Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung |
15. Dezember 2017

Technologiebericht B.1b Elektromobilität Hybrid-Oberleitungs-LKW innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende

Till Gnann

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Fraunhofer ISI

Disclaimer:
Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:
Gnann, T. (2017): Technologiebericht B.1b Elektromobilität Hybrid-Oberleitungs-LKW. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:
Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:
Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:
Till Gnann
Tel.: +49 721 / 6809 – 460
Fax: +49 721 / 689152
E-Mail: till.gnann@isi.fraunhofer.de

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

Review durch:
Markus Landau (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **3**

Tabellenverzeichnis **4**

Abbildungsverzeichnis **5**

Zusammenfassung (Steckbrief) **6**

1 Beschreibung des Technologiefelds **9**

2 Stand der F&E in Deutschland **12**

3 Bewertung der Relevanz öffentlicher Forschungsförderung **13**

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten 13
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig) 14

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes **16**

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale 16
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen 18
4.3 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung 18
4.4 Kriterium 8: Stand und Trends von Forschung und Entwicklung im internationalen Vergleich 19
4.5 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz 19
4.6 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit 20
4.7 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen 21

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand **22**

Literaturverzeichnis **24**

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Ausgangsdaten zur Energiewirtschaftlichen Bewertung von Hybrid-Oberleitungs-Lkws ---- 11

Tab. 3-1: Aktueller Einsatz von Hybrid-Oberleitungs-Lkws ---- 13

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw ---- 14

Tab. 3-3 Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Hybrid-Oberleitungs-Lkw ---- 14

Tab. 3-4 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw ---- 15

Tab. 4-1 Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkws (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr) ---- 17

Tab. 4-2 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (jeweils in Spannbreiten) ---- 18

Tab. 4-3 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Hybrid-Oberleitungs-Lkw ---- 19

Tab. 4-4 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw zum Status Quo (2015) ---- 20

Tab. 4-5 Abhängigkeit des Technologiefeldes Hybrid-Oberleitungs-Lkw von Infrastrukturen ---- 21

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Fahrzeugbestand, Fahrleistung und CO_2-Emissionen des straßengebundenen Güterverkehrs in Deutschland 2017 ---------- 9

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. B.1b
Elektromobilität – Hybrid-Oberleitungs-Lkw (energiewirtschaftliche Aspekte)

Fraunhofer ISI

A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf

Beschreibung des Technologiefeldes

Der **Hybrid-Oberleitungs (HO)-Lkw** (schwerer Straßengüterfernverkehr) nutzt elektrische Energie aus Oberleitungen. Ist keine Oberleitung verfügbar, so kann/muss kurz- bis mittelfristig ein Dieselaggregat (aus Kosten- und Reichweitengründen) oder langfristig eine Fahrzeugbatterie zur Energieversorgung für die Strecken abseits der Oberleitung eingesetzt werden.

Technologische Reife: Demonstration (TRL=6), Projekte in Schweden, Deutschland und den USA

Kritische Komponenten: Ausbau der Infrastruktur und Verbesserung der Batterietechnologie sind Voraussetzungen für den langfristigen Einsatz von HO-Lkws. Stromzufuhr ab Mittelspannungsnetz zur Oberleitung ist in der Aufbauphase ein wesentlicher Kostenfaktor und muss vorfinanziert werden. Grenzüberschreitende Lösungen sind anzustreben.

Entwicklungsziele

Senkung der Batteriekosten, Steigerung der Energiedichte, Ausbau der Infrastruktur

Marktentwicklung

	Einheit	Heute	2030	2050
Marktpotenziale Deutschland Lkw	Stück	0	50.000 – 70.000	250.000
Stromverbrauch Deutschland	TWh	-	9 – 12	35
Erhöhung der Spitzenlast Deutschland			Bis zu 50 % der lokalen Nachfrage	Bis 75 % der lokalen Nachfrage
Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur	km		2.000 – 4.000	4.000 – 8.000

F&E-Bedarf

- Optimale Auslegung der Stromzufuhr (auch unter regionalen Aspekten wie vielbefahrenen Autobahnen und Autobahnkreuzen sowie Systemintegration Erneuerbarer Energien)
- Umgang mit weitgehend unflexibler Nachfrage und hierdurch entstehenden neuen Flexibilitätsbedarfen an anderer Stelle
- Akzeptanzanalysen bezüglich Oberleitungen (Vor-Ort-Akzeptanz, Nutzerakzeptanz von Nutzern der Autobahnen)
- Optimale Fahrzeugauslegung (Hybridkonzepte mit Diesel vs. Batterie) unter energiewirtschaftlichen Aspekten
- Analyse der energiewirtschaftlichen Auswirkungen von autonomem Fahren

B) Multikriterielle Bewertung

Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen (gegenüber Referenz)

Der CO_2-Ausstoß des Straßengüterverkehrs betrug 2015 rund 40 Mio. t CO_2. Im Jahr 2030 wären bei einem elektrischen Fahranteil von 60 % und dem Strommix aus den Klimaszenarien 2050 (CO_2-Emissionen des Strommix bei 192 t CO_2/MWh) CO_2-Einsparungen von 2,3 Mio. t CO_2 zu erzielen. Im Jahr 2050 wäre eine CO_2-Einsparung von etwa 32 Mio. t CO_2 pro Jahr möglich.

Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz (gegenüber Referenz)

Durch den Einsatz von HO-Lkws könnten unter den getroffenen Annahmen 1,4 Mio. bbl Öl (223 Mio. l Öl) im Jahr 2030 und 6,1 Mio. bbl Öl (270 Mio. l Öl) in 2050 eingespart werden.

Inländische Wertschöpfung

Aktuell ist Siemens der wichtigste Akteur in diesem Forschungsfeld. Aufgrund der hohen Nachfrage nach Strom kann inländische Wertschöpfung auch im Bereich der Erneuerbaren Energien und im Stromsektor allgemein entstehen.

Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Insgesamt gibt es nur wenige Projekte zu HO-Lkws. Hier betreiben mit Siemens, Scania und Volvo derzeit drei große Technikunternehmen F&E: Deutschland hat eine nicht-öffentliche Teststrecke und der Aufbau von drei Testrecken an deutschen Autobahnen ist beschlossen. International ist Deutschland neben Schweden und den USA derzeit an der Spitze der Marktvorbereitung.

Gesellschaftliche Akzeptanz

Politische Akzeptanz geteilt. Auf europäischer Ebene bislang kaum Interesse, die deutschen Ministerien sind teilweise sehr positiv, teilweise sehr kritisch dem Konzept gegenüber eingestellt.
Marktakzeptanz unklar: Logistikdienstleister auf Kosten fixiert, könnten aber bei geringen notwendigen Verhaltensanpassungen hinsichtlich der Einsatzflexibilität interessiert sein. Lkw-Fahrer von Geräuschpegel begeistert, von „Tunnelblick“ ggf. irritiert.
Vor-Ort-Akzeptanz unklar: Die meisten Autobahnen verlaufen nicht durch Siedlungen, allerdings treten beim Ausbau von oberirdischen Stromnetzen auch heute schon Akzeptanzprobleme auf.

Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

- Abhängigkeit von Infrastruktur, Ausbau ist teuer und muss eine gewisse Mindestabdeckung erreichen (über 2.000 km)
- Reaktionsfähigkeit gering, da Infrastruktursystem mit langen Amortisationszeiten

Abhängigkeit von Infrastrukturen

- Aufbau einer Mindestmenge an Oberleitungsinfrastruktur unerlässlich.
- Reaktionsfähigkeit des Systems ist gering, da die Amortisationszeiten groß sind (häufig wird von 30 Jahren für die Oberleitungsinfrastruktur der Bahn ausgegangen.

Systemkompatibilität

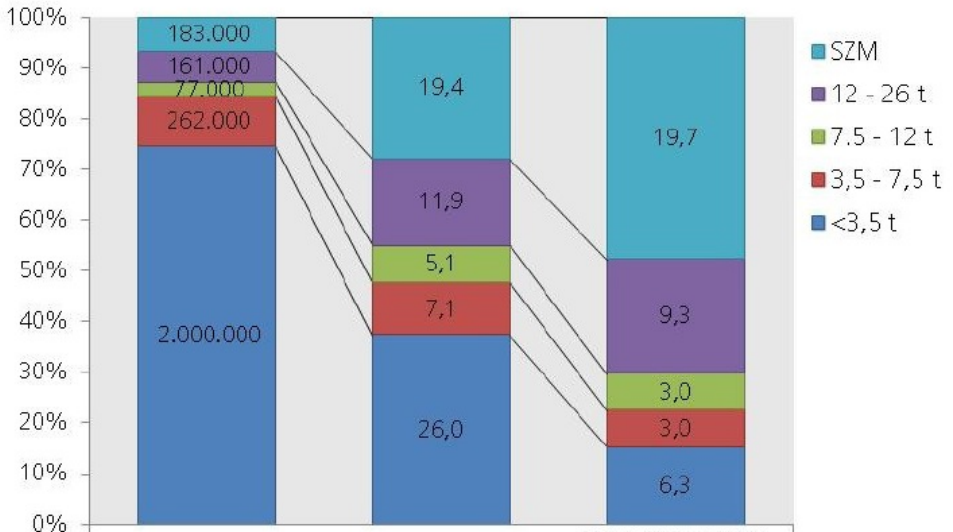
Bei Infrastrukturaufbau nahe der EE-Erzeugung kann eine Netzbelastung vermieden werden, die zusätzliche Strommenge ist bis 2030 verkraftbar. Die Nutzung einer Oberleitung führt zu einer nicht verschiebbaren Last, die jedoch zumeist tagsüber zu Phasen hoher PV-Einspeisung stattfindet. Ggf. kann eine Nutzungskonkurrenz mit anderen Anwendungen um den EE-Strom entstehen.

***Vorbemerkung**: Der Verkehrssektor gehört nicht zum Untersuchungsstand dieser Studie. Allerdings sollen die energiewirtschaftlichen Auswirkungen neuer Verkehrstechnologien mit betrachtet werden. Diese werden in Anlehnung an die übliche Technologiebeschreibung durchgeführt, weichen aber in einigen Punkten wegen des besonderen Zuschnittes davon ab.*

1 Beschreibung des Technologiefelds

Die spezifischen Energieverbräuche im Verkehr sind in den vergangenen Jahren um rund 30 Prozent zurückgegangen, jedoch ist der Gesamtenergieverbrauch aufgrund der deutlich wachsenden Verkehrsleistung leicht angestiegen (BMWi 2017).

Der Lkw-Verkehr ist dabei für etwa ein Drittel der CO_2-Emissionen des Verkehrssektors (ca. 40 Mio. t CO_2) verantwortlich, mit deutlich steigender Tendenz. Mehr als die Hälfte entfallen dabei auf knapp 250.000 Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 Tonnen (vgl. Abb. 1-1).



	Fahrzeugbestand	Fahrleistung [Mrd. Fzg-km/a]	CO2-Emissionen [Mio. tCO2/a WtW]
SZM	183.000	19,4	19,7
12 - 26 t	161.000	11,9	9,3
7.5 - 12 t	77.000	5,1	3,0
3,5 - 7,5 t	262.000	7,1	3,0
<3,5 t	2.000.000	26,0	6,3

Abb. 1-1 Fahrzeugbestand, Fahrleistung und CO_2-Emissionen des straßengebundenen Güterverkehrs in Deutschland 2017

Quelle: Wietschel et al. (2017)

Um diese deutlich zu reduzieren, müssen alternative Antriebe zum heute genutzten Dieselantrieb eingeführt werden, die weniger Emissionen verursachen. Hier sind reine Batteriekonzepte mit Lademöglichkeiten über Nacht nicht möglich, da die Fahrleistungen hoch sind und ausreichend hohe Batteriekapazitäten die Nutzlast der Lkws massiv einschränken würden. Daher müssen andere alternative Fahrzeugkonzepte zum Einsatz kommen. Diskutiert werden hier der Einsatz von Erdgas, insbesondere flüssigem Erdgas, der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen sowie strombasierte Kraftstoffe (Power-to-Gas (PtG) oder Power-to-Liquid (PtL)). Der Stand und die aktuellen F&E-Themen sowie Politikmaßnahmen für die verschiedenen Kraftstoffarten und Antriebskonzepte für den schweren Straßengüterverkehr werden in BMVI (2017) analysiert. Die Herstellung von Wasserstoff, PtG-

und PtL-Kraftstoffen werden in den Technologieberichten im *Technologiebereich 4: Sektorenkopplung* behandelt.

Eine weitere wichtige Dekarbonisierungsoption für den schweren Straßengüterverkehr ist der Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw), der im Folgenden im Mittelpunkt bezüglich seiner energiewirtschaftlichen Ausführungen steht. Dieser nutzt die elektrische Energie aus Oberleitungen mit sehr geringen Energietransport- und Energieumwandlungsverlusten. Ist keine Oberleitung verfügbar, so kann ein Dieselaggregat (voraussichtlich mittelfristig aus Kosten- und Reichweitengründen die beste Lösung) oder eine Fahrzeugbatterie für die Strecken abseits der Oberleitung eingesetzt werden. Langfristig kann auch der Dieselkraftstoff bei Hybrid-Oberleitungs-Lkws durch PtG- oder PtL-Lösungen abgelöst werden, gerade wenn sehr ambitionierte Klimaschutzziele erreicht werden müssen. Gegenüber den anderen Alternativen wie Gas-Lkws, Brennstoffzellen-Lkws oder anderen strombasierten Kraftstoffen mit Verbrennungsmotoren-Lkws hat der HO-Lkw deutlich höhere Wirkungsgrade. Diese könnten langfristig aufgrund von (Flächen-)Nutzungskonkurrenzen von Erneuerbaren Energien entscheidend sein.

