



Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen
Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und
Kraftstoffstrategie

Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Auftraggeber:
Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI)

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer ISI

Prof. Dr. Martin Wietschel, Dr. Till Gnann, André Kühn,
Dr. Patrick Plötz, Cornelius Moll, Daniel Speth, Jan Buch,
Dr. Tobias Boßmann

Fraunhofer IML

Dr. Sebastian Stütz, Maximilian Schellert,
David Rüdiger

PTV Transport Consult GmbH

Werner Balz, Helmut Frik, Dr.-Ing. Volker Waßmuth,
Daniela Paufler-Mann

TU Hamburg-Harburg – IUE

Dr. Anne Rödl

M-Five

Dr. Wolfgang Schade, Simon Mader

Karlsruhe, Februar 2017

Kontakt

Fraunhofer Institut für System und
Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe, Germany
<http://www.isi.fraunhofer.de>

Prof. Dr. Martin Wietschel
Tel.: +49 721 6809-254
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
1 Einleitung.....	11
1.1 <i>Ausgangslage und Problemstellung</i>	11
1.2 <i>Zielsetzung und Vorgehensweise</i>	13
TEIL 1: TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE.....	17
2 Infrastruktur.....	19
2.1 <i>Oberleitungsinfrastruktur.....</i>	19
2.1.1 <i>Ableitung von Anforderungen an die Oberleitungsinfrastruktur aus den Fahrzeugeigenschaften</i>	19
2.1.2 <i>Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur</i>	19
2.1.3 <i>Relevante Normen und Richtlinien.....</i>	20
2.1.4 <i>Energieeinspeisung und 20- bis 60-kV-Zuleitungen</i>	21
2.1.5 <i>Umspannstationen.....</i>	21
2.1.6 <i>Masten und Oberleitungen</i>	26
2.1.7 <i>Unterquerung von Schilderbrücken.....</i>	28
2.1.8 <i>Unterquerung von Überführungsbauwerken und Tunneln</i>	29
2.1.9 <i>Zusammenfassung der Komponenten und besonderen Merkmale der Oberleitungsinfrastruktur</i>	30
2.1.10 <i>Betriebliche Aspekte.....</i>	31
2.1.11 <i>Mögliche Synergieeffekte</i>	31
2.1.12 <i>Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur</i>	32
2.1.13 <i>Notwendige / sinnvolle Abdeckung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur</i>	41
2.1.14 <i>Optimale Länge der Oberleitungsabschnitte.....</i>	44
2.1.15 <i>Überlegungen zur Platzierung der Abschnitte.....</i>	44
2.1.16 <i>Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur</i>	44
2.2 <i>Alternative Ladeinfrastrukturen – induktives Ladungssystem über Stromleiter in der Fahrbahnoberfläche („Stromschiene“).....</i>	46
2.2.1 <i>Generelle Anforderungen an die Infrastruktur für das induktive Ladungssystem über Stromschienen</i>	46
2.2.2 <i>Komponenten der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Ladungssystem mittels Stromschienen.....</i>	47
2.2.3 <i>Energieeinspeisung und 20- bis 60-kV-Zuleitungen</i>	48
2.2.4 <i>Umspannstationen.....</i>	49
2.2.5 <i>Längsverkabelung entlang der Autobahn</i>	49
2.2.6 <i>Konduktive Ladeeinrichtungen (Stromschienen) in der Fahrbahndecke</i>	50
2.2.7 <i>Betriebliche Aspekte.....</i>	51
2.2.8 <i>Kostenschätzung der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Ladesystem mittels Stromschienen.....</i>	52
2.3 <i>Alternative Ladeinfrastrukturen – induktives Ladungssystem</i>	61

2.3.1	Generelle Anforderungen an die straßenseitige Infrastruktur für das induktive Ladungssystem	61
2.3.2	Komponenten der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Ladungssystem	63
2.3.3	Energieeinspeisung und Zuleitungen	64
2.3.4	Transformatorstationen	64
2.3.5	Inverter und Induktionsschleifen.....	64
2.3.6	Betriebliche Aspekte.....	65
2.3.7	Kostenschätzung der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Ladungssystem	66
2.4	<i>Kostenvergleich der verschiedenen Ladeinfrastruktursysteme</i>	69
2.5	<i>Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf</i>	70
3	Fahrzeuge	73
3.1	<i>Einleitung</i>	73
3.2	<i>Entwicklung des Fahrzeugbestands nach Gewichtsklassen (GK)</i>	73
3.2.1	Abgrenzung des Nutzfahrzeugbestandes nach Gewichtsklassen	73
3.2.2	Entwicklung von Bestand und Neuzulassungen je Gewichtsklasse	75
3.3	<i>Vergleich von Antriebssystemen für Lkw aus technischer Sicht</i>	77
3.3.1	Entwicklung Parameter für konventioneller Lkw bis 2030	77
3.3.2	Entwicklung Parameter für Hybrid-Oberleitungs-Lkw bis 2030.....	81
3.3.3	Entwicklung Parameter für Lkw mit anderen alternativen Antrieben bis 2030.....	92
3.4	<i>Fahrleistungsverteilung</i>	103
3.5	<i>Nutzlast- und Nutzvolumenverluste und ihre betriebswirtschaftliche Berücksichtigung</i>	105
3.6	<i>Zusammenfassung zu Fahrzeugtechnologien</i>	110
TEIL 2: MARKTENTWICKLUNG FÜR INFRASTRUKTUR UND FAHRZEUGE		111
4	Ausbau der HO-Infrastruktur entlang der Autobahnen	113
4.1	<i>Einleitung</i>	113
4.2	<i>Auswahl an Autobahnen für Ausstattung mit Hybridoberleitungen</i>	113
4.2.1	Auswertung der Distanz zur BAB	117
4.3	<i>Festlegung der umzusetzenden Korridore</i>	119
5	Markthochlaufberechnung	127
5.1	<i>Methodik</i>	127
5.1.1	Übersicht	127
5.1.2	Autobahnanteil der Jahresfahrleistung.....	129
5.1.3	Nutzen elektrifizierter Autobahn	131
5.1.4	Anteil der Fahrten in Deutschland	133
5.1.5	Anzahl der Fahrtage im Jahr	135
5.1.6	TCO-Berechnung	136
5.1.7	Beschränkte Modellverfügbarkeit	138
5.1.8	Berechnung der Kosten für THG-Emissionen.....	140

5.2	<i>Ergebnisse</i>	140
5.2.1	Annahmen und Szenarien.....	141
5.2.2	Markthochlauf bis 2030 (Basisszenario).....	144
5.2.3	Sensitivitäten und Variationsrechnungen.....	150
5.2.4	Betriebswirtschaftliche Bewertung der HO-Lkw-Optionen (HO-Diesel, HO-Batterie, Stromschiene, Induktion).....	159
5.2.5	Bewertung des HO-Lkw-Systems unter Einbezug der Kosten für den Infrastrukturaufbau.....	163
5.2.6	Marktpotentiale vor und nach 2030 (kurz- und langfristig).....	167
5.2.7	Diskussion der Ergebnisse.....	171
5.2.8	Zusammenfassung der Markthochlaufergebnisse.....	173
TEIL 3: AUSWIRKUNGEN EINER VERBREITUNG VON HO-LKW		175
6	Treibhausgas-Lebenszyklusbetrachtung des HO-Lkw-Systems	177
6.1	<i>Einleitung</i>	177
6.2	<i>Modellierung</i>	178
6.2.1	Methodische Grundlagen.....	178
6.2.2	Systemgrenzen und funktionale Einheit.....	180
6.2.3	Datengrundlage und Annahmen.....	183
6.2.4	Emissionsfaktoren.....	191
6.2.5	Konfiguration des Basisszenarios.....	193
6.3	<i>Bewertung</i>	195
6.3.1	Infrastruktur.....	196
6.3.2	Fahrzeuge.....	197
6.3.3	Nutzung des Infrastruktursystems.....	198
6.3.4	Sensitivitätsbetrachtung.....	200
6.4	<i>Diskussion und Ausblick</i>	202
7	Energiewirtschaftliche Auswirkungen der HO-Lkw	205
7.1	<i>Einleitung</i>	205
7.2	<i>Energiewirtschaftliche Szenario</i>	205
7.3	<i>Auswirkungen auf die Stromnachfrage</i>	206
7.4	<i>Auswirkungen von HO-Lkw auf die Stromlastganglinie</i>	207
7.5	<i>Regionale Stromnachfrage: Auswirkungen auf die Stromnetze</i>	211
7.6	<i>Zusammenfassung und weitere Forschungsfragen</i>	216
8	Auswirkungen für die Hersteller und Logistikunternehmen	217
8.1	<i>Einleitung</i>	217
8.2	<i>Verkehrsmittel Lkw im Allgemeinen</i>	217
8.2.1	Produkte des Lkw-Fernverkehrs.....	218
8.2.2	Branchenüberblick Speditionsgewerbe / Fuhrunternehmer.....	221
8.2.3	Marktdynamik am Beispiel Lkw-Vermietung.....	223
8.3	<i>Lkw-Hersteller – aktuelle Position und mögliche Anreize</i>	225

8.4	<i>Schlussfolgerungen</i>	231
8.5	<i>Zusammenfassung und Forschungsbedarf</i>	233
9	Finanzierungsmodelle einer Oberleitungsinfrastruktur	237
9.1	<i>Einleitung</i>	237
9.2	<i>Alternative Finanzierungsmodelle</i>	237
9.3	<i>Zusammenfassung</i>	245
10	Die europäische Dimension	247
10.1	<i>Einleitung</i>	247
10.1.1	Einordnung in die verkehrspolitische Strategie der EU	247
10.1.2	Weißbuch zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum	247
10.1.3	TEN-V und Kernnetzkorridore (CNC)	248
10.2	<i>Güterverkehrspolitik und Rail Freight Corridors (RFC)</i>	251
10.2.1	Klimapolitik – Dekarbonisierung des Verkehrs	252
10.2.2	AFID – Infrastruktur für die Dekarbonisierung	253
10.3	<i>Förderung alternativer Antriebstechnologien in den TEN-V</i>	253
10.4	<i>In EU-Korridorstudien prognostiziertes Verkehrswachstum</i>	259
10.5	<i>Passfähigkeit von HO-Lkw zur EU-Verkehrspolitik</i>	260
10.6	<i>Situation in ausgewählten EU-Ländern</i>	261
10.7	<i>Zusammenfassung und Forschungsfragen</i>	263
11	Transitionspfade	265
12	Anhang	269
12.1	<i>Verlauf von Batterieladezuständen bei unterschiedlichen Randbedingungen</i>	269
12.2	<i>Antriebsleistung</i>	277
12.3	<i>Komponentenkosten für BEV- und PHEV-Antriebsstrang</i>	278
12.4	<i>Nutzlastverlust bei BEV und PHEV</i>	278
12.5	<i>Berechnung der Wartungskosten für Lkw mit alternativen Antrieben</i>	280
13	Abbildungsverzeichnis	281
14	Tabellenverzeichnis	286
15	Literaturverzeichnis	291

Zusammenfassung

Problemstellung und Zielsetzung

Der Lkw-Verkehr ist derzeit für über 20 % der gesamten Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland verantwortlich¹. Dabei tragen die schweren Nutzfahrzeuge, dies sind Sattelzugmaschinen (SZM) und Lkw der Gewichtsklasse über 12 t zulässiges Gesamtgewicht, unter allen Lkw derzeit am meisten zu den Treibhausgasemissionen (THG) sowie der Endenergienachfrage im Verkehr bei (siehe Abbildung 1). Die Mehrzahl der Verkehrsprognosen geht von einem weiteren Anstieg der Verkehrsleistung bei schweren Nutzfahrzeugen aus. Ohne einen Umstieg auf treibhausgasarme oder -neutrale Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen können somit die politisch gesetzten, ambitionierten Klimaschutzziele in Deutschland nicht erreicht werden.

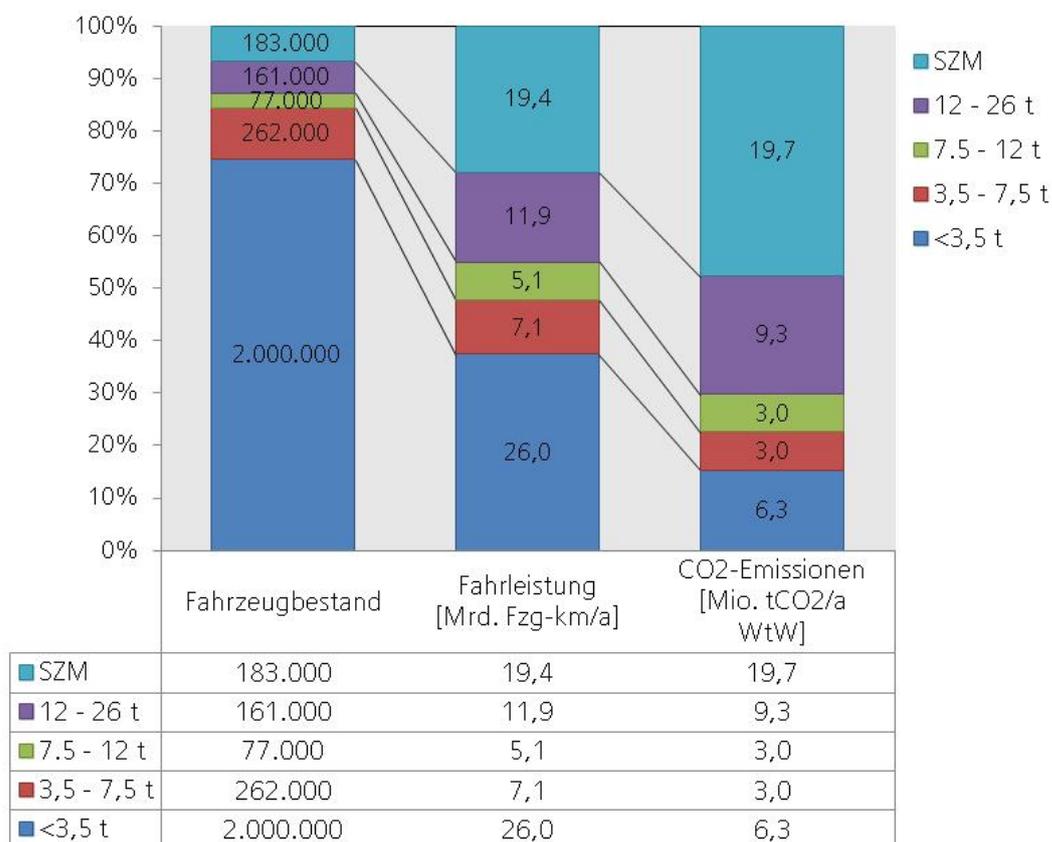


Abbildung 1: Fahrzeugbestand, Fahrleistung und CO₂-Emissionen im Güterverkehr in Deutschland im Jahr 2015 differenziert nach Gewichtsklassen (Fzg = Fahrzeug)

¹ Quelle: UBA (2013a)

In dieser Studie wird das Potential von Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw) für schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit, der energie- und klimapolitischen Auswirkungen und der praktischen Realisierbarkeit analysiert. Diese Analyse wird für einen Zustand, bei dem die Infrastruktur schon gut ausgebaut und genutzt wird (sog. eingeschwungener Zustand), sowie für die Phasen eines möglichen Markthochlaufes durchgeführt. Verschiedene Perspektiven werden dabei betrachtet: die Sicht der politischen Entscheidungsträger, der Investoren und Betreiber der Oberleitungsinfrastruktur sowie der Lkw-Hersteller und Logistikunternehmen.

Situation in einem eingeschwungenen Zustand

Die **wirtschaftliche Bewertung** der HO-Lkw erfolgt in dieser Studie auf Basis umfangreicher Total-Cost-of-Ownership(TCO)-Analysen unter Einbezug realer Fahrleistungen, der Bewertung verschiedener Kraftstoff- und Antriebstechnologien und alternativer Ausbauvarianten der Stromzufuhr. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass Oberleitungs-Lkw mit einem Dieselmotor als hybride Komponente eine wirtschaftlich darstellbare Lösung für schwere Nutzfahrzeuge sein können. Dies gilt allerdings nur für den Fall, dass die Oberleitungsinfrastruktur vorfinanziert aufgebaut wurde und gut ausgelastet ist. Andere Studien kommen diesbezüglich zu einem vergleichbaren Ergebnis². Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit hat sowohl aus einer betriebs- als auch aus einer volkswirtschaftlichen Sicht, bei der das bestehende Steuer- und Abgabensystem nicht einbezogen ist, Bestand.

Die Analysen zeigen weiterhin, dass vergleichsweise geringe elektrische Fahrleistungen von 20.000 bis 30.000 km/Jahr an der Oberleitung pro HO-Lkw ausreichen, um die Mehrkosten der Umrüstung eines konventionellen Diesel-Lkw zu einem Diesel-Oberleitungs-Lkw zu amortisieren. Der Dieselmotor als Teil des Hybridantriebs garantiert dabei die Nutzungsflexibilität der HO-Lkw abseits der elektrifizierten Strecken.

Auf der Basis von Wirtschaftlichkeitsberechnungen könnten langfristig ca. 80 % (ca. 250.000 Lkw) der in Deutschland zugelassenen schweren Nutzfahrzeuge³ als Hybrid-Oberleitungs-Lkw umgerüstet werden. Hinzu kommen könnte noch der Transitverkehr durch Deutschland. Wie die Auswertungen von Streckenbelastungen der deutschen Autobahnen mit Lkw-Verkehr ergeben, müssten dazu „nur“ ca. 4.000 km des deutschen Autobahnnetzes (30 % des gesamten Netzes) mit Oberleitungen zur Stromversorgung der Lkw ausgestattet werden. Hier kommt der Umstand zum Tragen, dass der überregionale schwere Lkw-Verkehr sich in Deutschland auf vergleichsweise wenige vielbefahrene Stre-

² Siehe UBA 2016a, SRU 2012, UBA 2016b, den Boer et al. 2013

³ Ohne Berücksichtigung der Baufahrzeuge, die aufgrund von Spezialaufbauten nicht als HO-Lkw infrage kommen.

cken konzentriert. Die Investitionen in die Oberleitungsinfrastruktur beliefen sich in diesem Fall auf ca. 8 bis 10 Mrd. Euro.

Die Wirtschaftlichkeit der schweren Lkw wird aufgrund der hohen Fahrleistungen durch die laufenden Ausgaben dominiert. Kraftstoffausgaben und Wirkungsgrade sind somit maßgeblich. Hier ist der HO-Lkw u. a. aufgrund seiner hohen Wirkungsgrade anderen Alternativen oft überlegen. HO-Lkw weisen im elektrischen Betriebsmodus einen doppelt so hohen Wirkungsgrad wie konventionelle dieselbetriebene Lkw auf (70 bis 75 % zu 30 bis 35 %). Andere strombasierte Lösungen wie Wasserstoff, erneuerbares Methan oder erneuerbares Methanol haben ebenfalls geringere Wirkungsgrade im Fahrzeugbetrieb. Betrachtet man den gesamten Wirkungsgrad von der Energiequelle zum Antriebsrad, dann weisen Wasserstoff und insbesondere erneuerbares Methan oder Methanol deutlich niedrige Wirkungsgrade als der HO-Lkw auf. Somit ist der Ausbaubedarf von zusätzlichen erneuerbaren Erzeugungskapazitäten zur Abdeckung der Stromnachfrage des Lkw-Sektors bei der Einführung von HO-Lkw deutlich geringer im Vergleich zu den anderen strombasierten Kraftstoffen auf Basis erneuerbarer Energieträger. Dies kann im Sinne einer umfassenden Klimaschutzstrategie in Deutschland, bei der strombasierte erneuerbare Kraftstoffe eine bedeutende Rolle spielen, ein wichtiges Argument sein.

In einem ausgelasteten Zustand (250.000 HO-Lkw im Bestand) könnten durch die Einführung der HO-Lkw 10 bis 12 Mio. Tonnen an **Treibhausgasemissionen** gegenüber konventionellen Diesel-Lkw eingespart werden, wenn der Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird. Der durchschnittliche elektrische Fahranteil beträgt dann 60 % bei einem Ausbau von 4.000 km Autobahn mit Oberleitung. Dies bedeutet aber auch, dass langfristig bei ambitionierten Klimaschutzzielen die restlichen 40 % ebenfalls CO₂-frei erzeugt werden müssten. Dies könnte beispielsweise durch Hybridlösungen auf Basis von Methanol, über erneuerbare Energien, Brennstoffzellen oder Batterien umgesetzt werden. Zu der HO-Lkw-Variante mit einer Batterie anstelle eines Verbrennungsmotors wurden ebenfalls Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt, die aber gezeigt haben, dass die Option unter den getroffenen Annahmen kurz- und mittelfristig noch nicht wirtschaftlich darstellbar ist.

Situation in der Marktvorbereitungsphase und bei einem Markthochlauf

Zum derzeitigen Zeitpunkt befinden sich HO-Lkw noch in einer **Marktvorbereitungsphase**. Alternative Technologien, fahrzeugseitig wie vonseiten der Stromzufuhr, werden entwickelt und in Demonstratoren dargestellt. Erste Pilotvorhaben an öffentlichen Autobahnteststrecken sind geplant bzw. im Bau. Wichtig ist dabei, Erfahrungen mit den Genehmigungsabläufen und -fristen sowie den Bauzeiten für die Oberleitungen zu gewinnen. Mit ersten HO-Lkw-Kleinserienfertigungen kann frühestens in zwei bis drei Jahren gerechnet werden. Unter optimistischen Annahmen kann somit ab 2020 der Start eines Markthochlaufes in Deutschland stattfinden.

Für den möglichen Markthochlauf von HO-Lkw sind bis 2030 in einem optimistischen Szenario ca. 25 % des Bestandes von Lkw mit über 12 t zulässigem Gesamtgewicht (ca. 50.000 bis 70.000 Lkw) als HO-Lkw vorstellbar. Hierzu sind ca. 2.000 bis 2.500 km Bundesautobahn (BAB) mit Oberleitungen auszustatten (vgl. Abbildung 2 für mögliche Ausbaustrecken). Die notwendige Zeitkomponente für den Aufbau einer Infrastruktur, für die Entwicklung und den Bau von HO-Lkw sowie den Ersatz des bestehenden Lkw-Bestands sollte nicht unterschätzt werden. Wirtschaftlich wäre eine Ausdehnung des HO-Lkw-Netzes auf die deutschen **EU-Nachbarn** vorteilhaft. Diese wäre auch aus Sicht der klimapolitischen Ziele der EU sinnvoll. Verkehrspolitisch steht die Ausdehnung aber im Widerspruch zum EU-Ziel, insbesondere den langlaufenden und grenzüberschreitenden Güterverkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern (vgl. European Commission 2011a).

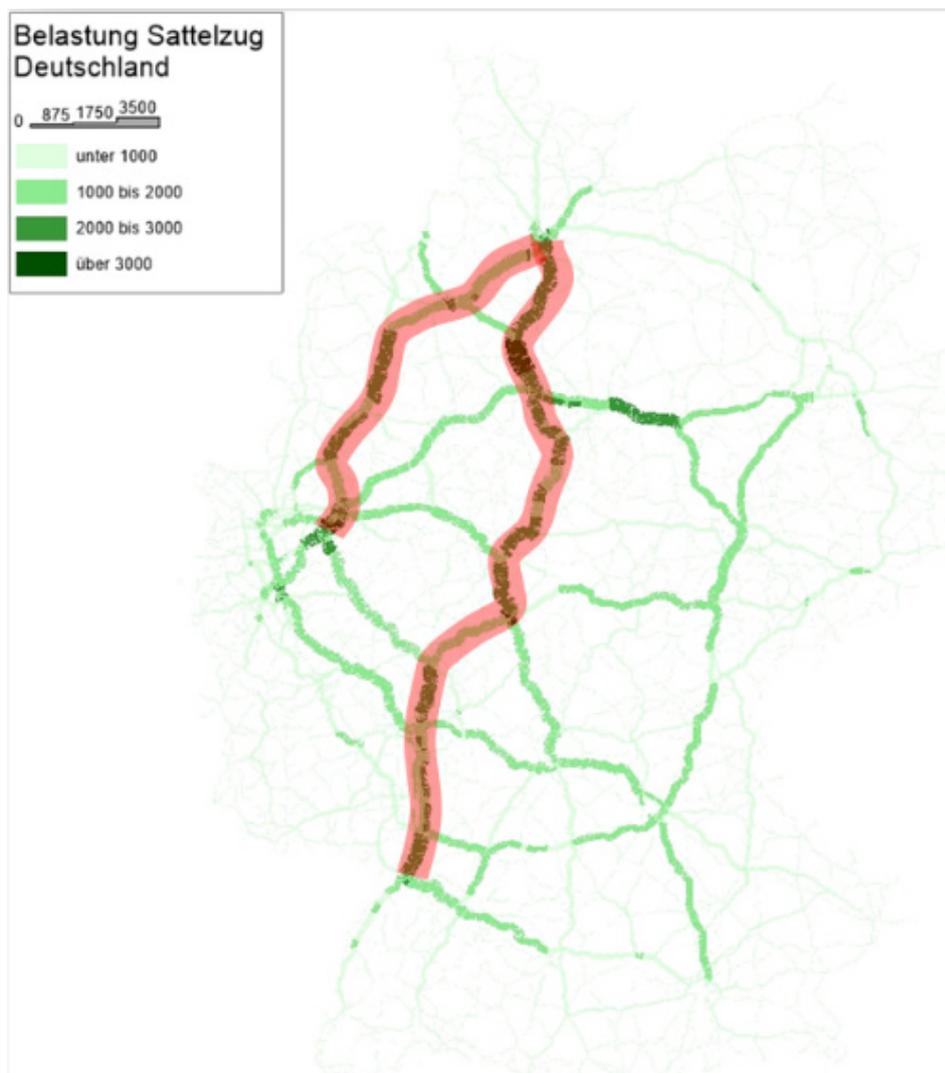


Abbildung 2: Belastung der Bundesautobahnen durch innerdeutschen Verkehr von Sattelzugmaschinen (grün) und Ausbaukorridor für die ersten 1.000 km Oberleitung (rot)

Wie Berechnungen gezeigt haben, lässt sich die Infrastruktur in einem gut ausgelasteten Zustand über Nutzungsgebühren finanzieren. In einem solchen Zustand werden durch die Umlage der HO-Infrastruktur auf die gefahrenen Lkw-Kilometer die gesamten TCO-Kosten im unteren einstelligen Prozentbereich erhöht. Allerdings zeigt sich für die Phase des Markthochlaufes, dass eine direkte Umlage der gesamten Infrastrukturkosten auf die Nutzer in dieser Phase wirtschaftlich für Nutzer kaum darstellbar ist. Dies liegt in der Unterlastung der kapitalintensiven Oberleitungsinfrastruktur begründet, was zu hohen Nutzungsgebühren führen würde.

Somit stellt sich die Frage, wie eine HO-Infrastruktur vor**finanziert** werden kann. Abhängig von der politischen Priorisierung, rechtlichen Grundlagen sowie der Frage, ob die Initiative vom Staat oder der Privatwirtschaft ausgeht, sind verschiedene Szenarien vorstellbar. Tritt der Staat selbst als Initiator auf, steht ihm grundsätzlich eine Finanzierung aus dem Haushalt (d. h. über Steuereinnahmen) oder über Nutzergebühren offen. Angesichts des im Bereich Verkehr ausgemachten jährlichen Investitionsdefizits⁴ und der im Grundgesetz verankerten Schuldenbremse erscheint eine Haushaltsfinanzierung aus Steuereinnahmen allerdings wenig realistisch. Wahrscheinlicher ist die Finanzierung über Nutzergebühren, wobei hier über eine sog. Public-Private-Partnership (PPP) privates Kapital zur Vorfinanzierung eingebunden werden kann. Bei einer solchen PPP geht es besonders um die Risikoverteilung und damit um Vertragsgestaltungen. Um eine konkrete Ausgestaltung dieser PPP zu entwerfen, bedarf es einer tieferen Analyse von möglichen Akteuren wie z. B. Netzbetreibern, Technologielieferanten und Finanzierungsbanken, die im Rahmen dieser Studie nicht im Fokus waren. Privatwirtschaftlich initiiert könnte ein Unternehmenskonsortium ähnlich „H2-Mobility“ (Unternehmenskonsortium, das eine flächendeckende Wasserstofftankstelleninfrastruktur erreichen möchte) die Bereitstellung und damit die Vorfinanzierung der Infrastruktur leisten. Der Staat könnte dabei über Fördergelder und der Übernahme von bestimmten Risiken unterstützend eingreifen, womit es sich ebenfalls um ein PPP handeln würde. Bei der Entwicklung und Bewertung von Finanzierungsmodellen für die Oberleitungsinfrastruktur besteht weiterer Forschungsbedarf.

Neben Vorfinanzierung und Zeitbedarf für den Infrastrukturaufbau ist die **Akzeptanz** eine wesentliche Herausforderung für die HO-Lkw. Analysen zur derzeitigen Verkehrspolitik der Europäischen Kommission haben gezeigt, dass die politische Akzeptanz u. a. aufgrund einer Konkurrenz zur Schiene nur eingeschränkt gegeben ist. Auch fristet das Konzept in anderen großen und damit für den Lkw-Verkehr relevanten EU-Ländern teilweise nur ein Nischendasein.

Die Marktakzeptanz erscheint bei Lkw-Herstellern derzeit kaum vorhanden zu sein. Dies kann an dem Umstand liegen, dass durch die komplette Umstellung des Antriebssystems

⁴ von 7,2 Mrd. Euro (Daehre et al. 2012, S. 4)

und Verlusten bei der Wertschöpfung – der Verbrennungsmotor macht derzeit ca. 50 % der Wertschöpfung eines OEM aus – die wirtschaftliche Attraktivität fehlt. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die notwendigen Stückzahlen an HO-Lkw erreicht werden können, damit die Deckung der FuE-Ausgaben sowie eine notwendige Kostendegression in der Herstellung erreicht werden können. Dies ist wahrscheinlich nur bei einer europäischen oder gar weltweiten Nachfrage nach HO-Lkw gegeben. Somit spielt für den Erfolg oder Misserfolg des HO-Lkw auch die internationale Verkehrspolitik eine bedeutende Rolle.

Bei den Logistikdienstleistern und Speditionen erscheint die Akzeptanz derzeit ebenfalls noch nicht ausgeprägt zu sein. Da hohe Fahrleistungsanteile unter der Oberleitung die Wirtschaftlichkeit erhöhen, gestaltet sich der Einsatz von HO-Lkw abseits der Oberleitung weniger flexibel. Die Einsatzflexibilität ist jedoch bisher die besondere Stärke der Lkw-basierten Logistik. Eine weitere Herausforderung könnte darin liegen, dass zumindest in den ersten Jahren ein begrenzter Sekundärmarkt vorliegt und die Fahrzeuge vermutlich deshalb schwerer zu veräußern sind. Da die Branche in Deutschland von zahlreichen klein- und mittelgroßen Betrieben geprägt ist, könnten Fehlinvestitionen in einen HO-Lkw durchaus existenzgefährdend sein. Eine mögliche Lösung besteht in der Etablierung neuer Geschäftsmodelle analog zum Güterverkehr der Bahn (vgl. weiter unten die Diskussionen zum Traktionsdienstleistermodell). Zusätzlich sind die Kosten für die Logistikdienstleister aufgrund der derzeit herrschenden hohen Konkurrenzsituation mit ausländischen Anbietern und deren geringeren Lohnkosten extrem wichtig. Hier könnte der HO-Lkw bei Logistikdienstleistern in Deutschland gegebenenfalls punkten.

Viele Fragen bei der Vor-Ort-Akzeptanz sind derzeit weitgehend offen. Ob sich Anwohner an Autobahnen durch eine zusätzliche Oberleitungsinfrastruktur beeinträchtigt fühlen oder die lokale Emissionsminderung von Lärm, Feinstaub, NO_x höher zu gewichten wäre, ist in dieser Studie nicht untersucht worden. Wie darüber hinaus Nutzer von Autobahnen Oberleitungen als Sichtbeeinträchtigung wahrnehmen oder Lkw-Fahrer das Fahren mit HO-Lkw bewerten, z. B. schnellere Beschleunigung und Lärmreduktion im Innenraum, ist wissenschaftlich ebenfalls noch nicht ausreichend beantwortet. Die jetzt in Deutschland anlaufenden Pilotvorhaben sollten deshalb genutzt werden, die Vor-Ort-Akzeptanzfragestellungen umfassend zu analysieren.

Die Akzeptanzfragen insgesamt bedürfen einer tiefergehenden Analyse, denn sie stellen in der gesamten Gemengelage derzeit eine sehr relevante Barriere für den Aufbau einer HO-Lkw-Lösung dar.

Letztendlich könnten relevante zeitliche Verzögerungen bei der Markteinführung und Markthochlauf von HO-Lkw dazu führen, dass die gesteckten klimapolitischen Ziele nicht erreicht werden können und deshalb andere Pfade der THG-Minderung bei schweren Lkw beschritten werden müssen. Dies bedeutet, dass eine Entscheidung für oder gegen den weiteren Ausbau der HO-Lkw von der **Politik** in den nächsten Jahren gefällt werden sollte. Danach müssen die politischen Rahmenbedingungen wie THG-Minderungsziele und

THG-Minderungsregularien für den schweren Lkw-Verkehr gesetzt werden. Da aus Kostengründen eine rein deutsche Lösung kaum darstellbar ist, ist mittelfristig eine europäische Lösung anzustreben.

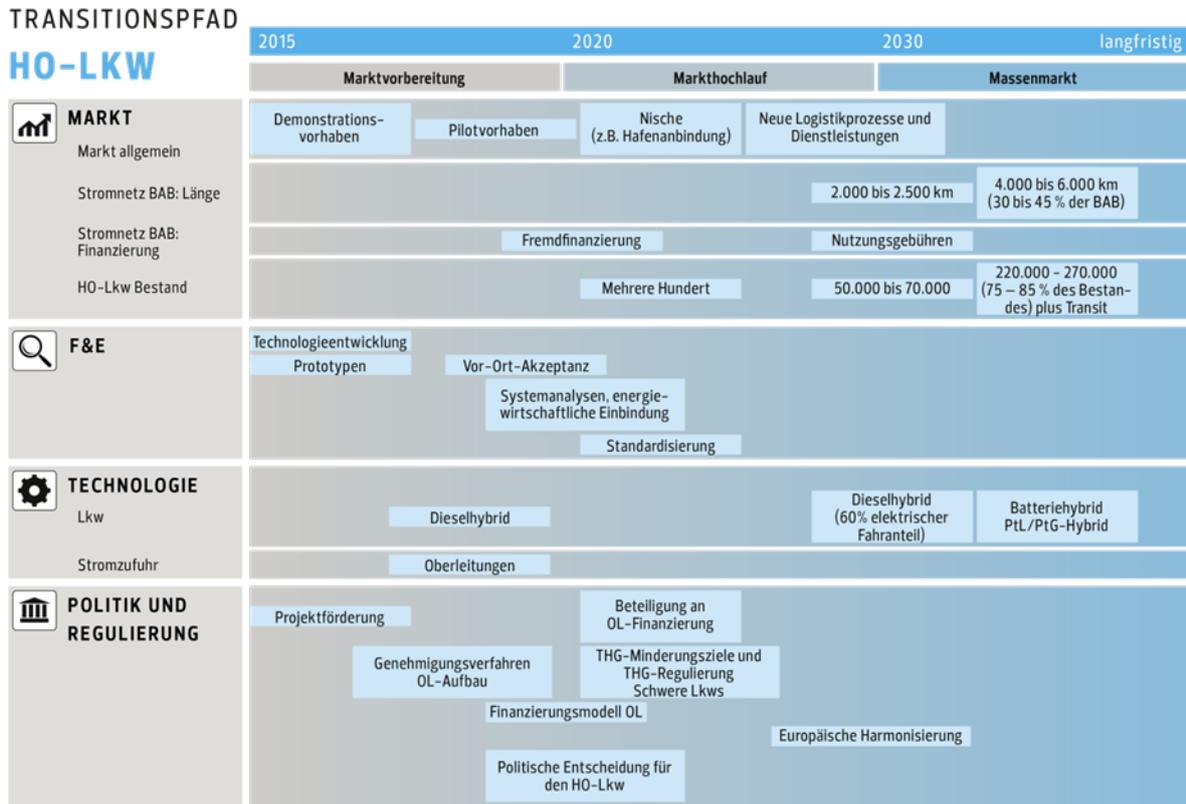


Abbildung 3: Ein Transitionsfad für die Einführung von HO-Lkw in Deutschland (OL: Oberleitungen; PtL: Power to Liquid; PtG: Power to Gas)

Treibhausgasbilanz und energiewirtschaftliche Auswirkungen

Die ganzheitliche **Bilanzierung der CO₂e-Emissionen** mit einem Life Cycle Assessment Ansatz, der auch die Produktion der HO-Lkw und den Oberleitungsinfrastrukturaufbau in die Bilanzierung einbezieht, zeigt, dass die CO₂e-Emissionsbilanz eindeutig von der Nutzungsphase dominiert wird. Setzt man die durchschnittlichen THG-Emissionen des Strommixes im Jahre 2030 an (BMUB 2015), dann entfallen nur knapp 3 % der CO₂e-Emissionen auf die HO-Lkw-Produktion und den Infrastrukturaufbau. Dies gilt, wenn man die HO-Lkw-Dieselvariante betrachtet. Unterstellt man als hybride Lösung eine große Batterie, dann steigen zwar die CO₂e-relevanten Emissionen bei der Fahrzeugherstellung deutlich an, aber in der gesamten Betrachtung spielen sie nach wie vor nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Interessant ist, dass bei der Unterstellung des heutigen Strommixes und der Bewertung mit Durchschnittsemissionen kein CO₂e-Vorteil entsteht. Das heißt, einen erfolgreichen Beitrag zum Klimaschutz leisten die HO-Lkw nur dann, wenn die Transformation der

Energieerzeugung Richtung Dekarbonisierung weiter voranschreitet. Dann aber ist ihr Beitrag zur ThG-Minderung sehr relevant.

