

Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland

Patrick Plötz, Till Gnann, Martin Wietschel, Philipp Kluschke, Claus Doll
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Florian Hacker, Ruth Blanck, Sven Kühnel
Öko-Institut, Berlin

Julius Jöhrens, Hinrich Helms, Udo Lambrecht, Frank Dünnebeil
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg

Karlsruhe, Berlin, Heidelberg
Oktober 2018

Kontakt:

Patrick Plötz, Fraunhofer ISI, patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de

Florian Hacker, Öko-Institut, f.hacker@oeko.de

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

Herausgeber:

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI

Breslauer Str. 48

76139 Karlsruhe

INHALT

EINLEITUNG UND MOTIVATION.....	1
1 HERAUSFORDERUNGEN	2
<i>Die Treibhausgasemissionen im Güterfernverkehr steigen Jahr für Jahr an – die Umkehrung dieses Trends ist eine besondere Herausforderung.</i>	<i>2</i>
<i>Eine weitere Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene ist wichtig, die Kapazitäten sind dort aber begrenzt.</i>	<i>3</i>
<i>Die Vielfalt denkbarer Antriebsalternativen verhindert Richtungsentscheidungen bei den Akteuren des Straßengüterverkehrs.</i>	<i>3</i>
2 VERGLEICH DER ALTERNATIVEN ANTRIEBE UND KRAFTSTOFFE	5
<i>Verschiedene technische Optionen stehen in Konkurrenz.</i>	<i>5</i>
<i>Elektrische Antriebe haben den für Lkw entscheidenden Vorteil geringer Betriebskosten.</i>	<i>7</i>
<i>Alternative Antriebe benötigen frühzeitige Investitionen in eine eigene Infrastruktur.</i>	<i>8</i>
<i>Energiewirtschaftlich haben Oberleitungs-Lkw Vorteile, da der Strombedarf vergleichsweise gering ist und sich eher gleichmäßig über das Streckennetz verteilt.</i>	<i>9</i>
<i>Alle alternativen Technologien bieten Chancen für eine heimische Wertschöpfung – Unterschiede bestehen bei der Abhängigkeit von Energieimporten.</i>	<i>10</i>
<i>Fazit: Elektrische Antriebe haben klare Vorteile, vor allem wegen der hohen Energieeffizienz.</i>	<i>11</i>
3 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN.....	13
<i>Der Umstieg auf alternative Antriebe erfordert schon heute politisches Handeln.</i>	<i>13</i>
<i>Der Infrastrukturaufbau kann zu begrenzten Kosten erfolgen, muss aber staatlich vorfinanziert werden.</i>	<i>13</i>
<i>Große Demonstrationsprojekte helfen, praktische Erfahrungen zu sammeln und Akzeptanz zu schaffen.</i>	<i>14</i>
LITERATUR.....	15

EINLEITUNG UND MOTIVATION

In diesem Papier werden Thesen und Handlungsempfehlungen zum Klimaschutz im Straßengüterverkehr in Deutschland entwickelt. Hierzu haben sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer ISI, des Öko-Instituts und Instituts für Energie- und Umweltforschung (ifeu) zusammengeschlossen, die in den letzten Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten zu diesem Thema gearbeitet haben. Ziel ist es, den gemeinsamen Kenntnisstand handlungsorientiert darzustellen. Das Papier richtet sich primär an die Politik und soll die Diskussion zu diesem wichtigen Themenfeld der Klimapolitik weiter anregen.

1 HERAUSFORDERUNGEN

Die Treibhausgasemissionen im Güterfernverkehr steigen Jahr für Jahr an – die Umkehrung dieses Trends ist eine besondere Herausforderung.

Nach dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sollen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 um 40 bis 42 Prozent im Vergleich zu 1990 sinken auf 95-98 Mio. t CO₂/a.¹ Bis 2050 ist angesichts der Ziele von Paris eine praktisch vollständige Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs notwendig. Der derzeitige Trend zeigt jedoch in eine andere Richtung: In den letzten Jahren sind die CO₂-Emissionen des Verkehrs durch Zunahme der Fahrleistungen wieder angestiegen und lagen im Jahr 2017 bei mehr als 170 Mio. t CO₂/a.² Davon werden ca. 40 Mio. t CO₂/a von schweren Nutzfahrzeugen (Lkw >3,5 t zulässiges Gesamtgewicht) verursacht – mit steigender Tendenz.³

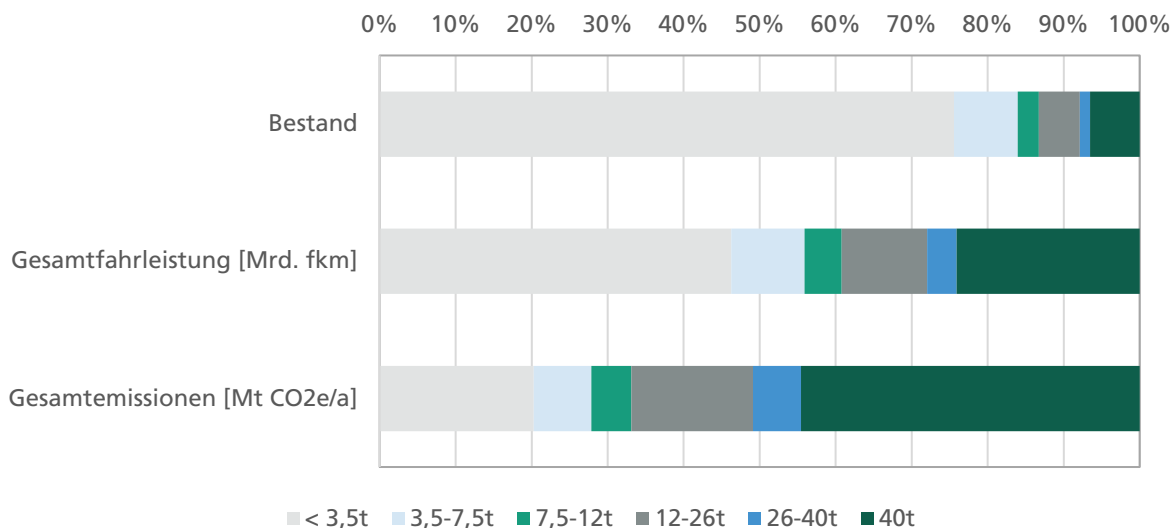


Abbildung 1: Bestand, Fahrleistung und CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2016 nach zulässigem Gesamtgewicht (Quelle: Timmerberg et al. 2018).