Die HO-Lkw-Technologie ist stark vom Aufbau einer geeigneten Infrastruktur abhängig. Derzeit sind neben Oberleitungen auch alternative Infrastrukturkonzepte in Erprobung: Die Stromzufuhr könnte auch über sogenannte Stromschienen in der Straße oder über induktive Systeme erfolgen. Bei beiden Systemen wären auch Synergieeffekte mit dem Pkw denkbar. In Wietschel et al. (2017) werden die Kosten der beiden Alternativen jedoch als deutlich teurer eingeschätzt (insbesondere aufgrund des Eingriffs in den Straßenbelag). Es kommen zusätzliche Schwierigkeiten bei der Sicherheit hinzu (Rutschgefahr bei Vereisung oder Stromschlag für Fußgänger) und die Synergieeffekte durch Pkw bei einer Nutzung der rechten Fahrstreifen der Autobahn zwischen zahlreichen Lkws mit geringerer Geschwindigkeit sind als gering zu betrachten. Daher werden diese beiden Konzepte in diesem Bericht nicht weiter berücksichtigt.

Zur Ausgestaltung der Oberleitungsinfrastruktur liegen bereits detaillierte Analysen vor (Siemens 2011; Edel et al. 2015; Wietschel et al. 2017). Das derzeit attraktivste Konzept ist ein Anschluss am Mittelspannungsnetz zur Hinführung an die Autobahn. In Ballungsräumen ist dabei von einer Länge von durchschnittlich 500 Metern, in ländlichen Räumen von etwa drei Kilometern auszugehen. Die Kabel können in der Erde oder oberirdisch mit Oberleitungen verlegt werden. Am Autobahnrand sind im Abstand von etwa drei Kilometern Umspannstationen zur Transformation von 20-60 kV auf 1,0-1,5 kV für die Oberleitungen zu installieren. Die Oberleitung hängt an Beton- oder Stahlmasten mit Auslegern von sechs Metern Länge beidseitig am rechten Fahrbahnrand, welche im Abstand von 50 Metern aufgestellt werden sollen. Die Oberleitung selbst ist als Kettenwerk gestaltet, das aus dem Straßenbahnbereich bekannt ist. Hierfür werden zweipolige Rillenfahrdrähte mit 150 mm² Querschnittsfläche, Tragseile mit 120 mm² Querschnittsfläche und Querkupplungen zwischen den beiden Fahrbahnseiten verwendet (Wietschel et al. 2017)[1]. Die Kosten der Infrastruk-

[1] Für Details zur Querung von Schildbrücken und Überführungswerken, zur Absicherung der Masten und zur Enteisung der Oberleitungen sei auf Wietschel et al. (2017) verwiesen.

tur belaufen sich auf ca. 1,7-2,2 Mio. Euro pro Autobahnkilometer und werden maßgeblich durch die Kosten der Stromleitung zur Autobahn und die Kosten für die Umspannstation beeinflusst, welche auch die Kostenunterschiede bewirken (Siemens 2011; Edel et al. 2015; Wietschel et al. 2017).

Für die Bewertung der energiewirtschaftlichen Aspekte von Hybrid-Oberleitungs-Lkws wird der Markthochlauf der HO-Lkws aus Wietschel et al. (2017) übernommen (vgl. Tab. 1-1). Die Marktdurchdringung beträgt bis 2030 etwa ein Viertel der Flotte, was bis 2050 fortgeschrieben wird. Bis 2030 wird vornehmlich von einer Durchdringung mit sogenannten Diesel-Hybrid-Fahrzeugen und einem geringeren elektrischen Fahranteil ausgegangen. Ab dann durchdringen bis zum Jahr 2050 immer mehr Batterie-Hybrid-Fahrzeuge den Markt, die Strecken abseits der Oberleitung aus der Batterie bewältigen, sodass der elektrische Fahranteil bis 2050 auf 100 % steigt. Die mittlere Jahresfahrleistung der Hybrid-Oberleitungs-Lkws nimmt dabei von 130.000 km im Jahr 2030 auf 110.000 km im Jahr 2050 ab.

Tab. 1-1: Ausgangsdaten zur Energiewirtschaftlichen Bewertung von Hybrid-Oberleitungs-Lkws

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Marktpotenziale Deutschland Lkw	Fahrzeuge im Bestand	0	1.000	70.000 (28%)	165.000 (67%)	250.000 (100%)
Durchschnittlicher elektrischer Fahranteil	%	0	28	60	90	100
Mittlere Jahresfahrleistung	km	SZM	150.000	130.000	120.000	110.000
		GK4	n.a.	75.000	70.000	65.000
Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur	km	-	500	2.000 bis 4.000	3.000 bis 6.000	4.000 bis 8.000

Quellen: Wietschel et al. (2017) und eigene Abschätzungen

Von hoher Relevanz für die Stromnachfrage durch HO-Lkws ist der Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur. Sie bestimmt in den ersten Jahren den elektrischen Fahranteil und später bei den Batterievarianten die Größe der Batterie. In Wietschel et al. (2017) wird demnach von einem Infrastrukturausbau von 4.000 km bis 2030 und 8.000 km bis 2050 ausgegangen. Diese Werte werden für die Rechnungen im ambitionierten Szenario DE_95 angenommen. Für das Szenario DE_80 werden geringere Werte von 2.000 km im Jahr 2030 und 4.000 km im Jahr 2050 gewählt.

2 Stand der F&E in Deutschland

Bislang gibt es weltweit noch wenig F&E-Projekte zu Hybrid-Oberleitungs-Lkws, u. a. in den USA und in skandinavischen Ländern. Siemens ist Marktführer für diese Technologie in Deutschland und spielt auch international eine bedeutende Rolle, u. a. bei Technologien, die zum Bau von Oberleitungsinfrastrukturen benötigt werden, sowie bei der Umrüstung von Fahrzeugen für Pilotanwendungen. Große deutsche Lkw-Hersteller sind derzeit eher etwas zurückhaltend bei der F&E von Fahrzeugen für Oberleitung-Lkws.

Mit einer Teststrecke in der Nähe von Berlin (Groß Dölln), die von Siemens betrieben wird, und zwei geplanten Projekten (in Schleswig-Holstein und Hessen) sind auch bereits mehrere Demonstratoren in Deutschland in Umsetzung (Heise 2017). Siemens beschäftigt sich bereits seit mehreren Jahren mit diesem Thema und wurde in ersten Studien, die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unterstützt wurden, von der Technischen Universität Dresden und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wissenschaftlich begleitet (ENUBA 1 und ENUBA 2 (Edel et al. 2014; Siemens 2016)).

