlich die Möglichkeit, Einfluss auf den Betriebsmodus zu nehmen und dadurch bspw. die Batterie durch den Verbrennungsmotor zu laden oder das Fahrzeug in Abhängigkeit des Ladestands der Batterie zu zwingen, rein elektrisch zu fahren [Boltze et al. 2020; Schöpp et al. 2021a]. Abbildung 7 zeigt die verschiedenen Betriebsmodi und den Wechsel zwischen den Traktionsanteilen von Verbrennungsmotor und E-Maschine anhand einer exemplarischen Fahrt eines OH-Lkws der Konfiguration 1 im Shuttleverkehr des FESH. Über die Zeit dargestellt sind die Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h, die mechanischen Leistungen des Verbrennungsmotors (P_{VKM}) und der E-Maschine (P_{EM}) in kW, der momentane Dieselmotorkraftstoffverbrauch in l/h, sowie der Batterieladestand als State of Charge (SOC) in % der Bruttokapazität.

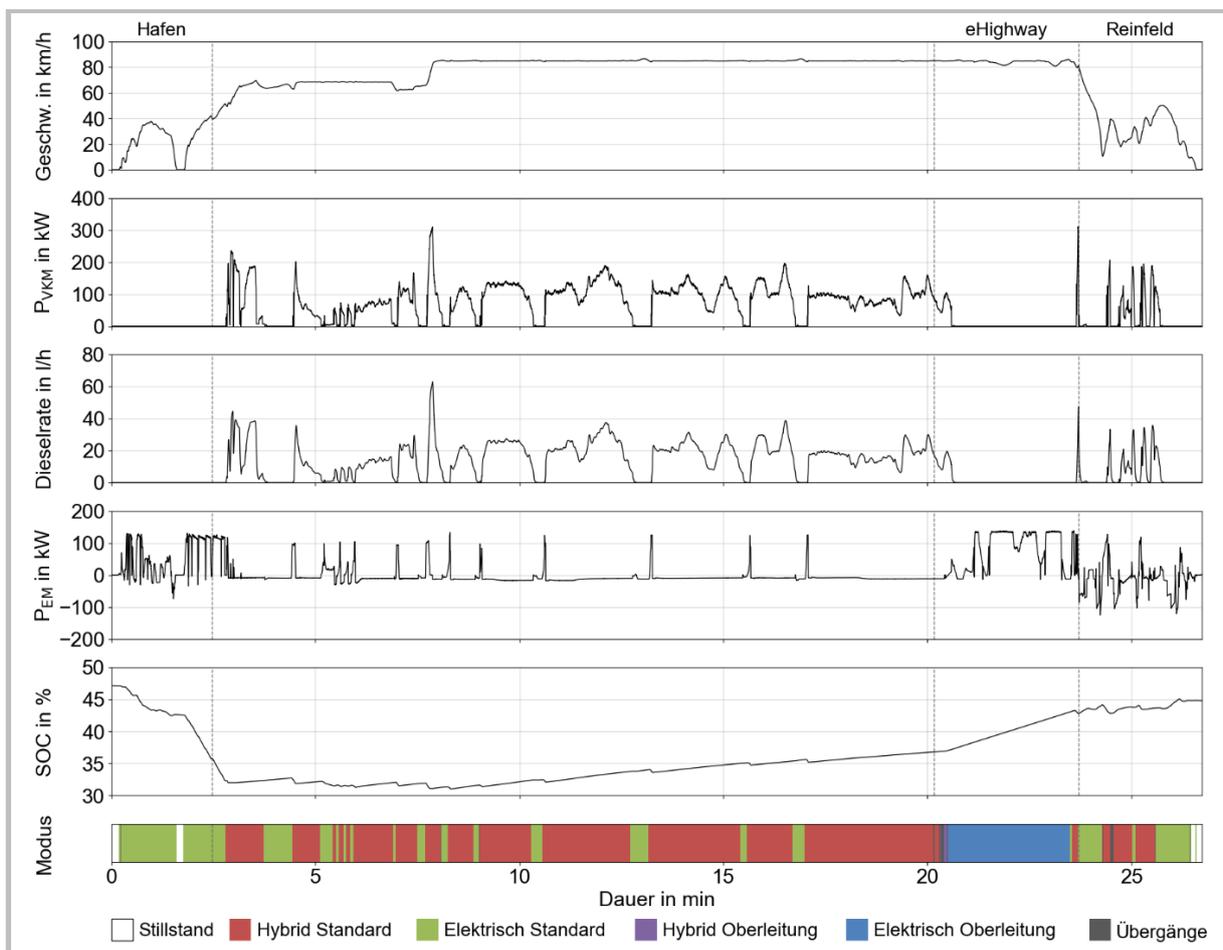


Abbildung 7: Verläufe der Geschwindigkeit, mech. Leistung von Verbrennungsmotor und EM sowie SOC für eine exemplarische Fahrt auf der FESH-Teststrecke

In den urbanen Bereichen zum Beginn und zum Ende der Fahrt – hier das Hafengelände sowie der Speditionsbereich in Reinfeld – ist zu erkennen, dass sich der OH-Lkw größtenteils rein elektrisch und lokal emissionsfrei fortbewegt. Auf Streckenanteilen ohne Oberleitungsinfrastruktur kann der Verbrennungsmotor im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben werden und mit der über den Vortrieb hinausgehenden Energie die Batterie laden. Dadurch erhöht sich der Batterieladezustand (SOC). Im Oberleitungsbetrieb fährt der OH-Lkw rein elektrisch und lädt parallel dazu die Batterie.

Eine Auswertung im Feldversuchsprojekt FESH ergab für dieses Fahrzeug im Jahr 2020 einen durchschnittlichen Anteil der elektrischen Betriebsmodi von zusammen 29 % und der hybriden Betriebsmodi von 64 % bezogen auf die zurückgelegte Strecke. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass aufgrund der kurzen Teststrecke nur ca. 20 % der Gesamtstrecke unter der Oberleitung zurückgelegt wurde. Mit den neueren Fahrzeugkonfigurationen (siehe Abschnitt 4) ist aufgrund höherer Batteriekapazitäten und höheren OL-Ladeleistungen ein weiterer Anstieg der elektrischen Betriebsanteile zu erwarten.