Der notwendige Beitrag von Lastkraftwagen (Lkw) zur Einsparung von CO₂-Emissionen und damit zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele ist von entscheidender Bedeutung. Der Lkw-Verkehr stellt heute einen Anteil von 73 % an der Transportleistung im

1 BMUB 2016
 2 UBA; BMU 2018
 3 Zimmer et al. 2016

deutschen Güterverkehr dar und für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg des Lkw-Verkehrs prognostiziert.⁴ Ohne eine Verbesserung der Auslastung und Effizienzsteigerung der Fahrzeuge würden die CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs demnach bis zum Jahr 2030 um weitere ca. 10 Mio. t ansteigen – dann wäre das Klimaschutzziel im Verkehr kaum noch erreichbar.⁵

Eine weitere Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene ist wichtig, die Kapazitäten sind dort aber begrenzt.

Zur Reduktion von Energieverbrauch und lokalen wie globalen Emissionen sind die Vermeidung und Verlagerung von Verkehr wichtige Handlungsoptionen. Sie helfen, die Größe der Herausforderung zu senken und erleichtern die Zielerreichung. Erste Option für nicht-vermeidbare Verkehre bleibt die Schiene. Hier ist der Güterverkehr schon heute in weiten Teilen elektrisch und energieeffizient. Im Rahmen der Energiewende erfolgt eine schrittweise Umstellung auf Erneuerbaren Strom, womit die CO₂-Emissionen gesenkt werden.

Derzeit wird auf der Straße das Vierfache an Gütertonnenkilometern gegenüber der Schiene transportiert. Mehrere Studien haben das Verlagerungspotential von der Straße auf die Schiene analysiert und kommen zu dem Fazit, dass selbst unter optimistischen Annahmen zur Verlagerung auch zukünftig mindestens zwei Drittel des Güterverkehrs über die Straße abgewickelt werden muss.⁶

Eine sehr starke Erhöhung des Schienengüterverkehrs würde darüber hinaus erhebliche Investitionen in neue Schienennetze sowie die Organisation des Güterverkehrs erfordern. Diese Investitionen und Ihre Wirkung müssen mit den Gesamtkosten und den Investitionen in einen CO₂-neutralen Straßengüterverkehr verglichen werden.

Die Vielfalt denkbarer Antriebsalternativen verhindert Richtungsentscheidungen bei den Akteuren des Straßengüterverkehrs.

Bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen sind batterieelektrische Fahrzeuge (einschließlich Plug-In-Hybridfahrzeuge) eine technische Option zur Reduktion der THG-Emissionen, welche von den meisten Experten angesichts fortschreitender Technikentwicklung bei Batterien als plausibel angesehen wird – zumindest in Ländern mit guter Verteilnetzinfrastuktur. Beim schweren Straßengüterverkehr werden dagegen mögliche technische Lösungen derzeit noch kontroverser diskutiert, denn vor allem der hohe spezifische Energieverbrauch birgt eine Herausforderung bezüglich der Reichweiten. Im Folgenden werden daher vier alternative Antriebs- oder Kraftstoffvarianten unterschieden:

⁴ vgl. bspw. BMUB 2016b

⁵ vgl. bspw. BMUB 2016b

⁶ SRU 2012, UBA 2016b, Holzhey 2014, Zimmer et al. 2016 und UBA 2016

- (1) Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw), die Strom von einer Oberleitung nutzen und entweder mit zusätzlichem Dieselmotor oder mithilfe einer Batterie die Strecken abseits der Oberleitungen zurücklegen;
- (2) Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw), die mit Wasserstoff betrieben werden;
- (3) reine Batterie-Lkw (BEV-Lkw), die an Ladestationen geladen werden und nur über einen elektrischen Antrieb verfügen; sowie
- (4) konventionelle verbrennungsmotorische Lkw, die mit synthetischen Kraftstoffen aus Erneuerbarem Strom betrieben werden und dabei sowohl gasförmig (Power-to-Gas, PtG-Lkw) oder flüssig (Power-to-Liquid, PtL-Lkw) vorliegen können.

Insgesamt besteht noch Unsicherheit, welcher alternative Antrieb sich in Zukunft durchsetzen könnte. Diese Vielfalt der Optionen lässt Investitionen in eine bestimmte Technologie sowohl auf Seiten der Fahrzeughersteller als auch der Lkw-Betreiber riskant erscheinen, was durch den ungewissen Ausbau der jeweiligen Versorgungsinfrastruktur noch verstärkt wird. Mit dem vorliegenden Papier möchten wir einen Beitrag leisten, diese Handlungsunsicherheit zu reduzieren und die Dekarbonisierung auch im Straßengüterverkehr voranzubringen.

2 VERGLEICH DER ALTERNATIVEN ANTRIEBE UND KRAFTSTOFFE

Verschiedene technische Optionen stehen in Konkurrenz.

Im Status quo operieren nahezu 100 % der Lkw-Flotte mit konventionellen Dieselantrieben, da hiermit viele Nutzeranforderungen an Lkw erfüllt werden: vergleichsweise geringe Kraftstoffkosten und Investitionen, hohe Motorleistung, Flexibilität, Reichweite und Zuverlässigkeit. Je nach Anwendung wiegen einige Anforderungen mehr als andere: So sind im Fernverkehr vor allem die Kraftstoffkosten dominierend, während in der Nahverkehrslogistik Flexibilität eine große Rolle spielt - wie auch zunehmend die lokal emissionsfreie Belieferung in Städten.