Aus **energiewirtschaftlicher** Sicht können HO-Lkw eine erhebliche Steigerung der Stromnachfrage bedeuten (bei 60.000 HO-Lkw um ca. +1,6 % (ca. +8 TWh/a) und bei 250.000 um ca. +7 % (ca. +36 TWh/a)). Die Nachfrage ist regional sehr unterschiedlich, und die Last und Nachfrage kann sich in einzelnen ländlichen Regionen mit Oberleitungsautobahn um bis zu 30 % erhöhen. Insbesondere an vielbefahrenen Autobahnkreuzen im ländlichen Raum sind hohe zusätzliche Lasten zu erwarten. Da allerdings gerade in ländlichen Regionen der Ausbau von Erneuerbaren oftmals voranschreitet, können sich gegebenenfalls positive Effekte für die Systemintegration der Erneuerbaren ergeben.

Energiewirtschaftlich herausfordernd ist, dass die schweren Lkw eine weitgehend unflexible Nachfrage darstellen und zudem die Nachfrage eher tagsüber und an Werktagen anfällt. Somit erhöht sich die Höchstlast an Werktagen deutlich (+ 2 GW im Jahr 2030 bei 60.000 HO-Lkw). Dies führt dazu, dass an anderer Stelle des Energiesystems neue Flexibilitäten, beispielsweise durch Stromspeicher, Netzausbau oder Lastmanagement, bereitgestellt werden müssen. Bei der energiewirtschaftlichen Systemintegration stellt sich eine Reihe an weiteren Fragen, die zukünftig tiefergehend analysiert werden sollten. Dazu gehört auch autonomes Fahren bei Lkw, welches durch dann eine mögliche Verlagerung in die Nacht noch einen deutlicheren Einfluss auf den Lastgang und die energiewirtschaftlichen Folgen haben könnte.

Technische Ausgestaltung der Stromzufuhr

Als **alternative** Möglichkeiten der **Stromzufuhr** gegenüber dem Oberleitungskonzept werden derzeit konduktive Ladungssysteme über Stromleiter in der Fahrbahnoberfläche sowie induktive Ladungssysteme mittels Induktionsschleifen unter der Fahrbahnoberfläche diskutiert. Die durchgeführten Auslegungen der verschiedenen Varianten und die Kostenabschätzung zeigen, dass beide Systeme signifikant teurer als die Oberleitungsvariante sind. Der Kostenvorteil des Oberleitungssystems gegenüber dem konduktiven Ladungssystem über Stromschienen beträgt – je nach betrachteter Variante – rund 33 bis 80 %, die Kosten für die straßenseitige Infrastruktur des induktiven Ladungssystems liegen in allen Varianten um mehr als 100 % über den Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur. Weiterhin führen sie zu höheren Fahrzeuganschaffungspreisen und zudem weisen die induktiven Systeme aufgrund eines geringeren Wirkungsgrades einen höheren Stromverbrauch auf. Bei induktiven Systemen kommt hinzu, dass deren Einführung aus Kostengründen nur bei einer Komplettsanierung der Autobahnabschnitte infrage kommt, was die Markteinführung zeitlich deutlich verzögern kann.

Bei den alternativen Lösungen der Stromzufuhr liegt ein weiterer Forschungsbedarf bei den Nutzungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur durch Pkw und daraus resultierende technische, fachliche, betriebliche und wirtschaftliche Wirkungen. Weiterhin gibt es Analy-

sebedarf bei der Bewertung der alternativen Ladungssysteme im Hinblick auf resultierende Verkehrseinschränkungen und -störungen, bei der Installation der straßenseitigen Infrastruktur und beim Betrieb der Ladungssysteme sowie der Bewertung der alternativen Ladungssysteme im Hinblick auf die Verkehrssicherheit.

Traktionsdienstleister als Geschäftsmodell

Für den Einsatz von HO-Lkw wird derzeit noch ein **alternativer Ansatz zur Einführung** diskutiert. Um die Infrastruktur schnell auslasten zu können und um darüber hinaus den gesamten Lkw-Transitverkehr durch Deutschland integrieren zu können sowie die Akzeptanz zu steigern, könnte ein Traktionsdienstleistungsmodell konzipiert werden. Hierbei fahren HO-Zugmaschinen auf hochausgelasteten Autobahnstrecken im Pendelverkehr, wobei an speziellen Umladestationen der Sattelanhänger getauscht wird. Durch die damit erzielbaren hohen Fahrleistungen und die Integration ausländischer Transporte wirkt sich der Vorteil der niedrigen Kraftstoffkosten für die HO-Lkw stärker aus. Der Aufbau könnte zunächst auf einer der Hauptrouten, z. B. von der polnischen Grenze in die Beneluxstaaten, getestet werden. Insgesamt kann der Ausbau der Infrastruktur auf die vielbefahrenen (wenige) Autobahnstrecken fokussiert werden. Traktionsdienstleister könnten Logistikdienstleister von dem beträchtlichen wirtschaftlichen Risiko der Beschaffung eines HO-Lkw entbinden, da sie selbst dafür sorgen müssen, Fahrzeuge zu erwerben, instand zu halten und hinreichend auszulasten.

Obwohl erste Analysen heute noch keine wirtschaftliche Lösung aufzeigen, erscheint die Traktionsdienstleisterlösung aus unterschiedlichen Blickwinkeln recht vielversprechend und sollte in Folgestudien tiefergehend analysiert werden. Offene Fragen sind hier u. a. die Energieeffizienz und Kostendegression der Fahrzeuge und ob Vor- und Nachlauf sowie Umladung entsprechend organisiert werden können.

Konkurrierende alternative Kraftstoff- und Antriebskonzepte

Betrachtet man wichtige **Konkurrenzantriebsarten** zur Dekarbonisierung des schweren Lkw-Verkehrs, kommen zum einen auf Basis erneuerbaren Stroms erzeugte kohlenstoffhaltige Kraftstoffe wie Methanol oder Methan in Betracht. Biomasse erscheint derzeit wegen der Nutzungskonkurrenz zum Luftverkehr und dem Energiesektor weniger sinnvoll.

Wie oben bereits erwähnt, stellen die deutlich geringen Wirkungsgrade von erneuerbarem Methanol und Methan einen wesentlichen Nachteil gegenüber den Hybrid-Oberleitungen dar. Der niedrige Wirkungsgrad erfordert entweder den stärkeren Ausbau von Erneuerbaren in Deutschland oder den Import dieser Kraftstoffe aus Regionen mit hohen und wirtschaftlich günstigen erneuerbaren Stromerzeugungspotentialen. Der Einsatz von Methanol sowie Methan im Lkw-Sektor ist nur dann konkurrenzfähig, wenn sehr günstiger EE-Strom eingesetzt werden kann und die CO₂-Erzeugung sehr kostengünstig ist. Ist beides nicht der Fall, ist der HO-Lkw wirtschaftlich günstiger. Ein Vorteil gegenüber der HO-Lkw-

Lösung ist, dass durch den Methanol- und den Methaneinsatz ein größerer Bereich der Mobilität abgedeckt werden kann, beispielsweise der Lkw-Verkehr abseits vielbefahrener Autobahnen. Weiterhin gestaltet sich die Markteinführung einfacher, weil die bestehende Kraftstoffinfrastruktur nur leicht modifiziert werden müsste. Aufgrund des sehr geringen Anpassungsaufwandes dürfte die Akzeptanz der Lkw-Nutzer und der Hersteller höher sein.

Ähnliches gilt für die Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw) mit dem Energieträger Wasserstoff, wobei der Gesamtwirkungsgrad höher ist als bei Methanol und Methan. Als Hemmnis bei Wasserstoff erweist sich, ähnlich wie bei den HO-Lkw, die Vorfinanzierung der Infrastruktur. Dieser Aufbau ist kapitalintensiv und in den ersten Jahren unterausgelastet. Mit steigender Marktdurchdringung sinken die spezifischen Infrastrukturkosten bei Wasserstoff – wie bei den HO-Lkw – pro Fahrzeugkilometer deutlich.

Bei der Entwicklung einer Gesamtstrategie für den schweren Lkw-Verkehr in Deutschland, bei der alle relevanten Optionen zu dessen Dekarbonsierung ganzheitlich bewertet werden, wird weiterer Forschungsbedarf gesehen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Die Bundesregierung in Deutschland hat sich ambitionierte Ziele zur Senkung der Treibhausgase (THG) gesetzt. Bis 2050 sollen sie um 80 bis 95 % (bezogen auf 1990) gesenkt werden⁵. Die UN-Klimakonferenz in Paris 2015 hat die weltweiten Anstrengungen zum Schutz des Klimas auf eine neue und ambitionierte Grundlage gestellt (UN 2015). Alle 196 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention haben sich auf das Ziel verpflichtet, den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur deutlich unter 2 °C zu halten und streben eine Begrenzung auf 1,5 °C an.

Eine weitgehend dekarbonisierte Welt benötigt einen nahezu THG-freien Mobilitätssektor⁶. Fossile Kraftstoffe müssen deshalb weitgehend durch erneuerbare Kraftstoffe ersetzt werden. Biokraftstoffe können nur einen kleinen Teil der Mobilitätsnachfrage befriedigen⁷, weshalb strombasierte Kraftstoffe bzw. der direkte Stromeinsatz im Lkw-Sektor unter Klimaschutzaspekten dominieren werden. Während der Verkehr mit Pkw zukünftig, aufgrund stagnierender Bevölkerung, voraussichtlich nicht stark steigen wird, gehen einschlägig bekannte Prognosen von einem deutlichen Anstieg der Beförderungsleistung im (Straßen)-Güterverkehr aus. Der Anteil der Lkw an den verkehrsbedingten THG-Emissionen wird daher zukünftig sehr wahrscheinlich zunehmen, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden (vgl. Abbildung 4). Somit steht man heute vor der Herausforderung für den Lkw-Verkehr Lösungen zur Dekarbonisierung zu finden.

Tabelle 1 gibt einen nach Gewichtsklassen (GK) differenzierten Überblick zu den Beständen, Fahrleistungen und THG-Emissionen im Lkw-Sektor. Hieraus wird ersichtlich, dass hinsichtlich des Ausstoßes an CO₂-Emissionen sowie dem Energiebedarf im Lkw-Sektor die Gewichtsklassen (GK) 1, leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht sowie insbesondere die schweren Sattelzüge und die Lkw der GK 4 relevant sind.

Derzeit werden für SZM und Lkw der GK 4 Hybrid-Oberleitungs-Lkw intensiv diskutiert, weil ihnen ein hohes Potential zur Minderung an Treibhausgasemissionen im Güterver-

⁵ Dies wurde im Integrierten Energie- und Klimaprogramm (IEKP) der Bundesregierung 2007 (Bundesregierung 2007) beschlossen und mit dem Koalitionsvertrag 2013 (CDU, CSU, SPD 2013) bestätigt.

⁶ Siehe u. a. die Studien BMWi (2014), UBA (2013b) und BMUB (2015), wo gezeigt wird, dass der erdgebundene Verkehr bei ambitionierten THG-Minderungszielen weitgehend THG-frei sein muss, weil das verbleibende THG-Emissionsbudget für andere Sektoren wie der Landwirtschaft und Industrie sowie andere Mobilitätsanwendungen wie dem Flugverkehr genutzt werden muss.

⁷ Siehe hierzu die Diskussion in UBA (2016b) sowie den dortigen Verweis auf globale Studien und der beschränkten Verfügbarkeit von nachhaltigen Biomassepotentialen für den Verkehr.

kehr zugesprochen wird. Hybrid-Oberleitungs-Lkw sind Systeme mit oberleitungsgebundenem elektrischem Betrieb von schweren Nutzfahrzeugen auf vielbefahrenen Autobahnen. In der Regel sind es Hybridantriebe, die neben dem elektrischen Antrieb auch noch über einen konventionellen Antrieb verfügen und mit kleineren Batterien zum Zwischenspeichern von Energie ausgestattet sind. Die Batterie bzw. der Verbrennungsmotor dient dafür, Strecken ohne Oberleitung befahren zu können, Überholmanöver zu ermöglichen bzw. zu erlauben, dass die Autobahnen nur abschnittsweise mit Oberleitungen ausgestattet werden. Dies spart Kosten für den Aufbau der kapitalintensiven Oberleitungsinfrastruktur entlang ausgewählter Teile der Autobahnen und ermöglicht es, kritische Streckenbereiche, z. B. Autobahntunnel, Brücken oder Lärmschutzwälle, zu überbrücken. Im Nahverkehr werden bereits ähnliche Konzepte in einigen Städten bei Bussen angewendet. Ob man die Batterie größer auslegen kann und dann ganz auf den verbrennungsmotorischen Teil beim Hybrid-Oberleitungs-Lkw verzichten kann, ist ebenfalls eine offene Frage. Weiterhin könnte man bei der Verwendung von Verbrennungsmotoren als hybride Lösung den Dieselmotorkraftstoff durch strombasierte flüssige oder gasförmige Kraftstoffe ersetzen, um die THG-Emissionen weiter zu senken. Eine weitere Option ist es, eine größere Batterie als hybride Lösung zu wählen, die während der Fahrt an der Oberleitung aufgeladen wird.

Ob die HO-Lkw einen wirtschaftlich und klimapolitisch sinnvollen Lösungsbeitrag auch im Vergleich zu anderen Optionen für die anstehende Verkehrswende beitragen können, ist derzeit eine offene Frage.

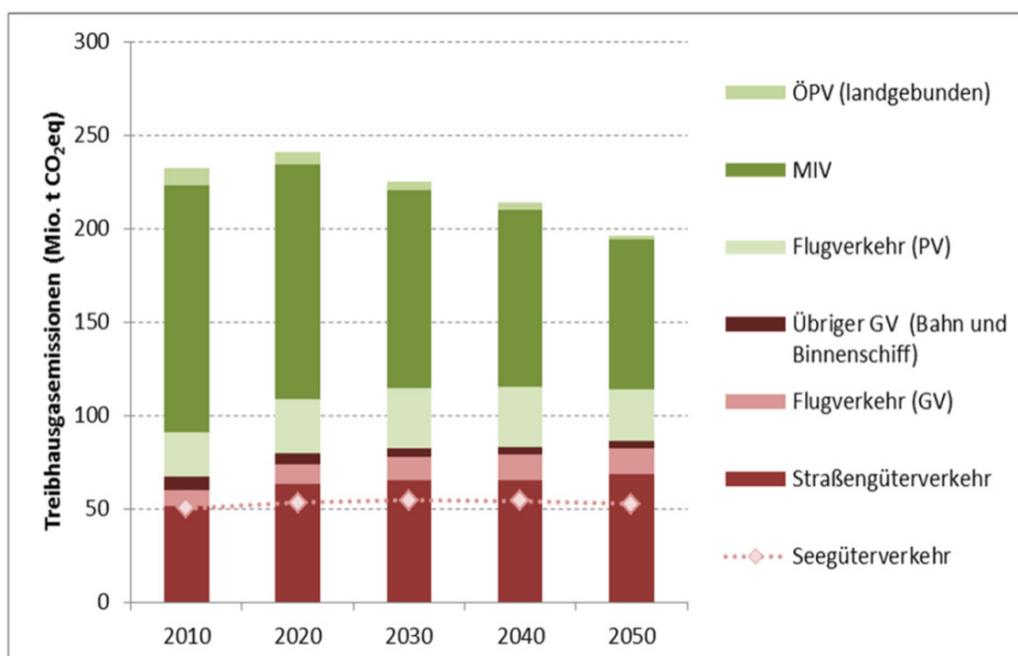


Abbildung 4: Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland – Stand und Prognose (Quelle: UBA 2013, BAU-Szenario)

Tabelle 1: Kennzahlen für Lkw und potentielle strombasierte Antriebstechnologien unterschieden nach Gewichtsklassen

Größenklasse	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	Sattelzüge
zGG ¹⁾ [t]	[0; 3,5 t]	[3,5; 7,5 t]	[7,5; 12 t]	[12 t; 26 t]	[40 t]
Ø JFL ²⁾ [km/a]	ca. 13 Tsd.	ca. 27 Tsd.	ca. 66 Tsd.	ca. 74 Tsd.	ca. 106 Tsd.
Bestand [Fzg]	ca. 2 Mio.	ca. 262 Tsd.	ca. 77 Tsd.	ca. 161 Tsd.	ca. 183 Tsd.
Fahrleistung [Fzg.-km/a]	26 Mrd.	7,1 Mrd.	5,1 Mrd.	11,9 Mrd.	19,4 Mrd.
CO ₂ -Emission ³⁾ WTW ⁵⁾ [g/Fzg-km]	241	431	594	781 ⁴⁾	1.016
CO ₂ -Emission WTW [Mio. t CO ₂ /a]	6,3	3,0	3,0	9,3	19,7
Energiebedarf TTW ⁶⁾ [TWh/a]	19,0	9,2	9,1	28,1	59,5
Potentielle strombasierte Antriebstechnologien	BEV/PHEV ⁷⁾				
	Brennstoffzelle				
	Methan				
	Flüssige Kraftstoffe (wie Methanol, Fischer-Tropsch-Kraftstoffe, ...)				
					HO-Lkw ⁸⁾
<p>1) zulässiges Gesamtgewicht; 2) Jahresfahrleistung; 3) Ø alle Straßenkategorien, Euro-VI, Auslastung 50 %; 4) mit dem Bestand gewichtetes Mittel aus 'Lkw > 14-20 t und 'Lkw > 20-26 t; 5) Well-to-Wheel Emissionen; 6) Tank-to-Wheel-Emissionen; 7) reine Batteriefahrzeuge (BEV) sowie Plug-in-Hybride (PHEV); 8) Hybridoberleitungs-Lkw</p>					

Quellen: KBA 2013, 2014a, 2015a; HBEFA 2015; Truckscout24 2016

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die übergeordnete Zielsetzung der Studie ist es, das wirtschaftliche Potential von Hybrid-Oberleitungs-Lkw in Deutschland mit den energie- und klimapolitischen Folgen zu analysieren und Schlussfolgerungen für die Politik zu ziehen. Im Einzelnen lassen sich folgende Fragen formulieren:

- Welches Potential haben Hybrid-Oberleitungs-Lkw unter einer wirtschaftlichen Perspektive in Deutschland? Dabei soll sowohl eine betriebs- wie eine volkswirtschaftliche Sichtweise eingenommen werden.
- Was sind sinnvolle technische Ausgestaltungsoptionen der Stromzufuhr (Oberleitungen, induktive Systeme, Stromschienen)?
- Welche technische Auslegung der HO-Lkw bieten sich an? Wie sieht die Hybridisierungsstrategie aus?
- Wie sieht die Wirtschaftlichkeit in einem eingeschwungenen Zustand aus?
- Wie sollten der Markthochlauf und der Infrastrukturaufbau über die Zeit aussehen?

- Welche Autobahnen sind über welche Zeitschiene mit einer Oberleitungsinfrastruktur aufzubauen?
- Welche Finanzierungs- und Betreibermodelle für den Infrastrukturaufbau/-betrieb sind sinnvoll?
- Wie ist die Sicht der Lkw-Hersteller und wie könnte eine künftige Modellpalette aussehen?
- Wie sieht die Nutzersicht auf HO-Lkw aus? Was sind Nutzeranforderungen?
- Was sind die energie- und klimapolitischen Auswirkungen der Einführung von HO-Lkw?

Eine Option, die in der vorliegenden Studie nicht analysiert wird, ist dabei die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene. Derzeit wird auf der Straße das Vierfache an Gütertonnenkilometern gegenüber der Schiene transportiert. Studien wie (SRU 2012, UBA 2016b, Hacker et al. 2015 und Holzhey 2014) haben das Verlagerungspotential von der Straße auf die Schiene analysiert und kommen zu dem Fazit, dass selbst unter optimistischen Annahmen zur Verlagerung auch zukünftig der deutlich größere Teil des Güterverkehrs über die Straße abgewickelt werden dürfte.

Derzeit stehen verschiedene Alternativen für die Ausgestaltung der Stromzufuhr für Lkw zur Diskussion: Oberleitungen, Stromschienen und induktive Systeme. Diese drei Systeme werden in Kapitel 2 vorgestellt, sinnvolle Ausgestaltungsvarianten entwickelt und die dazugehörigen Ausbaurkosten erhoben. Neben dieser technischen und ökonomischen Datenbasis für die Stromzufuhr werden im anschließenden Kapitel 3 die Ausgestaltungsvarianten zu den HO-Lkw festgelegt und ebenfalls die relevanten technischen Daten, wie Energieverbräuche, und ökonomischen Daten, wie Anschaffungspreise und laufende Ausgaben, erhoben. Diese Datenbasis fließt später in die Analysen zum eingeschwungenen Zustand und zum Markthochlauf ein.

In Kapitel 4 wird zuerst ein möglicher Ausbau der Oberleitungen entlang der deutschen Autobahnen entwickelt. Zur Abbildung der Verkehrsverflechtungen im deutschlandweiten Kontext und zur Ableitung von netzspezifischen Untersuchungen wird auf das deutschlandweite Verkehrsmodell PTV Validate zurückgegriffen. Als Ergebnis erhält man mögliche Ausbaukorridore in Deutschland, die sich aufgrund der Belastung der Autobahnen mit schweren Lkw ergeben und die sinnvoll zusammenhängende Korridore darstellen.

Anschließend (in Kapitel 5) wird ein Modell zum Markthochlauf von HO-Lkw entwickelt und eingesetzt. Auf Basis realer Fahrleistungen und unter Berücksichtigung einer beschränkten Verfügbarkeit an HO-Lkw zu Beginn des Markthochlaufes und einer beschränkten HO-Infrastrukturverfügbarkeit wird der Markthochlauf auf der Grundlage einer Total-Cost-of-Ownership-Betrachtung berechnet. Der HO-Lkw steht dabei in Konkurrenz zum konventionellen Dieselantrieb sowie weiteren alternativen Kraftstoffen und Antriebssystemen (vgl. Tabelle 1). Verschiedene Sensitivitäts- und Variationsrechnungen zeigen die mögliche Bandbreite der künftigen Entwicklungen auf. Zu den Markthochlaufszszenarien werden

die Auswirkungen auf die THG-Emissionen und Energienachfrage in der Nutzungsphase kalkuliert.

Um eine Gesamtbilanzierung der ökologischen Auswirkungen einschließlich der Effekte beim Bau der Oberleitungen und der Fahrzeuge zu erreichen, erfolgt im anschließenden Kapitel 6 eine Life Cycle Analyse (LCA). Hier werden die HO-Lkw den konventionellen Dieselantrieben gegenübergestellt.

Die Auswirkungen auf das Energiesystem bezüglich Gesamtstromnachfrage, zeitliche und geographische Verteilung der Stromnachfrage und der Diskussion der möglichen Folgen findet in Kapitel 7 statt. Kapitel 8 beinhaltet die Analysen zu den Auswirkungen auf die Lkw-Hersteller sowie die Logistikunternehmen.

Daran schließt sich die Analyse möglicher Finanzierungsmodelle für die HO-Oberleitungsinfrastruktur an (Kapitel 9). Erste Akzeptanzfragestellungen werden in Kapitel 10 analysiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der europäischen Perspektive.

Im letzten Kapitel erfolgt die Diskussion möglicher Transitionspfade.

TEIL 1: TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE

2 **Infrastruktur**

Hauptbearbeiter/innen: W. Balz, H. Frik (PTV TC GmbH)

2.1 **Oberleitungsinfrastruktur**

2.1.1 **Ableitung von Anforderungen an die Oberleitungsinfrastruktur aus den Fahrzeugeigenschaften**

Im Folgenden wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die HO-Lkw auch Teilstrecken ohne Oberleitung befahren können. Dies ist wichtig, da z. B. in Tunneln und auf Talbrücken eine Oberleitung aus Sicherheits- und/oder Kostengründen nur sehr schwer realisierbar ist. Ebenso müssen die HO-Lkw im Sekundärnetz ohne Oberleitung vom Abfahrtsort zur Autobahn sowie von der Autobahn zum Zielort kommen.

Daraus folgt, dass die HO-Lkw während einer Fahrt über die Autobahn zwischen minimal zwei Anschlussstellen genügend Strom aufnehmen können müssen, um mindestens ihren Zielpunkt zu erreichen (in der Annahme, dass sie dort wieder geladen werden können).

Dies bedeutet, dass ein HO-Lkw auf einer Strecke von 2 bis 3 km (Anschlussstellenabstand in Ballungsräumen) genügend Energie für eine Strecke von 10 bis 30 km aufnehmen können muss.

Dies bedeutet wiederum, dass die maximale Stromaufnahme eines HO-Lkw, der z. B. in normaler Fahrt 100 kW kontinuierliche Leistung benötigt, eine Leistung von bis zu ca. 500 bis 1.000 kW aufnehmen können muss. Da derartige Leistungen bei Straßenbahnfahrzeugen heute bereits übertragen werden, ist dies kein grundsätzliches Problem.

Somit lässt sich festhalten, dass Strecken ohne Anschlussstellen oder mit gering belasteten Anschlussstellen, an denen üblicherweise keine HO-Lkw abfahren, nicht zwingend mit Oberleitungen ausgestattet werden müssen, sondern von den HO-Lkw im Batteriebetrieb durchfahren werden können.

Unter diesen Voraussetzungen besteht die Möglichkeit, die Oberleitungen im Wesentlichen auf Bereiche zu konzentrieren, in welchen stärker belastete Anschlussstellen liegen. Es kann vermutet werden, dass diese Anschlussstellen in der Regel in unmittelbarer Nähe größerer Siedlungen liegen, sodass dort auch ausreichend leistungsfähige Mittelspannungsnetze eher nahe der Autobahn zu finden sind.

2.1.2 **Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur**

Die Oberleitungsinfrastruktur besteht aus den folgenden maßgebenden Komponenten:

- Energieeinspeisung aus dem Mittelspannungsnetz der EVU
- Zuleitungen zwischen Energieeinspeisung und Umspannstationen an der Autobahn
- Umspannstationen an der Autobahn

- Masten
- Oberleitungen.

2.1.3 Relevante Normen und Richtlinien

Für die technische Gestaltung und Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur an Autobahnen sind insbesondere folgende Normen und Richtlinien maßgebend:

- DIN EN 50119 und DIN EN 50149: Maßgebend für die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Oberleitungen
- DIN EN 50122-1: Anforderungen an die elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung ortsfester Bahnanlagen
- DIN EN 50153: Schutzanforderungen in elektrisch extern (z. B. über Oberleitungen) gespeisten Fahrzeugen
- DIN EN 50502: Sicherheitsanforderungen und Konstruktionshinweise für die elektrische Ausrüstung in O-Bussen
- BOStrab, §25: Fahrleitungsanlagen
- RPS: Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (maßgebend für die Absicherung der Masten und Umspannstationen mit Schutzplanen)
- RAA: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (maßgebend für die Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Straßenquerschnitt, siehe nachfolgende Abbildung).

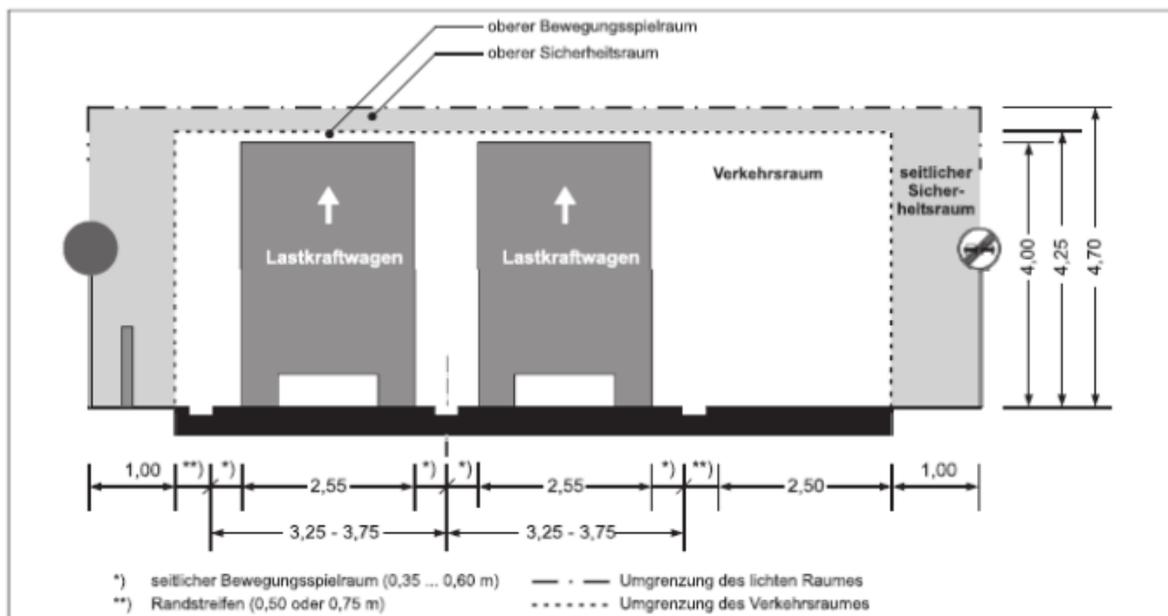


Abbildung 5: Grundmaße für den Verkehrsraum und den lichten Raum (Quelle: FGSV 2008)

2.1.4 Energieeinspeisung und 20- bis 60-kV-Zuleitungen

Die Energieeinspeisung kann aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz der lokalen Energieversorgungsunternehmen (EVU) erfolgen, mögliche Anschlüsse sind z. B. bestehende Umspannwerke, Erdkabel oder Freilandleitungen. Für die Anschlüsse an das Mittelspannungsnetz, inkl. der erforderlichen Abzweigmuffen, sind jeweils ca. 10.000 bis 15.000 Euro anzusetzen, je nach den Anforderungen der EVU für die Absicherung des Stichs.⁸

Die Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Autobahn sind als Erdverkabelung oder Freileitung auszuführen. Die Kosten⁹ betragen in etwa

- 30-200 Euro/m Tiefbaukosten (30 Euro/m in freiem Gelände, 200 Euro/m im bebauten Bereich bei komplexen Bedingungen),
- 100 Euro/m Kabelkosten; die exakten Kosten variieren mit den benötigten Leistungen und Reserven an der Umspannstation,
- hinzu kommen evtl. Kosten für Gestattungen, die jedoch nicht pauschaliert werden können, da sie von den örtlichen Gegebenheiten abhängen.

Bei höher belasteten Anschlussstellen im Bereich von Bebauung kann von Anschlusslängen von im Mittel 500 m zum nächsten leistungsfähigen Anschluss an das Mittelspannungsnetz ausgegangen werden, wenn die Umspannstation bevorzugt an Stellen gebaut wird, an denen das nächste Mittelspannungsnetz gut erreicht werden kann.

In ländlichen Bereichen muss von Entfernungen von etwa 2 bis 3 km zum Anschluss an das Mittelspannungsnetz ausgegangen werden, jedoch zu geringeren Kosten je Meter Leitungslänge.

2.1.5 Umspannstationen

Die Umspannstationen an der Autobahn bestehen aus Trafos und Gleich-Wechselrichtern sowie elektronischen Komponenten der Kommunikations- und Sicherungstechnik, die in größeren Schaltschränken oder Containern am Fahrbahnrand der Autobahnen untergebracht sind. Es ist von einer einseitigen Anordnung der Umspannstationen im Abstand von ca. 3 km entlang des mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Streckennetzes auszugehen.

⁸ Die hier genannten Werte basieren auf verfügbaren Ausschreibungsergebnissen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen.

⁹ Die hier genannten Werte basieren auf dem Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr) sowie auf verfügbaren Ausschreibungsergebnissen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen.

Um Leistungsanpassungen durch zusätzliche Gleichrichtermodule oder durch Umsetzen von Anlagen leicht durchführen zu können, sollten die Umspannstationen transportabel, z. B. als Containermodule, ausgeführt werden.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die elektrischen Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur.

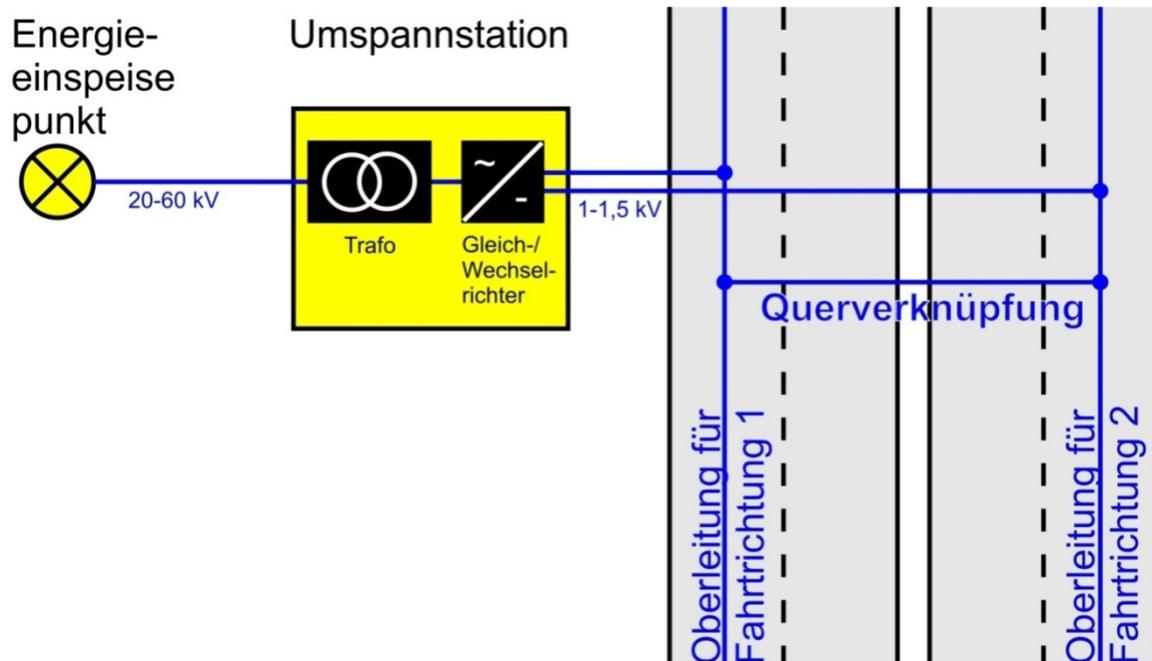


Abbildung 6: Elektrische Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur

Die durchgeführten Literatur- und Internetrecherchen lassen auf Kosten für die Umspannstationen von etwa 300.000 Euro je MVA Leistung schließen, was etwa 30 EuroCent/VA¹⁰ an Kosten bedeutet. Dies erscheint plausibel und lässt sich bei größeren verbauten Stückzahlen noch senken. Aktuell werden je Jahr nur wenige solche Anlagen gebaut. Solarwechselrichter, die einer Umspannstation in Einspeiserichtung ohne Trafo entsprechen, kosten wegen der starken Konkurrenzsituation und der höheren Stückzahlen in diesem Markt nur etwa 5 EuroCent/VA bei Leistungen > 1 MVA, sodass inkl. Trafokosten bei Ansatz der Kosten dieses benachbarten Marktes Kosten von 15 EuroCent/VA und darunter möglich sein können. Der Einsatz von gleichartigen Modulen, z. B. in Containerbauweise mit z. B. 2 oder 5 MVA, ist daher anzustreben.