7 Wie lässt sich das eHighway-System in logistische Betriebsabläufe integrieren?

Autoren: R. Linke, M. Bramme, T. Burgert, F. Schöpp, C. Doll, C. Brauer

Die aktuell auf den drei deutschen Teststrecken eingesetzten OH-Lkw erfüllen unterschiedliche Transportzwecke, welche nach dem Einsatzprofil unterschieden werden können. Die derzeit 15 betriebenen OH-Lkw lassen sich den folgenden Kategorien zuordnen: Shuttleverkehr, Verteilerverkehr und Kombiniertes Verkehr (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Struktur der Transportfahrt und Fahrtenhäufigkeit unter der Oberleitungsanlage

Struktur der Transportfahrt	Shuttleverkehr	Verteilerverkehr	Kombiniertes Verkehr
Fahrzeuge je Projekt			
ELISA	2	2	1
FESH	1	-	4
eWayBW	5	-	-
Häufigkeit der Fahrten unter der Oberleitungsanlage pro OH-Lkw (maximal pro Tag)*			
ELISA	11	4	1
FESH	14	-	12
eWayBW	11	-	-

**) unterliegt Schwankungen je nach Transportaufkommen*

Das Augenmerk des Projekts ELISA liegt speziell auf dem Einsatz der OH-Lkw bei verschiedenen Transportunternehmen mit unterschiedlichen Anforderungen an die Fahrzeugkonfiguration und unterschiedlichen logistischen Abläufen. Zwei der OH-Lkw werden in der Region Rhein-Main als Shuttle zwischen Darmstadt und Frankfurt am Main eingesetzt. Sie passieren die ELISA-Teststrecke mit einer hohen Frequenz. Einer der OH-Lkw im Shuttleverkehr operiert darüber hinaus im Zweischichtbetrieb. Ein weiteres Fahrzeug wird in der temperaturgeführten

Logistik eingesetzt und beliefert als Verteilerverkehr regionale Supermärkte. Das vierte Fahrzeug transportiert insbesondere Baustoffe und beliefert, von einem zentralen Standort aus, unterschiedliche Kunden in der Region. Der Betrieb des fünften OH-Lkws zeichnet sich besonders durch den Einsatz im Kombinierten Verkehr (KV) aus. Der OH-Lkw fährt vor allem Binnenhäfen in der Region mit Containern an bzw. liefert ausgehend von diesen Binnenhäfen Container aus.

Im Projekt FESH werden alle verfügbaren OH-Lkw durch eine einzige Spedition eingesetzt. Die Fahrzeuge pendeln auf insgesamt drei verschiedenen Strecken und nutzen die Oberleitung jeweils auf dem Hin- und Rückweg. Zwei Strecken stellen den Vor- und Nachlauf zum unbegleiteten KV per Bahn oder Fähre nach Skandinavien dar. Hierbei fahren die eingesetzten OH-Lkw vom Depot der Spedition zum KV-Terminal im Lübecker Hafen oder zum Hafenterminal in Travemünde. Auf diesen Relationen werden hauptsächlich Lebensmittel in gekühlten Kofferaufliegern transportiert, teilweise werden aber auch Planenaufleger oder Container eingesetzt. An den Terminals findet ein Aufliegertausch statt. Der angelieferte Auflieger wird für den Weitertransport auf Schiff oder Bahn bereitgestellt und ein im Nachlauf befindlicher Auflieger wird zurück zum Depot transportiert. Die dritte Strecke wird durch einen OH-Lkw mit Planenaufleger bedient. Hierbei finden Shuttleverkehre zwischen einem Produktionsstandort eines Kunden des Spediteurs in Bad Oldesloe und einem Lager in Lübeck-Moisling statt.

In eWayBW werden die OH-Lkw ebenfalls als Shuttle im regulären Logistikbetrieb bei zwei Speditionen entlang der B462 bei Rastatt eingesetzt. Als Besonderheit ist hier hervorzuheben, dass diese im 24/7-Betrieb auf der Pilotstrecke zwischen Logistikzentren und Papierfabriken auf einer Bundesstraße pendeln. Die Logistikprozesse sind dabei so ausgerichtet, dass ein möglichst hoher Nutzungsgrad der Sattelzugfahrzeuge erreicht wird. Dementsprechend werden die Sattelzugfahrzeuge nach Erreichen der Parkposition bei den drei Firmen in Obertsrot oder in den beiden Logistikzentren in Kuppenheim von den Aufliegern abgekoppelt, um unmittelbar einen fertig beladenen Auflieger aufnehmen zu können. Infolge dieses Umsatteln sind die Fahrzeuge durchgängig im Einsatz und Standzeiten werden weitgehend vermieden. So kommt ein OH-Lkw auf 10-11 Umläufe pro Tag und dies an 365 Tagen im Jahr. Zur Einbindung der OH-Lkw in verschiedene Logistikkonzepte wurden zudem prospektive Abschätzungen der Umweltwirkungen von OH-Lkw und O-BEV einerseits im bestehenden Shuttlebetrieb zwischen den Papierfabriken und den Lagerstandorten, also der aktuell bedienten Versuchsstrecke, und darüber hinaus im Einsatz für den Zulauf zu den KV-Terminals in Karlsruhe und Wörth (Rheinland-Pfalz) sowie für den Fernverkehr durchgeführt (siehe [Zembrot et al. 2021]).

Die Analyse der Transportfahrten der OH-Lkw im Feldversuch zeigt, dass sich aufgrund der aktuellen Lage und Länge der Teststrecken zunächst der Einsatz in regionalen Shuttleverkehren anbietet. Darüber hinaus wurden die OH-Lkw auch erfolgreich im Verteilerverkehr sowie im Vor- bzw. Nachlauf des KVs als Shuttle rund um die Teststrecken eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass mit dem Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur (s. Abschnitt 10) und der damit einhergehenden Möglichkeit, die OH-Lkw flexibler einsetzen zu können, auch der KV andernorts und der Fernverkehr von der Oberleitungsinfrastruktur stark profitieren werden.

Neben der Analyse der Struktur der Transportkette spielt auch die Wahrnehmung seitens der Transportunternehmen bei der Integration von OH-Lkw in logistische Abläufe eine entschei-

dende Rolle. Insgesamt berichten die Transportunternehmen bislang vorwiegend von positiven Erfahrungen aus dem Realbetrieb. Interviews mit mehreren Expertinnen und Experten haben gezeigt, dass besonders wichtige betrieblich-operative Anforderungen wie die Transportzeit oder die Kundenzufriedenheit unter Einsatz der aktuellen OH-Lkw-Konfigurationen jederzeit gewährleistet werden konnten. Die Reduktion der Ausfallzeiten der bisherigen OH-Lkw-Prototypen sowie die Möglichkeit, die elektrische Reichweite der OH-Lkw mittels Verlängerung bzw. Ausbau der Oberleitungsanlage zu erhöhen, sind außerdem wichtige Voraussetzungen für die Anschaffung von weiteren OH-Lkw durch Transportunternehmen in der Zukunft.