In einigen Studien werden alternative Kraftstoffe (E-Fuels und Bio-Fuels sowie Erdgas oder synthetische Gase) zur Nutzung in adaptierten Verbrennungsmotoren diskutiert.⁷ Diese Optionen haben den Vorteil der Nutzung weitestgehend bestehender Antriebstechnik sowie etablierter Versorgungsinfrastruktur. Die Herstellung synthetischer E-Fuels ist vergleichsweise weniger effizient als die direkte Nutzung von Strom; sie weisen derzeit hohe Herstellungskosten auf und eine lokale Emissionsfreiheit ist nicht gewährleistet. Das Potenzial von Biokraftstoffen ist begrenzt. Vor allem aus energiestrategischen Gründen werden auch Erdgasantriebe (CNG oder LNG) derzeit diskutiert und zum Teil erprobt. Erdgas steht bzgl. des Klimaschutzes jedoch letztlich vor den gleichen Herausforderungen wie Flüssigkraftstoffe und wird deshalb hier nicht separat betrachtet.

Neuere Studien gehen daher vermehrt auf elektrifizierte alternative Antriebe wie batterieelektrischer Antrieb, Brennstoffzellen-Antrieb oder Oberleitungs-Antrieb für schwere Nutzfahrzeuge ein.⁸ Ein rein batterieelektrischer Antrieb bietet eine hohe Energieeffizienz, ist derzeit allerdings aufgrund der geringen Energiedichte und der Nachladedauer der Batterie eher für kürzere Strecken geeignet.⁹ Brennstoffzellen-Antriebe haben bei der Nutzung von verflüssigtem Wasserstoff Vorteile durch größere Reichweiten sowie schnellere Betankung, allerdings ist hier die Energieeffizienz durch Umwandlungsverluste schlechter, was zu hohen Kosten führt, und das Konzept für eine flächendeckende Infrastruktur ist unklar.¹⁰ Oberleitungs-Antriebe sind eine bewährte Technik aus dem Schienenverkehr und bieten hohe Wirkungsgrade, allerdings verbunden mit einer hohen Markteintrittsbarriere: dem Infrastrukturaufbau. Tabelle 1 stellt diese Punkte nochmals vergleichend gegenüber.

⁷ siehe bspw. Bahn et al. 2013, Askin et al. 2015

⁸ Mulholland et al. 2018, Talebian et al. 2018, Plötz et al. 2018, Kühnel et al. 2018.

⁹ Mulholland et al. 2018

¹⁰ Gnann et al. 2017

Tabelle 1: Übersicht von alternativen Antrieben und Kraftstoffen für Lkw.

	BZ-Lkw	BEV-Lkw	OH-Lkw	PtG-Lkw und PtL-Lkw
Motoren und Technik	Elektromotor und Brennstoffzelle mit Wasserstoff als Energiespeicher	Elektromotor und Batterie als Energiespeicher	Elektromotor und Strom aus Oberleitung, ggf. mit Batterie als Energiespeicher oder zusätzlichem Verbrennungsmotor	Verbrennungsmotor und Druckgas- oder Flüssigtank als Energiespeicher
Umwandlungsschritte Kraftstoffherstellung aus Strom	Umwandlung in Wasserstoff (Elektrolyse)	Direktnutzung	Direktnutzung	Umwandlung in Wasserstoff (Elektrolyse) und weiter in kohlenstoffhaltigen Kraftstoff
Wirkungsgrad heute bei Verwendung von Erneuerbaren Strom	Circa	Circa	Circa	Circa
tank-to-wheel	40 – 50 %	90 %	90 %	35 – 40 %
well-to-tank	60 – 70 %	90 %	90 %	50 – 60 %
well-to-wheel	25 – 35 %	80 %	80 %	20 – 25 %
Technologischer Stand Fahrzeuge	Mehrere Demonstrationsprojekte (TRL 6-7) ¹¹	Erste kommerziell verfügbare Fahrzeuge (TRL 8) ¹¹	Mehrere Demonstrationsprojekte (TRL 6-7) ¹¹	Konventionelle Fahrzeuge
Zentrale Herausforderungen	Infrastrukturaufbau und erhöhter Strombedarf durch hohe Umwandlungsverluste, Kostenreduktion der Kraftstoffherstellung	Begrenzte Reichweite, Ladedauer und Zuladungsverluste	Infrastrukturaufbau, Akzeptanz, Integration in Logistikprozesse	Stark erhöhter Strombedarf durch höchste Umwandlungsverluste, Kostenreduktion bei Fahrzeug und Kraftstoffherstellung

¹¹ TRL = Technological Readiness Level mit Stufen von TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) bis TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes), vgl. EU 2014.

Elektrische Antriebe haben den für Lkw entscheidenden Vorteil geringerer Betriebskosten.

Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen im Logistikmarkt wird maßgeblich von den Transportkosten bestimmt. Eine zentrale Anforderung an die eingesetzten Fahrzeuge und damit für den Markterfolg einer Antriebstechnologie sind daher konkurrenzfähige Gesamtkosten für einen typischen Nutzungszeitraum des Fahrzeugs im Fernverkehr. Angesichts der hohen Jahresfahrleistungen von Lkw im Güterfernverkehr sind, viel stärker als bei Pkw, die Betriebskosten für die Gesamtkosten relevant. Mehrere Studien (siehe Abbildung 2) zeigen, dass insbesondere Antriebssysteme mit direkter Stromnutzung (OH-Lkw und BEV-Lkw) bei der Fortschreibung der technologischen Entwicklung und selbst bei unveränderten fiskalischen Rahmenbedingungen (u.a. Steuern, Abgaben, Maut) bereits kurzfristig ähnliche Gesamtkosten wie effiziente Diesel-Lkw im Straßengüterfernverkehr erzielen können. Die höheren Beschaffungskosten werden durch geringere Betriebskosten kompensiert. Deutlich höhere Gesamtkosten sind hingegen weiterhin mit dem Einsatz von Brennstoffzellen-Lkw bzw. von synthetischen Kraftstoffen in verbrennungsmotorischen Lkw verbunden, da die Kraftstoffkosten pro Kilometer hier höher sind.