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, die durch das Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) koordiniert wird, war der HO-Lkw bereits seit mehreren Jahren von Relevanz. Im Jahr 2017 wurde hieraus erstmals eine Studie zur Machbarkeit einer Einführung veröffentlicht (Wietschel et al. 2017).

Zudem wurden mehrere Studien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrs veröffentlicht, die das Thema in unterschiedlicher Tiefe behandeln, aber nicht zum Hauptthema haben (SRU 2012; BMUB 2015; Dörr et al. 2014; Dünnebeil 2015; Gerhardt et al. 2015; Hacker et al. 2014; Hülsmann et al. 2014; Kreyenberg et al. 2015; UBA 2013; UBA 2015; UBA 2016a; UBA 2016b).

3 Bewertung der Relevanz öffentlicher Forschungsförderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Derzeit hängt die Entwicklung der HO-Lkw-Technologie von öffentlichen Fördermitteln ab. Aktuell ist die Teststrecke Groß Dölln in Betrieb. Die beiden Demonstrationsprojekte in Schleswig-Holstein (A1 zwischen Lübeck und Reinfeld) und Hessen (Darmstadt-Weiterstadt bis Frankfurt Flughafen) haben eine Länge von sechs Kilometern und sollen bis Ende 2018 in Betrieb gehen. Dies sind Projekte mit öffentlicher Förderung. Tab. 3-1 gibt einen Überblick über derzeit laufende und öffentlich angekündigte Projekte von HO-Lkws.

Tab. 3-1: Aktueller Einsatz von Hybrid-Oberleitungs-Lkws

	Genauer Standort	Länge	Status	Inbetrieb-nahme	Beteiligte
Teststrecke Groß Dölln (DE)	Groß Dölln	2 km	In Betrieb	2013	Siemens mit Lkw von Volvo, Scania, Daimler
Pilotprojekt Hessen (DE)	Darmstadt-Weiterstadt – Frankfurt Flughafen	6 km	In Planung	2018	Siemens
Pilotprojekt Schleswig-Holstein (DE)	A1 Lübeck – Reinfeld	6 km	In Planung	2018	Siemens
Pilotprojekt Schweden	E16 Gävle – Sandviken	2 km	In Betrieb	2016	Siemens, Scania
Pilotprojekt USA	I710 Los Angeles – Long Beach	1,6 km	In Planung	Mitte 2017	Siemens

Quellen: Spiegel (2014), Siemens (2016), Siemens (2017)

Mit einer Einführung einer kommerziellen Anlage, beispielsweise in einer Nische wie einer Anbindung von Häfen, so wie in den USA angedacht, oder im Bergbau ist erst frühestens ab 2020 zu rechnen. Erst deutlich nach 2020 ist dann mit dem Start des Ausbaus einer flächendeckenden Infrastruktur zu rechnen. Diese wird aufgrund der Unterauslastung erst einmal deutlich defizitär sein (Wietschel et al. 2017), weshalb für den Aufbau staatliche Unterstützung notwendig sein wird. Erst in einem eingeschwungenen Zustand kann diese dann wirtschaftlich betrieben werden.

Wenn HO-Lkws einen Beitrag zu den Klimaschutz- und Emissionsminderungszielen der Bundesregierung beitragen sollen, ist eine Unterstützung der Technologie durch einen Oberleitungsinfrastrukturaufbau deutlich vor 2030 notwendig (vgl. Tab. 1-1). Aufgrund der technischen Reife von Oberleitungen im Bahnbereich und der beginnenden Feldversuche ist eine Kommerzialisierung vor 2030 möglich, wenn der Oberleitungsinfrastrukturaufbau bei positiven Feldversuchen bald begonnen wird.

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen …					
Szenarienbereich DE_80%	**bis 2020 ☐**	**bis 2030 ☒**	**bis 2040 ☐**	**bis 2050 ☐**	**nach 2050 ☐**
Szenarienbereich DE_95%	**bis 2020 ☐**	**bis 2030 ☒**	**bis 2040 ☐**	**bis 2050 ☐**	**nach 2050 ☐**

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium einer Technologie

Die Technologie für HO-Lkws und Oberleitungsinfrastruktur ist über das Stadium der Technologieentwicklung hinaus und wird in anwendungsnaher Umgebung in Deutschland, Schweden und den USA erprobt. Mit den zwei geplanten Demonstratoren auf Autobahnabschnitten in realer Umgebung (in Schleswig-Holstein und Hessen) sind bereits die weiteren Entwicklungsstufen geplant.

Tab. 3-3 Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Grobklassifizierung	**Feinklassifizierung**	**TF**
Grundlagenforschung		☐
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	☐
Technologieentwicklung		☐
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	☐
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	☐
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	☐
Demonstration		☒
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	☒
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	☐
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	☐
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	☐
Kommerzialisierung		☐
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	☐

TF = Technologiefeld, TRL= Technology Readiness Level

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Kritisch für den Einsatz der Oberleitungstechnologie stellt sich die Entwicklung der technischen Komponenten der Infrastruktur sowie der Fahrzeugkonzeption dar. Bei der Infrastruktur sind vor allem die Leistungsschalter zu nennen, die heute einer der Hauptkostentreiber sind. Die optimale Auslegung der Stromzufuhr auch unter regionalen Aspekten (Autobahnzufuhr, Autobahnkreuze, Nutzungsintensität der Autobahnen) ist ein zu entwickelndes Themenfeld. Der Aufbau der Infrastruktur stellt das wesentliche wirtschaftliche Risiko der HO-Technologie dar.

Weiter stellt aus energiewirtschaftlicher Perspektive die Nachfrage von Strom durch einen HO-Lkw einen inflexiblen Verbraucher mit hohen Nachfragen dar. Während Spitzen beim Anfahren ggf. durch Pufferbatterien ausgeglichen werden können, ist eine mehrstündige Lastverschiebung bei den Fahrzeugen nicht denkbar. Somit müssen Konzepte gefunden werden, die nicht nur eine temporale, sondern auch regionale Nutzung Erneuerbarer Energien einschließen.

Die Auslegung der Hybridsysteme zwischen Oberleitung, Batterie und Dieselaggregat kann dabei eine entscheidende Rolle spielen. Sie ist daher nicht nur aus Fahrzeugherstellersicht, sondern auch aus energiewirtschaftlicher Perspektive zu bewerten.

Gleiches gilt für das autonome Fahren, das in Lkws nicht nur zu einer Reduktion der Gesamtkosten durch verminderte Aufwendungen für den Fahrer, sondern auch zu einer Energieeinsparung durch das sogenannte Platooning führen könnte. Unklar sind dabei potenzielle Rebound-Effekte durch die Verlagerung von anderen Verkehrsträgern (z. B. der Bahn) in den Schwerlastverkehr wegen geringerer Kosten.