Die bisherigen Untersuchungen in den Feldversuchen haben weiterhin gezeigt, dass die technische Konfiguration der OH-Lkw einen Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten der OH-Lkw hat. Insgesamt erfüllen die OH-Lkw-Konfigurationen 1 bis 3 (s. Tabelle 1 in Abschnitt 4) die wesentlichen technischen Anforderungen seitens der in den Feldversuchen beteiligten Transportunternehmen. Zu diesen wesentlichen Anforderungen zählen die Antriebsleistung, die Achskonfiguration, keine Einschränkung bzgl. der Zuladung, die Vorhaltung notwendiger Assistenzsysteme sowie die Kompatibilität mit unterschiedlichen Aufliegertypen.

Auf den derzeitigen Feldversuchstrecken werden in Kombination mit der OH-Lkw-Sattelzugmaschine unterschiedliche Aufliegertypen eingesetzt. Zu diesen zählen Kofferauflieger (teilweise mit Kühlfunktion), Containerchassis (20ft oder 40ft) sowie Tankauflieger. Bisher nicht kompatibel mit den Prototypen für OH-Lkw-Sattelzugmaschinen sind Kippauflieger, wobei eine Weiterentwicklung der Versuchsfahrzeuge diese Kombination zukünftig nicht ausschließt.

Die im Realbetrieb eingesetzten OH-Lkw transportieren eine Vielzahl von Gütern mit unterschiedlichen Eigenschaften. Zu diesen Gütern gehören Dispersionsfarbe, Dünnschlamm, Papier und Profile für den Trockenbau sowie temperaturempfindliche Güter wie Lebensmittel. Trotz der unterschiedlichen Anforderungen der Güter an den Transport konnte festgestellt werden, dass keine Einschränkungen für die im Projekt beförderten Güter vorliegen. Allerdings sind die aktuellen OH-Lkw nicht für den Transport von Gefahrgut zugelassen. Hintergrund ist hier der bislang vorliegende Prototypenstatus, welcher mit dem Übergang in eine Serienproduktion von OH-Lkw dann jedoch auch den Transport von Gefahrgütern ermöglichen soll.

Die Auswertung der Fahrgeschwindigkeiten der OH-Lkw über die Monatsverläufe hat gezeigt, dass die OH-Lkw die Oberleitungsanlage größtenteils mit der maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit (80 km/h) passieren. Des Weiteren liegen aufgrund des hybriden Antriebstrangs keine Reichweitereinschränkungen vor. Aufgrund der unterschiedlichen Konfigurationen der OH-Lkw können zusätzliche Einrichtungen, wie Ladestationen, notwendig sein. Die aktuell im Projekt ELISA eingesetzten OH-Lkw benötigen keine zusätzlichen Einrichtungen auf dem Betriebshof oder beim Kunden. Die in FESH eingesetzten OH-Lkw der Konfiguration 3 sind auch mit einer Plug-In-Funktion mittlerer Leistung (22 kW) ausgestattet, welche zusätzlich stationäres Laden über eine Ladestation auf dem Betriebshof ermöglicht.

In den Projekten FESH und eWayBW wird die ergänzende Einrichtung stationärer Ladeinfrastruktur für das Laden über den Pantographen geprüft, was erste Erkenntnisse im Hinblick auf die in Abschnitt 10 thematisierten Synergiepotenziale geben könnte.

8 Wie hoch ist die Verfügbarkeit der Oberleitungsinfrastruktur?

Autoren: M. Werner, J. Wilke

Als Teil der Begleitforschung des Feldversuchs werden wichtige Maßzahlen der **Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage** (OLA) untersucht und bestimmt. Die Verfügbarkeit beschreibt in diesem Kontext die Fähigkeit der Oberleitungsanlage, in einem Zustand zu sein, in dem diese in einem definierten Betrachtungsrahmen mit vorgegebenen Randbedingungen während einer bestimmten Zeitspanne die geforderte Funktion der kontinuierlichen externen Energieversorgung der Oberleitungs-Fahrzeuge erfüllen kann. Basis für die Verfügbarkeitsbetrachtungen bilden Anlagentagebücher aus den Feldversuchsstrecken, in denen alle Ereignisse dokumentiert sind, die mit einer Betriebsunterbrechung der OLA einhergehen. Das beinhaltet im Wesentlichen Informationen zum Zeitpunkt des Ausfalls und der Wiederinbetriebnahme, zur Ursache der Betriebsunterbrechung, zu den Instandsetzungsmaßnahmen sowie zu den betroffenen Anlagenteilen und Streckenbereichen. Ziel der Untersuchungen zur Verfügbarkeit der OLA ist es, wichtige Kennzahlen zu Betriebs- und Ausfallzeiten, Störungsursachen sowie relevante Verfügbarkeitsmaßzahlen zu bestimmen. Die hier exemplarisch dargestellten Auswertungen sollen erste Erkenntnisse zur Verfügbarkeit der OLA aufzeigen. Dafür wird folgender **Betrachtungsrahmen** definiert:

- Zeitspanne vom 01.01.2020 bis 31.12.2020 mit 24/7-Betrieb der Oberleitungsanlage
- Betrachtete Feldversuchsstrecken FESH und ELISA
- Einbeziehung aller infrastrukturseitigen Betriebsunterbrechungen

Die Analysen umfassen unter anderem die Gegenüberstellung der im 24/7-Betrieb **theoretisch möglichen Betriebszeiten** der OLA in FESH und ELISA mit den **realen Betriebszeiten** im Jahr 2020 sowie die Kategorisierung und Untersuchung der **Ursachen der Betriebsunterbrechungen**. In Abbildung 8 ist exemplarisch für FESH der Anteil der Betriebszeiten der Oberleitungsanlage (links) sowie die Verteilung der Dauer der Betriebsunterbrechungen nach den gebildeten Kategorien⁵ (rechts) dargestellt. Daraus wird zunächst ersichtlich, dass die Oberleitung während eines Großteils (> 96 %) der Zeit in Betrieb war. Bei Betrachtung der Betriebsunterbrechungen und deren Ursachen lässt sich außerdem erkennen, dass die Nicht-Verfügbarkeit der OLA bei FESH maßgeblich durch von der Oberleitung unabhängige bauliche Maßnahmen im Straßenraum wie beispielsweise Fahrbahnausbesserungen sowie aufgrund der im Feldversuch geplanten Inspektionen an der OLA hervorgerufen wurde. Um die Auswirkungen auf den Lkw-Verkehr zu minimieren, bietet es sich an, planbare Arbeiten soweit wie möglich in Schwachverkehrszeiten zu legen.