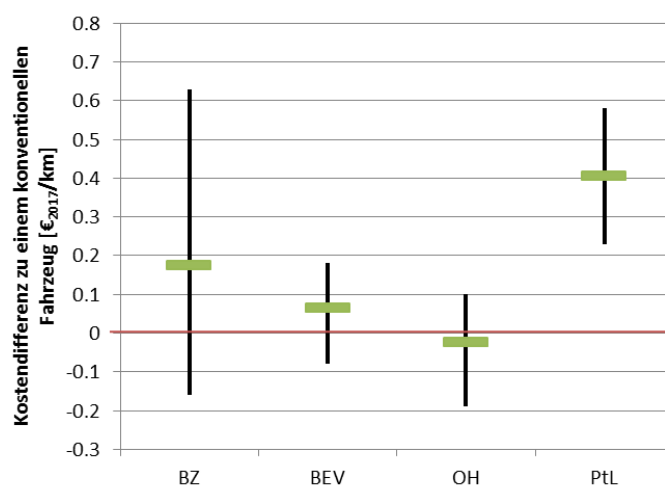


Abbildung 2: Differenz der TCO verschiedener alternativer Antriebs- / Kraftstoffoptionen relativ zum fossil betriebenen Dieselfahrzeug im Zeitraum 2020 - 2030 (Mittelwert (in grün) und Bandbreite zwischen verschiedenen Studien).¹²

¹² Quellen: Fulton et al. 2015, Moulak et al. 2017, Wietschel et al. 2017, Kühnel et al. 2018, ifeu 2018, Miyasato et al. 2012, den Boer et al. 2013, PtL-Preise aus Maier et al. 2018, km-Kosten berechnet mit Lkw-TCO-Modell aus ifeu 2018; Anmerkungen: Kosten wurden in €₂₀₁₇ übertragen; der Betrachtungszeitraum und -zeitpunkt variieren je nach Quelle zwischen 2020-2030; es werden sowohl Kurz- als auch Langstrecken-Lkw betrachtet.

Es bestehen teilweise große Spannbreiten sowohl bei den Annahmen zu den zukünftigen Komponentenkosten (insbesondere zur Brennstoffzelle) als auch zu den Rahmenbedingungen (u.a. Energiepreisentwicklung). Die durch diese Unsicherheiten verursachte Schwankungsbreite bei den Vollkosten liegt in ähnlicher Größenordnung wie die Vollkosten-Unterschiede zwischen verschiedenen Technologien. Besonders relevant für die Wirtschaftlichkeit sind die fahrleistungsabhängigen Kostenkomponenten. Geringfügige Veränderungen von bspw. Energiepreisen und Maut können die Technologiereihenfolge nach Gesamtkosten bereits verschieben. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von alternativen Antriebssystemen im Vergleich zur etablierten Dieselsechnologie könnte erhöht werden, wenn die geringere Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei der Bepreisung von Energie und Infrastrukturnutzung honoriert würden – z.B. durch eine CO₂-Komponente bei der Energiebesteuerung oder bei Infrastrukturabgaben. Würden die Kosten des Infrastrukturaufbaus bereits in der Markthochlaufphase den wenigen Fahrzeugen mit alternativem Antrieb angelastet, würde die Erreichung der Kostenparität auf Grund der anfänglich geringen Infrastrukturauslastung jedoch erschwert.¹³

Alternative Antriebe benötigen frühzeitige Investitionen in eine eigene Infrastruktur.

Während für Dieselkraftstoff ein flächendeckendes Versorgungsnetz besteht, erfordern die Antriebs- und Kraftstoffalternativen – mit Ausnahme von synthetischen Kraftstoffen – den Aufbau einer eigenen Energieversorgungsinfrastruktur. Diese reicht von einer Verteil- und Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff im Falle von BZ-Lkw, über ein stationsbasiertes Ladesäulennetz für batterieelektrische Lkw bis hin zu elektrifizierten Fernstraßen im Falle von oberleitungsgebundenen Fern-Lkw.

In der frühen Marktphase besteht die Herausforderung, dass erst bei einem verfügbaren Grundversorgungsnetz der Einsatz von alternativ betriebenen Fahrzeugen für Nutzer attraktiv wird. Angesichts des geringen Marktvolumens ist in diesem Zeitraum ein wirtschaftlich rentabler Aufbau und Betrieb der Infrastruktur aber wenig wahrscheinlich. Jedoch besteht voraussichtlich im Straßengüterverkehr – stärker als im Personenverkehr – die Möglichkeit, bereits mit einer relativ geringen Netzdichte bzw. ausgewählten Korridoren zu einem frühen Zeitpunkt ein attraktives Versorgungsnetz für erste Anwendungen zu schaffen (z.B. für Regional- oder Pendelverkehre sowie auf hoch frequentierten Korridoren).

Eine aktuelle Studie analysiert die Infrastrukturkosten für den Aufbau eines Start- sowie eines Ausbaunetzes in Deutschland zur Versorgung von etwa 5.000 bzw. 40.000 Fern-Lkw für die betrachteten Energieversorgungsvarianten.¹⁴ Diese bewegen sich für das Startnetz zwischen 280 Mio. € für ein Grundnetz aus Wasserstofftankstellen (bei dezentraler Erzeugung) und 850 Mio. € für eine beidseitige Elektrifizierung von Fernstraßen mit Oberlei-

¹³ siehe Kühnel et al. 2018

¹⁴ Kühnel et al. 2018, vgl. aber auch Wietschel et al. 2017 sowie Fulton et al. 2018

tungen auf einer Länge von 500 km. Die Investitionen für das gesamte Start- und Ausbaunetz bewegen sich laut dieser Abschätzung zwischen 2,3 Mrd. € (Wasserstofftankstellen) und 5,1 Mrd. € (2.000 km Oberleitung).