Die notwendige Leistungskapazität je Umspannstation richtet sich nach dem Bezug je HO-Lkw und der Anzahl der HO-Lkw im versorgten Bereich.

¹⁰ MVA = Megavoltampere, VA = Voltampere

Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h = 22,22 m/s, einem minimalen Fahrzeugfolgeabstand von 2 s und einer mittleren Fahrzeuglänge von ca. 18 m ergibt sich eine maximale Anzahl von ca. 16 Fahrzeugen je km¹¹. Bei 3 km Versorgungsstrecke je Umspannstation und zwei Fahrtrichtungen (an Autobahnkreuzen 4 Fahrtrichtungen) sind also bis zu ca. 100 mit maximal erlaubter Geschwindigkeit fahrende HO-Lkw im Bereich einer Umspannstation unterwegs.

100 mit maximal erlaubter Geschwindigkeit fahrende HO-Lkw benötigen

- auf ebener Fläche um 10-12 MVA,
- in der Steigung (hier nur eine Richtung, d. h. 50 Fahrzeuge; bis ca. 500 kW/Fahrzeug¹² bei 5 % Steigung) etwa 25 MVA,
- im Ladebetrieb bis zu 100 MVA.¹³

Die dem 20kV-Mittelspannungsnetz entnehmbare Leistung liegt bei maximal 10-15 MVA, in der Regel darunter, da die Umspannstation der Oberleitung nicht der einzige Verbraucher im 20kV-Netz sein wird.

Die nach den obigen Ansätzen maximal erforderlichen Leistungen übersteigen also sowohl die möglichen Leistungsfähigkeiten des Mittelspannungsnetzes als auch die Stromtragfähigkeit der Oberleitung (bei 670 V Gleichstrom ist eine Strombelastung von max. 150 kA möglich).

Dies bedeutet, dass das System zum einen auf unvermeidbare Energiebezüge ausgerichtet werden muss, andererseits Maßnahmen ergriffen werden müssen, um zu hohe Leistungen zu vermeiden.

¹¹ Dies entspricht einer Lkw-Verkehrsstärke von 1.280 Lkw/h (auf einem Fahrstreifen).

¹² Dieser Wert ergibt sich aus der Annahme, dass der Fahrer auch an der Steigung und auch im (nahezu) voll beladenen Zustand bestrebt ist, mit der höchsten zugelassenen Geschwindigkeit weiterzufahren. Bei Dieselmotoren wäre eine solche Leistung vergleichsweise teuer, ein Elektromotor kann dagegen für eine gewisse Zeit eine erhebliche Mehrleistung erbringen, sodass eine Leistung von 500 kW vergleichsweise preiswert realisierbar ist und daher vermutlich auch genutzt werden wird. Deshalb wird von einem Wert von 500 kW für die Ermittlung der Last, die maximal anzusetzen ist, falls keine Gegenmaßnahmen erfolgen, ausgegangen.

¹³ Bezüglich der angegebenen Leistungen ist der folgende Punkt zu beachten: In der allgemeinen Elektrotechnik wird in der Regel die maximale regulär abgebbare Leistung, auf die dann auch Sicherheitseinrichtungen etc. ausgelegt werden, angegeben. Thermische Grenzen, die diese Last nicht dauerhaft sondern nur für eine gewisse Zeit erlauben, werden dann als Aussetzbetrieb definiert. Beispiel: Die Nennleistung beträgt 10 MW, auf Grund der Wärmeabgabe darf diese Leistung aber nur für 3 h gezogen werden, die übrige Zeit (für z. B. 7 h) dürfen dann maximal 3,3 MW gezogen werden – d. h. in diesem Fall ist ein Aussetzbetrieb mit 30 % der Zeit Nennlast, 70 % der Zeit Teillast von 33 % bei zehn Stunden Intervalldauer definiert. In der Bahntechnik wird dagegen mit einer Nennlast, die dauerhaft bezogen werden darf, und einer Überlast, die eine gewisse Zeit zusätzlich bezogen werden darf, gerechnet. Beispiel: 3,3 MW Nennlast mit 200 % Überlast (10 MW) für drei Stunden.

Mögliche Gegenmaßnahmen zur Vermeidung des Risikos zu hoher Strombezüge und Stromstärken sind:

1. Verwendung einer möglichst hohen Spannung im Oberleitungsnetz, um die Stromstärken zu reduzieren;
2. Herstellen eines Kommunikationssystems zwischen HO-Lkw und Umspannstation, über das der HO-Lkw der Umspannstation die Wunschbezugsleistung übermittelt und die Umspannstation dem HO-Lkw die jeweils aktuell mögliche Bezugsleistung mitteilt;
3. Anordnung von Oberleitungen im Anschluss an Steigungsstrecken, sodass auf der Steigungsstrecke selbst weniger Energie bereitgestellt werden muss;
4. Verdichtung der Umspannstationen;
5. Einbau von Batteriespeichern in den Umspannstationen, um das Mittelspannungsnetz von Bezugsspitzen durch HO-Lkw zu entkoppeln;
6. Lokale Verstärkungen des Mittelspannungsnetzes.

Ergänzende Erläuterungen zur Maßnahme 1

Um die Strombelastungen der Oberleitungen zu reduzieren, erscheint es sinnvoll, die Versorgungsspannung zu erhöhen, insbesondere da die notwendigen Leistungshalbleiter (siehe z. B. Zentralwechselrichter für Solaranlagen) inzwischen für Spannungen bis 1,5 kV marktgängig sind. Bis 1,5 kV Gleichspannung gelten die gleichen Normen wie für 670 V, und es können oft auch die gleichen Bauelemente eingesetzt werden.

Eine Erhöhung der Spannung von 670 V auf z. B. 1.450 V senkt die Stromstärke um den Faktor 2,16 und senkt die Leitungsverluste entlang der Strecke um den Faktor 4,68. Entsprechend können Leiter dünner ausfallen, es sinkt die Strombelastung der Stromabnehmer und die Umspannstationen können längere Streckenabschnitte mit vertretbaren Leitungsverlusten versorgen.

Da bei der Oberleitungsinfrastruktur für HO-Lkw keine Rücksicht auf Bestandssysteme genommen werden muss (da es noch gar keinen Bestand gibt), ist davon auszugehen, dass die wirtschaftlichen Vorteile, die sich aus der Spannungserhöhung ergeben, genutzt werden können.

Ergänzende Erläuterungen zur Maßnahme 2

Da eine Überlastung der Umspannstation mit Auslösen von Sicherungseinrichtungen zu einem möglichen Liegenbleiben einer größeren Zahl von HO-Lkw – und damit zu erheblichen Verkehrsbehinderungen – führen würde, ist ein Informationsaustausch zwischen Umspannstation und HO-Lkw zweckmäßig, um den maximalen Leistungsbezug des HO-Lkw limitieren zu können (und damit keine Sicherungselemente auszulösen). Dies führt

dann ggf. zu reduzierter Fahrgeschwindigkeit des HO-Lkw (langsame Fahrt bergauf, langsame Fahrt für längere Ladezeit bei leeren Batterien).

Tritt dieser Begrenzungsfall öfter auf, sind benachbart weitere oberleitungsversorgte Bereiche aufzubauen und/oder die Umspannstation und die Oberleitung für höhere Leistungen zu verstärken.

Ergänzende Erläuterungen zur Maßnahme 5

Da die Umspannstationen sowohl Leistung abnehmen und als Gleichspannung bereitstellen als auch Leistung in das Mittelspannungsnetz einspeisen können (und zwar in der Regel mit beliebigem Blindspannungsanteil), besteht die Möglichkeit, die Umspannstationen mit eigenen Batterien von einigen 100 kWh auszustatten, mit denen auch die kurzfristige Leistung der Umspannstation vervielfacht werden kann, wenn die Batterie mit bis zu 1.500 V geladen und mit z. B. bis zu 1.300 V entladen wird sowie die HO-Lkw auf Eingangsspannungen von 1.300 bis 1.500 V vorbereitet werden (dann können die Batterien direkt mit der Oberleitung verbunden werden, die Spannung an der Oberleitung wechselt dann entsprechend Lade-/Entladebetrieb der Akkumulatoren in der Umspannstation).

Bei einer solchen Ausstattung können die Umspannstationen durch Blindleistungsbereitstellung den örtlichen Betrieb der Mittelspannungsnetze optimieren sowie – durch Bereitstellung von Momentanleistung – das Netz stützen.

Bei z. B. 20 % Netzabdeckung (s. u.) also 2.600 km Streckenanteil und z. B. 4 MVA je km Leistungsausstattung stünden bis 10 GW Momentanleistung zur Verfügung, d. h. etwa 300 % der aktuell durch rotierende Massen in Kraftwerken (derzeit noch Must-Run-Kapazitäten) bereitgestellten Momentanreserveleistung.

Ergänzende Anmerkungen zum Leistungsbedarf bei Stausituationen

In Stausituationen (Stau mit Stillstand oder langsamer Geschwindigkeit) ist die Leistungsaufnahme der beteiligten Fahrzeuge sehr niedrig, sodass die Batterien der in einem Oberleitungsabschnitt befindlichen Fahrzeuge kontinuierlich bis zur maximalen Ladung aufgeladen werden können, ohne das System stärker zu belasten.

Beim Anfahren aus dem Stand bewegt sich die Welle anfahrender Fahrzeuge mit ca. 15 km/h entgegen der Fahrtrichtung durch den Stau, sodass sich immer eine konstante Menge an Fahrzeugen im Beschleunigungsprozess befindet.

Der Leistungsbedarf je Fahrzeug ist zu Beginn des Anfahrens gering, da zwar die benötigte Kraft groß, aber der zurückgelegte Weg klein ist und damit die aufgenommene Leistung klein bleibt. Mit fortschreitender Geschwindigkeitszunahme steigt zwar die Leistungsaufnahme je Fahrzeug, dafür fällt aber die Fahrzeugdichte ab, da die Abstände zwischen den Fahrzeugen größer werden.

Nimmt man einen max. Leistungsbedarf von 500 kW beim beschleunigenden, voll beladenen HO-Lkw an (bei 80 km/h als sinnvolle Obergrenze für die Geschwindigkeit), entspricht dies einer Beschleunigung von $0,56 \text{ m/s}^2$. Bei konstanter Beschleunigung bedeutet dies, dass das Fahrzeug den Beschleunigungsvorgang nach ca. 40 s abgeschlossen hat. Bei einer max. Fahrzeugfolge von ca. 20 HO-Lkw je Minute folgt daraus, dass sich max. ca. 13-14 HO-Lkw je Fahrstreifen im Beschleunigungsprozess befinden, mit linear ansteigender Leistung zwischen 0 und 500 kW. Daraus ergibt sich für die anfahrenen Fahrzeuge eine maximale Bezugsleistung je Fahrstreifen von 7 MW (ohne Rückgriff auf Batterieleistung). Der Leistungsbedarf in Stausituationen ist demnach geringer als in Steigungsbereichen oder bei hohem Ladebedarf.

2.1.6 Masten und Oberleitungen

Aus technisch-wirtschaftlichen Gründen sollte ein durchschnittlicher Mastabstand von 50 m eingehalten werden; dieser Abstand ist auch im Schienenverkehr üblich. Um den üblicherweise vorhandenen Standstreifen, den notwendigen Minimalabstand zum Fahrbahnrand (Leitplanken) sowie die Hälfte der Hauptfahrbahn zu überbrücken, ist von Auslegern von mindestens 6 m oder von beidseitigen Masten auszugehen.

Die Masten sind beidseitig der Fahrbahn anzuordnen – üblich sind Beton- oder Stahlmaste (vgl. nachfolgende Abbildung), die mit Schutzplanken abzusichern sind, wobei gemäß RPS 2009 von der Aufhaltstufe H1 ausgegangen werden muss; evtl. ist eine Verstärkung der vorhandenen Schutzplanken vorzunehmen.

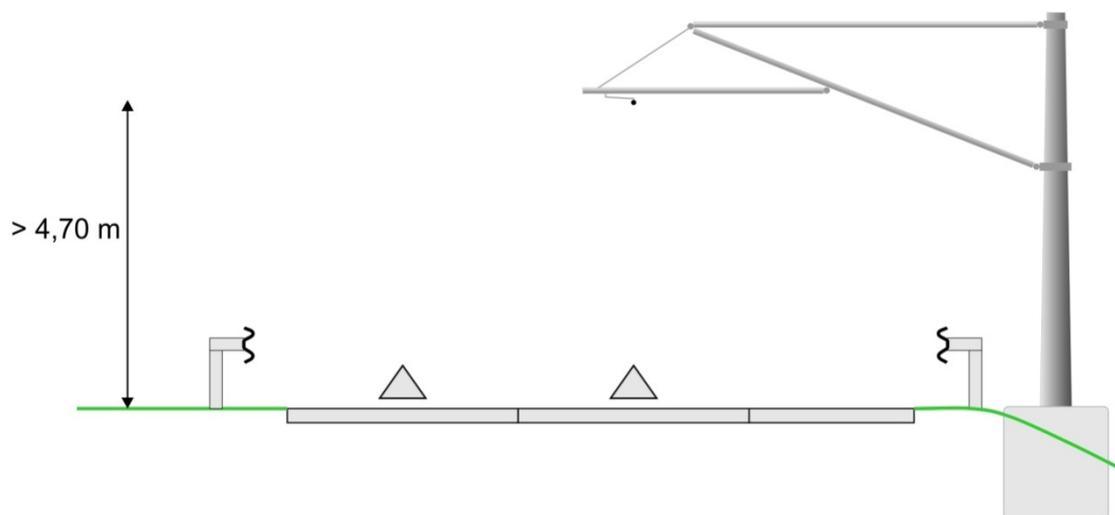


Abbildung 7: Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Straßenquerschnitt (Variante 1)

An Standorten mit Querverknüpfungen (in der Regel an den Standorten der Umspannstationen, siehe Abbildung 8) sind ggf. etwas stärkere Masten erforderlich.

Damit die Masten keine gefährlichen Hindernisse entlang der Straße darstellen, könnten sie als Gabelständer ausgeführt werden (siehe Abbildung 9). Bei Verwendung von Gabelständern, die als verformbar eingestuft werden können, sind gemäß RPS 2009 Schutzeinrichtungen mit Aufhaltestufe N2 ausreichend; bei gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüften Tragkonstruktionen (d. h. bei Gabelständern, bei denen die einzelnen Rohre so dünn sind, dass sie keine Hindernisse im Sinne der RPS darstellen), kann ggf. auf Schutzeinrichtungen verzichtet werden.

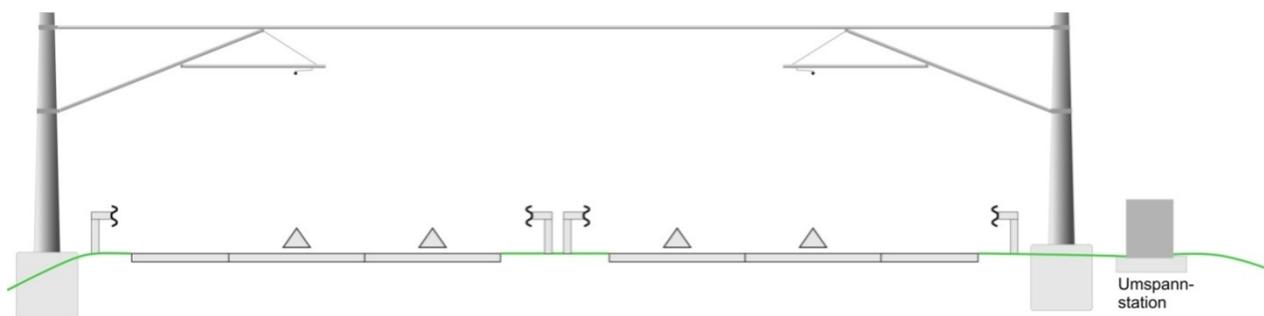


Abbildung 8: Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Straßenquerschnitt (Variante 2)

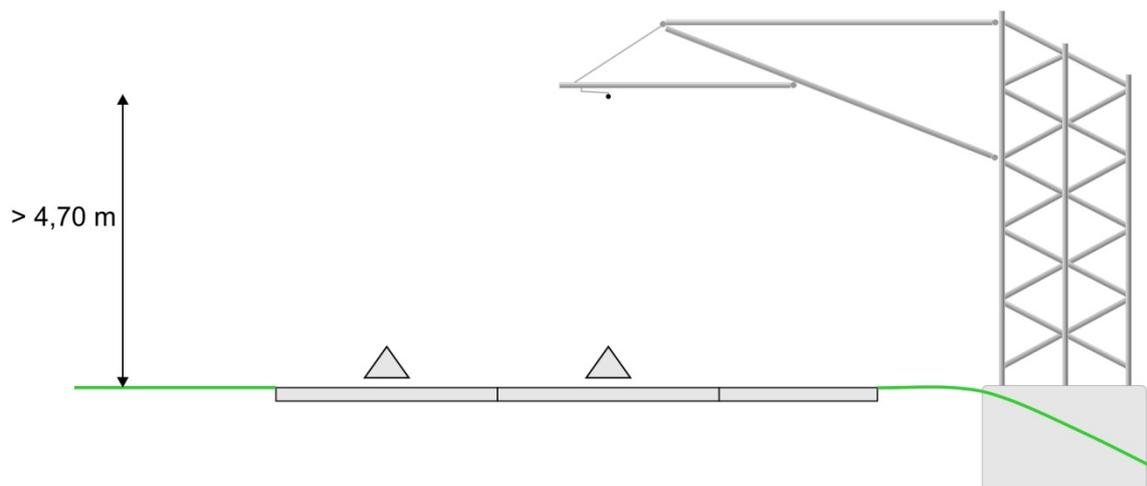


Abbildung 9: Ausbildung der Masten in Form von Gabelständern

Die Oberleitungen selbst sind in Form eines Kettenwerks auszulegen, bestehend aus 2-poligen Rillenfahrdrähten mit 150 mm^2 Querschnittsfläche, Tragseilen (120 mm^2 Querschnittsfläche je Tragseil, Dimensionierung entsprechend lokaler Strombelastung) und Querkupplungen zwischen den Oberleitungen beider Fahrtrichtungen.

Da Eislasten bis ca. 2.000 kg/50 m auftreten können¹⁴, wird empfohlen, die Oberleitungen beheizbar auszulegen. Ansonsten müssten massive Kragarme entlang der Autobahn verbaut werden, die mit hohen Kosten und hoher Gefährdung der Verkehrsteilnehmer verbunden wären.

Zur elektrischen Absicherung der Oberleitungsinfrastruktur bietet es sich an, ein Datenübertragungskabel entlang der mit Oberleitungen ausgerüsteten Streckenabschnitte mitzuführen und an jedem Mast eine Ader in einer Schleife durch das Fundament zu führen, welche abreißt, wenn der Mast umgefahren wird. Außerdem sollte ein Neigungsschalter installiert werden, der sich automatisch auslöst, wenn sich die Neigung des Masts in irgendeine Richtung mehr als zulässig ändert. Die Überwachungseinrichtungen eines Abschnitts können in Serie geschaltet und damit der Abschnitt abgeschaltet werden, wenn eine der Überwachungseinrichtungen anspricht. Dadurch ist gewährleistet, dass die Spannung auf einem Abschnitt automatisch abgeschaltet wird, wenn ein Unfall die Infrastruktur in gefährlicher Weise beschädigt.

Für die Oberleitungsinfrastruktur entlang der Strecke ist mit folgenden Kosten zu rechnen¹⁵:

- Masten: 10.000 Euro pro Mast
- Oberleitung (Kettenwerk): 300 Euro pro m
- Passive Schutzeinrichtungen: 100 Euro pro m.

2.1.7 Unterquerung von Schilderbrücken

Die Tragfähigkeit der Schilderbrücken für zusätzliche Lasten, die keine Windlasten längs zur Fahrbahnrichtung darstellen, dürfte in den meisten Fällen ausreichen, um ein Oberleitungsseil über 50 m statische Länge zu tragen.

Ist eine Schilderbrücke ausreichend tragfähig, so ist als Nächstes die Durchfahrtshöhe die entscheidende Frage, ob an der Schilderbrücke Änderungen vorzunehmen sind. Ist die Fahrbahn wie üblich vom Mittelstreifen nach außen mit 1-2 % geneigt und verfügt die Schilderbrücke auch über der Innenkante auf dem Überholfahrstreifen über die Soll-Durchfahrtshöhe von 5 m, so stehen in der Mitte des Hauptfahrstreifens etwa 5 cm Höhe zur Verfügung, um die Oberleitung mittels eines Isolierstücks und einer Stromschiene unter der Schilderbrücke hindurchzuführen. Das obere Tragseil sowie die Verstärkungslei-

¹⁴ 270 mm² Bronze + 95 mm² Alu wiegen etwa 3 kg/m, also 150 kg/50 m Abstand je Leiter, insgesamt also 300 kg/50 m. Eislast bis ca. 6-10 kg/m Leiter also 300-500 kg/50 m oder 1.200-2.000 kg/50 m insgesamt.

¹⁵ Die hier genannten Werte basieren auf dem Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr) sowie auf Literatur- und Internetrecherchen.

tung können dabei über dem Schild – in einem Isolator eingefasst – über die Schilderbrücke hinweggeführt und dort gestützt werden.

Da die Oberleitungsseile mit Durchmessern unter 20 mm deutlich schmaler sind als die Strichbreiten der Anzeigehalte auf Schilderbrücken, ist nicht von einer kritischen Sichtbehinderung durch die Oberleitungen auszugehen.

Sofern die Höhe der Schilderbrücke oder ihre Tragfähigkeit nicht ausreicht, so kann versucht werden, diese für die neuen Anforderungen zu ertüchtigen oder aber – falls die zulässige Durchfahrtshöhe unterschritten wird – eine Ausnahmegenehmigung zu erhalten. Ist dies nicht möglich, so ist die Beschilderung umzumontieren oder gar die Schilderbrücke zu tauschen.

Falls keine Umbauten an der Schilderbrücke erforderlich sind, ist zu erwarten, dass sich die Mehrkosten für das Equipment zur Unterführung der Schilderbrücke mit der Kostenersparnis für einen eingesparten Oberleitungsmasten kompensieren. Bei Austausch der Schilderbrücke entstehen dagegen Mehrkosten bis zu 100.000 Euro (für eine zu ersetzende große Schilderbrücke eines Wechselwegweisungssystems).

2.1.8 Unterquerung von Überführungsbauwerken und Tunneln

Unter Überführungsbauwerken oder auf kürzeren Tunnelstrecken (bis ca. 100 m Länge) bietet sich der Einsatz von Deckenstromschiensystemen an. An Überführungsbauwerken sind zudem Berührungshindernisse zum Schutz vor Berührung der Oberleitungen anzubringen. Auch hier ist zu erwarten, dass sich die Mehrkosten für das Equipment zur Unterführung von Überführungsbauwerken und die Kostenersparnis für eingesparte Oberleitungsmasten in etwa ausgleichen. Längere Tunnelstrecken (ebenso wie Talbrücken) sollten aus Kosten- und Sicherheitsgründen nicht mit Oberleitungen ausgestattet werden¹⁶.

¹⁶ Tunnel und Brücken können zwar grundsätzlich durchaus mit Oberleitungen ausgestattet werden, jedoch bedarf dies umfassender Untersuchungen der Statik und des Risikos. Da sowieso nicht die komplette Länge des Netzes ausgestattet werden muss, ist es daher empfehlenswert, auf die Ausstattung von Tunneln und Brücken mit Oberleitungen zu verzichten.

2.1.9 Zusammenfassung der Komponenten und besonderen Merkmale der Oberleitungsinfrastruktur

Tabelle 2: Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur und deren Merkmale

Komponente	Eigenschaften / Anforderungen
Energieeinspeisepunkt	Abzweig aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz des lokalen EVU, z. B. an einem Umspannwerk, an einem Erdkabel oder an einer Freilandleitung.
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	20- bis 60-kV-Leitungen; es ist mit Zuleitungslängen von 500 m (in Ballungsräumen) bis 3.000 m (in ländlichen Gebieten) zu rechnen.
Umspannstation	Schaltschrank mit Trafo und Gleich-/Wechselrichter; Anordnung einseitig am Fahrbahnrand im Abstand von ca. 3 km; zur Reduktion der Strombelastungen wird vorgeschlagen, die Oberleitungen mit Spannungen von 1,0 bis 1,5 kV Gleichstrom zu versorgen.
Masten	Beton- oder Stahlmasten mit Auslegern von ca. 6 m Länge (an Anschlussstellen sind ggf. längere Ausleger notwendig); Anordnung beidseitig am rechten Fahrbahnrand im Abstand von ca. 50 m; an Standorten mit Querverknüpfungen sind ggf. etwas stärkere Maste erforderlich.
Oberleitung (Fahrdrabt)	Kettenwerk, bestehend aus 2-poligen Rillenfahrdrähten mit 150 mm ² Querschnittsfläche, Tragseilen (120 mm ² Querschnittsfläche) und Querkupplungen zwischen den Oberleitungen beider Fahrtrichtungen.

Tabelle 3: Besondere Aspekte der Oberleitungsinfrastruktur

Aspekt	Eigenschaften / Anforderungen
Querung von Schilderbrücken	Unterquerung des Fahrdrabts mittels Stromschiene (in einem Isolator gefasst) dürfte in aller Regel möglich sein; Tragseil und Verstärkungsleitung können – in einem Isolator gefasst – über der Beschilderung hinweggeführt werden. Tragfähigkeit der Schilderbrücken für die Befestigung der Oberleitungen dürfte in aller Regel ausreichend sein; ebenso der notwendige Platzbedarf (ca. 5 cm) zur Einhaltung der Soll-Durchfahrtshöhe.
Querung von Überführungsbauwerken	Unterquerung der Oberleitungen (Fahrdrabt, Tragseil und Verstärkungsleitung) mittels Deckenstromschienen dürfte in aller Regel möglich sein. An Überführungsbauwerken sind Einrichtungen zum Schutz vor Berührung der Oberleitungen anzubringen.
Absicherung der Masten durch passive Schutzeinrichtungen (Schutzplanken)	Beton- und Stahlrohrmaste sind mit Schutzplanken abzusichern, wobei gemäß RPS 2009 von der Aufhaltstufe H1 ausgegangen werden muss; ggf. ist eine Verstärkung der vorhandenen Schutzplanken vorzunehmen. Bei Verwendung von Gabelständern, die als verformbar eingestuft werden können, sind gemäß RPS Schutzeinrichtungen mit Aufhaltstufe N2 ausreichend; bei gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüften Tragkonstruktionen kann ggf. auf Schutzeinrichtungen verzichtet werden.
Enteisung der Oberleitungen	Da Eislasten bis ca. 2.000 kg/50 m auftreten können, wird empfohlen, die Oberleitungen beheizbar auszuliegen.
Streckenabschnitte ohne Oberleitungen	Aus Kostengründen sollten Talbrücken sowie die Verbindungsrampen an Autobahnkreuzen und -dreiecken ausgespart werden; längere Tunnelstrecken (> 100 m) sollten aus Sicherheitsgründen ausgespart bleiben. Ebenso sollten Streckenabschnitte mit Lärmschutzwänden nach Möglichkeit ausgespart werden, da die nachträgliche Anordnung von Masten im Bereich von Lärmschutzwänden aufwändig und mit erheblichen Mehrkosten verbunden sein kann. Darüber hinaus können weitere Streckenabschnitte ohne Oberleitungen bleiben, wenn sie im Batteriebetrieb überwunden werden können.

2.1.10 Betriebliche Aspekte

Arbeiten an den Fahrbahnoberflächen werden durch die Oberleitungsinfrastruktur nicht beeinträchtigt, soweit jedoch bei Fahrbahndeckensanierungen mit Muldenkippern usw. gearbeitet wird, muss auf die Höhenbeschränkung durch die Oberleitung Rücksicht genommen werden, was zu einer gewissen Aufwandserhöhung führen kann.

Während der Arbeiten an Fahrbahnen oder an den Oberleitungen ist die Spannung des Abschnitts abzuschalten, woraus folgt, dass die Oberleitung in typischen Baustellenlängen, z. B. jeweils die Hälfte eines Oberleitungsabschnitts, abschaltbar sein sollte.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Oberleitungsinfrastruktur den Einsatz von Sicherheits- und Rettungskräften (insbesondere wegen der eingeschränkten Landemöglichkeiten von Rettungshubschraubern) erschweren kann. Die Anordnung von Oberleitungen sollte deshalb mit den zuständigen Rettungskräften abgestimmt werden.

2.1.11 Mögliche Synergieeffekte

Da die Umspannstationen sowohl Leistung abnehmen und als Gleichspannung bereitstellen können als auch Leistung in das Mittelspannungsnetz einspeisen können (und zwar in der Regel mit beliebigem Blindspannungsanteil), besteht die Möglichkeit, die Umspannstationen mit eigenen Batterien von einigen 100 kWh auszustatten. Die kurzfristige Leistung der Umspannstation kann mit diesen Batterien vervielfacht werden, wenn die Batterie mit bis zu 1.500 V geladen und mit z. B. bis 1.300 V entladen wird sowie die HO-Lkw auf Eingangsspannungen von 1.300 bis 1.500 V vorbereitet werden. Dann können die Batterien direkt mit der Oberleitung verbunden werden, und die Spannung an der Oberleitung wechselt dann entsprechend Lade-/Entladebetrieb der Akkumulatoren in der Umspannstation.

Bei einer solchen Ausstattung können die Umspannstationen durch Blindleistungsbereitstellung den örtlichen Betrieb der Mittelspannungsnetze optimieren sowie – durch Bereitstellung von Momentanleistung – das Netz stützen.

Bei z. B. 20 % Netzabdeckung (s. u.) also 2.600 km Streckenanteil und z. B. 4 MVA je km Leistungsausstattung stünden bis zu 10 GW Momentanleistung zur Verfügung, d. h. etwa 300 % der aktuell durch rotierende Massen in Kraftwerken (derzeit noch Must-Run-Kapazitäten) bereitgestellten Momentanreserveleistung.

Da die finanzielle Bewertung dieser Synergie außerhalb dieses Projekts liegt, wurde sie weder monetär bewertet noch in den Kostenrechnungen berücksichtigt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass vergleichbare Systeme, nur ohne Oberleitung bereits zur Frequenzhaltung und anderen Systemdienstleistungen aufgebaut werden.

2.1.12 Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur

Die Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur erfolgt für zwei Ausstattungsvarianten der HO-Lkw:

- *Variante 1*: Oberleitungsinfrastruktur für HO-Lkw, die mit einem Dieselmotor ausgestattet sind und demnach nur kleine Batterieeinheiten (wenige kWh) benötigen.
- *Variante 2*: Oberleitungsinfrastruktur für HO-Lkw, die ohne Dieselmotor ausgestattet sind und demzufolge größere Batterieeinheiten (> 150 kWh) benötigen.

Außerdem wird jeweils zwischen 2 Ausstattungsvarianten hinsichtlich der Abdeckung der Autobahnen mit Oberleitungsinfrastruktur unterschieden:

- *Variante A*: Mindestabdeckung der Autobahnen mit Oberleitungsinfrastruktur, die für die Startphase des HO-Lkw-Betriebs in einem ausgewählten Teilnetz ausreichend erscheint.
- *Variante B*: Notwendige Abdeckung der Autobahnen mit Oberleitungsinfrastruktur für den Vollbetrieb des gesamten Autobahnnetzes.

Darüber hinaus erfolgt eine Differenzierung der Kostenschätzung nach günstigen Randbedingungen (Best-Case-Betrachtung) und ungünstigen Randbedingungen (Worst-Case-Betrachtung).

Die in den nachfolgenden Tabellen angegebenen Werte basieren auf den folgenden Informationsquellen:

- Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (BMVI 2010)
- Ergebnisse verfügbarer Ausschreibungen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen
- Literatur- und Internetrecherchen
- Siemens AG / Technische Universität Dresden: Ökonomische und ökologische Bewertung eines Oberleitungs-Hybrid-Systems für schwere Nutzfahrzeuge im Rahmen des Förderprojekts ENUBA2 „Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen“. Ergebnisbericht, Stand 13.10.2014.

Tabelle 4: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1A (HO-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000,-- Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,9 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgen daraus rund 0,3 Mio. Euro/km	300.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	Annahme: Es kann auf passive Schutzeinrichtungen verzichtet werden, da verformbare, gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüfte Tragkonstruktionen eingesetzt werden können	0,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	133.000,--
Gesamt		1.463.000,--

Tabelle 5: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1A (HO-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000 Euro /km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,9 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgen daraus rund 0,3 Mio. Euro/km	300.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	ca. 100 Euro pro lfd. m; unter der Annahme, dass die gesamte Strecke neu ausgestattet bzw. bestehende Schutzplanken verstärkt werden müssen, ergeben sich Kosten von 200.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	200.000,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	175.000,--
Gesamt		1.930.000,--

Tabelle 6: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1B (HO-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 6 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 1,8 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgt daraus rund 0,6 Mio. Euro/km	600.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	Annahme: Es kann auf passive Schutzeinrichtungen verzichtet werden, da verformbare, gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüfte Tragkonstruktionen eingesetzt werden können	0,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	163.000,--
Gesamt		1.763.000,--

Tabelle 7: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1B (HO-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 6 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 1,8 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgen daraus rund 0,6 Mio. Euro/km	600.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	ca. 100 Euro pro lfd. m; unter der Annahme, dass die gesamte Strecke neu ausgestattet bzw. bestehende Schutzplanken verstärkt werden müssen, ergeben sich Kosten von 200.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	200.000,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	205.000,--
Gesamt		2.260.000,--

Tabelle 8: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2A (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,9 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgt daraus rund 0,3 Mio. Euro/km	300.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	Annahme: Es kann auf passive Schutzeinrichtungen verzichtet werden, da verformbare, gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüfte Tragkonstruktionen eingesetzt werden können	0,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	133.000,--
Gesamt		1.463.000,--

Tabelle 9: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2A (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,9 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgt daraus rund 0,3 Mio. Euro/km	300.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	ca. 100 Euro pro lfd. m; unter der Annahme, dass die gesamte Strecke neu ausgestattet bzw. bestehende Schutzplanken verstärkt werden müssen, ergeben sich Kosten von 200.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	200.000,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	175.000,--
Gesamt		1.930.000,--

Tabelle 10: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2B (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 7,5 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgt daraus rund 2,5 Mio. Euro/km	2.500.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50 m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	Annahme: Es kann auf passive Schutzeinrichtungen verzichtet werden, da verformbare, gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüfte Tragkonstruktionen eingesetzt werden können	0,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	353.000,--
Gesamt		3.883.000,--

Tabelle 11: Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2B (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau, Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgen daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Umspannstation	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 7,5 Mio. Euro pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgen daraus rund 2,5 Mio. Euro/km	2.500.000,--
Masten	ca. 10.000 Euro pro Mast (inkl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50m ergeben sich Kosten von 400.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300 Euro pro lfd. m, d. h. 600.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	ca. 100 Euro pro lfd. m; unter der Annahme, dass die gesamte Strecke neu ausgestattet bzw. bestehende Schutzplanken verstärkt werden müssen, ergeben sich Kosten von 200.000 Euro pro km (für beide Fahrtrichtungen)	200.000,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	395.000,--
Gesamt		4.350.000,--

Tabelle 12: Zusammenstellung der Gesamtkosten (Mittelwert zwischen Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung, gerundet) in den unterschiedlichen Varianten

Variante	Ausprägung	Kosten [Mio. Euro/km]
1A	HO-Lkw mit Dieselmotor, Startphase	1,7
1B	HO-Lkw mit Dieselmotor, Endzustand	2,0
2A	HO-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase	1,7
2B	HO-Lkw ohne Dieselmotor, Endzustand	4,1

2.1.13 Notwendige / sinnvolle Abdeckung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur

2.1.13.1 Grundlagen

Im Folgenden wird ein Ansatz für die Ermittlung der notwendigen bzw. sinnvollen Abdeckung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur für die o. g. Variante 1 (d. h. für den Fall, dass die HO-Lkw ohne Dieselmotoren auskommen müssen) vorgestellt.