Der Anlagenbetrieb in ELISA wies im Betrachtungszeitraum ähnliche Betriebs- und Unterbrechungszeiten auf. Speziell bei ELISA wurde die Betriebsunterbrechungsdauer maßgeblich durch eine angeforderte vorsorgliche Abschaltung aufgrund eines externen Unfalls im Straßenverkehr hervorgerufen.

⁵ Die Kategorie Störung OLA umfasst alle Ereignisse, die unmittelbar auf einen Ausfall der Funktionsfähigkeit der OLA selbst zurückzuführen sind. Sonstiges beinhaltet beispielsweise Abschaltungen der OLA für Forschungsinstallationen in den Feldversuchsstrecken oder Störungen in der Betriebszentrale. Als Mängelbeseitigung werden Betriebsunterbrechungen eingestuft, die aus sogenannten frühen Fehlern („Kinderkrankheiten“) der Technologie resultieren (bspw. aus der nachträglichen Korrektur vermeidbaren Baumangels nach Ersterrichtung). Inspektionen umfassen die im Rahmen der Instandhaltungsstrategie der Feldversuchsstrecken zyklisch stattfindenden Inspektionsarbeiten an der Oberleitungsanlage.

Gemäß den Untersuchungen werden sowohl in FESH als auch in ELISA die erfassten Betriebsunterbrechungen durch äußere Einwirkungen auf die OLA dominiert, Störungen an der OLA selbst machen lediglich einen geringen Anteil an der gesamten Ausfallzeit aus.

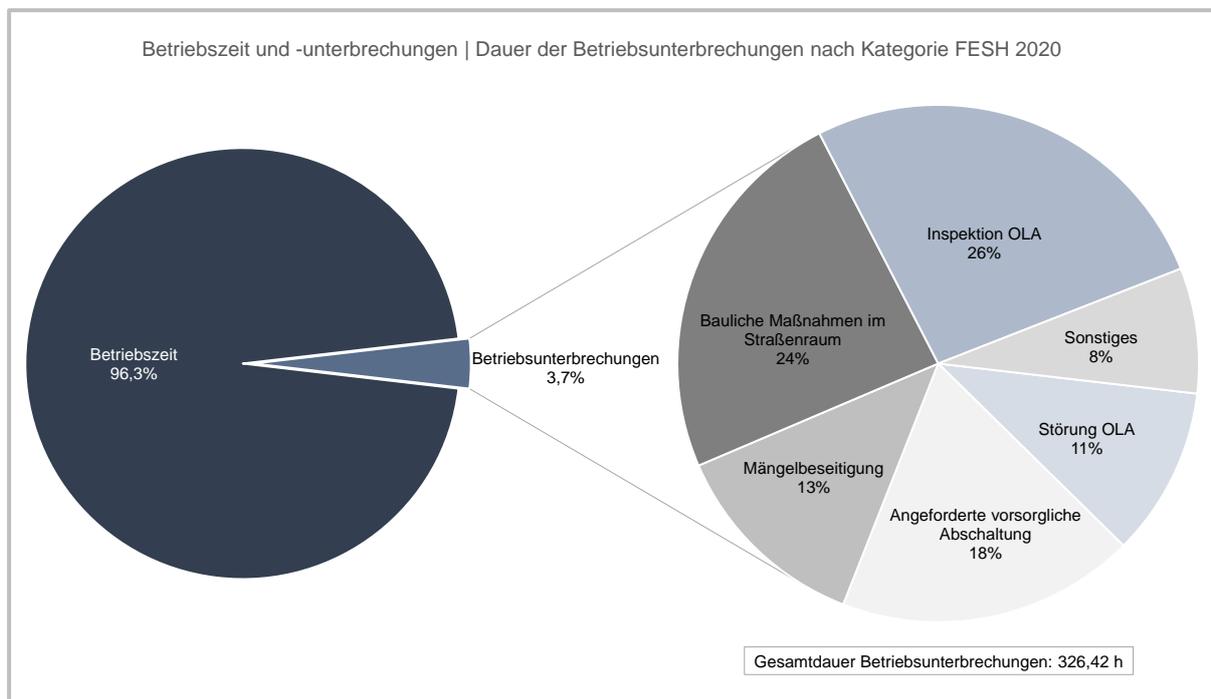


Abbildung 8: Exemplarische Darstellung des Anteils der Betriebszeit (links) sowie der Dauer der Betriebsunterbrechung nach Kategorie (rechts) für FESH im Jahr 2020

Das Ausfallverhalten der OLA lässt sich in Analogie zu Bahnfahrleitungen mit Hilfe der **Dauerverfügbarkeit** A_D hinreichend genau charakterisieren [Kießling et al. 2014]. Der Wert der Dauerverfügbarkeit variiert dabei je nach definiertem Betrachtungsrahmen. Werden beispielsweise ausschließlich die Betriebsunterbrechungen infolge einer Störung an der Oberleitungsanlage selbst berücksichtigt, ergibt sich in FESH eine Dauerverfügbarkeit von über 99,6 %. Insgesamt kann auf Grundlage der bisher durchgeführten Auswertungen und insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen **Phase der Technologieerprobung** die Aussage getroffen werden, dass die **eHighway-Oberleitungsanlagen** in den Feldversuchsstrecken FESH und ELISA grundlegend **eine hohe Verfügbarkeit** aufweisen, was für die Praxistauglichkeit des eHighway-Gesamtsystems von essentieller Bedeutung ist. In weiteren detaillierten Untersuchungen werden über die gesamten Projektlaufzeiten jahres- und monatsweise vorgenommene Auswertungen gegenübergestellt sowie statistische Kennzahlen als Maße der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bestimmt und bewertet.