Tabelle 2: Abschätzung der Infrastrukturinvestitionen für zwei Netzausbaustufen (Startnetz / Ausbaunetz: Versorgung von max. 5.000 / 40.000 Lkw).¹⁵

	Wasserstofftankstellen	Ladesäulennetz	Oberleitung (Netzlänge)
Startnetz	290 Mio. €	510 Mio. €	850 Mio. € (500 km)
Ausbaunetz	2.300 Mio. €	3.700 Mio. €	5.100 Mio. € (2.000 km ¹⁶)

Bei der Bewertung des Kostenunterschieds zwischen den Infrastrukturen ist zu berücksichtigen, dass sich auch die Gesamtnutzungskosten der Fahrzeuge zwischen den Antrieben deutlich unterscheiden. Abbildung 2 weist beispielsweise für den OH-Lkw um etwa 20 ct/km geringere Vollkosten gegenüber dem Brennstoffzellen-Lkw aus. Für das hier genannte Ausbauszenario entspräche dies einer Ersparnis im Betrieb von bis zu 600 Mio. € pro Jahr, die die höheren Infrastrukturkosten des Oberleitungsnetzes nach etwa fünf Jahren kompensieren würde.

Die Kostenschätzung ist insgesamt mit Unsicherheiten behaftet, da sie sehr stark von den unterstellten Annahmen zur Nutzung der Infrastruktur und der daran ausgerichteten Infrastrukturauslegung abhängig ist. Zudem können die tatsächlichen Realisierungskosten auf dem aktuellen Kenntnisstand nur grob abgeschätzt werden. Derzeit werden erste Erfahrungen über die tatsächlichen Kosten (Planung, Ausführung, und Betrieb) einer Oberleitungs-Infrastruktur in einer Reihe von Feldversuchen gesammelt.

Energiewirtschaftlich haben Oberleitungs-Lkw Vorteile, da der Strombedarf vergleichsweise gering ist und sich eher gleichmäßig über das Streckennetz verteilt.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht sind die absoluten Strommengen, die bereitzustellende Erzeugungskapazität, die abgerufene Leistung und ggf. Speicherung relevant für den Vergleich alternativer Antriebe im Straßengüterverkehr.

Die absoluten Strommengen für OH-Lkw und BEV-Lkw sind im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen niedriger.¹⁷ Zudem ist der notwendige zusätzliche Ausbau an Er-

¹⁵ Zahlen aus Kühnel et al. 2018

¹⁶ Bei den Kosten für das Ausbaunetz kommen nicht nur die zusätzlichen Kilometer zum Tragen, sondern auch eine höhere spezifische Leistungsfähigkeit der Infrastruktur, um die genannte Zahl von 40.000 Lkw versorgen zu können.

neuerbaren Energien durchaus realistisch und unterhalb der heute verfügbaren Kapazitäten.¹⁸ Die notwendigen Erzeugungskapazitäten für eine klimaneutrale Energieversorgung wären für die Option Wasserstoff (BZ-Lkw) in etwa doppelt so hoch und für synthetische Flüssigkraftstoffe wie eDiesel (PtL-Lkw) ca. dreimal so hoch wie für OH-Lkw und BEV-Lkw.

Die Last von OH-Lkw wird stetig während der Fahrt abgerufen und könnte lokal zu Netzengpässen führen. Erste Auswertungen zeigen jedoch, dass die Netzbelastung im Vergleich zur steigenden Energienachfrage eher gering ist und nur in ländlichen, wenig bevölkerten Gebieten zum Problem werden könnte.¹⁹ Bei entsprechendem Ausbau Erneuerbarer Energien könnten die OH-Lkw hier jedoch gleichzeitig zu Netzentlastungen führen. Die Fluktuation Erneuerbarer Energien könnte allerdings eine Speicherung notwendig machen, was bei anderen alternativen Kraftstoffen einfacher wäre. PtL-Lkw und BZ-Lkw benötigen zwar ebenfalls die entsprechenden Anlagen zur Erzeugung, die jedoch mit entsprechenden Speichern besser gesteuert werden könnten und damit auch eine wichtige Flexibilitätsoption darstellen. Reine Batteriefahrzeuge benötigen ähnliche Strommengen wie OH-Lkw, allerdings werden lokal deutlich höhere Leistungen zum Nachladen (zum Beispiel an Rastanlagen während der Ruhepausen) notwendig, und es ist daher eine lokal deutlich höhere Netzbelastung als bei OH-Lkw zu erwarten.

Wichtig zu erwähnen bleibt, dass nach derzeitigem Stand der Wissenschaft strombasierte Kraftstoffe (von Wasserstoff bis eDiesel) in anderen Verkehrsträgern (Flug- und Schiffsverkehr) für einen klimaneutralen Betrieb zukünftig zum Einsatz kommen müssen, weil limitierte Platzverhältnisse und Gewichtrestriktionen den Einsatz elektrischer Antriebe weitestgehend ausschließen.

Alle alternativen Technologien bieten Chancen für eine heimische Wertschöpfung – Unterschiede bestehen bei der Abhängigkeit von Energieimporten.