Im Ansatz der ENUBA-Studie¹⁷ wird von einer durchgehenden Versorgung des Autobahnnetzes auf dem dort festgelegten „Ausbaunetz“ mit Strom aus der Oberleitungsinfrastruktur ausgegangen, abgesehen von einzelnen Sonderfällen, an denen eine Oberleitung nur mit unverhältnismäßigem Aufwand realisierbar ist.¹⁸

Unter der Voraussetzung, dass die HO-Lkw eine gewisse Distanz ohne Oberleitungsinfrastruktur überbrücken können, muss man nicht zwingend einen möglichst großen Streckenbereich mit Oberleitungen überspannen; für einen Erstausbau besteht durchaus die Möglichkeit, sich auf die zwingend notwendigen Bereiche zu beschränken, sodass eine relativ kostengünstige Lösung ermöglicht wird.

2.1.13.2 Ansatz zur Ermittlung der Mindestdichte des Oberleitungsnetzes

Unter Zugrundelegung einiger Annahmen, die im Folgenden erläutert werden, lässt sich die Mindestdichte des Oberleitungsnetzes aus den maximalen Ladeströmen der Batterien ableiten.

Um eine hinreichende Ausfallsicherheit des Systems zu erzielen, sollten die HO-Lkw einen Ausfall eines Oberleitungsabschnittes ohne weitere Beeinträchtigung verkraften können.

Angenommen, ein Oberleitungsabschnitt habe die Länge X [km], der Ladestrom der Batterie sei $Y \cdot K$ (in [km]), der Abschnitt ohne Oberleitung habe die Länge Z [km] und die Batterie habe die Kapazität K (in [km]).

Die benötigte Kapazität der Batterie im Fahrzeug (in [km]) ist dann

$$K \geq 2 \cdot Z + X$$

¹⁷ Siemens AG (2016)

¹⁸ Das „Ausbaunetz“ der ENUBA-Studie umfasst ca. 4.100 km, davon ist ein Anteil von ca. 6 % nicht elektrifizierbar (im Wesentlichen sind dies Streckenabschnitte mit Talbrücken oder Tunneln sowie Höhenhindernissen und Autobahnkreuzen/-dreiecken). Somit verbleibt ein Streckennetz von ca. 3.850 km, das mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestattet werden soll, wobei von einer installierten Leistung von 2 MVA je Unterwerk ausgegangen wird.

Ferner ist über den maximalen Ladestrom in den mit Oberleitung versehenen Abschnitten

$$Z \leq X \cdot Y \cdot K$$

wobei Y = aufladbare Kapazität je km Länge, abhängig von der Lkw-Geschwindigkeit sowie von den Batterieeigenschaften.

Damit erhält man eine mindestens notwendige Kapazität (in [km]) von

$$K = 2 \cdot (X \cdot Y \cdot K) + X$$

Damit ist

$$K - 2 \cdot X \cdot Y \cdot K = X \text{ oder } X/K = (1 - 2 \cdot X \cdot Y) \text{ oder } K/X = 1/(1 - 2 \cdot X \cdot Y) \text{ oder } K = X/(1 - 2 \cdot X \cdot Y)$$

Als Beispiel ergibt sich dann unter der Annahme einer maximalen Ladestromstärke von 3 C und einer mittleren Lkw-Geschwindigkeit von 80 km/h eine aufladbare Kapazität je km Fahrstrecke von

$$Y = 0,0375 \cdot K/\text{km}$$

Mit $X = 3$ km ergibt sich damit für K mindestens 3,878 km und für Z maximal 0,43 km.

Dies führt zu in der Praxis zu kurzen oberleitungslosen Abschnitten, ist also als Untergrenze anzusehen; weitere Grenzen werden aus ökonomischer Sicht gesetzt.

Bei einer Investition je km von A in die Oberleitungsinfrastruktur, einer Lebensdauer von LO und jährlichen Betriebskosten von $B \cdot A$ sowie Kosten je km ohne Oberleitung von

$C = [\text{Batteriepreis je km Kapazität}] / [\text{Ladezyklen je Batterie}] + (1 - [\text{Wirkungsgrad Batterie}]) \cdot \text{Strompreis} \cdot [\text{Verbrauch/km je Lkw je Jahr}]$ muss gelten:

$$(A/LO + B \cdot A) \cdot (X/X + Z) + C \cdot Z \cdot \text{Lkw-Verkehrsstärke} \rightarrow \min$$

Diese Gleichung führt mit wachsendem Z zu immer weiter asymptotisch sinkenden Kosten für das Gesamtsystem. Wobei genaugenommen auch die Kosten je Oberleitungsabschnitt mit wachsender Lücke steigen (wegen der höheren Ladeleistungen). Dies ändert aber nichts am asymptotischen Verhalten.

Daraus folgt, dass aus Sicht der Infrastruktur bei konstanten Kosten je km aus dem Batteriebetrieb die Akkukapazität des Lkw beliebig groß werden sollte, um das wirtschaftliche Optimum zu erreichen. Woraus wiederum folgt, dass sich der optimale Maximalabstand zwischen zwei Oberleitungsabschnitten aus den Fahrzeugeigenschaften selbst ableiten muss.

Dies kann z. B. anhand der gewünschten Fahrzeuglebensdauer aus den möglichen Ladezyklen der Batterie erfolgen. Es kann angenommen werden, dass die Batterie keine längere Lebensdauer benötigt als das Gesamtfahrzeug – insbesondere, wenn sie leicht

tauschbar an der Fahrzeugseite – wie derzeit die Tanks – installiert wird. Nimmt man einen Fahrenergiebedarf des Fahrzeugs von 1,5 kWh/km und eine Zyklusfestigkeit der Batterie von 5.000 an, so erhält man bei einer gewünschten Fahrzeuglebensdauer von 1 Mio. km eine sinnvolle Batteriekapazität von 300 kWh.

1,5 kWh je km entspricht bei einem Treibstoffbedarf von 250 ml Diesel/kWh Antriebsenergie einem Treibstoffbedarf von 37,5 l/100 km.¹⁹ Die Leistungsaufnahme eines Lkw würde damit im Mittel ca. 120 kW bei 80 km/h betragen. Ein 300 kWh Akku würde mit einer Leistungsdichte von 90 Wh/kg etwa 3.333 kg wiegen.

Nimmt man ein Gewicht von 1.000 kg für den Motorblock, 500 kg für das Getriebe sowie 1000 kg für gefüllte Tanks, Abgasanlagen, Adblue etc. beim Dieselantrieb an, sowie ca. 750 kg für den äquivalenten Antriebsblock für Motor und Getriebe beim Elektroantrieb, so wäre bei 200 km Reichweite das elektrische Antriebssystem ca. 1,6 t schwerer als der Diesel-Lkw. Bei 100 km Reichweite wären Dieselantrieb und elektrischer Antrieb etwa gleich schwer.

Die Kosten für den Elektromotor werden bei hinreichend großen Stückzahlen im Bereich zwischen 10.000 und 15.000 Euro liegen, der Dieselantrieb plus Nebenanlagen dürfte bei 40.000 Euro liegen. Bei 200 Euro/kWh Batteriekosten wäre damit bei ca. 120 bis 150 kWh Batteriekapazität Kostengleichheit erreicht.

Da die Energiekosten bei einer Versorgung über Oberleitung und Batterie in jedem sinnvoll absehbaren Szenario günstiger ist als die Energieerzeugung über Dieselmotor, scheint es nicht sinnvoll, von kleineren Batterien und damit günstigeren Fahrzeugen als mit Dieselantrieb auszugehen. Damit kann man für die Mindestdichte des Oberleitungsnetzes von Batteriereichweiten von 100 bis 200 km ausgehen.

Unter der Annahme, dass die Batterie in einem Oberleitungsabschnitt wieder vollgeladen werden kann (aber der Strom ausgefallener Oberleitungsabschnitte nicht nachgeladen wird) und mit weiteren Annahmen für die Batterieeigenschaften ergeben sich bei 3 km Oberleitungslänge oberleitungsfreie Abschnitte von 11,25 km (bei 100 km Batteriereichweite) bis 22,5 km (bei 200 km Batteriereichweite), also Mindestabdeckungen von 12 bis 21 % der Netzlänge.

Da bei einem Abstand der zu erwartenden Ziele von maximal ca. 50 km vom Autobahnnetz ausgegangen werden kann und dort (bei Fernverkehrs-Lkw) anzunehmen ist, dass über Steckdose oder Oberleitungsabschnitt an der Logistikimmobilie das Fahrzeug geladen werden kann, kann bei Abdeckung des Autobahnnetzes bei den ermittelten Batteriereichweiten in jedem Fall der gesamte Lkw-Fernverkehr elektrisch abgewickelt werden. Es

¹⁹ Dieser Wert ist wegen Rekuperation eher hoch angesetzt.

ist kein Fall ersichtlich, der eine Mitnahme eines Dieselmotors an Bord erfordert. Für Sonderfälle kann eine Generatoreinheit von ca. 150 kVA auf der Ladefläche des Lkw installiert und mitgenommen werden, welche die Fahrzeugbatterie während der Fahrt abseits des Oberleitungsnetzes kontinuierlich mit der erforderlichen Energie wieder auflädt.

Die Ladeleistung eines Lkw beträgt bei Ausnutzung dieser Abstände und bei 120 kW Leistungsaufnahme während der Fahrt ca. 450 kW bzw. 900 kW, d. h. die gesamte Leistungsaufnahme beträgt ca. 570 kW bzw. 1.020 kW. Es bietet sich an, bei Bergauffahrt die Ladeleistung zu verringern und den Oberleitungsabschnitt zu verlängern (siehe dazu auch die Batteriesimulation im Anhangkapitel 12).

2.1.14 Optimale Länge der Oberleitungsabschnitte

Die optimale Länge eines Oberleitungsabschnitts ist bestimmt durch:

- benachbarte Streckenabschnitte, die wegen ungünstigen Rahmenbedingungen nicht mit Oberleitung bestückt werden sollten,
- die Leistungsfähigkeit des Mittelspannungsnetzes, bei deren Überschreiten Sprungkosten für das Aufrüsten längerer Leitungsabschnitte und von Umspannwerken zur 110 kV-Ebene entstehen können,
- die Strombelastbarkeit der Oberleitung und Verstärkungsleitungen, die aber bei Gleichstrom durch Steigerung der Leiterquerschnitte wegen fehlendem Skin-Effekt beliebig erhöht werden können.

2.1.15 Überlegungen zur Platzierung der Abschnitte

Die folgenden Bereiche sind für die Platzierung von (längeren) Oberleitungsabschnitten prädestiniert:

- Steigungs-/Gefällstrecken zum Ausgleich von Bremsleistung und Fahrleistung bergauf,
- Bereiche mit hohen Lkw-Belastungen an den Anschlussstellen, da dort HO-Lkw mit weitgehend leeren Batterien vom Sekundärnetz auffahren bzw. HO-Lkw vollgeladen ins Sekundärnetz abfahren sollten.

Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, auch Streckenabschnitte im Sekundärnetz, die einen hohen HO-Lkw-Anteil aufweisen, mit Oberleitungsinfrastruktur auszustatten.

2.1.16 Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur unter verschiedenen Randbedingungen hinsichtlich Fahrzeugtechnik und Netzabdeckung.

Zuzüglich zu den Investitionskosten fallen Kosten für die Instandhaltung an, die sich aus Kosten für die regelmäßige Wartung sowie Instandsetzungskosten (Reparatur bzw. Ersatz defekter Systemkomponenten) zusammensetzen. Nach den Ergebnissen der durchgeführten Literatur- und Internetrecherche ist mit jährlichen Instandhaltungskosten von ca. 2 % der Investitionskosten (ohne Projektierungs- und Planungskosten) zu rechnen, so dass voraussichtlich folgende Wartungs- und Instandsetzungskosten anfallen werden:

Tabelle 13: Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur

System-variante	Ausstattungsmerkmale	Investitionsbedarf [Mrd. Euro]
1A	Fahrzeugtechnik: HO-Lkw mit Dieselmotor (geringe Ausstattungsquote) Max. Leistungsabgabe je Umspannstation: 3 MVA Netzabdeckung mit Oberleitungsinfrastruktur: 3.600 km (90 % eines „Startnetzes“ von 4.000 km) Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: ca. 4.000 km	6,1
1B	Fahrzeugtechnik: HO-Lkw mit Dieselmotor (hohe Ausstattungsquote) Max. Leistungsabgabe je Umspannstation: 6 MVA Netzabdeckung mit Oberleitungsinfrastruktur: 11.700 km (Endausbau) Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: ca. 13.000 km (gesamtes Autobahnnetz)	23,4
2A	Fahrzeugtechnik: HO-Lkw ohne Dieselmotor (geringe Ausstattungsquote) Max. Leistungsabgabe je Umspannstation: 3 MVA Netzabdeckung mit Oberleitungsinfrastruktur: 1.200 km (30 % eines „Startnetzes“ von 4.000 km) Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: ca. 4.000 km zzgl. direkt anschließende An- und Abfahrtsstrecken zu Be- und Entladestationen	2,0
2B	Fahrzeugtechnik: HO-Lkw ohne Dieselmotor (hohe Ausstattungsquote) Max. Leistungsabgabe je Umspannstation: 25 MVA Netzabdeckung mit Oberleitungsinfrastruktur: 3.900 km (Endausbau) Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: 13.000 km (gesamtes Autobahnnetz, zuzüglich An- und Abfahrtsstrecken im Sekundärnetz von/zu Be- und Entladestellen)	16,0
ENUBA-Ansatz ²⁰	Fahrzeugtechnik: HO-Lkw mit Dieselmotor Max. Leistungsabgabe je Umspannstation: 2 MVA Netzabdeckung mit Oberleitungsinfrastruktur: 3.850 km Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: 4.100 km („Ausbau-netz“)	8,5

²⁰ Siemens AG (2016)

Tabelle 14: Jährliche Instandhaltungskosten in den unterschiedlichen Varianten

Variante	Ausprägung	Kosten [Mio. Euro/a]
1A	HO-Lkw mit Dieselmotor, Startphase	110
1B	HO-Lkw mit Dieselmotor, Endzustand	421
2A	HO-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase	36
2B	HO-Lkw ohne Dieselmotor, Endzustand	288

2.2 Alternative Ladeinfrastrukturen – induktives Ladungssystem über Stromleiter in der Fahrbahnoberfläche („Stromschiene“)

2.2.1 Generelle Anforderungen an die Infrastruktur für das induktive Ladungssystem über Stromschienen

Bei diesem System erfolgt die elektrische Versorgung der Fahrzeuge über Stromleiter (Stromschienen) entlang der Fahrbahn. Die Stromschienen sind in die Fahrbahnoberfläche eingelassen, mittels geeigneter Schaltvorrichtungen erfolgt eine Segmentierung der Stromschienen in Versorgungsabschnitte. Die Versorgungsabschnitte werden automatisch ein- und ausgeschaltet, wenn ein elektrisch zu versorgendes Fahrzeug mit entsprechendem Stromabnehmer das Segment überquert. Abbildung 10 verdeutlicht das Prinzip der induktiven Ladung über Stromschienen.



Abbildung 10: Prinzip der induktiven Ladung mittels Stromschienen (Bildquelle: <http://news.volvogroup.com>)

Entsprechend der Oberleitungsinfrastruktur wird auch bei der konduktiven Ladung über Stromschienen davon ausgegangen, dass die elektrisch zu versorgenden Lkw auch Teilabschnitte ohne Einrichtungen zur induktiven Ladung überbrücken können.

Dies ist notwendig, da die Stromschienen auf Brücken, in Tunneln sowie in Streckenabschnitten mit armierten Betonfahrbahnen nur schwierig oder gar nicht installierbar sind.

Daraus folgt, dass die elektrisch zu versorgenden Lkw genügend Energie auf den mit Ladeinfrastruktur ausgerüsteten Bereichen aufnehmen müssen, um die Bereiche ohne Ladeinfrastruktur sowie die Fahrt zum Ziel außerhalb der Autobahn absolvieren zu können.

Die Leistungsfähigkeit der konduktiven Ladung über Stromschienen entspricht weitgehend derjenigen des Oberleitungssystems, bzgl. der Ausstattung des Autobahnnetzes mit Stromschienen bestehen also die gleichen Voraussetzungen wie bei der Oberleitungsinfrastruktur.

2.2.2 Komponenten der straßenseitigen Infrastruktur für das konduktive Ladungssystem mittels Stromschienen

Die straßenseitige Infrastruktur für das konduktive Laden über Stromschienen besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- Energieeinspeisung aus dem Mittelspannungsnetz der EVU
- Umspannstationen an der Autobahn
- Zuleitungen zwischen Energieeinspeisung und Umspannstationen an der Autobahn
- Längsverkabelung entlang der Autobahn zur Energieversorgung der konduktiven Ladeeinrichtungen mit Gleichstrom
- Konduktive Ladeeinrichtungen (Stromschienen) in der Fahrbahndecke
- Schaltvorrichtungen für die Zu- und Abschaltung von Versorgungsabschnitten entlang der Fahrbahn
- Sensorik zum Erkennen von Fahrzeugen (Anwesenheit und Geschwindigkeit) im Bereich der Stromschienen.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen geben einen systematischen Überblick über die straßenseitigen Komponenten der konduktiven Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen.

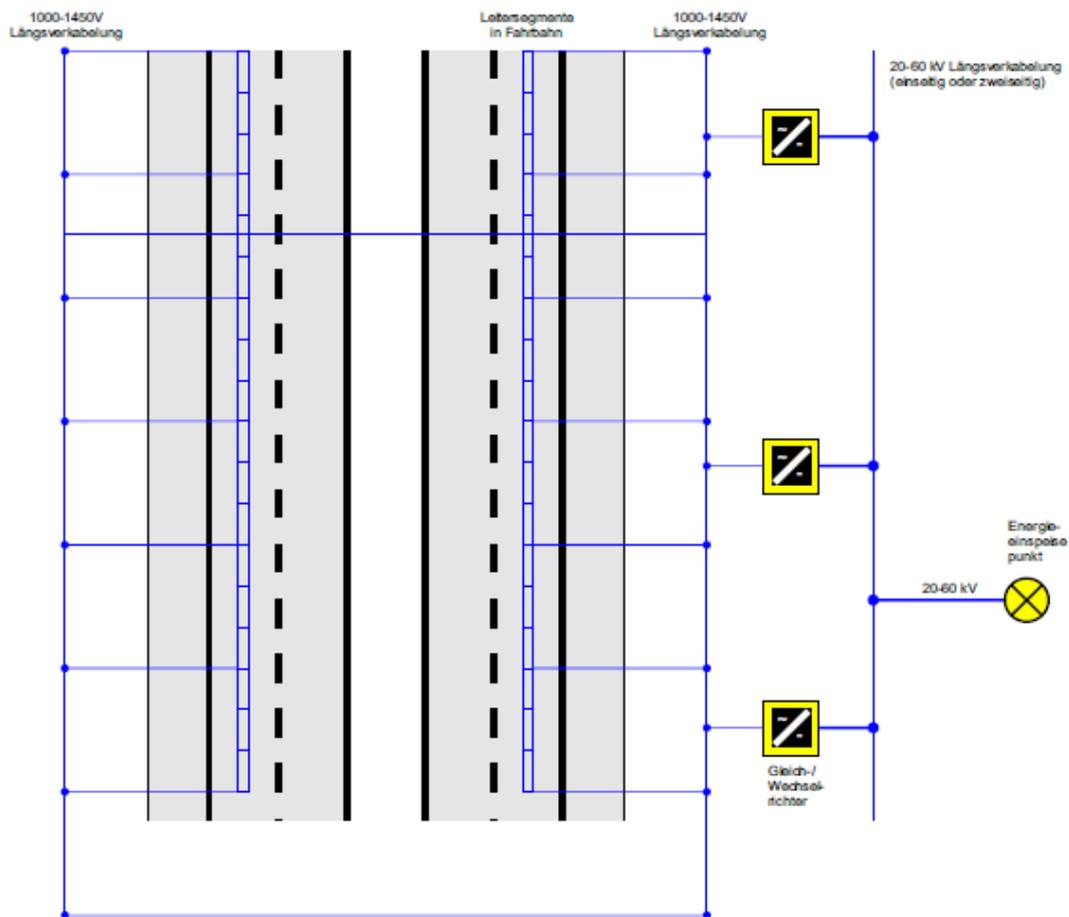


Abbildung 11: Aufbau der straßenseitigen Infrastruktur für das konduktive Laden über Stromschienen

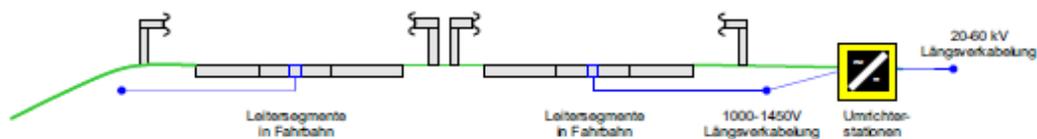


Abbildung 12: Anordnung der konduktiven Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen im Straßenquerschnitt

2.2.3 Energieeinspeisung und 20- bis 60-kV-Zuleitungen

Wie bei der elektrischen Versorgung mittels Oberleitungsinfrastruktur werden auch bei der konduktiven Ladung über Stromschienen so hohe Leistungen für einen Streckenabschnitt benötigt, dass eine Einspeisung aus dem Mittelspannungsnetz notwendig ist.

Für die Anschlüsse an das Mittelspannungsnetz und für die Zuleitungen zur Autobahn entstehen vergleichbare Kosten wie bei der Oberleitungsinfrastruktur.

2.2.4 Umspannstationen

Wie beim Oberleitungssystem bestehen die Umspannstationen für das konduktive Ladesystem mittels Stromschienen aus Trafos und Gleich-Wechselrichtern sowie elektronischen Komponenten der Kommunikations- und Sicherungstechnik, die in größeren Schaltschränken oder Containern am Fahrbahnrand der Autobahnen untergebracht sind.

Abweichend zum Oberleitungssystem sind die Umspannstationen für das konduktive Ladesystem im Abstand von ca. 1 km entlang der zu versorgenden Streckenabschnitte anzuordnen (s. u.).

2.2.5 Längsverkabelung entlang der Autobahn

Für die Energieversorgung der konduktiven Ladeeinrichtungen ist in den o. g. Umspannstationen eine Umwandlung des Wechselstroms aus dem Mittelspannungsnetz in 1.000 bis 1.500 V Gleichstrom erforderlich. Zur Versorgung der konduktiven Ladeeinrichtungen mit Gleichstrom ist eine Längsverkabelung entlang der Autobahn erforderlich.

Für die Längsverkabelung mit 1.000 bis 1.500 V Gleichspannung sind spezielle Kabel vorzusehen, wobei folgende Möglichkeiten bestehen:

- Verlegung beider Adern als einzelne Kabel in Schutzrohren
- Verlegung eines Kabels mit doppelt isolierten Adern

Für die Längsverkabelung entlang der Strecke zur Versorgung der konduktiven Ladeeinrichtungen mit Gleichstrom ist mit folgenden Kosten²¹ zu rechnen:

- 30 bis 200 Euro/m Tiefbaukosten (30 Euro/m in freiem Gelände, 200 Euro/m im bebauten Bereich bei komplexen Bedingungen),
- 150 Euro/m Kabelkosten.

Zur Energieversorgung der Umspannstationen ist zusätzlich zur o. g. Längsverkabelung eine Wechselstromversorgung auf Mittelspannungsebene vorzusehen. Um die Stromstärken in der Erdverkabelung und die Kosten für die zu verlegenden Kabel im Rahmen zu halten, sind die Umspannstationen im Abstand von einem Kilometer anzuordnen.

Für die Energieversorgung der Umspannstationen ist mit Kosten von 100 Euro/m zu rechnen (zusätzliche Tiefbaukosten fallen nicht an, da die gesamte Längsverkabelung in einem Kabelgraben ausgeführt werden kann).

²¹ Die hier genannten Werte basieren auf dem Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr) sowie auf verfügbaren Ausschreibungsergebnissen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen.

2.2.6 Konduktive Ladeeinrichtungen (Stromschienen) in der Fahrbahndecke

Aus der Literatur- und Internetrecherche sind folgende Beispiele für konduktives Laden über Stromschienen bekannt, die für den Betrieb von Lkw geeignet sind:

- Das (bipolare) System der Fa. Volvo, das nach den verfügbaren Informationen für eine Gleichstromversorgung mit 700 V sowie einen Leistungsbezug von 200 kW/Fahrzeug ausgelegt ist. Es sind aber keine systematischen Grenzen erkennbar, warum das System nicht für höhere Spannungen und höhere Ströme geeignet sein sollte.
- Das (unipolare) System APS der Fa. Alstom, das derzeit ausschließlich für eine 750 V-Gleichstromversorgung von Straßenbahnen mit den Schienen als Rückleiter ausgelegt ist. Dieses System ist nach den verfügbaren Informationen für Leistungen bis ca. 1 MW geeignet.

Nach den Ergebnissen der durchgeführten Literatur- und Internetrecherche ist für die Stromschienen in der Fahrbahn (inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente) mit Baukosten von ca. 1,8 bis 2,0 Mio. Euro zu rechnen.²² Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Komponenten des konduktiven Ladesystems mittels Stromschienen und deren Merkmale.

²² Aufgrund der sehr dürftigen Datenbasis ist dieser Wert jedoch als grober Schätzwert anzusehen, der durch detailliertere Kostenberechnungen abzusichern wäre, falls das Ladesystem „Stromschiene“ weiter verfolgt werden sollte.

Tabelle 15: Komponenten der konduktiven Ladeinfrastruktur und deren Merkmale

Komponente	Eigenschaften / Anforderungen
Energieeinspeisepunkt	Abzweig aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz des lokalen EVU, z. B. an einem Umspannwerk, an einem Erdkabel oder an einer Freilandleitung
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	20- bis 60-kV-Leitungen; Es ist mit Zuleitungslängen von 500 m (in Ballungsräumen) bis 3.000 m (in ländlichen Gebieten) zu rechnen
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	Erdkabel entlang der versorgten Strecke für 1,0-1,5 kV Gleichspannung; Variante 1: Verkabelung beidseits der Strecke Variante 2: Fahrbahnquerungen in regelmäßigen Abständen (Durchörterungen mit erhöhten Tiefbau- aber geringeren Kabelkosten ggü. Variante 1)
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Erdkabel entlang der versorgten Strecke für 20-60 kV Wechselspannung, um die notwendigen Kabelquerschnitte für die Gleichspannungsversorgung in Grenzen zu halten (eine durchgehende Verkabelung über mehrere km würde zu Kabelquerschnitten wie bei den geplanten HGÜ-Nord-Süd-Trassen oder darüber führen)
Umspannstationen	Schaltschrank/Container mit Trafo und Gleich-/Wechselrichter; Anordnung der Umspannstation einseitig am Fahrbahnrand im Abstand von ca. 1 km, die dann eine Erdverkabelung mit hohem Leiterquerschnitt entlang der Autobahn versorgt
Stromleiter, einschl. Schaltvorrichtungen und Sensorik	Zwei mit Isolatoren segmentierte Stromleiter längs der Fahrbahn. Die Segmente werden automatisch eingeschaltet, wenn ein Fahrzeug mit Stromabnehmer das Segment überquert. Die Länge der Segmente richtet sich nach der jeweiligen Fahrzeuglänge

2.2.7 Betriebliche Aspekte

Beim konduktiven Ladesystem mittels Stromschienen bestehen höhere Anforderungen an die Sicherungstechnik als bei der Oberleitungsinfrastruktur, da die Stromschienen in der Fahrbahn eingelassen und damit leichter zugänglich sind als Oberleitungen. Durch geeignete Sicherungsmaßnahmen ist unbedingt zu vermeiden, dass Personen, die sich auf der Fahrbahn befinden (z. B. bei Baustellen, Stau, Unfällen oder Pannen) mit der stromführenden Ladeinfrastruktur in Berührung kommen.

Der Einbau der Stromschienen in die Fahrbahn ist mit erheblichen baulichen Eingriffen in die Fahrbahndecke verbunden, an den Längsfugen entlang der Stromschienen besteht die Gefahr, dass Wasser eindringt und Schäden an der Fahrbahnoberfläche verursacht werden. Bei Sanierungsarbeiten an der Fahrbahndecke ist mit Erschwernissen zu rechnen, die erhebliche Mehrkosten verursachen können.

Darüber hinaus besteht evtl. die Gefahr, dass Fahrzeuge, insbesondere Motorräder, bei nasser Fahrbahn auf den Stromschienen ins Schleudern geraten. Deshalb ist darauf zu achten, dass die Stromschienen ausreichende Haftungsbeiwerte aufweisen (was im Gegensatz zu der Anforderung steht, dass die Stromabnehmer der Hybrid-Lkw möglichst gut und abriebfrei auf den Stromschienen gleiten können).

Der wesentliche Vorteil der konduktiven Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen gegenüber der Oberleitungsinfrastruktur besteht darin, dass Pkw relativ problemlos ebenfalls über diese Ladeinfrastruktur mit Energie versorgt werden können. Jedoch müssen die Leiterabschnitte für die Nutzung durch Pkw soweit verkürzt werden, dass sie zur Fahrzeuglänge des Pkw passen. Dies bedeutet Mehraufwand hinsichtlich der Schalteinrichtungen und der Sensorik.

2.2.8 Kostenschätzung der straßenseitigen Infrastruktur für das konduktive Ladesystem mittels Stromschienen

Wie bei der Oberleitungsinfrastruktur erfolgt die Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen für zwei Ausstattungsvarianten der Hybrid-Lkw:

- *Variante 1:* Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen für Hybrid-Lkw, die mit einem Dieselmotor ausgestattet sind und demnach nur kleine Batterieeinheiten (wenige kWh) benötigen
- *Variante 2:* Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen für Hybrid-Lkw, die ohne Dieselmotor ausgestattet sind und demzufolge größere Batterieeinheiten (> 150 kWh) benötigen.

Außerdem wird jeweils zwischen zwei Ausstattungsvarianten hinsichtlich der Abdeckung der Autobahnen mit Stromschienen unterschieden:

- *Variante A:* Mindestabdeckung der Autobahnen mit Stromschienen, die für die Startphase des Hybrid-Lkw-Betriebs in einem ausgewählten Teilnetz ausreichend erscheint.
- *Variante B:* Notwendige Abdeckung der Autobahnen mit Stromschienen für den Vollbetrieb des gesamten Autobahnnetzes.

Darüber hinaus erfolgt eine Differenzierung der Kostenschätzung nach günstigen Randbedingungen (Best-Case-Betrachtung) und ungünstigen Randbedingungen (Worst-Case-Betrachtung).

Die in den nachfolgenden Tabellen angegebenen Werte basieren auf den folgenden Informationsquellen:

- Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (BMVI 2010)
- Ergebnisse verfügbarer Auvikivsschreibungen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen
- Literatur- und Internetrecherchen
- Bericht der Fa. SYSTRA über das LUAS City Broombridge (BXD) Projekt in Dublin: Feasibility of Alternative Power Supply Systems for the LUAS BXD, 20. April 2012, Ref.: O-IRL-12-B309-REP-0001
- Ergebnisse des EU-Projekts FABRIC – Feasibility analysis and development of on-road charging solutions für future electric vehicles, veröffentlicht unter <http://www.fabric-project.eu/> (EU o.J.)

Tabelle 16: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1A (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA/3km, d. h. 1 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,3 Mio. Euro pro Umspannstation	300.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100 m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	1.800.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	255.000,--
Gesamt		2.795.000,--

Tabelle 17: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1A (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA/3km, d. h. 1 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,3 Mio. Euro pro Umspannstation	300.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	2.000.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	295.000,--
Gesamt		3.260.000,--

Tabelle 18: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1B (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000 Euro /km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca.50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 6 MVA/3 km, d. h. 2 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,6 Mio. Euro pro Umspannstation	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	1.800.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	285.000,--
Gesamt		3.125.000,--

Tabelle 19: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1B (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 6 MVA/3km, d. h. 2 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,6 Mio. Euro pro Umspannstation	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	2.000.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	325.000,--
Gesamt		3.590.000,--

Tabelle 20: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2A (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000 Euro /km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA/3 km, d. h. 1 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,3 Mio. Euro pro Umspannstation	300.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	1.800.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	255.000,--
Gesamt		2.795.000,--

Tabelle 21: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2A (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 3 MVA/3 km, d. h. 1 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 0,3 Mio. Euro pro Umspannstation	300.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	2.000.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	295.000,--
Gesamt		3.260.000,--

Tabelle 22: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2B (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau (Best-Case-Betrachtung))

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA/3 km, d. h. ca. 8,3 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 2,5 Mio. Euro pro Umspannstation	2.500.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	1.800.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	475.000,--
Gesamt		5.215.000,--

Tabelle 23: Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2B (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau (Worst-Case-Betrachtung))

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 100.000 Euro je km Strecke (einseitig)	100.000,--
Umspannstationen	ca. 300.000 Euro pro MVA (inkl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA/3km, d. h. ca. 8,3 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 2,5 Mio. Euro pro Umspannstation	2.500.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1 km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100 m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000 Euro/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn inkl. Schaltvorrichtungen und Sensorik für das An- und Abschalten der Segmente	Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche	2.000.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	515.000,--
Gesamt		5.680.000,--

Tabelle 24: Zusammenstellung der Gesamtkosten der konduktiven Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen (Mittelwert zwischen Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung) in den unterschiedlichen Varianten

Variante	Ausprägung	Kosten [Mio. Euro/km]	Mehrkosten gegenüber Oberleitungsinfrastruktur [%]
1A	Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Startphase	3,03	78
1B	Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Endzustand	3,36	68
2A	Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase	3,03	78
2B	Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Endzustand	5,45	33

Unter den hier getroffenen Annahmen und Kostenschätzungen ist die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in allen betrachteten Varianten deutlich teurer als die Oberleitungsinfrastruktur.

2.3 Alternative Ladeinfrastrukturen – induktives Ladungssystem

2.3.1 Generelle Anforderungen an die straßenseitige Infrastruktur für das induktive Ladungssystem

Bei diesem System erfolgt die elektrische Versorgung der Fahrzeuge über Induktionsschleifen, die in die Fahrbahndecke eingebaut werden. Die Versorgung der mit entsprechenden Stromabnehmern versehenen Fahrzeuge erfolgt berührungslos. Die beiden nachfolgenden Abbildungen verdeutlichen das Prinzip des induktiven Ladungssystems.