Teil III Ausblick auf die weitere Entwicklung

9 Welche internationalen Perspektiven bestehen für einen grenzüberschreitenden elektrifizierten Straßengüterverkehr?

Autoren: M. Staub, M. Lehmann

Das internationale Interesse an Elektrifizierungslösungen für den schweren Straßengüterverkehr ist groß. Wertet man die Teilnehmerbeiträge zu den bisher fünf großen Electric-Road-Systems- (ERS)-Konferenzen⁶ und weitere Veröffentlichungen aus, werden derzeit in Europa Studien und teilweise öffentlichen Erprobungen u. a. in folgenden Ländern durchgeführt oder geplant: Schweden, Frankreich, Italien, Großbritannien, Belgien, Niederlande, Österreich, s. [Gustavsson et. al. 2021], [Bateman et. al. 2018], [Suul et. al. 2018] und Abbildung 9. Außerhalb Europas besteht großes Interesse insbesondere in China, Indien, Japan, Kanada und den USA.

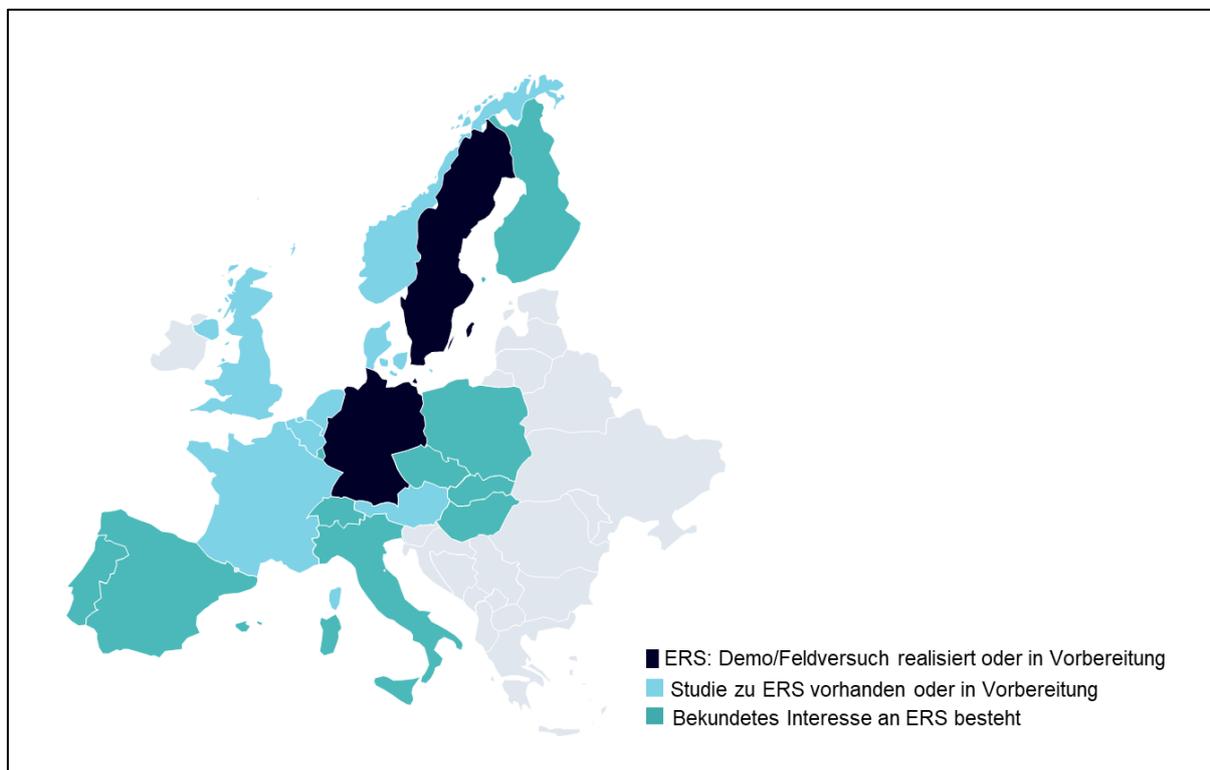


Abbildung 9: Überblick über europäisches Interesse an ERS Lösungen

Gerade der Straßengüterverkehr in Europa erfolgt vielfach grenzüberschreitend oder wird im Binnenmarkt sehr häufig durch ausländische Unternehmen durchgeführt. Den bereits heute bestehenden Forderungen nach technischer, betrieblicher und organisatorischer Interoperabilität (d. h. der Fähigkeit der nahtlosen Zusammenarbeit) wird durch zahlreiche Aktivitäten der EU (insbes. im Bereich Regulierung) sowie der Mitgliedsstaaten (insbes. im Bereich technischer Vorgaben) begegnet. Auf diesem bereits bekannten Wechselspiel aus nationalen und internationalen Akteuren der Regulierung und Standardisierung kann auch bei der internationalen Implementierung von Oberleitungssystemen aufgebaut werden.

⁶ www.electricroads.org

Abbildung 10 verdeutlicht die Abgrenzung zwischen Regulierung (d. h. insbesondere Anpassung und Weiterentwicklung der Systemumgebung) sowie Standardisierung als technisch verbindliche Abstimmung der Schnittstellen zwischen den Teilsystemen. Aufgrund der Neuartigkeit der Technologie lassen sich noch nicht alle Bestandteile eines ERS mit Oberleitung oder anderer Übertragungslösung in der bestehenden Regulierungs- bzw. Standardisierungslandschaft abbilden, was vereinzelt zu Normierungslücken und daraus abgeleiteten Normungsbedarfen führt. Um diese zu adressieren, ist beispielsweise die für die technische Interoperabilität wichtige Schnittstelle zwischen Oberleitung und Fahrzeugen bereits Gegenstand laufender internationaler Normungsarbeit durch die CENELEC als Dachorganisation der europäischen elektrotechnischen Normung. Parallel dazu werden verschiedene Normierungsprojekte zur Fortschreibung bestehender Standards genutzt, um durch Erweiterungen und Anpassungen Teilaspekte von ERS abzudecken. Einen Überblick über die Aktivitäten der Standardisierung verschiedener Antriebstechnologien schwerer elektrischer Nutzfahrzeuge gibt der aktuelle Bericht der Arbeitsgruppe 6 der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität [NPM AG6 2021].