Im Vergleich zu den anderen Dekarbonisierungsoptionen im schweren Straßengüterverkehr ist heute noch nicht klar, welche Technologie (oder welcher Technologiemix) sich am Ende durchsetzen wird. Hier zeigen entsprechende wissenschaftliche Analysen (s. o.) ein recht uneinheitliches Bild. Die Industrie verfolgt ebenfalls unterschiedliche Entwicklungsrichtungen und die Politik hat sich ebenfalls noch nicht auf eine Lösungsstrategie festgelegt (BMWi 2017).

Ebenso relevant ist die Akzeptanz der Oberleitungen (Vor-Ort-Akzeptanz und Akzeptanz von Nutzern der Autobahnen), die heute noch wenig beforscht ist, jedoch eine entscheidende Rolle bei der Einführung spielen könnte, wenn man die Proteste gegen den Übertragungsnetzausbau bedenkt.

Zusammengefasst hat die HO-Technologie somit eher wirtschaftliche als technische Risiken (vgl. Tab. 3-4).

Tab. 3-4 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das *technische* Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist …	☐	☒	☐	☐	☐	☐
Das *wirtschaftliche* Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist …	☐	☐	☐	☒	☒	☐

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Aus internationaler Sicht ist zunächst der europäische Markt zu betrachten. Deutschland ist dabei das Land mit den meisten Fahrzeugkilometern bei Lkws über 30 t (18,5 Mrd. fkm), gefolgt von Frankreich (13,3 Mrd. fkm), Spanien (10,7 Mrd. fkm) und Polen (9,8 Mrd. fkm) (Eurostat 2017). Bei einer Übertragung der Ergebnisse des deutschen Markthochlaufs auf die weiteren europäischen Länder (gleiche Marktanteile zur vereinfachten Abschätzung) sind Deutschland und Frankreich die Hauptprofiteure beim Stromverbrauch, da diese als Transitländer mit zusätzlich großem einheimischen Lkw-Bestand Strom bereitstellen müssen. Ersten Abschätzungen zufolge könnte der Stromverbrauch einer europäischen Lösung von HO-Lkws bis 2050 etwa 80-100 TWh für die EU27 betragen.

Weltweit ist der straßengebundene Gütertransport ein wachsender Markt, der jedoch häufig nicht besonders differenziert in Statistiken erfasst wird. Da insbesondere der schwere Güterverkehr über 12 Tonnen für HO-Lkws von Relevanz ist, fehlen hier ausreichend genaue Statistiken, um quantitative Einschätzungen vorzunehmen. Der höhere Anteil von Schienengütertransport in den USA könnte das Potenzial auf dem nordamerikanischen Kontinent einschränken. Erste Projekte am Hafen von Los Angeles mit HO-Lkws sind jedoch bereits gestartet. In China als wichtigem Vertreter Asiens ist vor allem die Nutzbarkeit des Stromnetzes unklar, das die steigenden Lasten übertragen muss.

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

Das Marktpotenzial von HO-Lkws als zusätzlichem Verbraucher ist abhängig von der Durchdringung der Lkws und der Verfügbarkeit ihrer Oberleitungsinfrastruktur. Die zu Beginn dieses Kapitels eingeführten Szenarien (vgl. Tab. 1-1) können verwendet werden, um das nationale Marktpotenzial zu berechnen (Tab. 4-1).

Im ambitionierten Szenario DE_95% ist mit einem Ausbau von 4.000 km Oberleitung eine Marktdurchdringung von 70.000 Lkws im Bestand im Jahr 2030 möglich. Im Jahr 2050 könnte der gesamte Güterfernverkehr (ca. 250.000 Fahrzeuge im Bestand mit einem Gewicht über 12 t) ersetzt werden. Dies würde bei durchschnittlichen elektrischen Fahranteilen von 60 % zu einem Energiemehrbedarf von 8 TWh/a im Jahr 2030 und zu ca. 35 TWh/a im Jahr 2050 führen (100 % elektrischer Fahranteil durch Batterienutzung auf nichtelektrifizierten Strecken).

Im weniger ambitionierten Szenario DE_80% ist nur die Verfügbarkeit der Infrastruktur verschieden, weshalb sich die Werte in den Jahren 2030 und 2040 unterscheiden. Bis 2050 wird davon ausgegangen, dass auch die Strecken abseits der Oberleitungsinfrastruktur mittels größerer Batterien bewältigt werden können. Entsprechend sind die Marktpotenziale und zu elektrifizierenden Strecken gleich groß.

Tab. 4-1 Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkws (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80%	Szenarienbereich DE_95%
Einheit	TWh	TWh
2020	0,07	0,07
2030	6,4	8,0
2040	18,4	22,1
2050	35	35

Hieraus ergibt sich insbesondere in den ersten Jahren ein sehr hohes Wachstum, das mittels der Compound Annual Growth Rate (CAGR) auf 60 % zwischen 2020 und 2030 berechnet werden kann. Die möglichen 1.000 Fahrzeuge im Jahr 2020 sind jedoch sehr unsicher und abhängig von der Entwicklung der Demonstrationsprojekte. Trotzdem ist dieses Marktwachstum ambitioniert und eine klare Herausforderung für die Technologie. Klar ist aber, dass die unter Kostendruck stehenden Logistikunternehmen bei einem deutlichen ökonomischen Vorteil, der bei einem geringen Investitionsrisiko realistisch ist: Wenn die Oberleitung ausgebaut ist, wird sie auch einige Jahre betrieben werden. Zudem sind die Mehrinvestitionen für den Lkw als Diesel-Hybrid-Variante vergleichsweise gering (Wietschel et al. 2017).

Die CAGR zwischen 2030 und 2050 liegt bei 5 % und ist in diesem späten Stadium noch recht hoch[2]. Methodisch ist jedoch anzumerken, dass bei diesem Marktanteil eine Sättigung zu erkennen ist, was besser durch ein logistisches Wachstum beschrieben wird. Das der CAGR zugrundeliegende exponentielle Wachstum ist in dieser Hinsicht mit Vorsicht zu bewerten.

In beiden Fällen ist der Investitionsaufwand für die Oberleitungsinfrastruktur zu nennen, der den Investitionen für die Fahrzeuge gegenübersteht. Für 4.000 km Oberleitungsausbau ist eine Investition von 8,8 Mrd. Euro zu tätigen, während für 8000 km das Doppelte zu bezahlen wäre. Unklar ist, wie groß der Unterschied in den Batteriegrößen sein müsste, aber bei einem Unterschied von 100 km in der benötigten Reichweite zwischen den beiden Optionen wären bei einem Batteriepreis von 200 EUR/kWh und der benötigten Bruttokapazität von etwa 200 kWh in einer Sattelzugmaschine für den gesamten Fahrzeugbestand Mehrinvestitionen von 10 Mrd. Euro notwendig. Je nach Entwicklung der Parameter ist also in beiden Szenarien eine langfristige Entwicklung zu ähnlichen Investitionen möglich.