Abbildung 13: Prinzip der induktiven Ladung – Induktionsschleifen (Quelle: EU o.J.)

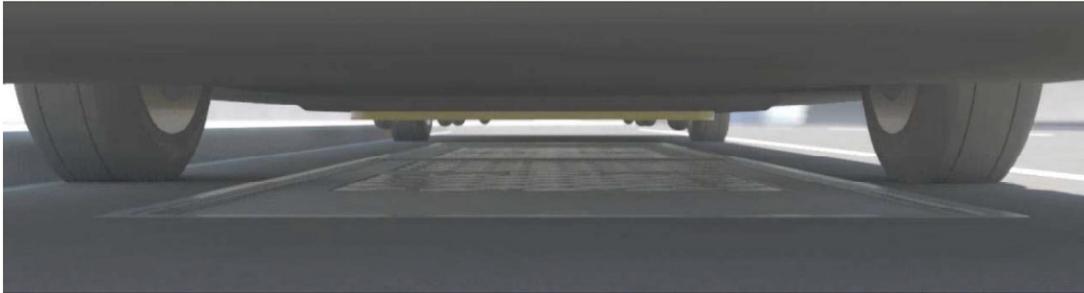


Abbildung 14: Prinzip der induktiven Ladung – Stromabnehmer am Fahrzeug (Quelle: EU o.J.)

Entsprechend den konduktiven Ladungssystemen wird auch bei der induktiven Ladung davon ausgegangen, dass die elektrisch zu versorgenden Lkw auch Teilabschnitte ohne Einrichtungen zur induktiven Ladung überbrücken können. Dies ist notwendig, da die Infrastruktur für das induktive Laden auf Brücken, in Tunneln sowie in Streckenabschnitten mit armierten Betonfahrbahnen nur schwierig oder gar nicht aufbaubar ist. Auch auf Strecken mit nicht armierten Betonfahrbahnen ist das Ausfräsen der Fahrbahn für die erforderlichen induktiven Ladeeinrichtungen schwierig und derzeit in den einschlägigen Normen nicht vorgesehen.

Daraus folgt, dass die elektrisch zu versorgenden Lkw genügend Energie auf den mit Ladeinfrastruktur ausgerüsteten Bereichen aufnehmen müssen, um die Bereiche ohne Ladeinfrastruktur sowie die Fahrt zum Ziel außerhalb der Autobahn absolvieren zu können.

Die Leistungsfähigkeit der induktiven Ladung ist jedoch beschränkter als die Leistung der kontaktbasierten Ladung, sodass die auszustattenden Strecken länger werden. Derzeit ist kein System am Markt verfügbar, das über 250 kW je Fahrzeug für die Versorgung bereitstellen kann.²³ Entsprechend muss die Fahrt auf der Autobahn eine längere Strecke andauern, bevor ein Ziel im Sekundärnetz ohne Zwischenladen erreicht werden kann.

Die Ladeleistung der induktiven Ladeinfrastruktur ist nicht nur durch die Batterie, sondern auch durch die von den Fahrzeugen übertragbare Leistung begrenzt. Bei ca. 250 kW übertragbarer Leistung je Fahrzeug und im Mittel ca. 150 kW bezogener Leistung für das reine Fahren ist nur eine sehr langsame Ladung der Batterien über die induktive Ladeinfrastruktur möglich. Daher ist davon auszugehen, dass eine möglichst flächendeckende Ausstattung des Autobahnnetzes mit induktiver Ladeinfrastruktur erforderlich sein wird.

²³ Vgl. Ergebnisse des EU-Projekts FABRIC – Feasibility analysis and development of on-road charging solutions für future electric vehicles (EU o.J.)

2.3.2 Komponenten der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Ladungssystem

Die straßenseitige Infrastruktur für das induktive Laden besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- Energieeinspeisung aus dem Mittelspannungsnetz der EVU
- Längsverkabelung für die Energieversorgung mit Wechselstrom entlang der Autobahn
- Zuleitungen zwischen Energieeinspeisung und Längsverkabelung entlang der Autobahn
- Transformatorstationen an der Autobahn
- Inverter (Wechselrichter) am Fahrbahnrand
- Induktive Ladeeinrichtungen (Induktionsschleifen) unter der Fahrbahndecke.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen geben einen systematischen Überblick über die straßenseitigen Komponenten der induktiven Ladeinfrastruktur.

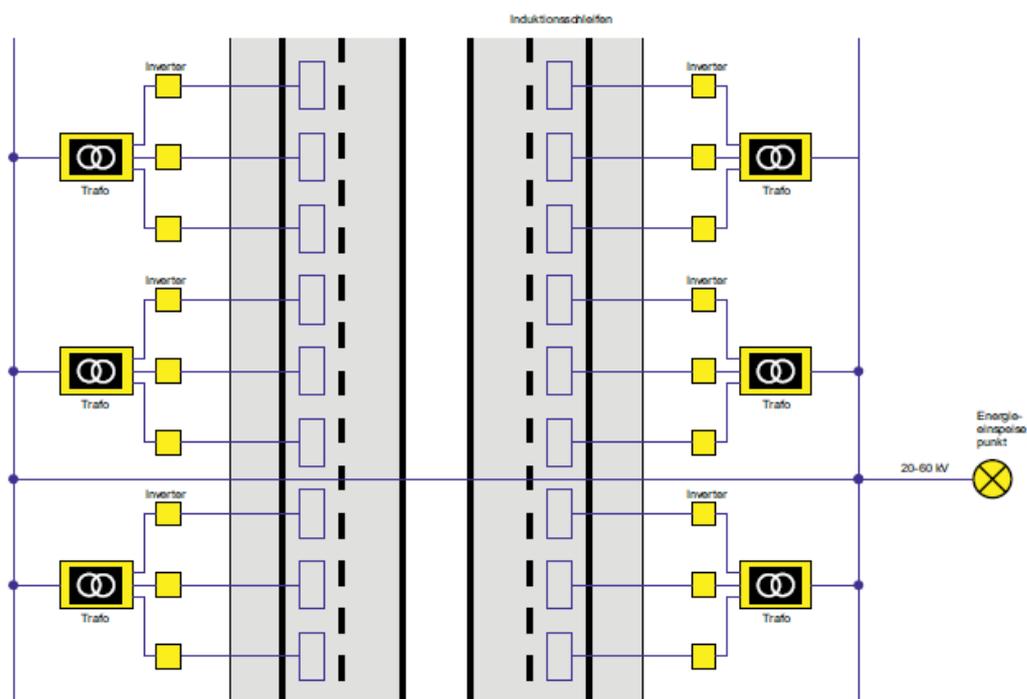


Abbildung 15: Aufbau der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Laden

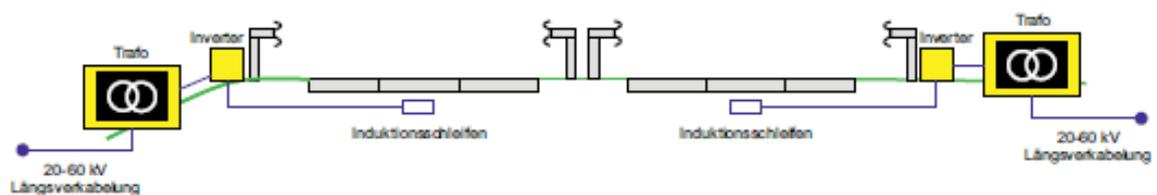


Abbildung 16: Anordnung der induktiven Ladeinfrastruktur im Straßenquerschnitt

2.3.3 Energieeinspeisung und Zuleitungen

Wie bei der elektrischen Versorgung mittels Oberleitungsinfrastruktur werden auch bei der induktiven Ladung so hohe Leistungen für einen Streckenabschnitt benötigt, dass eine Einspeisung aus dem Mittelspannungsnetz notwendig ist.

Für die Anschlüsse an das Mittelspannungsnetz und für die Zuleitungen zur Autobahn entstehen vergleichbare Kosten wie bei der Oberleitungsinfrastruktur.

Für die Energieversorgung der Transformatorstationen entlang der Autobahn ist keine Gleichrichtung erforderlich. Für die Längsverkabelung entlang der Strecke zur Versorgung der Transformatorstationen mit Wechselspannung ist mit folgenden Kosten²⁴ zu rechnen:

- 30 bis 200 Euro/m Tiefbaukosten (30 Euro/m in freiem Gelände, 200 Euro/m im bebauten Bereich bei komplexen Bedingungen),
- 100 Euro/m Kabelkosten.

2.3.4 Transformatorstationen

Entlang der mit induktiver Ladeinfrastruktur auszurüstenden Streckenabschnitte sind Transformatorstationen anzuordnen, welche das eigentliche induktive Ladesystem (Inverter und Induktionsschleifen) jeweils mit ca. 250 kW Leistung versorgt. Wegen der Leistungsübertragung auf 400-V-Ebene mit entsprechend hohen Leitungsquerschnitten sind Transformatorstationen im Abstand von ca. 250 m einzurichten.

Für die Transformatorstationen ist nach den durchgeführten Literatur- und Internetrecherchen mit Kosten von rund 15.000 Euro/Stück zu rechnen.

2.3.5 Inverter und Induktionsschleifen

Das eigentliche induktive Ladesystem besteht aus Invertern (Wechselrichtern) unmittelbar am Fahrbahnrand und Induktionsschleifen unter der Fahrbahndecke. Jeder Inverter speist jeweils eine Induktionsschleife.

Die Induktionsschleifen sind entlang der mit induktiver Ladeinfrastruktur auszurüstenden Streckenabschnitte flächendeckend in die Fahrbahnoberfläche einzubauen. Hierbei kommen nur Systeme infrage, die so tief eingebracht werden können, dass sie eine Sanierung der Deckschicht zuverlässig überstehen, da ansonsten mit jeder Fahrbahnerneuerung dieser Systemteil komplett erneuert werden muss. Nach den praktischen Erfahrungen mit

²⁴ Die hier genannten Werte basieren auf dem Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr) sowie auf verfügbaren Ausschreibungsergebnissen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen.

Induktionsschleifen für die Verkehrsdatenerfassung ist eine Mindestüberdeckung von 50 mm, besser 80 mm erforderlich.²⁵

Für die Installation des induktive Ladesystem (Inverter und Induktionsschleifen, inkl. notwendiger Zuleitungen ab der Transformatorstation) ist mit Kosten von 0,8 bis 1,6 Mio. Euro/km zu rechnen.²⁶ Für die Ausrüstung beider Fahrtrichtungen mit induktiver Ladeinfrastruktur entstehen demnach Kosten in Höhe von 1,6 bis 3,2 Mio. Euro/km.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Komponenten der induktiven Ladefrastruktur und deren Merkmale.

Tabelle 25: Komponenten der induktiven Ladefrastruktur und deren Merkmale

Komponente	Eigenschaften / Anforderungen
Energieeinspeisepunkt	Abzweig aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz des lokalen EVU, z. B. an einem Umspannwerk, an einem Erdkabel oder an einer Freilandleitung
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	20- bis 60-kV-Leitungen; es ist mit Zuleitungslängen von 500 m (in Ballungsräumen) bis 3.000m (in ländlichen Gebieten) zu rechnen
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Erdkabel entlang der versorgten Strecke für 20-60 kV Wechselspannung; Variante 1: Verkabelung beidseits der Strecke Variante 2: Fahrbahnquerungen in regelmäßigen Abständen (Durchörterungen mit erhöhten Tiefbau- aber geringeren Kabelkosten gegenüber Variante 1)
Transformatorstationen	Wegen der Leistungsübertragung auf 400-V-Ebene mit entsprechend hohen Leitungsquerschnitten sind Trafostationen im Abstand von ca. 250m zu errichten, welche die Inverter der Induktionsschleifen mit je ca. 250 kW Leistung versorgen
Inverter	Wechselrichter, die jeweils eine Schleife speisen. Die Inverter sind unmittelbar am Fahrbahnrand zu installieren
Induktionsschleifen	Die Induktionsschleifen sind flächendeckend in den Fahrbahnen einzubauen. Die Asphaltüberdeckung der Induktionsschleifen muss mindestens so groß sein, dass eine Fahrbahndeckensanierung ohne Beschädigung der Einrichtungen für das induktive Laden durchgeführt werden kann

2.3.6 Betriebliche Aspekte

Wie beim konduktiven Ladesystem mittels Stromschienen ist auch der Einbau der Induktionsschleifen in die Fahrbahn mit erheblichen baulichen Eingriffen in die Fahrbahndecke verbunden. An den Schnittfugen besteht die Gefahr, dass Wasser eindringt und Schäden an der Fahrbahnoberfläche verursacht. Bei Sanierungsarbeiten an der Fahrbahndecke ist dagegen nicht mit Erschwernissen zu rechnen, falls die Induktionsschleifen tief genug in

²⁵ Vgl. BASt (2012) (Bundesanstalt für Straßenwesen)

²⁶ Siehe Ergebnisse des EU-Projekts FABRIC – Feasibility analysis and development of on-road charging solutions für future electric vehicles, veröffentlicht unter <http://www.fabric-project.eu>

die Fahrbahn eingebaut werden. Beim Einbau der Induktionsschleifen ist zu prüfen, ob die Tragschicht der Fahrbahn verstärkt werden muss.

Der wesentliche Vorteil der induktiven Ladeinfrastruktur gegenüber der Oberleitungsinfrastruktur besteht darin, dass Pkw relativ problemlos ebenfalls über diese Ladeinfrastruktur mit Energie versorgt werden können.

2.3.7 Kostenschätzung der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Ladungssystem

Die in den nachfolgenden Tabellen angegebenen Werte basieren auf den folgenden Informationsquellen:

- Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010 (herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr)
- Ergebnisse verfügbarer Ausschreibungen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Autobahnen
- Literatur- und Internetrecherchen
- Ergebnisse des EU-Projekts FABRIC – Feasibility analysis and development of on-road charging solutions für future electric vehicles, veröffentlicht unter <http://www.fabric-project.eu> (EU o.J.).

Im Gegensatz zu den konduktiven Ladesystemen (Oberleitungen bzw. Stromschienen) sind die streckenbezogenen Kosten der induktiven Ladeinfrastruktur unabhängig von der Fahrzeugtechnik, da die Leistungsabgabe des induktiven Ladesystems auf 250 kW je Fahrzeug beschränkt ist. Demzufolge ist eine flächendeckende Ausstattung des Autobahnnetzes mit induktiver Ladeinfrastruktur erforderlich, unabhängig davon, ob die Hybrid-Lkw mit Dieselmotoren und kleinen Batterieeinheiten oder ohne Dieselmotoren und großen Batterieeinheiten ausgerüstet sind.

Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die Investitionskosten für die induktive Ladeinfrastruktur, differenziert nach günstigen Randbedingungen (Best-Case-Betrachtung) und ungünstigen Randbedingungen (Worst-Case-Betrachtung).

Tabelle 26: Kostenschätzung für die induktive Ladeinfrastruktur (Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000 Euro/km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Transformatorstationen	ca. 15.000 Euro pro Station; bei einem Raster von 250 m ergeben sich Kosten von 600.000 Euro/km (beidseitige Anordnung der Trafostationen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m; unter der Annahme, dass die Trafostationen im Abstand von 250 m beidseitig der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100 m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 80.000 Euro/km	80.000,--
Inverter + Induktionsschleifen	Gemäß den Angaben aus dem EU-Projekt FABRIC (EU o.J.) ist für das eigentliche Induktionssystem mit Kosten von mind. 1,8 Mio. Euro je km (für beide Fahrrichtungen) zu rechnen	1.800.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	281.000,--
Gesamt		3.091.000,--

Tabelle 27: Kostenschätzung für die induktive Ladeinfrastruktur (Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [Euro/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000 Euro/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; bei Ø 2,5 km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000 Euro pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000 Euro/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	ca. 50 Euro pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang der zu versorgenden Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100 Euro pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000 Euro je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000 Euro je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Transformatorstationen	ca. 15.000 Euro pro Station; bei einem Raster von 250 m ergeben sich Kosten von 600.000 Euro/km (beidseitige Anordnung der Trafostationen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100 Euro pro lfd. m; unter der Annahme, dass die Trafostationen im Abstand von 250 m beidseitig der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100 m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 80.000 Euro/km	80.000,--
Inverter + Induktionsschleifen	Gemäß den Angaben aus dem EU-Projekt FABRIC (EU o.J.) ist für das eigentliche Induktionssystem mit Kosten von bis zu 3,2 Mio. Euro je km (für beide Fahrtrichtungen) zu rechnen	3.200.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10 % der Investitionskosten	443.500,--
Gesamt		4.878.500,--

2.4 Kostenvergleich der verschiedenen Ladeinfrastruktursysteme

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit elektrischer Ladeinfrastruktur unter verschiedenen Randbedingungen hinsichtlich Fahrzeugtechnik und Netzabdeckung.

Tabelle 28: Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit elektrischer Ladeinfrastruktur

Systemvariante	Ausstattungsmerkmale	Investitionsbedarf [Mrd. Euro]		
		Oberleitungen	Stromschienen	Induktionsschleifen
1A	Fahrzeugtechnik: Hybrid-Lkw mit Dieselmotor (geringe Ausstattungsquote) Netzabdeckung mit elektrischer Ladeinfrastruktur: 3.600 km (90 % eines „Startnetzes“ von 4.000 km) Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: ca. 4.000 km	6,1	10,9	14,3
1B	Fahrzeugtechnik: Hybrid-Lkw mit Dieselmotor (hohe Ausstattungsquote) Netzabdeckung mit elektrischer Ladeinfrastruktur: 11.700 km (Endausbau) Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: ca. 13.000 km (gesamtes Autobahnnetz)	23,4	39,3	46,6
2A	Fahrzeugtechnik: Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor (geringe Ausstattungsquote) Netzabdeckung mit elektrischer Ladeinfrastruktur: 1.200 km (30 % eines „Startnetzes“ von 4.000 km) ²⁷ Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: ca. 4.000 km, zzgl. direkt anschließende An- und Abfahrtsstrecken im Sekundärnetz von/zu Be- und Entladestellen	2,0	3,6	14,3
2B	Fahrzeugtechnik: Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor (hohe Ausstattungsquote) Netzabdeckung mit elektrischer Ladeinfrastruktur: 3.900 km (Endausbau) ²⁸ Elektrisch (inkl. Batteriebetrieb) befahrbare Strecke: 13.000 km (gesamtes Autobahnnetz, zusätzlich An- und Abfahrtsstrecken im Sekundärnetz von/zu Be- und Entladestellen)	16,0	21,3	46,6

²⁷ Dies gilt nur für die konduktiven Ladesysteme (Oberleitungen bzw. Stromschienen). Beim induktiven Ladesystem ist – unabhängig von der Fahrzeugtechnik – eine flächendeckende Ausrüstung notwendig, sodass bei der Ermittlung des Investitionsbedarfs für das induktive Ladesystem von einer 90 %-igen Netzabdeckung auszugehen ist.

²⁸ s. o.

Unter den getroffenen Annahmen, den zu Grunde gelegten Rahmenbedingungen und den aus verschiedenen Quellen abgeleiteten Kostenansätzen schneidet die Oberleitungsinfrastruktur in allen betrachteten Varianten deutlich kostengünstiger ab als die alternativen Ladeinfrastrukturen (Stromschienen bzw. Induktionsschleifen).

2.5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse der straßenseitigen Ladeinfrastruktur wurden drei alternative Systeme betrachtet:

- Konduktives Ladungssystem über Oberleitungen,
- konduktives Ladungssystem über Stromleiter in der Fahrbahnoberfläche sowie
- induktives Ladungssystem mittels Induktionsschleifen unter der Fahrbahnoberfläche.

Zunächst wurden jeweils die maßgebenden Komponenten der Ladungssysteme identifiziert und deren technische und funktionale Merkmale analysiert. Anschließend wurden die Kosten der einzelnen Komponenten abgeschätzt, wobei zwei Varianten der fahrzeugseitigen Ausstattung unterschieden wurden, nämlich:

- Lkw, die mit einem Dieselmotor ausgestattet sind und demnach nur kleine Batterieeinheiten (wenige kWh) benötigen, bzw.
- Lkw, die ohne Dieselmotor ausgestattet sind und demzufolge größere Batterieeinheiten (> 150 kWh) benötigen,

sowie zwei Varianten hinsichtlich der Abdeckung der Autobahnen mit Ladeinfrastruktur betrachtet wurden, und zwar:

- Mindestabdeckung der Autobahnen mit Ladeinfrastruktur, die für die Startphase des Hybrid-Lkw-Betriebs in einem ausgewählten Teilnetz ausreichend erscheint, bzw.
- notwendige Abdeckung der Autobahnen mit Ladeinfrastruktur für den Vollbetrieb des gesamten Autobahnnetzes.

Darüber hinaus erfolgte eine Differenzierung der Kostenschätzung nach günstigen Randbedingungen (Best-Case-Betrachtung) und ungünstigen Randbedingungen (Worst-Case-Betrachtung).

Die Kostenschätzung ergab, dass die straßenseitige Infrastruktur des Oberleitungssystems in allen Varianten deutlich kostengünstiger ist als die beiden anderen in die Untersuchung einbezogenen Ladeinfrastrukturen (Stromschienen bzw. Induktionsschleifen). Der Kostenvorteil des Oberleitungssystems gegenüber dem konduktiven Ladungssystem über Stromschienen beträgt – je nach betrachteter Variante – rund 33 bis 80 %, die Kosten für die straßenseitige Infrastruktur des induktiven Ladungssystems liegen in allen Varianten um mehr als 100 % über den Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur.

Ergänzend zur Kostenschätzung der straßenseitigen Infrastruktur für die drei betrachteten Ladungssysteme wurden auch einige betriebliche Aspekte beleuchtet, die sich aus der

Einrichtung der Ladeinfrastruktur ergeben können. Diese Aspekte konnten in der vorliegenden Studie jedoch nur angerissen werden, und sollten näher untersucht werden. Weiterer Untersuchungsbedarf wird insbesondere im Hinblick auf die folgenden Aspekte gesehen:

- Nutzungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur durch Pkw und daraus resultierende technische, fachliche, betriebliche und wirtschaftliche Wirkungen;
- Bewertung der alternativen Ladungssysteme im Hinblick auf die Akzeptanz bei Anwohnern und Nutzern;
- Bewertung der alternativen Ladungssysteme im Hinblick auf resultierende Verkehrseinschränkungen und -störungen bei der Installation der straßenseitigen Infrastruktur und beim Betrieb der Ladungssysteme sowie
- Bewertung der alternativen Ladungssysteme im Hinblick auf die Verkehrssicherheit.

3 Fahrzeuge

Hauptbearbeiter/innen: A. Kühn, T. Gnann, P. Plötz, C. Moll, D. Speth (Fraunhofer ISI), S. Stütz, M. Schellert (Fraunhofer IML)

3.1 Einleitung

Die Potentiale von HO-Lkw und damit verbundenen Treibhausgasemissionsreduktionen hängen einerseits von der absoluten Anzahl der Fahrzeuge und deren Zusammensetzung nach Gewichtsklassen ab. Darüber hinaus ergeben sich sowohl für den konventionellen Dieselantrieb als auch für potentielle alternative Antriebstechnologien (PHE, BEV, CNG/LNG und HO) unterschiedliche Betriebskosten. Diese hängen von technologiespezifischen Bestimmungsgrößen wie Kraftstoffverbrauch, Anschaffungs- und Wartungskosten sowie Kosten durch Nutzlast-/Nutzvolumenverluste und von technologieunspezifischen Determinanten wie der jährlichen Fahrleistung ab. Alle Bestimmungsgrößen für das Marktpotential für HO-Lkw und den alternativen Antriebstechnologien werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2 Entwicklung des Fahrzeugbestands nach Gewichtsklassen (GK)

3.2.1 Abgrenzung des Nutzfahrzeugbestandes nach Gewichtsklassen

Die deutsche Nutzfahrzeugflotte besteht derzeit (Stand 2014) aus etwa 2,7 Millionen Fahrzeugen (KBA 2014a). Im Gegensatz zum Pkw-Bestand variiert der Nutzfahrzeugbestand deutlich hinsichtlich des Gewichts der Fahrzeuge (zulässiges Gesamtgewicht – zul. GGW.) und der Nutzungsart. Beide Attribute bestimmen die Fahrleistung der Fahrzeuge: Schwere Fahrzeuge fahren im Mittel mehr als leichte Fahrzeuge. Baufahrzeuge fahren weniger als Seitenplaner und Lkw mit Kofferaufbauten (KBA 2015a und WVI et al. 2010). Zudem verbrauchen schwere Lkw mehr Kraftstoff und die Wartungskosten, und die Investitionen steigen mit wachsendem Gesamtgewicht. Um die Fahrzeugparameter möglichst genau angeben zu können, wurde daher die Nutzfahrzeugflotte für diese Studie hinsichtlich ihrer Aufteilung in Aufbauarten und Gewichtsklassen im Detail untersucht.

Die Nutzungsart der Fahrzeuge lässt sich aus den Aufbauarten ableiten. Typische Aufbauarten in der deutschen Nutzfahrzeugflotte sind: Seitenplaner, Container (Wechselaufbau), (Kühl-)Koffer und Kipper (KBA 2014a). Während Kipper im Bauverkehr eingesetzt werden, werden Lebens- und Genussmittel in Kühlkoffern transportiert. Der Großteil der Güter im Fernverkehr wird mit Seitenplanern transportiert (KBA 2015a).

Neben den Aufbauarten lassen sich die Fahrzeuge nach ihrem zulässigen Gesamtgewicht einteilen. Dies reicht von 3,5 t bei leichten Nutzfahrzeugen bis 40 t bei Sattelzügen. Laut

Straßenverkehrs-Zulassungs-Verordnung (StVZO 2012, §34) können Solofahrzeuge mit bis zu vier Achsen mit einem maximalen zulässigen Gesamtgewicht von 32 t zugelassen werden. Die Gesamtmasse von Kombinationen aus Zugmaschinen und Anhängern (Sattelzüge und Gliederzüge) ist in Deutschland im Regelfall auf 40 t begrenzt. Je detaillierter die Aufteilung der Nutzfahrzeugflotte in Gewichtsklassen (GK) erfolgt, desto präziser repräsentieren die Parameter (z. B. Kraftstoffverbrauch, Investitionen) die einzelnen Fahrzeuge. Allerdings sinkt mit einer Detaillierung der Abbildung die Datenverfügbarkeit: Da jedoch sowohl Zulassungs- und Bestandszahlen als auch die meisten Parameter nur für bestimmte Gewichtsklassen verfügbar sind, wurde für diese Studie folgende – an der Shell-Lkw-Studie orientierte – Einteilung gewählt (Shell 2016):

- Gewichtsklasse **GK1**: 0 bis 3,5 t zul. GGW
- Gewichtsklasse **GK2**: 3,51 bis 7,5 t zul. GGW
- Gewichtsklasse **GK3**: 7,51 bis 12 t zul. GGW
- Gewichtsklasse **GK4**: 12,1 bis 26 t zul. GGW
- Gewichtsklasse **GK5**: 26 t bis 32 t zul. GGW
- Gewichtsklasse **SZM**: 40 t zul. GGW.

Die aus den Aufbauarten abgeleitete Nutzungsart variiert zwischen den Gewichtsklassen (siehe Abbildung 17). Während in den Gewichtsklassen GK2, GK3 und GK4 der Nutzfahrzeugbestand hinsichtlich der Aufbauart eine Heterogenität aufweist, dominieren in der GK1 die Kofferaufbauten (z. B. Mercedes Sprinter, VW Crafter) und bei den SZM die Seitenplaner. Das hohe zulässige Gesamtgewicht in GK5 von bis zu 32 t führt dazu, dass diese Fahrzeuge zum Großteil im Bauverkehr (z. B. Transportbeton-Lkw, Kipper) eingesetzt werden.

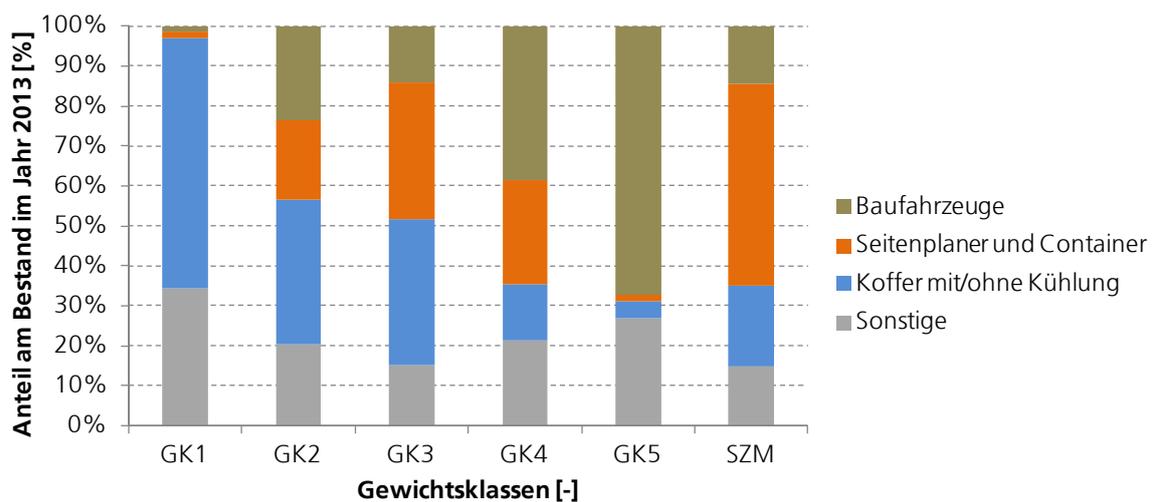


Abbildung 17: Aufteilung des Bestandes 2013 nach Gewichtsklassen und Aufbauarten (KBA 2014a)

Die mittlere jährliche Fahrleistung (FL) von Baufahrzeugen liegt mit 20.000 bis 30.000 km deutlich unter der Jahresfahrleistung von Sattelzügen (~ 100.000 km/a) (KBA 2015a). Für die GK5 gilt somit nicht der grundlegende Zusammenhang, dass mit steigendem Gesamtgewicht die Jahresfahrleistung wächst. Da mit sinkender Jahresfahrleistung auch die Anzahl der Fahrzeugkilometer auf Autobahnen zurückgeht und Baufahrzeuge vorwiegend kurze regionale Strecken zurücklegen (KBA 2015a), deren Ausstattung mit Oberleitung unwirtschaftlich ist, wird für die Studie die Gewichtsklasse GK5 nicht weiter betrachtet. Sämtliche Parameter werden daher nur für die Gewichtsklassen GK1 bis GK4 sowie SZM ausgewiesen. Gliederzüge als Kombination aus Lkw der GK4 und Anhänger werden aufgrund ihres zulässigen Gesamtgewichtes von 40 t wie Sattelzüge (SZM) behandelt.

3.2.2 Entwicklung von Bestand und Neuzulassungen je Gewichtsklasse

Um die zukünftige Entwicklungen der CO₂-Emissionen und absolute Marktpotentiale von Hybrid-Oberleitungs-Lkw abschätzen zu können, bedarf es an Informationen über zukünftige Entwicklung des Nutzfahrzeugbestandes. Für die Geschwindigkeit der Diffusion alternativer Antriebstechnologie sind zudem die jährlichen Neuzulassungen von Relevanz. Diese setzen sich einerseits aus den Ersetzungen altersbedingt stillgelegter oder exportierter Fahrzeuge und aus dem Flottenwachstum zusammen. Aus den Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) ergeben sich für die vergangenen Jahre folgende mittlere Nutzungsdauern und daraus abgeleitet der Anteil der Flotte, der jährlich ersetzt wird.

Tabelle 29: Nutzungsdauern und Ersetzungsraten bei Nutzfahrzeugen

Nutzfahrzeuge 2015 und 2030		Gewichtsklasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Nutzungsdauer	Jahre	8	[2]	12	[2]	10	[2]	10	[2]	6	[2]
Jährliche Ersetzung bezogen auf den Bestand	%	13	[2], [3]	8	[2], [3]	10	[2], [3]	10	[2], [3]	17	[2], [3]

[1] Lenz et al. 2010, [2] KBA 2015b, KBA 2015c [3] Wietschel et al. 2016a

Zusätzlich zu den jährlichen Ersetzungen wird in dieser Studie von einem Wachstum des Nutzfahrzeugbestandes ausgegangen. Dieser orientiert sich an der Prognose der Güterbeförderungs- und Fahrleistung innerhalb der durch das BMVI in Auftrag gegebenen Verkehrsverflechtungsprognose (Intraplan et al. 2014). Die Fahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen steigt demnach zwischen den Jahren 2010 und 2030 um 1,0 % jährlich. Der Verkehr von leichten Nutzfahrzeugen nimmt demzufolge bis zum Jahr 2030 um 1,4 % jährlich zu (vgl. Tabelle 30). Für die Entwicklung des Bestands wurde in dieser Studie die zentrale Annahme getroffen, dass sich die Fahrleistung der einzelnen Fahrzeuge zukünftig nicht ändert und somit der Bestand mit den gleichen Raten wie die Fahrleistung wächst.

Tabelle 30: Entwicklung der Inländerfahrleistung nach Fahrzeugarten (Intraplan et al. 2014, S. 334)

	Mrd. Fzg-km		2030/10 (%)	
	2010	2030	Insg.	p.a.
Pkw	599,0	657,4	9,7	0,5
Motorisierte Zweiräder	16,3	18,1	10,8	0,5
Omnibusse	3,3	3,5	6,3	0,3
Lkw / Sattelzugmaschinen	77,6	99,7	28,5	1,3
• Schwere Nutzfahrzeuge ²⁾	29,8	36,7	23,0	1,0
• Leichte Nutzfahrzeuge ²⁾	47,8	63,1	32,0	1,4
Sonstige Kraftfahrzeuge ³⁾	8,5	11,0	29,3	1,3
Insgesamt	704,8	789,8	12,1	0,6

1) Inländer-Fahrleistung; 2) Größer bzw. kleiner/gleich 3,5 t Nutzlast;
3) Übrige Kfz in der Abgrenzung des KBA (Polizei-, Feuerwehr und Müllfahrzeuge, Arbeitsmaschinen u.a.) sowie restliche Zugmaschinen (außer in der Landwirtschaft)

Die Definition der Fahrzeuggrößen in der Verflechtungsprognose entspricht jedoch nicht der Einteilung in Gewichtsklassen dieser Studie: Kleine Nutzfahrzeuge verfügen über eine Nutzlast von maximal 3,5 t, große Nutzfahrzeuge über mehr. Daher wurden folgende Annahmen getroffen, und mit Experten im Workshop diskutiert (Fachworkshop Wietschel et al. 2016a): Kleine Nutzfahrzeuge entsprechen weitestgehend der Gewichtsklasse GK1. Schwere Nutzfahrzeuge umfassen die Klassen GK2, GK3, GK4 und SZM. Da der Bestand von GK2 seit Jahren rückläufig ist (vgl. KBA 2015c) und keine Informationen über zukünftige Verschiebungen zwischen den Gewichtsklassen bekannt sind, wird dieser zwischen den Jahren 2015 bis 2030 absolut konstant gehalten. Das Bestandswachstum der schweren Nutzfahrzeuge von 1,0 % begrenzt sich somit auf die Gewichtsklassen GK3, GK4 und SZM. Laut Kraftfahrt-Bundesamt (KBA 2015a) blieb der Anteil der GK3 an der Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge zwischen den Jahren 2009 und 2014 weitestgehend konstant. Der Fahrleistungsanteil der SZM nahm leicht zu, der Verkehr mit Lkw der GK4 ging anteilmäßig leicht zurück. Unter Fortschreibung dieser Entwicklungen nimmt der Bestand der SZM überdurchschnittlich zu, der Bestand von Lkw der GK3 wächst durchschnittlich (~1 %), und der Anteil an der Wachstumsrate des Bestandes der GK4 ergibt sich aus der Differenz der Anteile an den schweren Nutzfahrzeugen. Im Einzelnen bedeutet dies:

- Bestand GK1 wächst um 1,4 % pro Jahr,
- Bestand GK2 bleibt konstant,
- Bestand GK3 wächst um 1,0 % pro Jahr,
- Bestand GK4 wächst um 0,4 % pro Jahr,
- Bestand SZM wächst um 1,2 % pro Jahr.