Die Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehr bedeutet auch für den Lkw-Sektor eine umfassende Transformation. Hierbei gibt es weltweit bereits Aktivitäten, wobei Deutschland aufgrund seines starken Angebots im Lkw-Bereich bei der Transformation eine wich-

¹⁷ Bei einer Durchdringung von 30 % OH-Lkw mit einem elektrischen Fahranteil von 50 % in Deutschland im Jahr 2030 wären rund 8 TWh Energie pro Jahr notwendig, eine Ersetzung aller Lkw mit über 12 t zGG wäre mit knapp 36 TWh/a zu bewerkstelligen (30 % BEV-LKW benötigten 16 TWh). Im Vergleich zur deutschen Bruttostromproduktion 2017 in Höhe von 655 TWh (AGEB 2018) wäre dies eine vergleichsweise geringe Strommenge. Eine vollständige Umstellung auf Wasserstoff läge bei 72 TWh/a, für eDiesel bei 104 TWh/a.

¹⁸ Um 36 TWh Erneuerbaren Strom aus Photovoltaik zu gewinnen, müssten Anlagen mit ca. 36 GW Spitzenleistung installiert werden, wenn man durchschnittlich 1.000 Volllaststunden annimmt. Bei Onshore-Windkraftanlagen mit 2.000 Volllaststunden würde das 18 MW installierter Leistung, bei Offshore-Anlagen mit 4.000 Volllaststunden ca. 9 MW bedeuten (BMW 2017). Auch hier zeigt der Vergleich mit der heute installierten Leistung von PV (41 GW), Wind onshore (46 GW) und Wind offshore (4 GW), dass dies auf lange Sicht machbar erscheint.

¹⁹ Wietschel et al. 2017

tige Rolle spielen kann. Dazu ist es unter anderem wichtig, dass man den Einsatz und die Funktion der Technologien auch im Inland aufzeigt und demonstriert.

Bezüglich der Technologie für OH-Lkw haben deutsche Unternehmen aus der Bahntechnik große Vorkenntnisse und sind Treiber bei der Entwicklung der Infrastrukturtechnologie. In der Weiterentwicklung der Lkw können deutsche Lkw-Hersteller und deren Tochtergesellschaften eine wichtige Rolle spielen, da sie bereits in den Pilotprojekten beteiligt sind. Auch bei der Batterietechnologie bestehen in Deutschland hohe Kompetenzen, vor allem an den Hochschulen. Derzeit wird der Aufbau von Produktionskapazitäten für Batteriezellen in Deutschland diskutiert, womit auch Produktionskompetenzen in größerem Maßstab aufgebaut werden könnten. Bei der Entwicklung der Umwandlungstechnologien zur Elektrolyse, Methanisierung, Methanolherstellung oder Fischer-Tropsch-Synthese bestehen große Potenziale für den deutschen Anlagenbau. Zudem wird Deutschland beim Einsatz von Flüssigkraftstoffen aus Erneuerbarem Strom importabhängig bleiben, da die Kosten von national hergestellten synthetischen Kraftstoffen die von importiertem klar übersteigen (Timmerberg et al. 2018). Selbst bei einer Kostenparität sind die EE-Erzeugungskapazitäten in Deutschland zu gering, um neben dem Lkw-Verkehr auch den Luft- und Schiffsverkehr zu dekarbonisieren.

Für alle Branchen und Technologien gilt es jedoch nicht den Anschluss zu verpassen, wie es im Batteriebereich bereits der Fall war. Eine frühzeitige Erprobung und die Mitwirkung in Versuchs- und Demonstrationsprojekten sind dafür wichtig.

Fazit: Elektrische Antriebe haben klare Vorteile, vor allem wegen der hohen Energieeffizienz.

Die Zusammenschau wesentlicher Bewertungskriterien der betrachteten alternativen Antriebsoptionen (Tabelle 3) lässt einige klare Vorteile für die elektrischen Antriebssysteme erkennen. Ihr hoher Wirkungsgrad ermöglicht prinzipiell eine heimische Versorgung mit Erneuerbarer Energie. Oberleitungs- und Punktladeinfrastruktur können durch elektrische Fahrzeuge grundsätzlich kombiniert genutzt werden, was das Risiko von Fehlinvestitionen reduziert. Energiewirtschaftlich scheinen die Strom- und Leistungsmengen für OH-Lkw im Vergleich zu BEV-Lkw lokal weniger problematisch, die lastflexible Erzeugung bietet hingegen leichte Vorteile für BZ-Lkw und PtL-Lkw. Hinsichtlich der heimischen Wertschöpfung bestehen in allen Bereichen Potenziale, die Importabhängigkeit wird für PtL-Kraftstoffe jedoch am höchsten sein.

Unter Berücksichtigung dieser Argumente wird empfohlen, dem Aufbau einer initialen elektrischen Versorgungsinfrastruktur (Oberleitungen und Ladepunkte) gegenüber anderen infrastrukturellen Maßnahmen eine höhere Priorität einzuräumen.

Tabelle 3: Vergleich der alternativen Antriebe und Kraftstoffe für Lkw

	BZ-Lkw	BEV-Lkw	OH-Lkw	PtG-Lkw und PtL-Lkw
Strombedarf für alle deutschen Sattelzugmaschinen [TWh]	Ca. 70	Ca. 36	Ca. 36	Ca. 105
Nutzerkosten ggü. Diesel-Lkw [€/km]²⁰	-0,15 bis 0,6	-0,1 bis 0,2	-0,2 bis 0,1	0,2 bis 0,6
Infrastruktur	Hohe Investitionen, Vorfinanzierung notwendig	Hohe Investitionen, Vorfinanzierung notwendig	Sehr hohe Investitionen, Vorfinanzierung notwendig	Keine hohen Investitionen, bestehende Infrastruktur vorhanden
Heimische Wertschöpfung	Erzeugungs- und Verteilungsanlagen	Elektromotor, Leistungselektronik	Infrastruktur, Stromabnehmer und Antriebssystem	Verbrennungsmotor und Erzeugungsanlagen
Importabhängigkeit	Gering	Bei Batteriezellen	Gering	Import von Kraftstoffen

²⁰ siehe Abbildung 2 und dortige Erläuterungen

3 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Der Umstieg auf alternative Antriebe erfordert schon heute politisches Handeln.