[2] Man beachte, dass die CAGR für die Zahl der HO-Lkws sich unterscheidet, da in die Berechnung der Energiemenge der zunehmende elektrische Fahranteil, jedoch auch die abnehmende mittlere Jahresfahrleistung und der abnehmende Energieverbrauch der Fahrzeuge eingehen.

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen

Teilkriterium 4.1 Vermiedene Treibhausgas-Emissionen

Mit Hilfe von HO-Lkws können in Deutschland Treibhausgasemissionen vermieden werden. Diese sind jedoch abhängig vom elektrischen Fahranteil und dem Energieverbrauch der Fahrzeuge (siehe Tab. 1-1) sowie den durchschnittlichen Emissionen der Stromerzeugung, der aus den Szenarien vorgegeben ist. Alle nicht-elektrifizierten Strecken werden mit Diesel-Motoren zurückgelegt, so dass keine Emissionsminderung zu erwarten ist. Die Emissionen des Dieselantriebs sind gemäß DIN EN 16258 als Referenz berechnet (DLSV 2013). Die Effizienz des Diesel-Antriebsstrangs ist den Angaben in Wietschel et al. (2017) entnommen und die Ergebnisse dieser Rechnungen in Tab. 4-2 dargestellt.

Tab. 4-2 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (jeweils in Spannbreiten)

Mio. t $CO_{2\text{-äq.}}$/a	Szenarienbereich DE_80%	Szenarienbereich DE_95%
2020	0,02	0,02
2030	2,0	2,5
2040	6,0	7,2
2050	12,6	12,6

Bis zum Jahr 2050 können mit dem Hybrid-Oberleitungs-Lkw CO_{2e}-Emissionen in Höhe von 12,6 Mio. t CO_{2e} eingespart werden, während bis 2030 Einsparungen von 2,0-2,5 Mio. t CO_{2e} zu erwarten sind. Die Emissionsreduktion liegt damit zwar unter den gesamten CO_{2e}-Emissionen der Größenklasse 4 und der Sattelzugmaschinen in Abb. 1-1, dies ist jedoch mit der Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs und dem Güterstruktureffekt zu erklären (Wietschel et al. 2017). Die Emissionen zur Produktion von HO-Lkws und die Emissionen zur Errichtung und dem Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur fallen gemäß Wietschel et al. (2017) nicht ins Gewicht.

Teilkriterium 4.2 Vermiedene oder gestiegene andere Emissionen

Weitere Emissionen wurden zu den energiewirtschaftlichen Auswirkungen von Hybrid-Oberleitungs-Lkws nicht betrachtet.

4.3 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Aktuell ist Siemens der wichtigste Akteur in diesem Forschungsfeld, national wie international. Siemens kooperiert in Schweden mit Scania und Volvo, ist in diesem Bereich jedoch klar marktführend. Für den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur bieten sich Unternehmen der Eisenbahn an, die auch in Deutschland ansässig sind. Aufgrund der hohen Nachfrage nach Strom kann inländische Wertschöpfung auch im Bereich der Erneuerbaren Energien und im Stromsektor allgemein entstehen.

Forschungsseitig sind die in Kapitel 2 genannten Einrichtungen zu nennen, die sich bislang dem Thema widmen. Diese Gruppe erscheint noch nicht groß, international gibt es zudem bislang wenig bekannte Forschungsarbeiten.

Deutschland hat die oben beschriebene nicht-öffentliche Teststrecke, und der Aufbau von zwei weiteren Demonstratoren an deutschen Autobahnen ist beschlossen. International ist Deutschland neben Skandinavien und den USA derzeit an der Spitze der Marktvorbereitung. Mit MAN und Daimler sind in Deutschland zudem zwei große Lkw-Hersteller vertreten, die das Konzept umsetzen und weiterverbreiten könnten.

4.4 Kriterium 8: Stand und Trends von Forschung und Entwicklung im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Insgesamt gibt es nur wenige Projekte zu HO-Lkws. Im Bereich HO-Lkws betreiben derzeit zwei große Technikunternehmen Forschung und Entwicklung: Siemens und Volvo. Auf der ersten HO-Lkw-Teststrecke in Schweden ist ebenfalls Siemens aktiv (Siemens 2016). Ein weiteres Pilotprojekt ist im Hafen von Los Angeles für 2017 geplant (Spiegel 2014). In Deutschland sind die oben genannten Teststrecken in Betrieb und Planung. In allen drei Ländern ist Siemens an der Entwicklung beteiligt und belegt damit seine Technologieführerschaft (siehe Tab. 3-1 und Tab. 4-3).

Tab. 4-3 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?		
Technologiefeld	☒ Technologieführerschaft	☐ wettbewerbsfähig
	☐ nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	☐ abgeschlagen

Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Die Höhe der bisherigen Förderung ist in Deutschland auf die Projekte von Siemens (ENUBA und EBUBA 2, gefördert durch das BMUB) beschränkt. Siemens hat Fördermittel in Höhe von 2,1 Mio. Euro für ENUBA 1 (01.05.2010 bis 30.09.2011) erhalten, die Daten für ENUBA 2 sind derzeit noch nicht verfügbar (Förderkatalog 2017). Der Eigenanteil von Siemens lag vermutlich in beiden Projekten deutlich höher, jedoch ist der Anteil am F&E-Budget von Siemens wie auch des BMUB gering.

4.5 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Die Akzeptanz von HO-Lkws ist bislang noch wenig untersucht. Es gilt hier drei Akzeptanzbereiche zu adressieren: die politische Akzeptanz, die Marktakzeptanz von Herstellern und Logistikdienstleistern sowie die Vor-Ort-Akzeptanz (Tab. 4-4).

- Die *Marktakzeptanz* ist heute unklar: Während die Hersteller vor allem auf die Kosten achten und an geringen notwendigen Verhaltensanpassungen im Betrieb interessiert sein könnten, sind die Lkw-Fahrer vor allem vom geringen Geräuschpegel begeistert. Von einem eventuellen ständigen "Tunnelblick" (durch die Leitungsmasten) könnten ggf. Irritationen entstehen.