Zusammen mit den jährlichen Ersetzungen führt dies zu der in Tabelle 31 dargestellten Entwicklung der Neuzulassungen. Baufahrzeuge wurden bei den Größenklassen GK4 und SZM aufgrund von Spezialaufbauten nicht berücksichtigt (39 % in GK4 und 16 % bei den SZM). Die in Tabelle 31 dargestellten Werte beinhalten für die SZM bereits die Gliederzüge als Kombination von Lkw der GK4 und Anhängern und einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t. Aufgrund fehlender Detailinformation wurde dabei angenommen, dass der Anteil der Gliederzüge an der Fahrleistung in der GK4 (41 %) dem Anteil der Gliederzüge am Bestand entspricht (KBA 2015a).

Tabelle 31: Gerundete Neuzulassungen in den Jahren 2015 und 2030 (eigene Berechnungen basierend auf (KBA 2015c) und (Intraplan et al. 2014, S. 334)

Nutzfahrzeuge 2015 und 2030		Gewichtsklasse			Gewichtsklasse (ohne Baufahrzeuge)	
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	3,51 – 7,5 t	7,51 – 12 t	> 12 t	SZM
2015	Fzg	228.000	18.000	9.000	6.000*	34.000**
2030	Fzg	278.000	18.000	10.000	6.000*	40.000**

* ohne Gliederzüge ** mit Gliederzügen

3.3 Vergleich von Antriebssystemen für Lkw aus technischer Sicht

Obwohl derzeit der Dieselantrieb in allen Gewichtsklassen dominiert, ist zukünftig der Einsatz alternativer Antriebe bei Lkw besonders im Hinblick auf CO₂-Reduktionsziele wahrscheinlich. Neben den HO-Lkw sollen daher auch weitere Alternativen wie batterieelektrisch betriebene Lkw (BEV), Plug-in-Hybrid (PHEV), Brennstoffzellen- sowie CNG/LNG-Lkw untersucht werden. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf den Investitionen in Form der Nettolistenpreise und den variablen, fahrleistungsabhängigen Betriebskosten (z. B. Kraftstoffkosten, Wartungskosten). Um die Technologien hinsichtlich der Gesamtkosten zu vergleichen, sollen diese Kostenkomponenten im Folgenden für alle Antriebstechnologien von heute (2015) bis zum Jahr 2030 abgeschätzt werden. Aufgrund des Fokus der Studie wird der HO-Lkw und dessen mögliche Ausprägungen besonders detailliert untersucht.

3.3.1 Entwicklung Parameter für konventioneller Lkw bis 2030

Sowohl bei leichten (bis 3,5 t zul. GGW – GK1) als auch bei schweren Nutzfahrzeugen (GK2 bis SZM) dominiert der Dieselantrieb die Zulassungszahlen und den Bestand (KBA 2014b). Während bei leichten Nutzfahrzeugen erste alternative Antriebe (z. B. BEV, CNG) zur Verfügung stehen, werden bei schweren Nutzfahrzeugen derzeit bis auf einzelne LNG-Modelle nur Diesel-Fahrzeuge angeboten. Um alternative mit konventionellen Antriebskonzepten anhand einer TCO-Betrachtung vergleichen zu können, werden im Fol-

genden alle antriebstechnologieabhängigen Kosten für den Betrieb von Lkw beschrieben. Die Summe dieser Kosten entspricht allerdings nicht den gesamten Transportkosten. Diese beinhalten darüber hinaus antriebstechnologieunabhängige Kostenkomponenten wie beispielsweise Fahrerkosten und Versicherungen. Von der Art des Antriebs abhängige Kosten sind – wie in Tabelle 32 dargestellt – die Investitionen, die Kraftstoffkosten, die Wartungskosten sowie Kosten für die Abgasreinigung.

Status quo der Parameter im Jahr 2015

Die Investitionen beim Kauf von Nutzfahrzeugen variieren im Jahr 2015 sowohl zwischen als auch innerhalb der Gewichtsklassen. Während Nettolistenpreise für Sattelzugmaschinen unabhängig von der Transportaufgabe und der damit verbundenen Aufbauart des Sattelanhängers ermittelt werden können (lastauto omnibus 2013), hängen die Investitionen in den Gewichtsklassen GK1 bis GK4 auch von der Aufbauart (z. B. Betonmischer, Kipper, Seitenplaner) ab. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Antriebsarten zu gewährleisten, wurden aufbauunabhängige Nettolistenpreise in Expertenworkshops abgestimmt (Wietschel et al. 2016a). Diese betragen bei leichten Nutzfahrzeugen 30.000 Euro und steigen bei Sattelzugmaschinen auf etwa 100.000 Euro an (siehe Tabelle 32).

Die Kraftstoffkosten beim Betrieb von Lkw können bei einer Jahresfahrleistung von über 100.000 km pro Jahr bis zu 30 % der Gesamtkosten betragen (Schubert 2013, S. 136) und stellen bei Fahrleistungen in dieser Höhe nach den Fahrerkosten den zweitgrößten Anteil an den Gesamtkosten dar. Anders als bei Pkw hängt der Kraftstoffverbrauch von Lkw stärker von der Auslastung der Nutzlast der Fahrzeuge ab. Da die genauen Auslastungsgrade der Fahrzeuge nicht bekannt sind, wird, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, bei allen Antriebsarten mit einer mittleren Auslastung der Nutzlast von 50 % angenommen (z. B. Hinfahrt voll beladen, Rückfahrt unbeladen oder bei beiden Fahrten eine mittlere Auslastung durch volumenkritische Transporte).

Bei Lkw existieren im Gegensatz zu Pkw bisher noch keine Normzyklen zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs. Daher werden die aktuellen Verbrauchswerte für die Größenklassen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Ifeu-Instituts entnommen (Handbook Emission Factors for Road Transport HBEFA 3.1). Diese entstehen durch Simulation von realen Fahrzyklen und weisen ähnliche Werte auf, wie sie beispielsweise bei realen Tests der Zeitschrift lastauto omnibus ermittelt werden (lastauto omnibus 2013) oder in der Literatur angegeben wurden (Wittenbrink 2011, Schubert 2013). So ergeben sich die in Tabelle 32 dargestellten Verbrauchswerte. Die Sattelzüge erreichen derzeit bei einer Auslastung von 50 % Verbrauchswerte von etwa 3,11 kWh/km, dies entspricht einem Dieserverbrauch von etwa 31 l/100 km.

Die in Tabelle 32 angegebenen Wartungskosten beinhalten darüber hinaus auch Pflege- und Reparaturkosten. Diese wurden für eine Nutzungsdauer von sechs Jahren bestimmt. Da diese Nutzungsdauer über der Dauer von Full-Leasing-Verträgen liegt, fallen die Kos-

ten pro gefahrenen Kilometer höher aus, als in diesen Verträgen angegeben, da einige Verschleißteile erst nach Ende der Leasing-Verträge getauscht werden müssen. Daher sind die ausgewiesenen Kosten nur bedingt mit sonstigen, in der Literatur genannten Werten (z. B. Wittenbrink 2011), vergleichbar. Die Wartungskosten betragen abhängig von der Gewichtsklasse Werte zwischen 9,1 und 15,7 EuroCent/km. Damit erreichen bei Sattelzügen die Wartungskosten etwa 5 % der Gesamtkosten (Wittenbrink 2011, S. 33).

Neben Investitionen, Kraftstoff- und Wartungskosten sind auch die Kosten für AdBlue antriebstechnologieabhängig. Zur katalytischen Reduktion der Stickoxide (NO_x) wird in der Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren der Harnstoff mit dem Markennamen AdBlue eingesetzt. Die Menge an benötigtem AdBlue wird häufig in Abhängigkeit vom Dieserverbrauch angegeben und liegt derzeit bei etwa 3 bis 5 % des Dieserverbrauchs (lastauto omnibus 2013). Die dadurch entstehenden Kosten für AdBlue liegen zwischen 0,1 EuroCent/km bei leichten Nutzfahrzeugen (GK1) und 0,6 EuroCent/km bei Sattelzügen (SZM).

Zusätzlich zu den genannten Kostenkomponenten werden in Tabelle 32 die Tankgrößen für die Dieselfahrzeuge angegeben. Diese basieren auf Angeboten, die derzeit am Markt verfügbar sind (Daimler AG 2016a) und dienen als Benchmark für die Reichweite alternativer Antriebstechnologien.

Tabelle 32: Parameter für Dieselfahrzeuge 2015

Dieselfahrzeuge 2015		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	30.000	[2]	40.000	[2]	50.000	[2]	65.000	[2]	102.000	[2]
Tankgröße	l	75	[3]	120	[3]	120	[3]	570	[3]	570	[3]
Verbrauch	kWh/km	0,74	[4]	1,32	[4]	1,82	[4]	2,39	[4]	3,11	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,0914	[5]	0,1718	[5]	0,1643	[5]	0,1565	[5]	0,1427	[5]
Kosten AdBlue	Euro/l	0,6	[6]	0,6	[6]	0,6	[6]	0,6	[6]	0,6	[6]
Kosten AdBlue/ km	Euro/km	0,001	[7]	0,002	[7]	0,003	[7]	0,004	[7]	0,006	[7]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Hülsmann et al. 2014, [3] Daimler AG 2016a, [4] HBEFA 2014, [5] lastauto omnibus 2013, [6] inforoad GmbH 2016, [7] inforoad GmbH 2016, Dünnebeil et al. 2015

Entwicklung der Parameter bis 2030

Da das TCO-Modell Marktanteile für die Jahre 2015 und 2030 berechnet, folgen nun Ausführungen über die zukünftige Entwicklung der Parameter für Dieselfahrzeuge. Dies betrifft im Wesentlichen die Investitionen und die Kraftstoffverbräuche. Da es keine Informationen über die Entwicklung von Wartungskosten gibt, wurden diese zwischen den Jahren 2015 und 2030 konstant gehalten (siehe Tabelle 33).

In den vergangenen Jahrzehnten stieg der Kraftstoffverbrauch teilweise mit der Einführung neuer Emissionsgrenzwerte an. Zuletzt konnte jedoch bei der Umstellung von der EURO5- auf die EURO6-Abgasnorm eine Reduktion der Kraftstoffverbräuche realisiert werden (Zeitzen 2014, S. 12). Eine Einführung und Absenkung von Emissionsgrenzwerten bei schweren Nutzfahrzeugen sowie steigende Kraftstoffpreise werden aller Voraussicht nach zukünftig zu sinkenden Kraftstoffverbräuchen führen. Zudem werden nach heutigem Stand die Abgasnormen nicht mehr weiter verschärft, sodass zukünftige Effizienzentwicklungen nicht durch Mehrenergieverbrauch in der Abgasnachbehandlung kompensiert werden.

Effizienzsteigerungen können einerseits durch eine Optimierung der motorischen Verbrennung sowie durch Wirkungsradverbesserungen des Antriebssystems (Motor – Getriebe – Antriebsachse) und andererseits durch aerodynamische Optimierung erreicht werden. Die Studie „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde- rung bei schweren Nutzfahrzeugen“ (Dünnebeil et al. 2015) untersucht, welche Kraft- stoffeinsparpotentiale bis zum Jahr 2030 erreicht werden können und zu welchen Mehr- kosten bei der Produktion der Fahrzeuge dies möglich wäre. Es ist dabei zwischen den leichten Nutzfahrzeugen und den schweren Nutzfahrzeugen zu unterscheiden: Während die Motoren der Gewichtsklassen GK1 bis GK3 vorwiegend im Teillastbereich auf inner- städtischen und regionalen Strecken betrieben werden, laufen die schweren Nutzfahrzeu- ge der Gewichtsklasse GK4 und SZM häufig im optimalen Drehzahlbereich bei Fahrten auf der Autobahn. Die Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz variieren daher zwischen den Gewichtsklassen: Bei schweren Nutzfahrzeugen trägt die aerodynamische Optimie- rung zu einem Großteil der Reduktion bei, während bei leichten und mittelschweren Lkw Hybridisierung und motorseitige Optimierung bei Fahrten in Teillast die Effizienzsteige- rung dominieren. Insgesamt können bis zum Jahr 2030 etwa 21 % des Kraftstoffs einge- spart werden (vgl. Tabelle 33). Werte dieser Größenordnung werden auch in anderen Literaturquellen ausgewiesen (Esch und Dahlhaus 2013). Für Sattelzüge bedeutet dies gegenüber dem Jahr 2015 einen Rückgang des Kraftstoffverbrauchs von 31 Liter/100 km auf etwa 25 Liter/100 km.

Durch die Effizienzmaßnahmen steigen die Produktionskosten und damit auch die Netto- listenpreise (vgl. Tabelle 33). Die Studie „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde- rung bei schweren Nutzfahrzeugen“ (Dünnebeil et al. 2015) geht davon aus, dass eine Kraftstoffverbrauchsreduktion um 21 % zu einer Steigerung der Kosten unabhängig von der Gewichtsklasse um etwa 26 % führt (Dünnebeil et al. 2015). Unter der Annahme, dass diese Kosten an den Käufer weitergegeben werden, steigen die Anschaffungspreise für eine Sattelzugmaschine bis zum Jahr 2030 von etwa 102.000 Euro auf 129.000 Euro (vgl. Tabelle 33).

Die mit den Effizienzmaßnahmen verbundene Optimierung der Abgasnachbehandlung führt laut Dünnebeil et al. (2015) bis zum Jahr 2030 zu einer Erhöhung des AdBlue-

Verbrauchs und den damit verbundenen Kosten um etwa 30 % (vgl. Tabelle 33). Im Verhältnis zu Kraftstoffkosten und Investitionen fällt bei Sattelzugmaschinen der Anteil der AdBlue-Kosten mit 0,9 EuroCent/km ein Vielfaches geringer aus.

Tabelle 33: Parameter für Dieselfahrzeuge 2030

Dieselfahrzeuge 2030		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	37.470	[2]	49.960	[2]	62.450	[2]	81.998	[2]	128.673	[2]
Tankgröße	l	75	[3]	120	[3]	120	[3]	570	[3]	570	[3]
Verbrauch	kWh/km	0,61	[4]	1,09	[4]	1,50	[4]	1,89	[4]	2,46	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,0914	[5]	0,1718	[5]	0,1643	[5]	0,1565	[5]	0,1427	[5]
Kosten AdBlue	Euro/l	0,6	[6]	0,6	[6]	0,6	[6]	0,6	[6]	0,6	[6]
Kosten AdBlue/km	Euro/km	0,002	[7]	0,004	[7]	0,005	[7]	0,007	[7]	0,009	[7]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Kreyenberg et al. 2015, [3] Daimler AG 2016a, [4] Dünnebeil et al. 2015, [5] lastauto omnibus 2013, [6] inforoad GmbH 2016, [7] inforoad GmbH 2016, Dünnebeil et al. 2015

3.3.2 Entwicklung Parameter für Hybrid-Oberleitungs-Lkw bis 2030

Um alternative Antriebstechnologien mit den konventionellen vergleichen und Marktpotentiale abschätzen zu können, werden im Folgenden analog zur Diesel-Antriebstechnologie auch für HO-Lkw die Entwicklung der technischen Parameter bis zum Jahr 2030 abgeschätzt.

3.3.2.1 Übersicht Technologien

Im Rahmen der Untersuchung werden drei unterschiedliche infrastrukturegebundene Stromversorgungskonzepte betrachtet. Neben der Versorgung mittels Oberleitungen wird in zwei Ausführungsvarianten sowohl die Energieversorgung über Stromschienen als auch über Induktionsspulen untersucht. Neben dem rein elektrischen Antrieb mit infrastrukturegebundener Stromversorgung in Verbindung mit einer Traktionsbatterie wird ein serielles Hybrid-Konzept in Form eines Diesellaggregats mit infrastrukturegebundener Stromversorgung betrachtet (s. Abbildung 18). In beiden Varianten werden unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Reichweite an die Traktionsbatterie gestellt. Während für die rein elektrisch betriebenen Lkw eine Traktionsbatterie mit ca. 200 kWh angenommen wurde, sind serielle Diesel-Hybrid mit kleinen Pufferbatterien um 1 kWh ausgestattet.

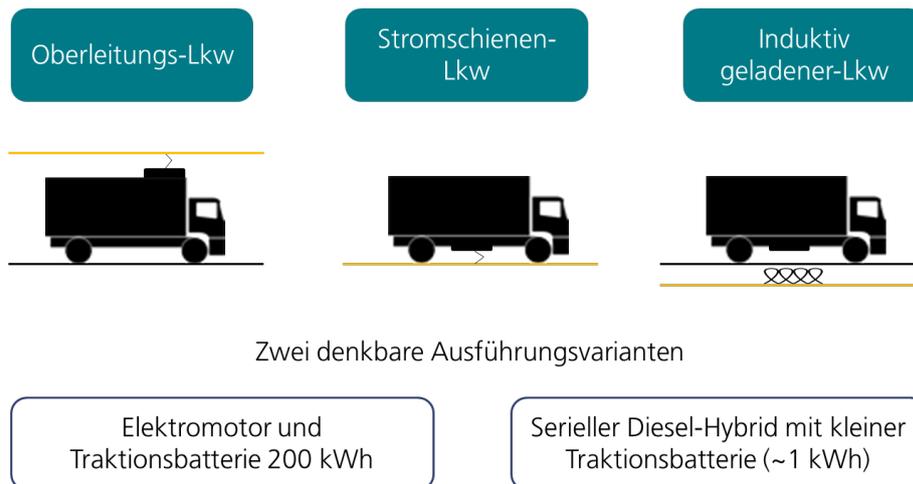


Abbildung 18: Systemvariationen HO-Lkw (eigene Darstellung)

3.3.2.2 Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Das Konzept der Oberleitungstechnologie für Nutzfahrzeuge ist eine bereits seit Jahrzehnten genutzte und etablierte Technologie. In einigen deutschen Städten, wie Solingen, aber auch in vielen osteuropäischen Ländern, wird sich der Oberleitungstechnologie bedient. Zumeist dient sie der Energieversorgung von Bussen im städtischen ÖPNV. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren sogenannte Oberleitungsbusse (auch: Trolley-Bus) in vielen deutschen Städten vorhanden, bspw. Aachen, Bielefeld und Idar-Oberstein. Die Oberleitungsbusse sind mittels eines Pantographen an die Stromversorgung angeschlossen, die im Gegensatz zur Eisenbahn i.d.R. aus ca. sechs Meter langen Stromabnehmerstangen und Schleifschuhen für den Kontakt zur Oberleitung bestehen. Oberleitungsbusse sind entweder als vollelektrisch betriebene Fahrzeuge oder als Hybride aus einem Diesel- und einem Elektromotor ausgeführt. Besondere Herausforderung bei Oberleitungsbussen ist die Fixierung der möglichen Routenführung an die bestehende Oberleitungsinfrastruktur.

Analog zum Konzept, Stadtbusse mit Strom aus der Oberleitung zu versorgen, soll dieses Konzept in angepasster Form (z. B. Überholmanöver, Fahrten ohne Oberleitung) die Energieversorgung von Lkw auf Bundesautobahnen gewährleisten. Für ein solches Konzept ist zum einen die Elektrifizierung der Bundesautobahn durch Oberleitungen und die Elektrifizierung von Lkw zu berücksichtigen. Die Oberleitungstechnologie wird im Weiteren unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht.

Technische Parameter

Die Elektrifizierung von schweren Lkw im Fernverkehr stellt ein neues Forschungsfeld dar. Gegenwärtig prägen Lkw mit einem Verbrennungsmotor das tägliche Bild auf Bundesautobahnen. Die technische Umrüstung von konventionellen zu Elektro-Lkw betrifft vier wesentliche Komponenten: Motor, Traktionsbatterie, Stromabnehmer (Pantograph) und

Steuerungselektronik. Zunächst bedarf ein Elektro-Lkw eines Elektromotors. Denkbar ist hier ein Permanentmagnet-Synchrongenerator und Motor mit einer Leistung von 200 bis 300 kW (Dauerleistung)²⁹. Dieser Elektromotor wird mittels einer Traktionsbatterie mit Energie versorgt. Die Traktionsbatterie ist wiederum mit dem Stromnetz über einen Stromabnehmer verbunden. Der Stromabnehmer besteht aus einem stromleitenden und einen Strom-rückführenden Pantographen. Für das reibungslose Zusammenspiel zwischen Elektromotor und Stromabnehmer wird eine Leistungs- und Steuerungselektronik benötigt. Die Spannungsversorgung des Antriebs liegt zwischen 750 und 900 V (Hacker et al. 2014, S. 2) und ist damit im Vergleich zum Pkw mit 400 V (Hacker et al. 2014, S. 59) fast doppelt so hoch.

Weitere Unterschiede in den Systemkomponenten fallen je nach Antriebsart des Lkw an. Bei einer hybriden Ausführung ist der Lkw zusätzlich mit einem 300 kW leistungsstarken Dieselmotor auszustatten.

An das Stromabnehmersystem stellen sich weitere Anforderungen. Der Stromabnehmer ist auf dem Dach des Lkw aufzubauen und muss in der Lage sein, in kurvigen Streckenverläufen und bei spurungetreuem Fahrverhalten die Energieversorgung aufrecht zu erhalten. Darüber hinaus soll das Fahrzeug selbstständig das An- und Abbügeln des Pantographen steuern. Dazu wird eine weitere Steuerungsmotorik am Stromabnehmersystem benötigt.

Der zusätzliche Stromabnehmer und die weiteren Komponenten, die für einen Elektro-Lkw benötigt werden, führen zu einem bei gleichbleibendem zulässigen Gesamtgewicht durch Mehrgewicht zum Nutzlastverlust. Abzüglich einer durch die EU-Richtlinie (Directive (EU) 2015/719) erlaubte Zusatzlänge von 0,5 m wird ein Nutzvolumenverlust von ca. 3 m³ erwartet (Edel et al. 2014).

Wirtschaftliche Parameter

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind die Anschaffungspreise, der reale Energieverbrauch, die Lebensdauer der Fahrzeuge und der Restwert von Bedeutung. Wie in Tabelle 34 zu sehen, belaufen sich die bisherigen Prognosen zum Anschaffungspreis für das Jahr 2015 auf ca. 170.000 Euro bis 200.000 Euro (Hacker et al. 2014, S. 61; UBA 2015, S. 43; den Boer et al. 2013, S. 77), wobei der Pantograph rund 40.000 Euro ausmacht (Gerhardt et al. 2015, S. 218; den Boer et al. 2013, S. 77). Eine Kostendegression durch Effizienzsteigerungen und Skaleneffekte in der Produktion ist zum Jahr 2030 zu erwarten. Der prognostizierte Anschaffungspreis läge sodann zwischen 103.000 Euro bis

²⁹ Vergleichbare vollelektrische Lkw verfügen über eine Leistung von rund 150 kW (emoss 2016b) bis 300 kW (E-FORCE ONE 2016)

201.000 Euro (den Boer et al. 2013, S. 77; UBA 2015, S. 43) mit Kosten von 10.000 Euro für den Pantographen (Gerhardt et al. 2015, S. 218; den Boer et al. 2013, S. 77).

Tabelle 34: Prognostizierte Wirtschaftlichkeitsdetails der Oberleitungs-Lkw laut Literatur

Jahr	2015	2030
Anschaffungspreis [Euro]	170.000 – 200.000 ¹⁾	103.000 – 201.000 ²⁾
Anschaffungspreis Pantograph [Euro]	40.000 ³⁾	10.000 ³⁾
Realer Energieverbrauch [kWh/km]	1,48 – 2,21 ⁴⁾	1,27 – 2,00 ⁴⁾
1) Öko-Institut e.V., 2014, S. 61; UBA (2015a), S. 43; den Boer et al. 2013, S. 77; 2) den Boer et al., 2013, S. 77; UBA (2015a), S. 43; 3) Gerhardt et al., 2015, S. 218; den Boer et al., 2013, S. 77 4) Edel et al. 2014; den Boer et al. 2013, S. 46		

Der reale Energieverbrauch spielt für die Betriebskosten der Lkw eine entscheidende Rolle. Auch der kilometerbezogene Fahrstromverbrauch wird als degressiv im Zeitverlauf eingeschätzt. Laut Literatur liegt der Energieverbrauch im Jahr 2015 zwischen 1,48 (Edel et al. 2014) und 2,21 kWh/km (den Boer et al. 2013, S. 46). Mit geringeren Werten zwischen 1,27 und 2,00 kWh/km (den Boer et al. 2013, S. 46) ist der Verbrauch für das Jahr 2030 veranschlagt. Zum Vergleich stehen die Verbrauchsdaten von Trolleybussen, die mit einem typischen Verbrauch im Stadtverkehr mit 1,4 bis 1,9 kWh/km auskommen. Lediglich in Ausnahmesituationen treten Energieverbräuche von 2,0 bis 2,6 kWh/km auf (Sun et al. 2014; Ioan et al. 2010; Tóth 2012).

Im Jahr 2015 fallen die Anschaffungspreise von HO-Lkw mit einem zusätzlichen Diesel-Aggregat im Vergleich zu konventionellen Diesel-Lkw knapp doppelt so hoch aus (vgl. Tabelle 35). Aufgrund der effizienteren Elektromotoren beträgt der Energieverbrauch mit 1,8 kWh/km (SZM) bei reinelektrischem Antrieb allerdings nur etwa 60 % des Verbrauchs eines Diesel-Lkw (vgl. Tabelle 35). Der geringere Verschleiß führt zudem dazu, dass die Wartungskosten leicht unter den Kosten für Wartungs- und Instandhaltung von Diesel-Lkw liegen (vgl. Tabelle 35).

Bedingt durch technologische Fortschritte und positive Skaleneffekte sinken die Anschaffungskosten für Diesel-HO-Lkw bis 2030 im Vergleich zum Jahr 2015 um etwa 17 %. Dennoch kosten HO-Lkw auch dann noch etwa 20.000 Euro mehr als konventionelle Diesel-Lkw. Der Verbrauch sinkt aufgrund von Effizienzsteigerungen leicht auf etwa 1,6 kWh/km (SZM), damit bleibt der HO-Lkw etwa 40 % effizienter als der konventionelle Dieselantrieb. Die Wartungskosten liegen bereits im Jahr 2015 auf einem niedrigen Niveau und werden sich daher bis zum Jahr 2030 nicht mehr verändern (vgl. Tabelle 36).

Tabelle 35: Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2015

Diesel-Hybrid 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	117.892	[2]	185.000	[2]
Tankgröße elektrisch	kWh	0	[3]	0	[3]
Verbrauch	kWh/km	1,38	[4]	1,80	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,151	[5]	0,135	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Wietschel et al. 2016a, [3] eigene Annahmen, [4] Wietschel et al. 2016a, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

Tabelle 36: Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2030

Diesel-Hybrid 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	96.863	[2]	152.000	[2]
Tankgröße elektrisch	kWh	0	[3]	0	[3]
Verbrauch	kWh/km	1,23	[4]	1,60	[5]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,151	[6]	0,135	[6]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Wietschel et al. 2016a, [3] eigene Annahmen, [4] Hüls-
mann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, Wietschel et al.
(2016a), [5] lastauto omnibus 2013, Kreyenberg et al. 2015, Wietschel et al.
2016a, [6] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

Im Gegensatz zu den Diesel-HO-Lkw werden die Anschaffungskosten bei Batterie-Hybrid-Fahrzeugen maßgeblich durch die Batteriekosten beeinflusst. Daher liegen die Preise für Lkw mit dieser Antriebstechnologie im Jahr 2015 etwa 100.000 Euro über den Diesel-HO-Lkw (vgl. Tabelle 37). Ebenfalls fallen die Wartungskosten etwa dreimal so hoch aus, da darin die Kosten für einen Batteriewechsel enthalten sind (Propfe et al. 2012). Bei den Werten für den reinelektrischen Energieverbrauch ergeben sich keine Unterschiede zum Diesel-HO-Lkw (vgl. Tabelle 37).

Sinkende Batteriepreise beeinflussen bis zum Jahr 2030 sowohl die Anschaffungs- als auch die Wartungskosten. Zudem steigt bei Batterien die Zyklenfestigkeit, sodass diese später ausgewechselt werden müssen. Die Wartungskosten sinken daher auf etwa 30 % unter den Wert von Diesel-HO-Lkw. Die Anschaffungskosten liegen hingegen trotz geringeren Batteriepreisen auch im Jahr 2030 etwa 25 % über den Preisen für Diesel-HO-Lkw. Beim reinelektrischen Verbrauch existieren keine Unterschiede gegenüber dem Diesel-HO-Lkw.

Tabelle 37: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2015

Batterie-Hybrid 2015		Gewichts-klasse	Q	Gewichts-klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	196.136	[2]	286.800	[2]
Tankgröße elektrisch	kWh	154	[3]	200	[3]
Verbrauch	kWh/km	1,38	[4]	1,80	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,312	[5]	0,380	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, [3] eigene Annahmen, [4] Wietschel et al. 2016a, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015

Tabelle 38: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2030

Batterie-Hybrid 2015		Gewichts-klasse	Q	Gewichts-klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	125.455	[2]	189.200	[2]
Tankgröße elektrisch	kWh	154	[3]	200	[3]
Verbrauch	kWh/km	1,23	[4]	1,60	[5]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,102	[6]	0,107	[6]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, [3] eigene Annahmen, [4] Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, [5] lastauto omnibus 2013, Kreyenberg et al. 2015, [6] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015

Für die wirtschaftliche Betrachtung des Restwerts der Fahrzeuge liegen keine ausreichenden Markterfahrungen zugrunde. Auch sind keine Erfahrungswerte oder nennenswerte Sekundärmärkte für Elektro-Lkw auszumachen. Der Restwert bleibt damit unbekannt und wird in der weiteren Betrachtung für alle Technologien mit Null angenommen.

3.3.2.3 Weitere Technologien zur spurgeführten Stromversorgung

Neben den HO-Lkw existieren zwei weitere Technologien, um Lkw auf Autobahnen mit Strom zu versorgen: Stromschiene und Induktion.

3.3.2.3.1 Stromschiene

Bei der Stromschiene-Technologie erfolgt die Stromversorgung über im Boden eingelassene Stromschienen. Die Technologie ist gegenwärtig wenig verbreitet. Von der Systematik ist das Verfahren ähnlich der Energieversorgung über Oberleitungen, mit der Abweichung, dass die stromführende Leitung in der Straße eingelassen ist, und am Fahrzeug anstatt eines Pantografen ein entsprechender Stromabnehmer angebracht werden muss.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Komponenten und Unterschiede zur Oberleitungs-technologie eingegangen.

Varianten der Stromschiene

Es werden im Wesentlichen drei unterschiedliche Ausführungsvarianten der Technologie unterschieden:

Bei dem **Flachschiensystem** sind zwei Flachschiene parallel zur Fahrtrichtung auf Höhe der Fahrbahnoberfläche montiert. Die Schienen sind entsprechend leicht für den Stromabnehmer am Fahrzeug zu erreichen. Die Herausforderung liegt bauartbedingt jedoch bei der Gewährleistung der Sicherheit, da verhindert werden muss, dass stromführende Schienen Kontakt zu Personen oder anderen Fahrzeugen haben.

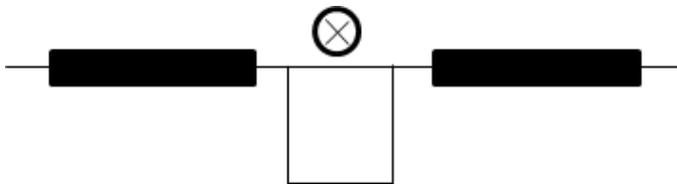


Abbildung 19: Flachschiensystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Olsson et al. 2012)

Beim **abgesenkten Flachschiensystem** sind die Stromschienen hingegen in die Fahrbahn eingelassen. Der Vorteil dieser Bauart ist, dass ein physischer Schutz den unbeabsichtigten Kontakt zu Personen oder anderen Fahrzeugen erschwert. Der Stromabnehmer muss entsprechend ausgelegt sein. Das Einfädeln in die Stromschiene ist technisch aufwendiger als beim Flachschiensystem. Gleichzeitig bewirkt die abgesenkte Bauweise, dass Fremdkörper wie Schmutz und Abrieb sich in den Vertiefungen ansammeln und erfordert eine kontinuierliche Reinigung. Darüber hinaus wird eine Verkehrsgefahr für Motorräder angenommen (Olsson et al. 2012).

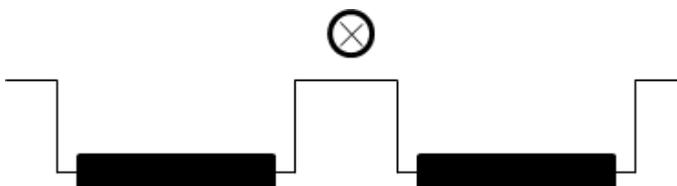


Abbildung 20: Querschnitt: abgesenktes Flachschiensystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Olsson et al. 2012)

Beim **Einschiensystem** werden die stromführenden Kontakte in einer Linie in abwechselnden Feldern angeordnet. Es ist ähnlich zum Flachschiensystem, jedoch segmentiert und parallel zur Fahrtrichtung und auf Höhe der Fahrbahn montiert. Sobald Fahrzeug ein Segment überfährt, wird dies unter Strom gesetzt. Dadurch verbleiben Segmente, die sich nicht unter dem Fahrzeug befinden, stromlos geschaltet und stellen keine Gefahr für an-

dere Verkehrsteilnehmer dar. Gleichzeitig benötigt diese Bauweise ein exakt funktionierendes Zu- und Abschaltungssystem, um die einzelnen Segmente anzusteuern (in Millisekunden genau). Dies erfordert eine zuverlässige Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (Olsson et al. 2012). Der Stromabnehmer muss entsprechend ausgelegt sein.

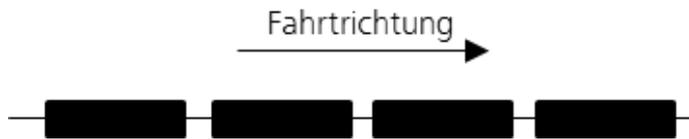


Abbildung 21: Querschnitt: Einschienensystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Olsson et al. 2012)

Sämtliche dargestellten Systeme sind untereinander nicht kompatibel, da sich sowohl Stromversorgung als auch die Stromaufnahme im Fahrzeug deutlich unterscheiden. Bei der Umsetzung sollte daher früh eine Entscheidung für die jeweilige Technologie getroffen und diese dann auch einheitlich umgesetzt werden.

Technische Parameter

Zur Nutzung der Stromschienentechnologie werden für das Fahrzeug vier Komponenten benötigt: Motor, Traktionsbatterie, Schleifer und Steuerungselektronik. Wie auch der Lkw bei Oberleitungstechnologie wird der Lkw mit Stromschienentechnologie mit einem 200-kW-Permanent-Synchrongenerator und Motor ausgestattet. Sofern ein hybrider Lkw eingesetzt wird, ist ein zusätzlicher Dieselmotor mit 300 kW Leistung erforderlich. Von der Oberleitungstechnologie abweichende Komponenten sind der Stromabnehmer, der nicht als Pantograph, sondern als Schleifer am Boden ausgeführt ist und die Kommunikationstechnik. Das Ein- und Ausfädeln des Schleifers steuert das Fahrzeug selbst, während die Leistungs- und Steuerungselektronik die Abstimmung zwischen Stromabnehmer und Antrieb des Lkw vornimmt (Kohler 2010, S. 77). Die Kommunikationstechnik sorgt für die Synchronisation zwischen Fahrzeug und stromführender Infrastruktur. Die Versorgung des Antriebs erfolgt im Bereich zwischen 750 und 900 V.