Die Transportleistung des Straßengüterverkehrs ist in der Vergangenheit stetig gestiegen und ein weiteres Wachstum, selbst bei einer weiteren Verlagerung auf den Schienengüterverkehr, wird prognostiziert. Der Handlungsdruck wie auch die Herausforderung für eine Dekarbonisierung im Güterverkehr ist entsprechend hoch. Die notwendige, weitreichende Treibhausgasminde rung erfordert zwingend alternative Antriebs- und Kraftstoffoptionen. Unter Berücksichtigung von Entscheidungs- und Planungsphasen ist bis zu einer weitreichenden Umstellung der Energieversorgung im Straßengüterverkehr mit einem Zeithorizont von mehreren Jahren bis Jahrzehnten zu rechnen²¹.

Zwar bleiben Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Technologiealternativen bestehen, eine deutliche Verbesserung der Entscheidungsgrundlage ist in den kommenden Jahren aber nicht zu erwarten. Das technologische „Allheilmittel“ wird es in absehbarer Zeit nicht geben. Der Vergleich der Antriebsarten zeigt jedoch, dass die direkte Nutzung von Strom gesamtwirtschaftlich Vorteile hat. Dabei sind jedoch auch Synergien und Kombinationsmöglichkeiten der Alternativen möglich.

Der Markteintritt der Alternativtechnologien setzt entschiedenes staatliches Handeln voraus. Hier sind zum einen technologieunspezifische Anreize für Treibhausgasminde rungen wie z.B. eine CO₂-basierte Mautspreizung oder die Einführung von Flottengrenzwerten für den Straßengüterverkehr notwendig. Parallel sollten jedoch auch technologiespezifische Maßnahmen wie der Aufbau der Infrastruktur und die Kommerzialisierung in Angriff genommen werden. Die längerfristige Infrastrukturplanung muss dabei transparent festgeschrieben werden („Infrastrukturentwicklungsplan“). Nur so können klare Marktanreize gesetzt und allen Akteuren Planungssicherheit für Zukunftsinvestitionen in CO₂-arme Technologien gegeben werden.

Der Infrastrukturaufbau kann zu begrenzten Kosten erfolgen, muss aber staatlich vorfinanziert werden.

Für die Entwicklung konkurrenzfähiger Antriebsalternativen im schweren Straßengüterverkehr ist der Aufbau der notwendigen Energieversorgungsinfrastruktur von zentraler Bedeutung. Wie auch andere Beispiele zeigen, lässt sich der Aufbau eines neuen Versorgungsnetzes, das in Konkurrenz zu etablierten Technologien steht und erst bei einem ho-

²¹ vgl. Grubler 1990

hen Ausbaugrad einen entsprechend hohen Nutzen entfaltet, weder privatwirtschaftlich initiieren noch durch die ersten Nutzer finanzieren.²² Langfristig können die Infrastrukturlkosten jedoch durch die Nutzer getragen werden, denn sie sind im Vergleich zu den Energiekosten und Anschaffungskosten niedrig und aus Nutzerperspektive von untergeordneter Bedeutung.

Gleichzeitig bündelt sich der Güterfernverkehr sehr stark auf Korridoren, so dass bereits mit einem Kernversorgungsnetz eine hohe Anzahl an Fahrzeugen erschlossen und eine hohe Auslastung frühzeitig erzielt werden kann. Zentral sind daher die staatliche Initiative bei der Initiierung des Infrastrukturausbaus und die Übernahme des Investitionsrisikos in der frühen Marktphase. Die gesamten Investitionen in ein Grundversorgungsnetz liegen je nach Antriebssystem bei 2,3 – 5,1 Mrd. €²³ und damit im Bereich der jährlichen Einnahmen aus der Lkw-Maut.

Große Demonstrationsprojekte helfen, praktische Erfahrungen zu sammeln und Akzeptanz zu schaffen.

Die Einführung von neuen Antrieben und Kraftstoffen im schweren Straßengüterverkehr kann nur gelingen, wenn technische Herausforderungen gemeistert werden und gleichzeitig die Akzeptanz der beteiligten Akteure (Logistikbetriebe, Nutzer, Fahrzeug- und Kraftstoffproduzenten) gewonnen werden kann. Auf politischer Seite muss auf möglichst vielen Ebenen – in der Kommune, im Land, im Bund und auf europäischer Ebene – Einigkeit über die Priorität alternativer Energieversorgungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr und die Unvermeidbarkeit eines Restrisikos bei Investitionen in diesem Bereich herrschen. Letztlich müssen auch Beteiligte vor Ort, d.h. Anwohner in der Nähe von Oberleitungen, Tankstellen, Kraftstoffproduktionsanlagen oder zusätzlichen Anlagen zur Produktion Erneuerbarer Energien, bereit sein, den Weg hin zu in neuen Antrieben für den schweren Straßengüterverkehr mit zu gehen.

Vor diesem Hintergrund sollten marktnahe alternative Antriebs- und Energieversorgungsoptionen baldmöglichst im größeren Maßstab in die Praxis überführt werden. Dies kann beispielsweise in Gestalt von Reallaboren geschehen, in denen kommerzielle Pilotprojekte realisiert werden, für die der Staat über einen längeren Zeitraum planbare Rahmenbedingungen garantiert.

Ziel sollte die Entwicklung einer langfristigen Strategie für den Straßengüterverkehr sein. Die Evaluation der Reallabore sowie die frühzeitige internationale Kooperation und Koordination mit Aktivitäten der Nachbarländer sind hierbei wichtige Bausteine.