- Die *politische Akzeptanz* erscheint heute gering, insbesondere auf europäischer Ebene, auf der man sich europäische Konzepte wünscht, die auch in dünner besiedelten und wenig befahrenen Ländern attraktiv sind. Die deutschen Ministerien sind teilweise sehr positiv, teilweise kritisch gegenüber dem HO-Konzept eingestellt.
- Die *Vor-Ort-Akzeptanz* ist ebenfalls unklar: Die meisten Autobahnen führen nicht durch Siedlungen, jedoch könnte eine Lärmverminderung mit der neuen Technologie einhergehen. Allerdings treten auch heute schon beim Ausbau der Übertragungsnetze Akzeptanzprobleme auf, die den Ausbau und die Marktdiffusion entscheidend hemmen könnten, bei der Bahn erscheint jedoch der Oberleitungsausbau weniger problematisch, da er ohnehin an Gleistrassen stattfindet.

Tab. 4-4 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Hybrid-Oberleitungs-Lkw zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt Marktakzeptanz Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Ebene Gesellschaft Sozialpol. Akzeptanz Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung/ Diskurse; Image		Lokale Ebene Lokale Akzeptanz Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)
Technologiefeld	3 (teils-teils)	Logistikdienstleister skeptisch, Fokus aber auf Kosten. Akzeptanz Lkw-Fahrer unklar	4 (eher gering)	Bislang wenig Interesse auf EU-Ebene, geteilte Meinungen in deutschen Ministerien	3 (teils-teils)	Ähnliche Akzeptanzprobleme wie bei Stromleitungen zu erwarten, aber Bahn mit wenig Problemen

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Da die Situation schwer einzuschätzen ist und an vielen Stellen unklar, wird insbesondere hier weiterer Forschungsbedarf, beispielsweise in Form einer Stakeholderanalyse, gesehen.

4.6 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Für die langfristige Entwicklung von Batterie-HO-Lkws, also den Fahrzeugen, die eine Batterie für die nicht elektrifizierten Strecken nutzen, ist insbesondere die Entwicklung neuer Batterietechnologien mit höherer Energiedichte von Relevanz. Fahrzeugkonzepte mit einer Reichweite von 100 km reichen auch bei einem großen Infrastrukturausbau nicht aus, um alle nichtelektrifizierten Strecken zu befahren (Wietschel et al. 2017). Eine Erhöhung der Reichweiten mit der heutigen Batterietechnologie würde jedoch zu Verlusten beim Zuladegewicht führen, was aus Logistiksicht ein

klares KO-Kriterium wäre. Eine Verbesserung der Energiedichte ist daher von großer Relevanz, aber auch bereits in Umsetzung.

Weiterhin ist aus energiewirtschaftlicher Sicht der Netzausbau für den HO-Lkw von Relevanz. Da Netzengpässe aber zumeist durch die Stromerzeuger entstehen und seltener durch die -abnehmer, erscheint dies eher ein lokales Problem zu sein, das keine Pfadabhängigkeit darstellt.

4.7 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Für die Verbreitung der HO-Lkws ist der Aufbau einer Mindestmenge an Oberleitungsinfrastruktur unerlässlich. Die Errichtung von kleinen Infrastruktureinheiten ist dabei schwieriger als bei anderen Technologien, da Nutzungs- und Betankungsort an der gleichen Stelle liegen bzw. die Dauer des Fahrens an der Infrastruktur im Verhältnis zur Gesamtstrecke direkt proportional zu den Kosten- und Emissionseinsparungen bei einem Diesel-Hybrid-Fahrzeug liegen. Zudem sind Leitungen vom Mittelspannungsnetz an die Autobahnen zu ergänzen, welche die bestehende Infrastruktur ergänzen (vgl. Tab. 4-5). Auf lange Sicht ist eine Infrastruktur- und Batteriekombination zu ermitteln, die die Bedürfnisse der Nutzer deckt. Die Reaktionsfähigkeit des Systems ist jedoch gering, da die Amortisationszeiten groß sind (häufig wird von 30 Jahren für die Oberleitungsinfrastruktur der Bahn ausgegangen (Wietschel et al. 2017).

Tab. 4-5 Abhängigkeit des Technologiefeldes Hybrid-Oberleitungs-Lkw von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist *unabhängig* von Infrastrukturen möglich.	☐	☒
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von *bestehenden* Infrastrukturen abhängig.	☒	☐
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen *bestehende* Infrastrukturen ausgebaut werden.	☒	☐
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen *neue* Infrastrukturen gebaut werden.	☒	☐

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Das Konzept des Hybrid-Oberleitungs-Lkw erscheint nach Auswertung der ersten Studien zu diesem Thema einen vielversprechenden Beitrag zur Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs und damit auch des gesamten Verkehrssektors liefern zu können, insbesondere durch die hohen Gesamtwirkungsgrade. Aus wirtschaftlicher Sicht könnte insbesondere der kostenintensive Oberleitungsinfrastrukturausbau ein Hemmnis sein, das diese Technologieentwicklung verzögern könnte.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht ergeben sich ebenfalls mehrere Forschungs- und Entwicklungsfelder, die es in naher bis mittlerer Zukunft abzudecken gilt:

1 | Die optimale Auslegung der Stromzufuhr sollte aus technischer und energiewirtschaftlicher Sicht weiter beleuchtet werden. Dies beinhaltet sowohl die Nähe zu vorhandenen Stromnetzen als auch deren techno-ökonomische Auslegung. Während bislang vor allem Verkehrsströme zur Ermittlung der auszubauenden Infrastruktur in Analysen herangezogen wurden, könnte insbesondere ein regionaler Bezug aufgrund des zu erwartenden Ausbaus Erneuerbarer Energien von Relevanz sein.

2 | Weiterhin stellt der HO-Lkw einen unflexiblen Nachfrager von Strom dar, der sein Hybridsystem vermutlich nur zur kurzzeitigen Vermeidung von Lastspitzen nutzen kann. Ein Einbezug des HO-Lkw in Analysen zur Lastverlagerung mit weiteren flexiblen Nachfragern sollte in zukünftigen Studien untersucht werden.

3 | Die Akzeptanz eines Ausbaus von Oberleitungen an Autobahnen ist ein wesentlicher Aspekt, der die gesamte Technologiediffusion infrage stellen könnte. Hier gilt es eine frühzeitige Akzeptanz vor Ort zu schaffen, um Schwierigkeiten, wie beispielsweise beim Stromnetzausbau oder CCS-Technologien, nicht aufkeimen zu lassen.

4 | Langfristig kann der Ausbau von Oberleitungsinfrastruktur zu großen Einsparungen von CO_2 führen. Mit mehr Oberleitungsinfrastruktur steigt auch der elektrische Fahranteil der Fahrzeuge, wenn sie als Dieselhybrid-Variante betrieben werden. Auf lange Sicht ist der Einsatz von Batterien notwendig, um diese Fahrzeuge (in Kombination mit Erneuerbarem Strom) vollständig zu dekarbonisieren. Die Größe der Batterien, die in den Fahrzeugen eingesetzt werden, kann jedoch einen geringeren Infrastrukturausbau ermöglichen, wenn sie entsprechend dimensioniert sind. Hier sind weitere Analysen zur energiewirtschaftlich und ökologisch richtigen Auslegung von Nöten.