An die stromführende Infrastruktur werden besondere Herausforderungen gestellt. Die Stromschiene stellt eine Gefahr in Form eines Stromschlags für Fußgänger und andere Fahrzeuge mit Bodenkontakt dar. Daher sollen nur die Module der Stromschiene zeitpunktgenau aktiv sein, die für die Energieversorgung des Fahrzeuges benötigt werden. Die Kommunikationstechnik ist für die Aktivierung und Deaktivierung der einzelnen Module zuständig. Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, wird dieses System bereits bei der Tram in Bordeaux (Frankreich) verwendet (Jahn 2015a), wobei sich die Bedingungen für die Kommunikationstechnik bei der Tram in Bordeaux zu den Bedingungen eines Stromschienen-Lkw unterscheiden. Zum einen betreffen die Unterschiede die Anzahl an Modulen, die gleichzeitig angesprochen werden, und die Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Durch die Länge der Tram in Bordeaux können mehr aktivierte Module noch unter dem

Fahrzeug verbleiben und stellen daher keine Gefahr für Fußgänger dar. Zum anderen ist das Zeitfenster zur Kommunikation mit einem Modul bei einer Fahrgeschwindigkeit von 21 km/h größer als bei einer üblichen Geschwindigkeit eines Lkw auf einer Bundesautobahn. Die Synchronisation der Schienenmodule zu den Fahrzeugen wird im Millisekundenbereich angesiedelt.



Abbildung 22: Stromschiene und Stromschienen-Tram (Jahn 2015b, c)

Wirtschaftliche Parameter

Die Wirtschaftlichkeit der Stromschienen-Lkw hängt vom Anschaffungspreis, der Lebensdauer, dem Restwert sowie den variablen Kosten der Lkw ab. Der Anschaffungspreis orientiert sich an dem Anschaffungspreis eines konventionellen Fahrzeugs, das durch Umrüstung (Retrofitting) mit einem Schleifer für die Aufnahme der Energie aus der Stromschiene ausgerüstet wird. Für das Retrofitting werden Kosten in Höhe von ca. 100.000 Euro (Systra 2012, S. 33) und für einen Schleifer 750 bis 1.000 Euro kalkuliert. Es wird davon ausgegangen, dass mehrere Schleifer pro Fahrzeug benötigt werden (Olsson et al. 2012). Zur Bestimmung der Lebensdauer fehlen Erfahrungswerte, sodass diese nicht quantifiziert werden kann. Der Restwert ist ebenso nicht quantifizierbar, da bisher das Stromschienensystem lediglich pilotiert ist, jedoch nicht vermarktet oder großflächig eingesetzt wird.

3.3.2.3.2 Lkw mit Induktionsspulen

Die induktive Technologie stellt zur Energieversorgung von Lkw auf Bundesautobahnen die dritte technische Umsetzungsvariante dar. Während die Stromschienentechnologie eine mögliche Gefährdung für Fußgänger darstellen kann, erfolgt bei der induktiven Technologie die Energieversorgung kontaktlos und ist daher weniger gefährlich für Fußgänger. Im Folgenden wird die induktive Technologie unter dem Aspekt der technischen Umsetzung und der Wirtschaftlichkeit betrachtet.

Technische Parameter

Wie auch bei den beiden vorherigen Formen der Energieversorgung werden die Lkw bei der induktiven Technologie mit einem 200-kW-Permanentmagnet-Synchrongenerator und Motor ausgestattet. Ebenso wird bei einer hybriden Ausführung des Lkw ein Dieselmotor mit einer Leistung von 300 kW notwendig. Im Gegensatz zur hybriden Ausführung bedarf bei einer rein batteriebetriebenen Ausführung der Lkw einer Traktionsbatterie. Um die Energieversorgung mit dem Generator und Motor zu verknüpfen, wird eine Leistungs- und Steuerungselektronik verwendet. Entscheidender Unterschied zu den anderen technischen Ausführungsformen ist das Energieempfängersystem (Pick-up), das die Energie aus der Energieversorgungsinfrastruktur aufnimmt. Die dabei realisierte Übertragungsleistung weist gegenüber einer konduktiven Energieversorgung Verluste auf. Merkmale der Übertragungsleistung liegen unter Laborbedingungen bei 200 kW mit bis zu 35 kHz (INTIS 2014, S. 1). Dahingegen wird für ein praxisnahes Umfeld 60 kW mit 30 kHz angestrebt (Kempkens 2015).



Abbildung 23: Scania-Lkw mit Induktionstechnologie (Scania 2016)

Ebenso wie die Stromschiementechnologie erfordert das induktive Laden von Fahrzeugen während der Fahrt ein zuverlässiges Zu- und Abschalten der im Boden befindlichen Induktionsspulen sowie eine exakte Positionierung des Pick-up über den Spulen. Dies erfordert wiederum eine fehlerfreie Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur.

Wirtschaftliche Parameter

Wirtschaftlich zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Oberleitungstechnologie. In einer Studie der CE Delft (den Boer et al. 2013) werden die Investitionskosten für die einzelnen Komponenten der Fahrzeuge beziffert.

Bezüglich des Energieverbrauchs liegt dieser im Mittel mit 2,21 kWh/km (eigene Berechnung) leicht über dem von Oberleitungs-Lkw. Dies ist auf den Übertragungsverlust der Induktionstechnologie zurückzuführen. Dieser liegt gegenwärtig bei ca. 20-30 % (Choi et al. 2013) bei 17-20 cm Nennluftspalt. Für die Zukunft wird erwartet, dass die Übertra-

gungsverluste geringer werden. Bei Tests unter Laborbedingungen konnten bereits Übertragungsverluste von 15 % erreicht werden, u. a. durch Verringerung des Nennluftspalts.

Tabelle 39: Komponentenpreise für Induktionssystem (den Boer et al. 2013)

Komponente	2015	2030
Elektromotor	ca. 6.500	ca. 5.200
Energieempfänger System	ca. 9.200	ca. 7.800
Steuereinheit	ca. 9.100	ca. 6.000

3.3.2.3.3 Parameter von Stromschienen- und Induktions-Lkw im Vergleich

Das Retrofitting der Diesel-Lkw für die Nutzung der Stromschiene und der Einbau einer zusätzlichen Traktionsbatterie führen zu erheblichen Mehrkosten im Vergleich zu Diesel-Lkw. Die Anschaffungskosten von Batterie-Hybriden sind daher im Jahr 2015 etwa dreimal so hoch. Durch den effizienteren Elektromotor und die geringen Übertragungsverluste sinkt der Energieverbrauch im Vergleich zum Diesel-Lkw um etwa 40 %. Die Wartungskosten fallen durch die komplexere Technologie knapp dreimal so hoch aus (vgl. Tabelle 40).

Die induktionsbasierte Stromübertragung und die damit verbundenen Anpassungen am Lkw führen im Jahr 2015 zu einem im Vergleich zur Stromschiene etwa 10.000 Euro höheren Anschaffungspreis. Die Übertragungsverluste bei der Induktionstechnologie liegen höher als bei der direkten Übertragung durch die Stromschiene, daher verbrauchen Lkw mit induktiver Stromversorgung etwa 30 % mehr Energie als Stromschienen-Lkw. Die Wartungskosten betragen analog zu den höheren Anschaffungspreisen etwa das 1,3-fache der Kosten von Stromschienen-Lkw (vgl. Tabelle 40).

Tabelle 40: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2015

Batterie-Hybrid 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	SZM Strom- schiene	[1]	SZM induktiv	[1]
Investitionen	Euro	303.800	[2]	311.800	[2]
Tankgröße elektrisch	kWh	200	[3]	200	[3]
Verbrauch	kWh/km	1,80	[4]	2,50	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,380	[5]	0,512	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, [3] eigene Annahmen, [4] Wietschel et al. 2016a, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015

Die Entwicklungen bis zum Jahr 2030 sind geprägt durch die effizientere Übertragung der Energie bei induktiven Lkw. Dies hat zur Folge, dass der Energieverbrauch im Vergleich zum Jahr 2015 um etwa 25 % zurückgeht. Die Stromschienentechnologien bieten weniger Optimierungspotentiale. Dennoch sinkt auch bei dieser Technologie der Energieverbrauch. Stromschienen-Lkw sind auch im Jahr 2030 effizienter als Lkw mit induktiver Stromübertragung (vgl. Tabelle 41). Sowohl Wartungskosten als auch die Anschaffungspreise sinken bis zum Jahr 2030 jeweils um etwa ein Drittel. Grund dafür sind erwartete technologische Entwicklungen und positive Skaleneffekte aus steigenden Produktionszahlen. Im Vergleich zum Diesel-Oberleitungs-Hybrid-Lkw fallen jedoch sowohl bei der induktiven als auch bei der Stromschienentechnologie sämtliche Kostenkomponenten höher aus (vgl. Tabelle 41).

Tabelle 41: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2030

Batterie-Hybrid 2030		Gewichtsklasse	Q	Gewichtsklasse	Q
Attribut	Einheit	SZM Stromschiene	[1]	SZM induktiv	[1]
Investitionen	Euro	202.200	[2]	187.600	[2]
Tankgröße elektrisch	kWh	200	[3]	200	[3]
Verbrauch	kWh/km	1,60	[4]	1,90	[5]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,107	[6]	0,120	[6]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, [3] eigene Annahmen, [4] Wietschel et al. 2016a, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass alle Technologien mit infrastrukturegebundener Stromversorgung auch zukünftig höhere Anschaffungskosten als Diesel-Lkw aufweisen werden. Die variablen Kosten, insbesondere die Energiekosten, fallen hingegen bei allen drei Varianten (Oberleitung, Stromschiene, Induktion) bedingt durch die höhere Effizienz der Elektromotoren geringer aus. Die Oberleitungstechnologie scheint derzeit in Kombination mit einem Diesel-Aggregat zur Überbrückung von Strecken ohne Oberleitung die günstigste unter allen Technologien mit infrastrukturegebundener Stromversorgung zu sein.

3.3.3 Entwicklung Parameter für Lkw mit anderen alternativen Antrieben bis 2030

Neben den HO-Lkw spielen zukünftig auch weitere alternative Antriebstechnologien bei der Marktdiffusion eine Rolle. Um ein vollständiges Bild der zukünftigen Marktpotentiale von HO-Lkw zu erzeugen werden daher im Folgenden sowohl weitere elektrische Antriebe (PHEV, BEV) als auch die Brennstoffzellen und CNG-/LNG-Varianten der Lkw näher betrachtet.

3.3.3.1 Parameter für Gas-Fahrzeuge

Bisher werden Gasfahrzeuge im Lkw-Bereich nur als Kleinserien produziert. Aufgrund der geringeren Energiedichte verglichen mit Diesel wird Erdgas an Bord der Fahrzeuge entweder stark komprimiert (CNG) oder verflüssigt (LNG) gespeichert. Während bei leichteren Fahrzeugen im Verteilerverkehr (GK1 bis GK3) mehrheitlich CNG eingesetzt wird, setzt sich im Fernverkehr (GK4, SZM) die flüssige Speicherung von Erdgas durch. Daher werden im Folgenden abhängig von der Größenklasse sowohl CNG- als auch LNG-Lösungen betrachtet.

Status quo der Parameter im Jahr 2015

Die Anschaffungskosten fallen bei allen Gewichtsklassen höher aus als bei Diesel-Lkw. Die Gründe dafür liegen einerseits in der komplexeren Tanktechnologie (Druckspeicherung, flüssige Speicherung), andererseits erfordert der Einsatz von Motoren zur Verbrennung von Erdgas einige Anpassungen der Technologie. Daher fallen die Investitionen derzeit (Jahr 2015) abhängig von der Gewichtsklasse etwa 30 % höher als bei Diesel Lkw aus (vgl. Tabelle 42).

Ebenfalls geschuldet durch die komplexere Technologie beträgt der Aufschlag bei Wartungskosten gegenüber der Diesel-Technologie etwa 15 %. Diese Werte leiten sich aus Untersuchungen bei CNG-Pkw ab (Propfe et al. 2012) und lassen sich auf Basis der Verhältnisse zwischen Diesel und CNG auf Lkw übertragen (vgl. Tabelle 42).

Tabelle 42: Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2015

CNG/LNG 2015		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	33.500	[2]	61.538	[3]	76.923	[3]	100.000	[3]	137.000	[3]
Tankgröße	kg										
Verbrauch	kWh/km	0,82	[4]	1,46	[4]	2,01	[4]	2,66	[4]	3,46	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,1064	[5]	0,1998	[5]	0,1890	[5]	0,1799	[5]	0,1647	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Hülsmann et al. 2014, [3] Hülsmann et al. 2014, erdgas mobil GmbH 2015, [4] Hülsmann et al. 2014, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

Der Energieverbrauch von Erdgas-Lkw liegt leicht über den Werten von Diesel-Lkw. Bisher lassen sich bei CNG-/LNG-Lkw nur geringer Wirkungsgrade realisieren, sodass diese etwa 10 % mehr Energie verbrauchen als der konventionelle Benchmark (vgl. Tabelle 42).

Der Harnstoff AdBlue zur katalytischen Reduktion von NO_x wird bei Erdgas-Lkw nicht benötigt, da die NO_x bereits durch die Abgasnachbehandlung ausreichend gesenkt werden

können. Daher entstehen beim Betrieb der CNG/LNG-Lkw auch keine Kosten für AdBlue (vgl. Tabelle 42).

Entwicklung der Parameter bis 2030

Der technologische Fortschritt führt bis zum Jahr 2030 dazu, dass die Kraftstoffverbräuche bei CNG-/LNG-Lkw deutlich sinken. Ähnlich wie bei den Diesel-Lkw lassen sich in den kommenden 15 Jahren Effizienzmaßnahmen realisieren, die sowohl die Aerodynamik als auch die Kraftstoffverbrennung optimieren. Insgesamt sinkt dadurch der spezifische Energieverbrauch bis zum Jahr 2030 um etwa 20 % (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 43: Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2030

CNG/LNG 2030		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	42.311	[2]	77.723	[2]	97.154	[2]	143.000	[2]	195.910	[2]
Tankgröße	kg										
Verbrauch	kWh/km	0,60	[2]	1,07	[2]	1,47	[2]	2,14	[2]	2,78	[2]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,0914	[3]	0,1718	[3]	0,1643	[3]	0,1565	[3]	0,1427	[3]
[1] Lenz et al. 2010, [2] Kreyenberg et al. 2015, [3] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012											

Durch die genannten Effizienzmaßnahmen steigen die Investitionen im Vergleich zum Jahr 2015 um etwa 40 % an (vgl. Tabelle 43). Der im Vergleich zum Diesel-Lkw überdurchschnittliche Anstieg hängt mit der komplexeren Antriebstechnologie und dem technologisch aufwendigen Tanksystem zusammen, dessen Anpassung kostenintensiver ist (Kreyenberg et al. 2015). Die Wartungskosten sinken bis zum Jahr 2030 um etwa 13 %, da mit steigender Diffusion der CNG-/LNG-Lkw auch Skaleneffekte bei Wartungs- und Reparatur realisiert werden können (Propfe et al. 2012). Insgesamt werden die Betriebskosten für Erdgas-Lkw entscheidend durch die steigenden Investitionen und den sinkenden Kraftstoffverbrauch beeinflusst.

3.3.3.2 Parameter für BEV-Fahrzeuge

Eine wachsende Bedeutung kommt batterieelektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen insbesondere in GK1 (leichte Nutzfahrzeuge) zu. Die geringen durchschnittlichen Fahrleistungen in dieser GK (siehe Kapitel 3.4) können auch von reichweitenbeschränkten BEV ohne Zwischenladung bewältigt werden. Eine Nutzung erfolgt aktuell überwiegend durch Kurierexpress-Paketdienstleister. Dem stehen einzelne Fahrzeugmodelle in GK4 gegenüber, die bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 t und einer Reichweite von 200 bis 300 km bereits ein Batteriegewicht von 2-3 t vorweisen (E-FORCE ONE 2016, Emiss

2016a). Bei einer größeren Reichweite würde das Batteriegewicht zu hohen Nutzlastverlusten führen, wodurch BEV an Attraktivität verlieren würden.

Status quo der Parameter für BEV im Jahr 2015

Im Gegensatz zu Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb sind batterieelektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge bis auf wenige Ausnahmen vor allem in GK1 nicht in den Produktportfolios der Hersteller vertreten. Daher kann nicht wie in Kapitel 3.3.1 auf Nettopreislisten für entsprechende BEV zurückgegriffen werden. Stattdessen wird ein Bottom-up-Vorgehen gewählt. Da sich BEV und Diesel-Lkw im Wesentlichen in ihrem Antriebsstrang unterscheiden, werden zu den bereits in Kapitel 3.3.1 bestimmten Investitionen für Diesel-Lkw die Kosten für den BEV-Antriebsstrang sowie die Kosten für die Batterie, die als Energiespeicher verwendet wird, addiert. Die Kosten für den BEV-Antriebsstrang setzen sich aus den Komponentenkosten für Elektromotor, Steuerung und Leistungselektronik sowie sonstigen Komponenten zusammen (siehe Anhang Kapitel 12.3), für welche eine Wertschöpfungsquote von 50 % berücksichtigt wurde. Die Wertschöpfungsquote beziffert dabei den Anteil des betriebswirtschaftlichen Wertzuwachses, den ein Unternehmen über die Vorleistungen (hier: Komponentenkosten) hinaus erwirtschaftet, am Wert der Endleistung. Neben einer Gewinnmarge umfasst sie vor allem den Aufwand für Fertigung und Montage durch den Hersteller. 2030 wird die Fertigung von BEV, insbesondere im Nutzfahrzeugbereich, immer noch eine sehr junge Branche sein, weshalb die Annahmen einer erhöhten Wertschöpfungsquote von 50 % im Gegensatz zu 30 % bei der Fertigung von konventionellen Fahrzeugen (Schulz 2014) und die Verwendung konventioneller Modelle als Basisplattform plausibel sind. Diese Mehrkosten sind auch damit zu begründen, dass bis 2030 Skalen- und Lerneffekte bei der Fertigung von BEV noch nicht in dem Umfang realisiert werden können, wie es bei der Fertigung konventioneller Nutzfahrzeuge der Fall ist.

Mit aufsteigender Gewichtsklasse nehmen sowohl Leistung des Antriebsstrangs (siehe Anhang Kapitel 12.2) als auch Tankgröße bzw. Kapazität der Batterie zu. Es wird davon ausgegangen, dass in jeder Gewichtsklasse eine Reichweite von 150 km erforderlich ist (Hülsmann et al. 2014), die bei BEV ausschließlich durch die Batterie bereitgestellt wird. Unter Berücksichtigung des zugrunde gelegten Verbrauchs von BEV und einer nutzbaren Kapazität von 90 %, ergeben sich die in Tabelle 44 dargelegten Batteriekapazitäten (Tankgröße). Ein Vergleich mit auf dem Markt verfügbaren BEV-Nutzfahrzeugen (siehe Hacker et al. 2015 oder Pelletier et al. 2014) zeigt, dass die berechneten Batteriekapazitäten von ca. 60 kWh in GK1 und 240 kWh bei SZM in etwa den durchschnittlichen Kapazitäten der tatsächlich verfügbaren Fahrzeuge entsprechen. Auf Basis der Batteriekapazität und der spezifischen Batteriekosten wurden die Gesamtkosten für die Batterie berechnet, welche in die Investitionen einfließen. Der Anteil der Batteriekosten an den gesamten Fahrzeuginvestitionen (vgl. Tabelle 44) liegt zwischen ca. 40 % in GK1 und um 50 % in den übrigen Gewichtsklassen und stellt somit einen wesentlichen Stellhebel dar.

Grundsätzlich haben BEV den geringsten Energieverbrauch aller Antriebsarten, was auf den hohen Wirkungsgrad des Elektromotors von 90 bis 95 % und geringe Verluste bei der Energieübertragung und -umwandlung innerhalb des batterieelektrischen Antriebsstrangs zurückzuführen ist. Hinzu kommt die Energierückgewinnung in BEV bei Bremsvorgängen, welche den Wirkungsgrad verbessert. Demgegenüber weisen beispielsweise Verbrennungsmotoren einen Wirkungsgrad von 30 bis 40 % auf (TAB 2012), welcher über Verluste durch das Getriebe und weitere Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs weiter verringert wird. Die im Rahmen dieser Studie herangezogenen Energieverbrauchswerte basieren auf (Hülsmann et al. 2014), in denen die Autoren in einer Technologiedatenbank Kosten und Energieeinsparpotentiale für verschiedene Antriebstechnologien bei Straßenfahrzeugen erarbeitet haben sowie auf Hacker et al. (2015). Die Werte aus der Literatur wurden vom Jahr 2010 auf das Jahr 2015 interpoliert und mittels eines gewichtsklassenspezifischen Aufschlagsfaktors auf eine mittlere Auslastung von 50 % angepasst. Eine Abgasnachbehandlung wie bei konventionellen Diesel-Lkw ist bei BEV nicht erforderlich, da diese lokal keine Emissionen verursachen. So ergeben sich die Energieverbrauchswerte gemäß Tabelle 44.

Die Kosten für Wartung und Instandhaltung von BEV (vgl. Tabelle 44) setzen sich aus verschiedenen Positionen zusammen (vgl. Anhang 12.5). Die reinen Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten sind bei BEV mit am geringsten und betragen lediglich 15 % der Kosten die bei Dieselantrieben entstehen. Dies ist auf die geringe Anzahl an bewegten Komponenten des Antriebsstrangs zurückzuführen (Taefi et al. 2014). Außerdem entfallen die Schmierstoffkosten. Andererseits entstehen Kosten für die Batterie, die über die Batteriereichweite und die Anzahl garantierter Ladezyklen auf den einzelnen Kilometer heruntergerechnet und den Wartungs- und Instandhaltungskosten zugerechnet werden. Diese Kostenposition übersteigt alle anderen bei weitem, sodass die Batteriekosten zwischen 71 % und 87 % der Gesamtkosten für Wartung und Instandhaltung ausmachen.

Tabelle 44: Parameter für BEV-Fahrzeuge 2015

BEV 2015		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	72.534	[2]	109.439	[2]	141.982	[2]	184.617	[2]	250.704	[2]
Tankgröße	kg	60	[3]	110	[3]	150	[3]	190	[3]	240	[3]
Verbrauch	kWh/km	0,35	[4]	0,63	[4]	0,88	[4]	1,09	[4]	1,4	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,091	[5]	0,168	[5]	0,221	[5]	0,256	[5]	0,306	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Lastauto Omnibus 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, [3] Hülsmann et al. 2014, [4] Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

Entwicklung der Parameter bis 2030

Bei den Investitionen für BEV (vgl. Tabelle 45) ergeben sich wesentliche Änderungen durch steigende Investitionen für das Basisfahrzeug sowie sinkende Kosten für den Antriebsstrang und vor allem die Batterie.

Was die Investitionen für das Basisfahrzeug betrifft, wird erwartet, dass die Kostensteigerung geringer ausfällt als bei Diesel-Lkw (ca. 26 %). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Diesel-Lkw neben der für BEV ebenfalls relevanten aerodynamischen Optimierung des Fahrzeugs zusätzlich eine Optimierung der motorischen Verbrennung und eine Wirkungsgradverbesserung des Antriebssystems die Produktionskosten bis 2030 erhöht. Für BEV werden daher lediglich Kostensteigerungen berücksichtigt, die auf aerodynamische Maßnahmen zurückzuführen sind und die auf etwa 15 % beziffert werden können.

Demgegenüber sind Kostensenkungen bei den Komponenten zu erwarten. Aufgrund des hohen Reifegrads von Elektromotoren wird bei diesen nur eine geringe Kostendegression bis 2030 von ca. 2 % erwartet, wohingegen bei der Steuerung und Leistungselektronik sowie den Kosten für weitere Komponenten pro Dekade mit einer Verringerung um 10 % gerechnet wird (Hülsmann et al. 2014). Auf der anderen Seite führen massiv sinkende Preise für Batterien bis 2030 zu einer Verringerung der Batteriekosten. Dies spiegelt sich einerseits in stark sinkenden Gesamtinvestitionen und andererseits in deutlich geringeren Wartungs- und Instandhaltungskosten wider (vgl. Tabelle 45). Erstere verringern sich so insgesamt um 20 bis 30 %, wobei sich letztere in etwa halbieren. Ungeachtet der sinkenden Batteriepreise wird die Reichweite der BEV und damit deren Batteriekapazität konstant gehalten (vgl. Tabelle 45).

Was den Energieverbrauch betrifft, besteht beim elektrischen Antriebsstrang selbst kaum nennenswertes Optimierungspotential. Die beim Diesel-Lkw zugrunde gelegte aerodynamische Optimierung findet jedoch auch bei BEV Anwendung und lässt Einsparungen beim Energieverbrauch von etwa 12 % zu (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 45: Parameter für BEV-Fahrzeuge 2030

BEV 2030		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	56.141	[2]	78.211	[2]	99.066	[2]	130.176	[2]	185.177	[2]
Tankgröße	kg	60	[3]	110	[3]	150	[3]	190	[3]	240	[3]
Verbrauch	kWh/km	0,308	[4]	0,5544	[4]	0,7744	[4]	0,9592	[4]	1,232	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,046	[5]	0,087	[5]	0,108	[5]	0,117	[5]	0,126	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] lastauto omnibus 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, [3] Hülsmann et al. 2014, [4] Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

3.3.3.3 Parameter für PHEV-Fahrzeuge

Aktuell sind nur sehr wenige Plug-in-Hybrid-Nutzfahrzeuge auf dem Markt verfügbar. Je nach Gewichtsklasse existieren sogar noch weniger Modelle als bei BEV. PHEV bezeichnen Fahrzeuge, die sowohl über einen konventionellen Dieselantriebsstrang mit Kraftstofftank und Verbrennungsmotor als auch über einen rein elektrischen Antriebsstrang mit Batterie und Elektromotor verfügen. Das elektrische Antriebssystem ist deutlich leistungsfähiger als bei Hybridfahrzeugen. So können PHEV aufgrund höherer Batteriekapazität und höherer Leistung des elektrischen Antriebsstrangs kürzere Strecken auch rein elektrisch fahren und außerdem extern über das Stromnetz geladen werden. Für diese Studie wird ein Parallelhybrid- in Abgrenzung zu einem seriellen Hybrid-System betrachtet. Bei einem Parallelhybridfahrzeug können sowohl Verbrennungsmotor, als auch Elektromotor auf die Antriebsachse einwirken, wohingegen beim seriellen Hybridfahrzeug der Verbrennungsmotor über einen Generator Strom erzeugt und daher eher als Rangeextender zu betrachten ist. Es wird davon ausgegangen, dass bei PHEV beide Antriebsstränge eigenständig die volle Leistung erbringen können. Das Vorhandensein zweier Antriebsstränge ist jedoch auch Grund für die geringe Verbreitung von PHEV. So erhöhen sich dadurch sowohl Investitionen als auch Gewicht gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen deutlich.

Status quo der Parameter für PHEV im Jahr 2015

Die Bestimmung der Parameter für PHEV orientiert sich stark an der Vorgehensweise, die bei BEV angewendet wurde. Es wird bei der Berechnung der Investitionen ebenso ein konventioneller Diesel-Lkw zugrunde gelegt, der um einen elektrischen Antriebsstrang ergänzt wird. Daher fallen wie bei BEV zusätzlich Kosten für Elektromotor, Steuerung und Leistungselektronik und sonstige Komponenten sowie Batterie an. Für den Antriebsstrang wird die gleiche Leistung wie bei BEV vorausgesetzt, wodurch sich die Investitionen gemäß Tabelle 46 ergeben.

Der einzige Unterschied gegenüber den Investitionen für BEV resultiert bei PHEV aus den geringeren Batteriekosten. So wird bei PHEV eine erforderliche elektrische Reichweite von 100 km angenommen, womit diese zwei Drittel der BEV-Reichweiten beträgt (Hülsmann et al. 2014). Unter Berücksichtigung des Verbrauchs von PHEV im elektrischen Fahrmodus und der DoD (Depth of Discharge, (dt. Entladetiefe)) ergeben sich die in Tabelle 46 dargestellten Batteriekapazitäten (elektrische Tankgröße). Für die Größe des konventionellen Energiespeichers von PHEV, also den Kraftstofftank, wurde der Wert des ausschließlich konventionell angetriebenen Fahrzeugs herangezogen. Es ist davon auszugehen, dass sich eine Abweichung vom Standardaufbau eines konventionellen Fahrzeugs nicht lohnt. Die Verkleinerung des Tanks würde relativ gering ausfallen und die auftretenden Kosten würden durch eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch etwaige Gewichtseinsparungen nicht ausgeglichen.

Grundsätzlich verbraucht ein konventionell angetriebenes Nutzfahrzeug am meisten Energie. So liegt der Verbrauch eines Diesel-Lkw in der Regel leicht über dem eines PHEV-Lkw im konventionellen Antriebsmodus. Grund hierfür ist die Rekuperation von Bremsenergie und die Pufferwirkung durch die Fahrzeugbatterie eines PHEV. Als Quelle wurden wie im vorigen Abschnitt für BEV (Hülsmann et al. 2014 und Hacker et al. 2015) herangezogen. Ebenso erfolgte die Berechnung und Umrechnung der gegebenen Werte nach dem gleichen Vorgehen wie bei BEV. Je nach Gewichtsklasse liegt der Energieverbrauch eines konventionellen Diesel-Lkw 7 bis 9 % über dem Dieselverbrauch eines PHEV. Einzige Ausnahme stellen SZM dar, wo ein Mehrverbrauch von nur ca. 2 % zu verzeichnen ist. Grund hierfür ist der hohe Fahranteil von SZM auf Autobahnen, wo eine deutlich geringere Anzahl an Brems- und Anfahrvorgängen zu verringerter Energieeinsparung durch Rekuperation führt. Im elektrischen Antriebsmodus ist der Energieverbrauch von PHEV mit dem von BEV vergleichbar. Zwar weisen die im Rahmen dieser Studie betrachteten PHEV ein höheres Leergewicht als BEV auf, die Unterschiede sind jedoch zu vernachlässigen, weswegen der im vorigen Abschnitt angegebene Energieverbrauch von BEV auch für den elektrischen Energieverbrauch von PHEV übernommen wurde (vgl. Tabelle 46).

Bei PHEV umfassen die Kosten für Wartung und Instandhaltung neben Reifenkosten aufgrund des konventionellen Antriebsstrangs Schmierstoffkosten, die denen des Diesel-Lkw entsprechen. Weiterhin fallen Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten in Höhe von 85 % des Werts von Diesel-Lkw (Details siehe Anhangkapitel 0) sowie Batteriekosten an. In Summe ergeben sich so Kosten für Wartung und Instandhaltung für PHEV die ca. 50 % über den Kosten für BEV liegen, was auf den zusätzlichen Diesel-Antriebsstrang zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 46).

Tabelle 46: Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2015

PHEV 2015		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	62.354	[2]	89.079	[2]	116.532	[2]	154.077	[2]	209.984	[2]
Tankgröße konventionell	l	75	[3]	120	[3]	120	[3]	570	[3]	570	[3]
Tankgröße elektrisch	kWh	40	[4]	70	[4]	100	[4]	130	[4]	160	[4]
Verbrauch konventionell	kWh/km	0,68	[5]	1,21	[5]	1,68	[5]	2,22	[5]	3,06	[5]
Verbrauch elektrisch	kWh/km	0,35	[5]	0,63	[5]	0,88	[5]	1,09	[5]	1,40	[5]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,143	[6]	0,266	[6]	0,308	[6]	0,339	[6]	0,382	[6]

[1] Lenz et al. 2010, [2] lastauto omnibus 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, [3] eigene Annahmen, [4] Hülsmann et al. 2014, [5] Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, [6] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

Da die betrachteten PHEV eine bestimmte Reichweite rein batterieelektrisch und somit lokal emissionsfrei zurücklegen können, wird davon ausgegangen, dass keine zusätzliche Abgasreinigung für den Dieselantriebsstrang erforderlich ist.

Entwicklung der Parameter bis 2030

Die Investitionen für PHEV in 2030 haben die gleichen Einflussfaktoren wie die der BEV. Auf der einen Seite stehen steigende Investitionen für das Basisfahrzeug aufgrund höherer Produktionskosten durch aerodynamische Optimierung des Fahrzeugs. Es wird angenommen, dass die Optimierung der motorischen Verbrennung und des Antriebssystems bei PHEV nur eine geringe Rolle spielen, da PHEV aufgrund des elektrischen Antriebsstrangs und der Rekuperation bereits hohe Effizienzgewinne beim Verbrauch erzielen können.

Auf der anderen Seite ergeben sich durch sinkende Kosten für die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs und durch massiv sinkende Batteriepreise bis 2030 in Summe geringere Investitionen (vgl. Tabelle 47).

Die Tankgröße des konventionellen Kraftstofftanks bleibt unverändert, wohingegen die Batteriegröße leicht erhöht wird (vgl. Tabelle 47). Da die Kosten für Batterien stark sinken und das erforderliche Volumen und Gewicht der Batterie aufgrund der zunehmenden Energiedichte ebenfalls abnimmt, erscheint eine Annäherung der elektrischen Reichweite an die von BEV sinnvoll.

Tabelle 47: Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2030

PHEV 2030		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	44.981	[2]	57.751	[2]	71.166	[2]	94.836	[2]	140.537	[2]
Tankgröße konventionell	l	75	[3]	120	[3]	120	[3]	570	[3]	570	[3]
Tankgröße elektrisch	kWh	50	[4]	80	[4]	110	[4]	140	[4]	180	[4]
Verbrauch konventionell	kWh/km	0,58	[5]	1,04	[5]	1,44	[5]	2,02	[5]	2,65	[5]
Verbrauch elektrisch	kWh/km	0,31	[5]	0,55	[5]	0,77	[5]	0,96	[5]	1,23	[5]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,101	[6]	0,190	[6]	0,201	[6]	0,207	[6]	0,214	[6]

[1] Lenz et al. 2010, [2] lastauto omnibus 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, [3] eigene Annahmen, [4] Hülsmann et al. 2014, [5] Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, [6] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012

Es wird weiterhin erwartet, dass sich bis 2030 der konventionelle Energieverbrauch von PHEV deutlich verbessert. Die Werte basieren auf (Hülsmann et al. 2014 und Hacker et

al. 2015). Der elektrische Energieverbrauch für 2030 stimmt mit dem Verbrauch von BEV, der sich aufgrund von aerodynamischer Optimierung verbessert, überein (vgl. Tabelle 47).

Bei den Kosten für Wartung und Instandhaltung ergibt sich aufgrund sinkender Batteriekosten eine Verringerung um ca. 50 % (vgl. Tabelle 47). Alle anderen Kostenpositionen werden als konstant angenommen.

3.3.3.4 Parameter für FCEV-Fahrzeuge

Im Gegensatz zu CNG-/LNG-Lkw weisen Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw) heute noch deutlich höhere Anschaffungspreise auf. Die Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Während Demonstrationsprojekte derzeit hauptsächlich bei Stadtbussen stattfinden, ist bei Pkw bereits die Serienreife erreicht. Die BZ-Lkw können von diesen Entwicklungen zukünftig profitieren. Während bereits derzeit aufgrund höherer Wirkungsgrade der Energieverbrauch bei BZ-Lkw etwa 17 % unter dem Energieverbrauch von Diesel-Lkw liegt, betragen die Anschaffungs- und Wartungskosten ein Vielfaches der Dieselergebnisse (vgl. Tabelle 48). BZ-Lkw sind derzeit auch teurer und weisen eine geringere Effizienz als HO-Lkw auf.