Den erforderlichen regulatorischen Anpassungen (z. B. bei Abrechnung und Finanzierung) speziell bei ERS mit Oberleitung widmen sich verschiedene Forschungsprojekte wie AMELIE und AMELIE2. Dabei werden in [Hartwig et. al. 2020a] ausgehend von einem universellen, europäisch anschlussfähigen Akteursmodell unterschiedliche Implementierungs- und Entscheidungspfade im Kontext Interoperabilität skizziert. In ihrer Gesamtheit sind die Schritte der normativen und regulatorischen Verortung einzelner Aspekte des Gesamtsystems eine wichtige Grundlage für einen interoperablen und grenzüberschreitenden Straßengüterverkehr.

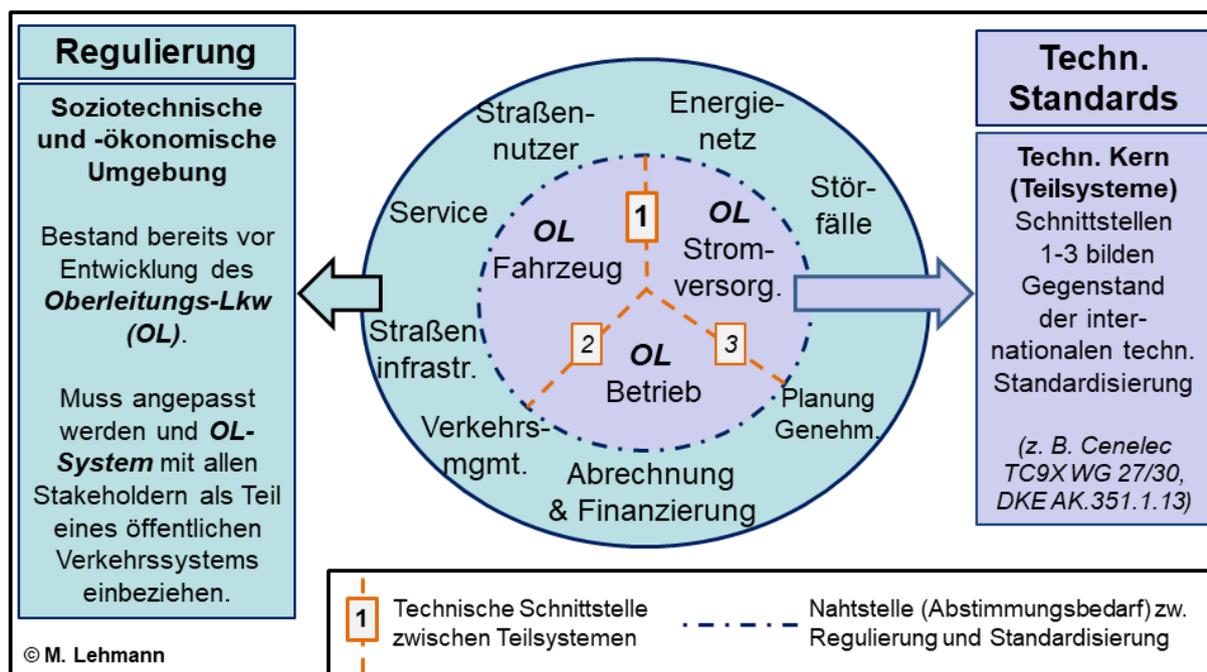


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Regulierung und Standardisierung beim (internationalen) Aufbau von Oberleitungssystemen

10 Welche Synergiepotenziale bestehen zu anderen ERS- und alternativen Antriebs-Technologien?

Autoren: J. Jöhrens, M. Lehmann

Die Energieversorgung über Oberleitungen können prinzipiell alle Antriebssysteme mit Elektromotor nutzen, neben Batteriefahrzeugen also auch Fahrzeuge mit Hybrid- oder Brennstoffzellenantrieb. Es besteht somit die Möglichkeit, die Effizienzvorteile einer direkten Stromnutzung auf Oberleitungsstrecken mit der räumlichen Flexibilität fahrzeugseitiger Energiespeichersysteme zu verbinden. Der Einsatz von Batterie-Lkw im Fernverkehr erfordert beispielsweise sehr große Batterien und hohe stationäre Ladeleistungen (siehe Abschnitt 1). Können Batterie-Lkw über einen Stromabnehmer aus der Oberleitung Strom beziehen, so kann die fahrzeugseitige Batteriekapazität je nach Einsatzprofil des Fahrzeugs und Ausdehnung des Oberleitungsnetzes erheblich reduziert und dadurch Kosten eingespart werden. Die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen-Lkw wiederum ist absehbar mit erheblich höheren Energiekosten gegenüber der direkten Stromnutzung verbunden [UBA 2019]. Können Brennstoffzellenfahrzeuge auf Oberleitungsstrecken den Strom direkt aus der Leitung beziehen, so birgt dies erhebliche Potentiale zur Senkung der Betriebskosten.

Die zukünftigen Kosten eines zunehmend auf erneuerbarem Strom basierenden Energiesystems inklusive der notwendigen Verteilnetze werden voraussichtlich wesentlich davon abhängen, wie effizient Stromangebot und –nachfrage zeitlich synchronisiert werden können. Wenn sowohl stationäre als auch dynamische Ladeinfrastrukturen vorhanden sind und genutzt werden, so ist mit einer hohen zeitlichen Verfügbarkeit von (möglicherweise auch rückspeisefähigen) Verbrauchern zu rechnen, was zusätzliche Freiheitsgrade zur Optimierung des Energiesystems mit sich bringen kann. Wie insbesondere die Infrastrukturkosten der Verteilnetze von Anteil und räumlicher Verteilung stationärer und dynamischer Ladetechnologien abhängen, ist ein wichtiger Gegenstand zukünftiger Forschung.

Auch hinsichtlich der Einführungspfade kann sich ein Oberleitungssystem mit stationärer Ladeinfrastruktur und sogar Wasserstofftankstellen gut ergänzen: Während letztere relativ leicht eher dezentral für die anfänglich begrenzten Fahrzeugzahlen einzuführen sind, bringt ein Oberleitungssystem den Vorteil einer guten Skalierbarkeit für Strecken mit hohen Verkehrsvolumina mit.