²² vgl. bspw. Yeh (2008) für Infrastrukturen von alternativen Kraftstoffen

²³ zur Versorgung von etwa 40.000 Lkw, vgl. vorangegangenen Abschnitt

LITERATUR

- AGEB 2018: Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern; AG Energiebilanzen; https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20171221_brd_stromerzeugung1990-2017.pdf; zuletzt geprüft am 01.10.2018
- Askin, Amanda C.; Barter, Garrett E.; West, Todd H.; Manley, Dawn K. (2015): The heavy-duty vehicle future in the United States. A parametric analysis of technology and policy tradeoffs. In *Energy Policy* 81, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.02.005.
- Bahn, Olivier; Marcy, Mathilde; Vaillancourt, Kathleen; Waaub, Jean-Philippe (2013): Electrification of the Canadian road transportation sector. A 2050 outlook with TIMES-Canada. In *Energy Policy* 62, pp. 593–606. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.023.
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin,
- BMUB (2016)b: Klimaschutzbeitrag im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen - Teilbericht des Projektes „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“; Herausgeber: Umweltbundesamt; Dessau-Rosslau
- BMWi (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung: Christiane Bernath, Tobias Bossmann, Gerda Deac, Rainer Elsland, Tobias Fleiter, André Kühn, Benjamin Pfluger, Mario Ragwitz, Matthias Rehfeldt, Frank Sensfuß, Jan Steinbach, Consentec GmbH: Andreas Cronenberg, Alexander Ladermann, Christian Linke, Christoph Maurer, Bernd Tersteegen, Sebastian Willemsen, IFEU: Bernd Franke, Benedikt Kauertz, Martin Pehnt, Nils Rettenmaier, Technische Universität Wien: Michael Hartner, Lukas Kranzl, M-Five: Wolfgang Schade, TEP Energy GmbH: Giacomo Catenazzi, Martin Jakob, Ulrich Reiter
- den Boer E. et al. (2013): Zero emissions trucks - An overview of state-of-the-art technologies and their potential. CE Delft, Online: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/CE_Delft_4841_Zero_emissions_trucks_Def.pdf [letzter Aufruf 05.09.18]
- EU 2014: HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 - General Annexes - Annex G. Technology readiness levels (TRL)
- Fulton L.; Miller M. (2015): Strategies for transitioning to low-carbon emission trucks in the United States. University of California, Davis, Online: <https://ncst.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2014/08/06-11-2015-06-11-2015-STEPS-NCST-Low-carbon-Trucks-in-US-06-10-2015.pdf> [letzter Aufruf 05.09.18]

- Gnann, Till; Kühn, Andre; Plötz, Patrick; Wietschel, Martin (2017): How to decarbonise heavy road transport? Available online at https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2017/4-mobility-transport-and-smart-and-sustainable-cities/how-to-decarbonize-heavy-road-transport/, checked on 7/23/2018.
- Grubler, Arnulf. The rise and fall of infrastructures: dynamics of evolution and technological change in transport. Physica-Verlag, 1990.
- Holzhey, Michael (2014): Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland - Weichenstellungen bis 2050; Herausgeber: WWF Deutschland; Berlin
- Ifeu (2018): Berechnungen der TCO alternativer Antriebsoptionen schwerer Lkw im Rahmen des Vorhabens „Roadmap OH-Lkw“ (gefördert durch das Bundesumweltministerium), Heidelberg, 2018.
<https://www.ifeu.de/projekt/roadmap-oh-lkw/>
- Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Görz, Wolf (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr – Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. 1. Teilbericht des Forschungsvorhabens StratON. Öko-Institut, Berlin
- Maier U.; Deutsch M. (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter Brennstoffe. Agora Verkehrswende und Agora Energiewende, Online: https://www.agora-energien.de.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/03_Foliensatz_Deutsch_und_Maier_SynKost-VA_13022018.pdf [letzter Aufruf 05.09.18]
- Miyasato M.; Greenwald P.; Impullitti J. (2012): Zero-Emission Catenary Hybrid Truck Market Study. Gladstein, Neandross & Associates, Online: <http://cdn.gladstein.org/pdfs/ZETECHMarketStudy.pdf> [letzter Aufruf 05.09.18]
- Moultak M.; Lutsey N.; Hall D. (2017): Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. ICCT, Online: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf [letzter Aufruf 05.09.18]
- Mulholland, Eamonn; Teter, Jacob; Cazzola, Pierpaolo; McDonald, Zane; Ó Gallachóir, Brian P. (2018): The long haul towards decarbonising road freight – A global assessment to 2050. In *Applied Energy* 216, pp. 678–693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.058.
- Plötz, Patrick; Gnann, Till; Jochem, Patrick; Ümitcan Yilmaz, Hasan; Kaschub, Thomas (2018): Impact of Electric Trucks on the European Electricity System and CO₂ Emissions. In *in the process of publication*.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2012): Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt; Erich-Schmidt-Verlag; Berlin

- Talebian, Hoda; Herrera, Omar E.; Tran, Martino; Mérida, Walter (2018): Electrification of road freight transport. Policy implications in British Columbia. In *Energy Policy* 115, pp. 109–118. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.01.004.
- Timmerberg S., Dieckmann C., Mackenthun R., Kaltschmitt M. (2018) Biomethane in Transportation Sector. In: Meyers R. (eds) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY
- UBA; BMU (2018): Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Klimabilanz 2017: Emissionen gehen leicht zurück. Umweltbundesamt; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- UBA - Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 (2016); ISSN 1862-4804; durchgeführt vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu); Dessau-Rosslau
- Wietschel M. et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potenziale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. BMVI, Online:
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile [letzter Aufruf 05.09.18]
- Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Hg. v. Fraunhofer ISI.
- Yeh, S. (2007). An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. *Energy Policy*, 35(11):5865–5875.
- Zimmer, Wiebke; Blanck, Ruth; Bergmann, Thomas; Mottschall, Moritz; Waldenfels, Rut von; Förster, Hannah et al. (2016): Endbericht Renewbility III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Studie im Auftrag des BMUB 2016. Öko-Institut; DLR; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU); Infrac.