5 | Alternativ zur Batterie als hybride Komponente können auch Verbrennungsmotoren mit synthetischen, strombasierten Kraftstoffen eingesetzt werden. Auch hier gilt es entsprechend die Auswirkungen auf die Energiewirtschaft zu analysieren.

6 | Die Fortschreitung der Technologieentwicklung des Autonomen Fahrens könnte eine große Änderung des Mobilitätsverhaltens (auch von Lkws) mit sich bringen. Beim Einsatz des sogenannten Platooning (Kooperation von mehreren Fahrzeugen zur Reduktion der Fahrwiderstände) können große Energiemengen eingespart werden (Krail et al. i. V.). Damit einher geht auch die Frage, ob dann ein

Teil des Lkw-Verkehrs in die Nacht verlagert werden kann oder flexibler gestaltet werden kann, was gegebenenfalls energiewirtschaftlich Vorteile haben könnte. Auch hieraus ergeben sich zahlreiche energiewirtschaftliche Fragestellungen, die es zu untersuchen gilt.

Literaturverzeichnis

BMUB (2015): Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Autoren: Öko-Institut e.V.: Repenning J.; Emele L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H. et al.; Fraunhofer ISI: Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Schade, W.; Schlomann, B. et al. Berlin, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI.

BMVI (2017): Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr - Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) - Referat G 20 „Energie und Klimaschutz“. Unter Mitarbeit von M. Kaltschmitt (Technische Universität Hamburg), O. Weinmann (Vattenfall Europe Innovation GmbH), M. Wietschel (Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (ISI), G. Larroque (TOTAL Deutschland GmbH), W. Schade (M-FIVE GmbH), M. Schuckert (Daimler AG) und der NOW GmbH. Berlin: BMVI.

DLSV (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Berlin: Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.

Dörr, H.; Hillen, K.; Marsch, V.; Romstorfer, A.; Toifl, Y.; Albrecht, R.; Huss, A.; Prenninger, P.; Berkowitsch, C.; Hörl, B.; Wanjek, M.; Bukold, S. (2014): Neue Fahrzeugtechnologien und ihre Effekte auf Logistik und Güterverkehr. Serviceability of Low-Emission-Vehicle-Technologies to eco-optimize Future Logistics and Freight Transport (EFLOG). Nr. 2014/09, Wien: Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg. und Auftraggeber). http://www.bmvit.gv.at/innovation/publikationen/verkehrstechnologie/downloads/eflog.pdf. Letzter Zugriff: 22.02.2017.

Dünnebeil, F.; Reinhard, C.; Lambrecht, U.; Kies, A.; Hausberger, S.; Rexeis, M. (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH.

Edel, R.; Sommer, H.; Lehmann, M.; Birkner, M.; Sessing, G.; Lerbs, S.; et al. (2014): Ökonomische und ökologische Bewertung eines Oberleitungs-Hybrid Systems für schwere Nutzfahrzeuge. Ergebnisbericht im Rahmen des Förderprojektes ENUBA 2: „Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen“. München: Siemens AG.

Eurostat (2017): Jährlicher Straßengüterverkehr nach dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeuges (1 000 t, Mio. tkm, Mio. Veh-km, 1 000 Jrnys) [road_go_ta_mplw]. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_go_ta_mplw&lang=de. Letzter Zugriff: 06.06.2017.

Förderkatalog (2017): Förderkatalog des Bundes. http://foerderportal.bund.de/. Letzter Zugriff: 04.06.2017.

Gerhardt, N.; Sandau, F.; Scholz, A.; Hahn, H.; Schumacher, P.; Sager, C.; Bergk, F.; Kämper, C.; Knörr, W.; Kräck, J.; Müller, T.; et al. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Endbericht. Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP; IFEU – Institut; Stiftung Umweltenergierecht. Kassel: Fraunhofer IWES.

Hacker, F.; Blanck, R.; Hülsmann, F.; Kasten, P.; Loreck, Ch.; Ludig, S.; et al. (2014): eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Gemeinsamer Endbericht zu den Vorhaben "Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum langfristigen Klimaschutz (FZK: UM 11 96 106) und "Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität im Güter- und öffentlichen Personenverkehr zum langfristigen Klimaschutz" (FKZ: 16 EM 1001). Berlin: Öko-Institut e.V.

Heise (2017): Elektromobilität: Praxistest von Oberleitungs-Lkw auf zwei Strecken ab Ende 2018. https://www.heise.de/newsticker/meldung/Elektromobilitaet-Praxistest-von-Oberleitungs-Lkw-auf-zwei-Strecken-ab-Ende-2018-3605961.html. Letzter Zugriff: 04.06.2017.

Hülsmann, F.; Mottschall, M.; Hacker, F.; Kasten, P. (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potentiale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Working Paper. Berlin: Öko-Institut e.V.

Krail, M.; et al. (i.V.): „Energie- und Treibhausgaswirkungen des Autonomen Fahrens im Straßenverkehr“, Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Stuttgart, Karlsruhe, TU Hamburg-Harburg, Hamburg, M-Five, Karlsruhe 2017.

Kreyenberg, D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Dünnebeil, F.; Heidth, C.; Knörr, W.; et al. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potentiale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH; Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH. Berlin: DLR.

Siemens (2017): World's first eHighway opens in Sweden. Pressemitteilung der Siemens AG. https://www.siemens.com/press/PR2016060319MOEN. Letzter Zugriff: 04.06.2017.

Siemens AG (2016): ENUBA 2 – Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Abschlussbericht. München: Siemens AG.

Spiegel (2014): Siemens baut elektrische Autobahn in den USA. http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/siemens-baut-in-kalifornien-autobahn-fuer-elektrische-lkw-a-984646.html. Letzter Zugriff: 04.06.2017.

SRU (2012): Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

UBA (2013a): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 – Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie- und Emissionsszenarios“. Autoren: Blanck, R.; Kasten P.; Hacker, F.; Mottschall, M. Berlin: Öko-Institut e.V.

UBA (2015): Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Texte 30/2015, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (UBA), durchgeführt von INFRAS AG und Quantis, Autoren: Schmied, M.; Wüthrich, P., Zah, R.; Althaus, H.-J.; Friedl, C. Dessau: Umweltbundesamt.

UBA (2016a): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, durchgeführt von Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, Ch.; Schmied, M.; Wüthrich, P. Öko-Institut e.V., DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), INFRAS. Berlin: Öko-Institut .

UBA (2016b): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Studie für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Durchgeführt von ifeu, INFRAS AG und LBST. Berlin: UBA.

Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, W., Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W., Mader, S. (2017): „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“, Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Stuttgart, Karlsruhe, TU Hamburg-Harburg, Hamburg, M-Five, Karlsruhe, 2017.