Nicht zuletzt sind auch auf betrieblicher Seite Synergien denkbar. Eine dynamische Ladung über den Stromabnehmer könnte Betriebsabläufe vereinfachen, vor allem in einem Szenario mit autonom fahrenden Lkw, bei denen die bisher obligatorischen Lenkzeitpausen als Batterieladezeiträume entfallen oder zumindest stark verkürzt werden. Die Möglichkeit einer stationären Ladung über den Stromabnehmer könnte umgekehrt betriebliche Anreize setzen, Lkw mit Stromabnehmern auszustatten und somit beide Infrastrukturen zu nutzen. Eine räumlich-betriebliche Systematisierung der verschiedenen stationären Ladeinfrastrukturen für batterieelektrische Lkw wurde in [Beckers/Bieschke 2021] vorgenommen. Erste Untersuchungen zu den kapazitären Bedarfen an Ladeinfrastrukturen mit dem Fokus auf Schnelllader (sog. Mega-Charger) für unterschiedliche Elektrifizierungsraten / Flottengrößen sind [Plötz et al. 2020] und [Plötz et al. 2021] zu entnehmen.

Fasst man die bisherigen Ergebnisse aus dem Oberleitungs-ERS-Betrieb und Systemaufbau sowie die Entwicklungen bei stationärer Ladung elektrischer Lkw hinsichtlich möglicher Synergien und weiterer Untersuchungsbedarfe zusammen, so ergeben sich folgende Schwerpunkte:

- Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs für elektrische Lkw mit stationärer und dynamischer Energieversorgung sowohl entlang der Autobahnen als auch an anderen stationären Ladeinfrastrukturen
- Bestimmung der benötigten Kapazitäten für Netzanschlüsse entlang des Bundesfernstraßennetzes sowie entsprechende Auslegung bzw. Ausbau der vorgelagerten Netzebenen
- Intensive Begleitung der Erprobung der verschiedenen Antriebs- und Versorgungstechnologien und ihres Zusammenspiels im Schwerlastverkehr

Diese Aspekte werden u. a. in der vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geleiteten „Ad-hoc-Task-Force zum dynamischen und stationären Laden mithilfe der Oberleitungstechnologie“ aufgenommen⁷. Praktische Erfahrung hinsichtlich der Stärken und Schwächen sowie der Erschließung von Synergien zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien können in den angekündigten Innovations-Cluster-Projekten in Bayern, Hessen und Baden-Württemberg sowie entlang der A2 gesammelt werden⁸. Sowohl die Arbeiten der Expertengruppe als auch die angeführten Innovationsprojekte sind konkrete Umsetzungen und Aktivitäten im Zuge der Gesamtstrategie „Elektrifizierung Schwerer Nutzfahrzeuge“, die das damalige Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Ende 2020 präsentierte [BMVI 2020].

⁷ <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/gesamtkonzept/task-forces-studien/>

⁸ <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/bmvd-bringt-innovationscluster-fuer-klimafreundliche-lkw-antriebstechnologien-auf-den-weg/>

Literaturverzeichnis

- [Agora Energiewende 2022] Agora Energiewende (2022): Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE-JAW2021/A-EW_247_Energiewende-Deutschland-Stand-2021_WEB.pdf.
- [Bateman et. al. 2018] Bateman, D.; Leal, D.; Reeves, S. et. al.: ELECTRIC ROAD SYSTEMS: A SOLUTION FOR THE FUTURE? A PIARC SPECIAL PROJECT. Piarc - World Road Association [Hrsg.]. Bericht: 2018SP04EN. Paris, 2018. Online: <https://trid.trb.org/view/1570673>
- [Beckers/Bieschke 2021] Beckers, T.; Bieschke, N.: Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw – Identifikation und Einordnung wesentlicher Ausgestaltungsfragen auf Basis (institutionen-) ökonomischer Erkenntnisse. Kurzstudie erstellt im Auftrag des ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH im Rahmen des Forschungsvorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs – My eRoads“. Weimar, 2021. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/bereitstellung_ladeinfrastruktur_batterie-elektrische-lkw_kurzgutachten-v101_2021-maerz.pdf
- [Biesenack et al. 2006] Biesenack, H.; George, G.; Hofmann, G.; Schmieder, A. et al.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden. 2006. ISBN: 978-3-519-06249-3.
- [BMVI 2020] BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]: Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge - Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullmissionslogistik auf der Straße. BMVI, Referat G 22 - Alternative Kraftstoffe und Antriebe, Infrastruktur, Energie. Berlin, 2020. Online unter: <https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.html>
- [Boltze et. al. 2020] Boltze, M.; Linke, R.; Schöpp, F.; Wilke, J. K.; Öztürk, Ö.; Wauri, D.: Insights into the Operation of Overhead Line Hybrid Trucks on the ELISA Test Track. 4th Electric Road Systems Conference, 12. Mai 2020, online, 2020. Online: <https://www.electricroads.org/wp-content/uploads/2020/05/ERSC2020-Abstract-Book-Publ.pdf>
- [Boltze et. al. 2021] Boltze, M.; Lehmann, M.; Riegelhuth, G. et. al.: Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr - Umsetzung des System eHighway. Kirschbaum Verlag, Bonn. 2021. ISBN: 978-3-7812-2053-9
- [Gustavsson et. al. 2021] Gustavsson, M.; Hacker, F.; Helms, H.: Overview of ERS concepts and complementary technologies. Report as part of the *Collers* research collaboration. Göteborg, Berlin, Heidelberg. 2019. Online: <https://www.electricroads.org/report-overview-of-ers-concepts-and-complementary-technologies/>
- [Hacker et al. 2020] Hacker, F.; Jöhrens, J.; Plötz, P. (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung Und Ausbauszenarien Von Oberleitungs-Lkw in Deutschland. Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Stand_desWissens_OH-Lkw_Zusammenfassung_final_2020-05-25.pdf.
- [Hartwig et. al. 2020a] Hartwig, M.; Bußmann-Welsch, A.; Lehmann, M.: Leitbilder für den Aufbau von elektrischen Straßensystemen in Europa. IKEM Working Paper. Berlin, 2020. Online: <https://www.ikem.de/leitbild-electric-road-systems/>
- [Hartwig 2020b] Hartwig, M.: Akteursmodell für die Finanzierung und Abrechnung elektrischer Straßensysteme (ERS). IKEM Working Paper. Berlin, 2020. Online: <https://www.ikem.de/projekt/amelie/>
- [Jöhrens et al. 2022] Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, Florian; Helms, Hinrich; Räder, D.; Köllermeier, Nadine; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“ Heidelberg / Karlsruhe. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04 - My eRoads - Potentiale Lkw-Antriebstechnologien - final_01.pdf.
- [Kießling et al. 2014] Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen. 3. Auflage. Publicis Publishing, Erlangen. 2014. ISBN: 978-3-89578-407-1.
- [Lehmann et al. 2014] Lehmann, M. et al: Energiebedarf und Wirkungsgrad im elektrischen Straßengüterverkehr. Vortrag auf: 24. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 21.03.2014. Tagungsband.

- [NPM AG6 2021] NPM - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: AG 6 – BERICHT, Schwere Nutzfahrzeuge – Standards und Normen für alternative Antriebe. NPM Arbeitsgruppe 6 - Standardisierung, Normung, Zertifizierung und Typgenehmigung. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin, 2021. Online: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/schwere-nutzfahrzeuge-standards-und-normen-fuer-alternative-antriebe/>
- [Plötz et al. 2020] Plötz, Dr. P.; Speth, D.; Rose, P. (2020): Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw. Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA). https://www.vda.de/dam/jcr:ec3b6932-29e6-47c9-9b2f-1fbeda97b7a5/Kurzstudie_Ladenetz_Schwerlastverkehr_23102020.pdf
- [Plötz et. al. 2021] P. Plötz, F. Hacker, J. Jöhrens, et al.: Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr: Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier. BOLD-Kooperation: Fraunhofer ISI, Öko-Institut, ifeu Karlsruhe, Berlin, Heidelberg. 2021. Online: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/infrastruktur-fuer-elektro-lkw-im-fernverkehr>
- [Prognos et al. 2021] Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.
- [Schöpp et al. 2021a] Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Wilke, J. K.; Boltze, M.: Electrification of Road Freight Transport – Energy Consumption Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks. Transportation Research Board (TRB) 100th Annual Meeting, 25. Januar 2021, online, 2021. TRBAM-21-00961. Online: <https://trid.trb.org/view/1759512>
- [Schöpp et al. 2021b] Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Wilke, J. K.; Boltze, M.: Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Kraftstoff- und Stromverbrauchsanalyse von Oberleitungs-Hybrid-Lastkraftwagen. In: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe 3 | 2021, Dialog Publishers, Baidersbronn. 2021. 40-45.
- [Schöpp et al. 2021c] Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Wilke, J. K.; Boltze, M.: Electrification of Road Freight Transport. The Influence of Gross Vehicle Weight in the Energy Consumption of (Overhead Line) Hybrid Trucks. 49th European Transport Conference, 15. September 2021, online, 2021.
- [Schöpp et. al. 2022] Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Boltze, M.: Electrification of Road Freight Transport – Energy Flow Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks. Transportation Research Board (TRB) 101st Annual Meeting, 12. Januar 2022, Washington, D.C. (USA), 2022. Online: <https://trid.trb.org/view/1909495>
- [Sul et. al. 2018] Sul, J.; Guidi, G.: Technology for dynamic on-road power transfer to electric vehicles - Overview and electro-technical evaluation of the state-of-the-art for conductive and inductive power transfer technologies. Report on Work Package 2 of ELinGO project. Oslo, 2018. Online: <https://www.sintef.no/projectweb/elingo/sluttokumentasjon/>
- [UBA 2019] UBA – Umweltbundesamt [Hrsg.]: Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungs- optionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie des Ökoinstitut Berlin im Auftrag des UBA. Fachgebiet I 2.2 „Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr“. Dessau/Berlin, 2019. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sensitivitaeten-zur-bewertung-der-kosten>
- [Werner 2020] Werner, M.: Simulationsmodell zur betrieblichen und technischen Verifizierung der Systemauslegung eHighway. Technische Universität Dresden, Dresden, Diplomarbeit, 2020.
- [Zembrot et al. 2021] Zembrot, Marcel; Böttiger, Harald; Schollbach, Frank; Flotho, Rainer; Wietschel, Martin; Burghard, Uta; Scherrer, Aline; Gnann, Till; Speth, Daniel; Plötz, Patrick; Fritz, John; Doll, Claus; Brauer, Clemens; Waßmuth, Volker; Köllermeier, Nadine; Schüller, Hagen; Lauer, Martin; Burgert, Tobias; Berg, Lars Fredrik: Oberleitungs-LKW als ein Baustein für ein nachhaltiges Verkehrssystem: Das Projekt eWayBW in Baden-Württemberg, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2021, Online: https://publica.fraunhofer.de/e-prints/urn_nbn_de_0011-n-6450674.pdf

Autoren, Institutionen und zugehörige Projekte

Autorin / Autor	Institution	Aktiv im Projekt...
Matthias Bramme	Hochschule Heilbronn	FESH (Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein)
Clemens Brauer	Fraunhofer ISI Karlsruhe	eWayBW (Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B 462)
Alexander Bulenda	Fachhochschule Kiel	FESH (Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein)
Uta Burghard	Fraunhofer ISI Karlsruhe	eWayBW (Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B 462) BOLD (Begleitforschung O-Lkw Deutschland)
Tobias Burgert	Fraunhofer ICT Karlsruhe	eWayBW (Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B 462)
Claus Doll	Fraunhofer ISI Karlsruhe	eWayBW (Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-Lkw auf der B 462)
Julius Jöhrens	ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH	BOLD (Begleitforschung O-Lkw Deutschland) My eRoads (Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs)
Eva Kaßens-Noor	Technische Universität Darmstadt	ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerkverkehr auf Autobahnen)
Michael Lehmann	Fachhochschule Erfurt	AMELIE 2 (Abrechnungssysteme und -methoden von elektrisch betriebenen Lkw, sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext)
Regina Linke	Technische Universität Darmstadt	ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerkverkehr auf Autobahnen)
Özgür Öztürk	Technische Universität Darmstadt	ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerkverkehr auf Autobahnen)
Ferdinand Schöpp	Technische Universität Darmstadt	ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerkverkehr auf Autobahnen)
Markus Staub	Siemens Mobility Erlangen	ELONSO (Elektrifizierung länderübergreifend betriebener Oberleitungs-Nutzfahrzeuge durch sequenzielle Oberleitungsabschnitte) FESH (Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein)

		<u>AMELIE 2 (Abrechnungssysteme und -methoden von elektrisch betriebenen Lkw, sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext)</u> <u>ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerkverkehr auf Autobahnen)</u>
<u>Markus Werner</u>	<u>Technische Universität Dresden</u>	<u>FESH (Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein)</u>
<u>Jürgen Wilke</u>	<u>Technische Universität Darmstadt</u>	<u>ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerkverkehr auf Autobahnen)</u>
Markus Worbs	<u>Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel GmbH</u>	<u>LaTech40 (Schwerlast-Lkw Technologievergleich auf Shuttlestrecke)</u>