Tabelle 48: Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2015

FCEV 2015		Gewichtsklasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	157.300	[2]	203.718	[2]	248.307	[2]	318.089	[2]	696.070	[2]
Tankgröße	kWh	182,08	[3]	326,47	[3]	598,41	[3]	804,41	[3]	1046,58	[3]
Verbrauch	kWh/km	0,61	[4]	1,09	[4]	1,50	[4]	2,01	[4]	2,62	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,239	[5]	0,291	[5]	0,370	[5]	0,503	[5]	0,704	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Hülsmann et al. 2014, [3] eigene Annahmen, [4] Hülsmann et al. 2014, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012, Hülsmann et al. 2014

Wie bei nahezu allen alternativen Antriebstechnologien werden auch bei Brennstoffzellen-Lkw die Kosten mit steigendem technologischem Fortschritt sinken. Der Mehrpreis einer BZ-SZM beträgt daher im Jahr 2030 nur noch etwa 45.000 Euro (Hülsmann et al. 2014). Die größte Herausforderung bei der Senkung der Produktionskosten besteht nach derzeitigem Kenntnisstand (Wietschel et al. 2016a) darin, die Nebenkosten, die bei BZ-Pkw bereits in Serienfertigung vorhandenen sind, hochzukalieren, um diese bei BZ-Lkw einsetzen zu können. Die Effizienzsteigerungen bis zum Jahr 2030 führen dazu, dass BZ-Lkw etwa 85 % des Energiebedarfs eines Diesel-Lkw aufweisen (vgl. Tabelle 49). Insgesamt lassen sich beim Einsatz der Brennstoffzelle geringere Wirkungsgrade erzielen, als bei der Energieversorgung durch Oberleitungen oder Batterie. Bei Wartung und Instand-

haltung ist mit einer Angleichung der Kosten an die Dieseltechnologie zu rechnen (vgl. Tabelle 49).

Tabelle 49: Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2030

FCEV 2030		Gewichts- klasse	Q								
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	[1]	3,51 – 7,5 t	[1]	7,51 – 12 t	[1]	> 12 t	[1]	SZM	[1]
Investitionen	Euro	54.050	[2]	70.000	[2]	94.500	[2]	121.057	[2]	174.000	[2]
Tankgröße	kWh	156,59	[3]	280,77	[3]	514,63	[3]	691,79	[3]	900,06	[3]
Verbrauch	kWh/km	0,52	[4]	0,94	[4]	1,29	[4]	1,73	[4]	2,25	[4]
Wartung & Instandhaltung	Euro/km	0,054	[5]	0,083	[5]	0,102	[5]	0,118	[5]	0,137	[5]

[1] Lenz et al. 2010, [2] Hülsmann et al. 2014, [3] eigene Annahmen, [4] Hülsmann et al. 2014, [5] lastauto omnibus 2013, Propfe et al. 2012, Hülsmann et al. 2014

Zudem werden die Annahmen für die Kosten des Brennstoffzellensystems und des Druckgastanks sowie deren Lebensdauern für die Berechnung benötigt. Diese entstammen (Hülsmann et al. 2014, Propfe et al. 2012, Schneider 2014). Für das Brennstoffzellensystem werden 2015 Kosten von 400 Euro/kW_{el} und für das Jahr 2030 betragen diese 80 Euro/kW_{el}. Die Kosten des Druckgastanks werden mit 36,5 Euro/kWh im Jahr 2015 beziffert und mit 14 Euro für 2030. Als Lebensdauer für den BZ-Stack wird 240.000 km im Jahr 2015 und 400.000 km im Jahr 2030. Für den Druckgastank liegen diese Werte bei 483.000 km für 2015 und 483.000 km für 2030. Details zur Analyse der Brennstoffzellen-Lkw finden sich in (Gnann et al. 2017).

3.3.3.5 Fazit zum Vergleich der Antriebssysteme

Neben Diesel-Lkw werden zukünftig auch vermehrt CNG-/LNG-Lkw, PHEV- und BEV-Lkw sowie Brennstoffzellen-Lkw am Markt verfügbar sein. Bei allen alternativen Antrieben werden die Anschaffungskosten durch die Energiespeichertechnologien maßgeblich bestimmt. Drucktanks bei Wasserstoff und Erdgas und Batterien bei elektrisch betriebenen Lkw führen daher zu deutlich höheren Preisen als bei Diesel-Lkw. Derzeit weisen Erdgas-Lkw die geringsten Mehrkosten gegenüber Diesel-Lkw auf.

Werden Lkw über eine Infrastruktur dauerhaft mit Energie versorgt, so ergeben sich infrastrukturegebundene Alternativen zum Diesel-Antrieb. Beim Vergleich von infrastrukturegebundenen Lkw entfallen auf den HO-Lkw die geringsten Gesamtkosten. Sowohl die Stromschienen-Technologie als auch die Übertragung der Energie mit Induktion weisen nach heutigem Kenntnisstand höhere Anschaffungskosten und bei der induktiven Übertragung durch geringere Wirkungsgrade auch höhere Energiekosten als HO-Lkw auf.

Generell unterschieden sich die Antriebssysteme bei Investitionen und variablen Kosten. Alternative Antriebe weisen in der Regel (deutlich) höhere Anschaffungskosten aber ge-

ringe variable Kosten durch höhere Wirkungsgrade auf. Daher sinken bei alternativen Antrieben die spezifischen Transportkosten pro Kilometer mit steigender Jahresfahrleistung stärker als bei Diesel-Lkw.

3.4 Fahrleistungsverteilung

Um abzuschätzen, wie die einzelnen Antriebsarten in den verschiedenen Gewichtsklassen bei einem Vergleich der Betriebskosten abschneiden, werden Informationen über die Verteilungen der Jahresfahrleistung in den einzelnen Gewichtsklassen benötigt. Ohne diese Informationen würde die TCO-Rechnung auf mittleren Jahresfahrleistungen beruhen und damit gäbe es pro Gewichtsklasse nur eine TCO-minimale Lösung. D.h. die komplette Gewichtsklasse würde sich für die eine günstigste Antriebstechnologie entscheiden. Da neben Unterschieden zwischen den Größenklassen auch eine Heterogenität bezüglich der Jahresfahrleistung innerhalb der Gewichtsklassen existiert, werden im Folgenden Verteilungen für Jahresfahrleistungen abgeleitet.

Im Gegensatz zu Pkw, deren Jahres- und Tagesfahrleistungen detailliert in Erhebungen wie dem Mobilitätspanel (MOP) oder Mobilität in Deutschland (MiD) erfasst werden, existieren für Lkw weniger umfassende und detaillierte Daten über Fahrprofile und Fahrleistungen einzelner Fahrzeuge. Die Erhebung Kraftverkehr in Deutschland (KiD) 2010 bietet als einzige deutschlandweite Befragung Datensätze zu Fahrzeugen differenziert nach Größenklassen an. Aus den Angaben zu Tachoständen und dem Datum der Erstzulassungen lassen sich für die Fahrzeuge durchschnittliche Jahresfahrleistungen ermitteln. Abbildung 24 zeigt die kumulierten Dichteverteilungen (CDF) der Jahresfahrleistungen in den Gewichtsklassen und die dazugehörigen Stichprobengrößen. Zur Validierung und Ergänzung der Stichproben aus der KiD 2010 (WVI et al. 2010) wurden Stichproben gebrauchter Fahrzeuge aus den Inseraten auf Online-Gebrauchtwagenbörsen herangezogen (Truckscout24 2016). Die daraus ermittelten Verteilungen bestätigten bis auf geringe Abweichungen die Werte aus der KiD 2010.

Für SZM ergibt sich dadurch eine Stichprobengröße von $n_{SZM} = 1.018$ Fahrzeugen. Der daraus berechnete Mittelwert beträgt etwa 114.000 km pro Jahr. Zur Validierung dieser Werte lassen sich die durch das KBA ausgewiesenen mittlere Jahresfahrleistungen nur bedingt heranziehen. Das KBA weist Jahresfahrleistungen nur für innerdeutsche Verkehre aus. Daher liegen die Jahresfahrleistungen des KBA mit etwa 81.000 km pro Jahr (KBA 2015a) unter den aus der KiD ermittelten Werte.

Das sich daraus ergebende Bild bestätigt den bereits erwähnten grundlegenden Zusammenhang zwischen Fahrzeuggewicht und Fahrleistung: Mit wachsendem zulässigem Gesamtgewicht steigt die jährliche Fahrleistung an: Während Fahrzeuge der Gewichtsklasse GK1 eine durchschnittliche Fahrleistung von etwa 18.000 km pro Jahr aufweisen, fahren Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t etwa 3,5-mal und Sattelzüge etwa 6-mal so viel Kilometer pro Jahr (vgl. Tabelle 50).

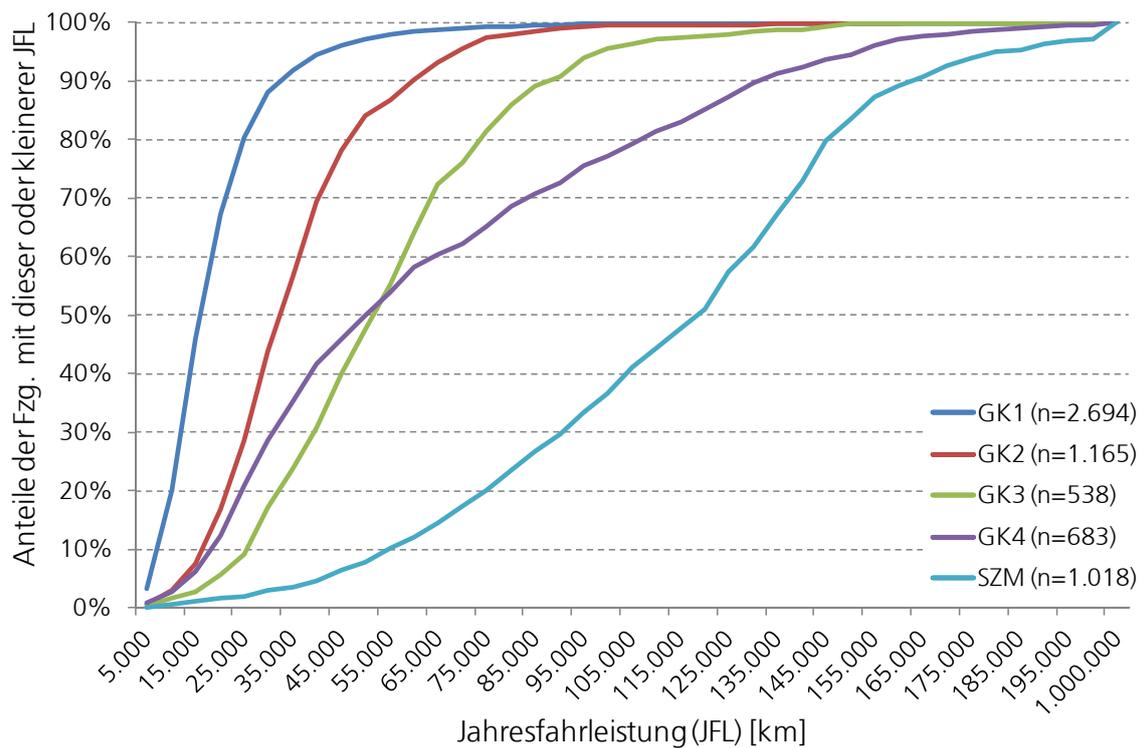


Abbildung 24: Kumulierte Dichteverteilung der Jahresfahrleistung auf Basis der Erhebung Kraftverkehr in Deutschland (KiD) 2010 (WVI et al. 2010)

Tabelle 50: Statistische Kennzahlen der Jahresfahrleistungsverteilungen (WVI et al. 2010, Truckscout24 2016)

Nutzfahrzeuge 2015 und 2030		Gewichtsklasse				
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	3,51 – 7,5 t	7,51 – 12 t	> 12 t	SZM
Mittelwert Fahrleistung	km/a.	18.872	35.315	54.459	63.901	113.914
Standardabweichung Fahrleistung	km/a	17.868	17.743	26.017	44.766	46.480

Die im Vergleich zu den Gewichtsklassen GK1 und GK2 mehr als doppelt so hohe Standardabweichung bei SZM und GK4 zeigt die Heterogenität hinsichtlich der Fahrleistungen innerhalb der Gewichtsklassen: Es existieren im Bestand einerseits Sattelzüge, die über 150.000 km pro Jahr fahren (etwa 16 % des Gesamtbestandes an SZM) und andererseits fahren etwa 8 % aller Sattelzüge weniger als 50.000 km pro Jahr.

Um die tägliche Fahrleistung der Lkw auf der Autobahn ermitteln zu können, muss aus der Jahresfahrleistung die Tagesfahrleistung abgeleitet werden. Dies kann mittels Division der Jahresfahrleistung durch die Anzahl der Betriebstage erfolgen. Da damit allerdings eine gewisse Unschärfe verbunden ist (z. B. zählt der Samstag zu den Betriebstagen?) wurde in dieser Studie auf die Angaben der Tagesfahrleistung in der Erhebung Kraftverkehr in Deutschland (KiD) 2010 (WVI et al. 2010) zurückgegriffen.

Somit lassen sich einerseits die Total Cost of Ownership basierend für unterschiedliche Jahresfahrleistungen sowie das Marktpotential für alternative Antriebstechnologien ermitteln und andererseits auf Basis der Tagesfahrleistung der Anteil der gefahrenen Kilometern auf Autobahnen ableiten.

3.5 Nutzlast- und Nutzvolumenverluste und ihre betriebswirtschaftliche Berücksichtigung

Neue Antriebstechnologien unterscheiden sich gewöhnlich neben den Antriebsaggregaten auch in der Art und Weise der Energiebereitstellung und -speicherung an Bord. Während konventionelle, dieselbetriebene Lkw den Kraftstoff in Metalltanks speichern, wird die Energie bei Hybrid-Oberleitung-Lkw über einen Pantographen aus der Oberleitung übertragen bzw. je nach Bauart durch ein Diesel-Aggregat oder eine Batterie zur Verfügung gestellt. Bei BEV wird der konventionelle Antriebsstrang inklusive des Kraftstofftanks durch einen elektrischen Antriebsstrang mit einer Batterie als Energiespeicher ersetzt, wohingegen bei PHEV ein elektrischer Antriebsstrang mit Batterie zusätzlich zum konventionellen Antriebsstrang im Fahrzeug verbaut wird. Diese Unterschiede gegenüber den Diesel-Lkw können bei höherem Gewicht der Energiespeicher-/Energieversorgungssysteme zu einer verminderten Nutzlast führen. Nimmt die Energiespeichertechnologie mehr Raum ein als ein Dieseltank und eine Verbrennungskraftmaschine, so kann zusätzlich das Nutzvolumen eingeschränkt werden.

Sowohl die Einschränkung des verfügbaren Transportraumes als auch eine geringere Nutzlast führen zu Mehrkosten der Transportdienstleister, da weniger Waren pro Lkw transportiert werden können. Zusätzlich dazu kann durch Veränderungen im Laderaum die Befahrbarkeit mit Flurfördergeräten (z. B. Gabelstapler, Hubwagen) eingeschränkt werden und damit die Be- und Entladungszeiten verlängern. Gespräche mit Transportdienstleistern ergaben zudem, dass Abweichungen von den standardisierten Sattelanhängern zur erheblichen Flexibilitätseinbußen der Transportdienstleister führen können, da Anhänger nicht mehr zwischen unterschiedlichen Sattelzugmaschinen getauscht werden können (Wietschel et al. 2016a).

Da sich die Auswirkungen veränderter Transportvolumina auf die Flexibilität und die Be- und Entladevorgänge nur bewerten lassen, wenn detaillierte Erkenntnisse über den Fahrzeugeinsatz, die Routenplanung, die Auslastung der einzelnen Lkw sowie die Be- und Entladezeiten vorliegen, liegt der Fokus in dieser Studie auf einer vereinfachten Abschätzung der Auswirkungen von Nutzvolumen- und Nutzlastverlusten auf die Produktionskosten der Transportdienstleister.

Nutzlastverlust des HO-Lkw

Im Unterschied zum Diesel-Lkw fällt die Dimensionierung des Diesel-Motors bei HO-Lkw geringer aus, da dieser lediglich für Strecken außerhalb des Oberleistungssystems ge-

nutzt wird. Zusätzlich dazu benötigt der HO-Lkw allerdings einen Pantographen zur Übertragung des Stroms aus der Oberleitung ins Fahrzeug, eine umfangreiche Steuerungselektronik sowie Sensortechnik, die erkennt, wenn der Pantograph das Oberleitungssystem verlässt oder betritt (Edel et al. 2014). In Summe führt diese technische Ausstattung dazu, dass derzeit die Nutzlast bei HO-Lkw im Vergleich zu Diesel-Lkw etwa 150 kg geringer ausfällt (Edel et al. 2014, Wietschel et al. 2016a), bei einer Nutzlast eines Sattelzuges von etwa 27 t entspricht dies einer Reduktion um etwa 1 %. Im Blick auf das Jahr 2030 kann dieser Nutzlastverlust durch Leichtbau und Optimierung der Fertigung sowie der einzelnen Bauteile voraussichtlich weiter optimiert werden, sodass davon auszugehen ist, dass im Jahr 2030 die Nutzlastverluste gegenüber der Diesel-Lkw wegfallen (Wietschel et al. 2016a).

Nutzvolumenverlust des HO-Lkw

Durch die zusätzliche Ausrüstung der HO-Lkw mit Pantographen und Steuerungselektronik wird derzeit das Nutzvolumen der Lkw gemindert. Derzeit benötigt der HO-Lkw einen Mehrbedarf an Volumen von etwa 3 m³ (Edel et al. 2014, Wietschel et al. 2016a). Bei einer Kleinserie ließe sich dies unter Einhaltung der gesetzlichen Maßbeschränkungen durch eine Verkürzung des Sattelanhängers unter Inkaufnahme einer geringeren Einsatzflexibilität erreichen. Mittel- bis langfristig ist davon auszugehen, dass der technologische Fortschritt die Nutzvolumenverluste egalisiert wird. Zudem ermöglicht die Richtlinie (EU) 2015/719 (EU 2015) die Überschreitung der gesetzlich zulässigen Gesamtgewichte und Fahrzeuglängen beim Einsatz von alternativen Antriebstechnologien, sofern diese ihre Verbreitung behindern.

Sowohl der Nutzlast- als auch der Nutzvolumenverlust der HO-Lkw finden bei der TCO-Betrachtung Berücksichtigung. Da detaillierte Informationen zur Auslastungen und Routenwahl der Lkw fehlen, wird vereinfacht angenommen, dass analog zum Rückgang der Ladekapazität die Fahrleistung bei gleicher Güterbeförderungsleistung ansteigt. Mit wachsender Fahrleistung steigen auch die Transportkosten (inklusive Personalkosten). Diese lassen sich dann als Aufschlag auf den Lkw-Kilometer berechnen und können so in die vergleichende TCO-Betrachtung miteinfließen. HO-Lkw erhalten damit zusätzlich zu den technologischen Kostendifferenzen einen Aufschlag aufgrund der geringeren Ladekapazität. Für das Jahr 2015 bedeutet dies für Sattelzüge einen Aufschlag von etwa 0,04 Euro/km. Die GK4 wird dadurch etwa 0,09 Euro/km teurer. Die Batterievariante des HO-Lkw erreicht durch das Batteriegewicht leicht höhere Aufschläge (siehe Abbildung 25). Da die Ladekapazitätsverluste bis zum Jahr 2030 abgebaut werden können, entstehen dann auch keine Mehrkosten mehr.

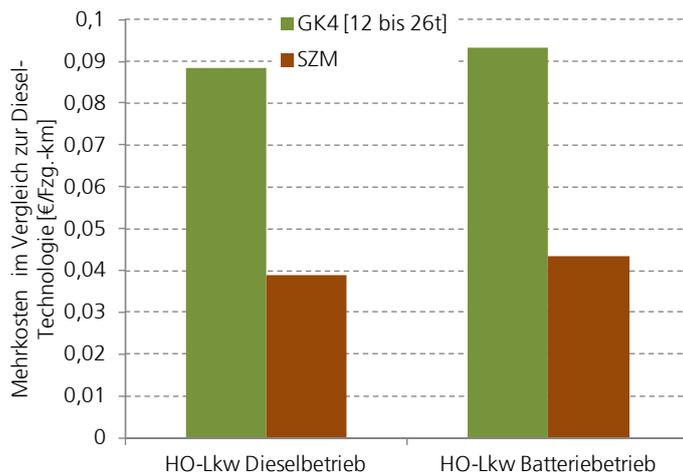


Abbildung 25: Mehrkosten der HO-Lkw pro Fahrzeugkilometer durch reduzierte Ladekapazität im Jahr 2015 (eigene Darstellung)

Nutzlastverlust bei BEV und PHEV

Der elektrische Antriebsstrang von BEV und PHEV ist deutlich leichter als ein vergleichbarer konventioneller Antriebsstrang (Dünnebeil et al. 2015). Wegen der geringen gravimetrischen Energiedichte von Batterien (0,115 kWh/kg) im Vergleich zu Diesel (12,22 kWh/kg) ergibt sich jedoch in aller Regel ein erhöhtes Leergewicht für BEV und PHEV gegenüber konventionellen Diesel-Lkw, was zu Nutzlastverlusten führen kann. Im Jahr 2015 ergeben sich so für BEV in GK1 bis GK3 Nutzlastverluste von 3 bis 8 % wohingegen in GK4 und bei SZM keine Verluste auftreten (vgl. Kapitel 12.4). Grund hierfür ist, dass das Batteriegewicht mit zunehmender Gewichtsklasse einen immer geringeren Anteil am Fahrzeuggewicht ausmacht. Aufgrund einer Verdopplung der Energiedichte von Batterien bis 2030 auf 0,215 kg/kWh (Thielmann et al. 2015) sind bei BEV sogar Nutzlastgewinne gegenüber konventionellen Diesel-Lkw möglich. Bei PHEV liegen die Nutzlastverluste für 2015 zwischen 18 % in GK1 und 4 % bei SZM. Sie halbieren sich bis 2030, wodurch die Nutzlastverluste auf 10 bis 2 % sinken.

Nutzvolumenverlust bei BEV und PHEV

Beim Nutzvolumen wird davon ausgegangen, dass es in keiner Gewichtsklasse zu einer Reduktion kommt. Die Batterien, welche volumenbezogen die mit Abstand größte Komponente eines elektrischen Antriebsstrangs darstellen, werden in GK1 im Fahrzeugboden untergebracht, während in den übrigen Gewichtsklassen die Batterien außerhalb des Fahrzeugs bzw. unterhalb des Laderaums angebracht werden, vergleichbar mit den konventionellen Kraftstofftanks. Fahrzeugskizzen von BEV-Umrüstern bzw. -Herstellern unterstützen diese Annahme (E-FORCE ONE 2016, Smith 2011). Der elektrische Antriebsstrang selbst weist ein relativ geringes Bauvolumen auf und kann deshalb ebenfalls ohne Beeinträchtigung des Laderaums im Fahrzeug untergebracht werden.

Schlussendlich führen die Veränderungen der Nutzlast zu Mehr-, bzw. Minderkosten, da diese in die TCO mit einfließen. Im Jahr 2015 ist in den Gewichtsklassen GK1 bis GK3 bei BEV mit Mehrkosten zu rechnen, in GK4 und bei SZM hingegen können bereits minimale Einsparungen erzielt werden. Bis ins Jahr 2030 können über alle Gewichtsklassen hinweg bei BEV Vorteile durch Nutzlastgewinne erzielt werden, die zwischen 5 EuroCent/km bei SZM und 19 EuroCent/km in GK 1 liegen. Die größte Differenz zeigt sich für BEV in GK1. Auf der einen Seite ergibt sich in 2015 ein Aufschlag von 20 EuroCent/km, wohingegen in 2030 Einsparungen aufgrund der Nutzlastzunahme in Höhe von 19 EuroCent/km erzielt werden können (vgl. Abbildung 26).

Ein anderes Bild ergibt sich bei PHEV. Sowohl in 2015 als auch in 2030 ist mit Mehrkosten aufgrund von Nutzlastverlusten zu rechnen, wobei sich diese über alle Gewichtsklassen hinweg bis 2030 in etwa halbieren (vgl. Abbildung 27). Die Mehrkosten von PHEV in GK1 über 44 EuroCent/km in 2015 und 24 EuroCent/km in 2030 sind mit Abstand am höchsten. Demgegenüber stehen Mehrkosten von 7 EuroCent/km und 3 EuroCent/km bei SZM.

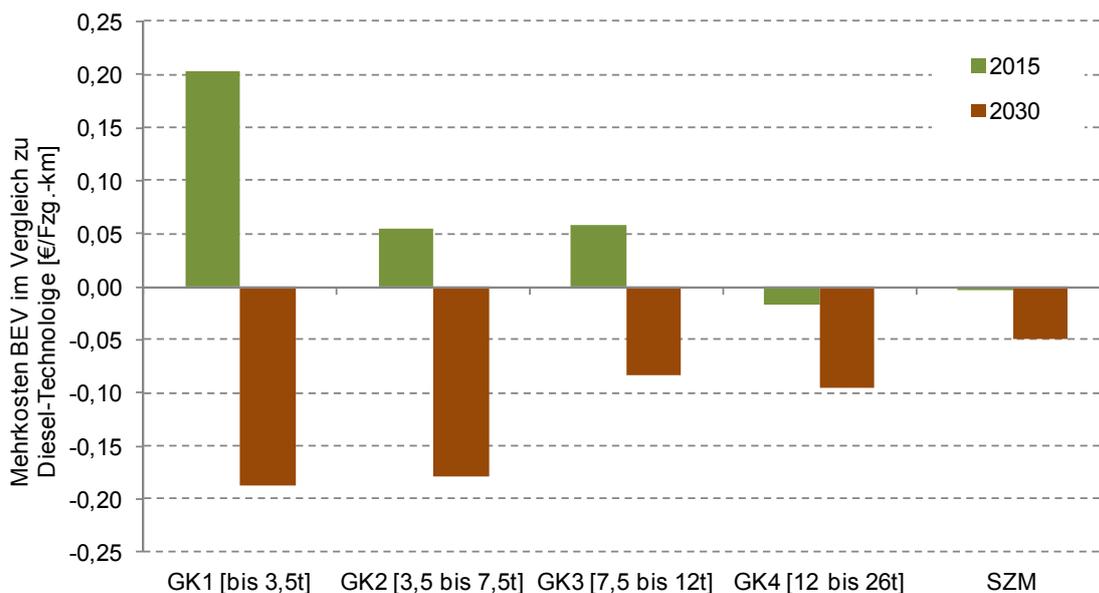


Abbildung 26: Mehr-/Minderkosten bei BEV pro Fahrzeugkilometer durch veränderte Ladekapazität im Jahr 2015 und 2030) (eigen Darstellung)

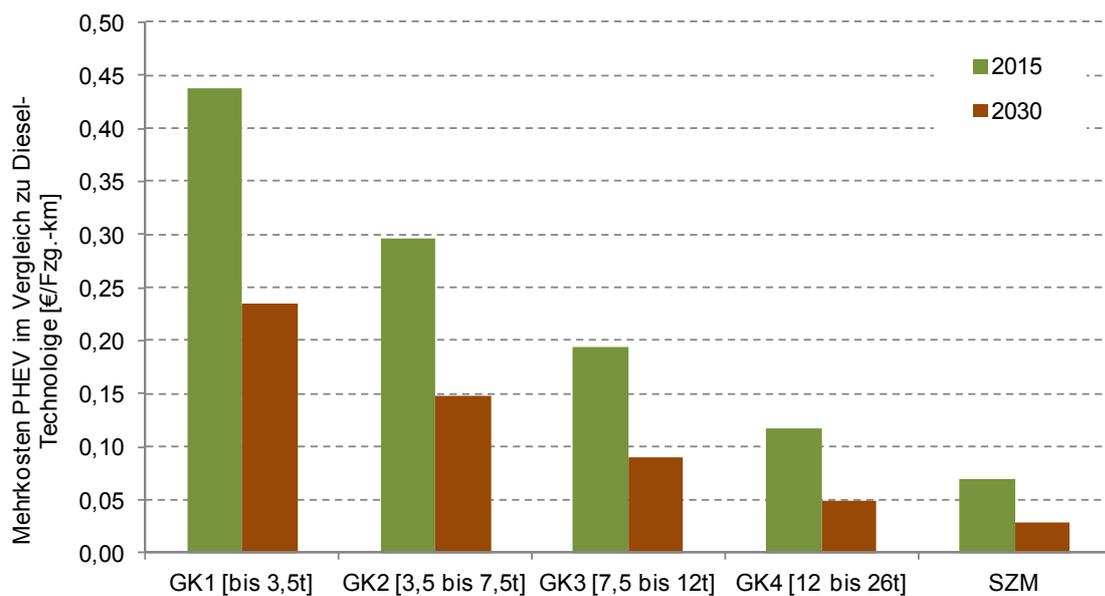


Abbildung 27: Mehrkosten bei PHEV pro Fahrzeugkilometer durch veränderte Ladekapazität im Jahr 2015 und 2030

Nutzlast- und Nutzvolumenverlust bei BZ-Lkw

Im Wesentlichen unterscheiden sich BZ-Lkw von konventionellen Lkw dadurch, dass der Drucktank zur Speicherung von Wasserstoff ein größeres Volumen einnimmt als die derzeit verwendeten Dieseltanksysteme. Das Brennstoffzellenaggregat nimmt hingegen mittlerweile kaum mehr Platz ein als die konventionelle Verbrennungskraftmaschine (Wietschel et al. 2016c, Gnann et al. 2017). Bei der Dimensionierung der Tanksysteme zeichnet sich ab, dass bei einer täglichen Reichweite von etwa 800 kg bis 1.000 kg kein Mehrgewicht zum Dieseltanksystem auftritt (Wietschel et al. 2016c).

Durch den zusätzlichen Platzbedarf der Tanks wird derzeit das Nutzvolumen der Lkw gemindert. Derzeit benötigt der BZ-Lkw einen Mehrbedarf an Volumen von etwa 3 m³ (Wietschel et al. 2016a). Analog zum HO-Lkw ließe sich dies bei einer Kleinserie unter Einhaltung der gesetzlichen Maßbeschränkungen durch eine Verkürzung des Sattelanhängers unter Inkaufnahme einer geringeren Einsatzflexibilität erreichen. Mittel- bis langfristig ist wie beim HO-Lkw davon auszugehen, dass der technologische Fortschritt die Nutzvolumenverluste egalieren wird. Zudem ermöglicht die Richtlinie (EU) 2015/719 (EU 2015) die Überschreitung der gesetzlich zulässigen Gesamtgewichte und Fahrzeuglängen beim Einsatz von alternativen Antriebstechnologien, sofern diese ihre Verbreitung behindern. Damit kann für das Jahr 2030 davon ausgegangen werden, dass BZ-Lkw keine Nutzlast- und Nutzvolumenverlusten gegenüber der Dieseltanktechnologie aufweisen.

3.6 Zusammenfassung zu Fahrzeugtechnologien

Der Bestand an Nutzfahrzeugen wird, bedingt durch den Anstieg der Güterbeförderungsleistung, auch in Zukunft weiter zunehmen. Von dem Anstieg sind besonders Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t betroffen.

Das Marktpotential alternativer Antriebstechnologien hängt von den Betriebskosten ab. Generell liegt der Anteil der Kraftstoffkosten bei Lkw mit Fahrleistungen um 100.000 km/a mit über 40 % (Wittenbrink 2011) der Gesamtkosten (ohne Fahrerkosten) mehr als doppelt so hoch wie bei Pkw (Gnann 2015). Alternative Antriebe weisen in der Regel höhere Anschaffungspreise, aber geringere variablen Kosten als Diesel-Lkw auf. Daher sinken die spezifischen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer bei alternativen Antrieben mit wachsender Fahrleistung schneller als bei Diesel-Lkw.

Alle alternativen Antriebstechnologien werden auch bis zum Jahr 2030 deutlich höhere Anschaffungskosten als Diesel-Lkw aufweisen. Elektrisch betriebene Lkw weisen die höchsten Wirkungsgrade und damit den geringsten Energieverbrauch auf. Neben Batterien können diese auch über eine externe Infrastruktur versorgt werden. Induktive Stromübertragung und die Stromschienentechnologien liegen sowohl bei den fixen als auch bei den variablen Kosten über der Oberleitungstechnologie. Der Diesel-Oberleitungshybrid weist von allen infrastrukturegebunden Konzepten die geringsten Kosten auf.

Nutzlast- und Nutzvolumenverluste spielen besonders beim Einsatz von großvolumigen und schweren Batterien eine Rolle. Bei BZ- und HO-Lkw werden diese aus heutiger Sicht durch die Möglichkeit der Verlängerung der Fahrzeuge (Richtlinie (EU) 2015/719, EU 2015) und durch den technologischen Fortschritt bis zum Jahr 2030 keinen negativen Einfluss mehr haben.

TEIL 2: MARKENTWICKLUNG FÜR INFRASTRUKTUR UND FAHRZEUGE

4 Ausbau der HO-Infrastruktur entlang der Autobahnen

Hauptbearbeiter/innen: V. Waßmuth, D. Paufler-Mann (PTV TC GmbH)

4.1 Einleitung

In diesem Abschnitt werden in verschiedenen Netzanalysen die spezifischen Grundlagen und Anforderungen des deutschen Autobahnnetzes berücksichtigt und für die weitergehenden Analysen ausgewertet.

4.2 Auswahl an Autobahnen für Ausstattung mit Hybrid-oberleitungen

Die BVWP-Verflechtungsprognose und das Modell Validate als Datengrundlage

Zur Abbildung der Verkehrsverflechtungen im deutschlandweiten Kontext und zur Ableitung von netzspezifischen Untersuchungen wird im Rahmen der MKS das deutschlandweite Verkehrsmodell PTV Validate eingesetzt. Validate bildet das Verkehrsgeschehen im Straßennetz in Deutschland ab und berücksichtigt dabei den europäischen Bezug. Verkehrsmengen und Verkehrsströme werden für den Straßenverkehr getrennt für Pkw und Lkw abgebildet. Für alle Teilgebiete/Regionen und Strecken können Analysen durchgeführt und miteinander verglichen werden. Das Validate-Modell beinhaltet über 10.000 Verkehrszellen, 5,6 Mio. Einzelstrecken (basierend auf kommerziell erwerbbaaren Navigationsnetzen und ca. 120 Mio. tägliche Fahrten). Somit kann eine hohe räumliche Differenzierung erreicht werden, die für die Analyse von Lkw-Routen und Autobahnanteilen von Bedeutung ist. Im Modell ist ein umfangreicher Strukturdatensatz verarbeitet, der neben Einwohnern, Schulen und Arbeitsplätzen auch Haushaltsbefragungen (wie z. B. der Studie Mobilität in Deutschland – MiD) und Pendlerdaten der Bundesagentur für Arbeit umfasst.

Das Gesamtmodell bildet das Verkehrsgeschehen der Bevölkerung und der Wirtschaftsunternehmen im motorisierten Individualverkehr und im straßenbezogenen Güterverkehr nach. In der Überlagerung der über 100 Mio. abgebildeten Einzelfahrten im deutschen Straßennetz ergeben sich Verkehrsmengen auf den relevanten Straßen des deutschen Streckennetzes. Dieses umfasst neben dem klassifizierten Netz auch alle innerstädtischen Strecken mit Verbindungsfunktion. Transitverkehr sowie Quell- und Zielverkehr Deutschlands werden im europäischen Kontext abgebildet.

Mit dieser Modellgrundlage können die Auswirkungen von veränderten Rahmenbedingungen auf das Verkehrsgeschehen im deutschen Straßennetz detailliert in einem sog. „Bottom-up“-Ansatz ermittelt werden, d. h. das verkehrliche Ergebnis ergibt sich aus der Aufsummierung der Einzelwirkungen je Strecke für ein bestimmtes Gebiet bzw. Deutsch-

land. Die Grundlage ist durch die Information über die zugrundeliegenden Routen auch in der Lage, Aussagen über den Autobahnanteil der Lkw-Fahrten zu treffen.



Quelle: PTV, eigene Darstellung

Abbildung 28: Validare – Ergebnisdarstellung Belastungen Pkw/Lkw

Für die Projektanforderungen wurde zunächst der Referenzfall 2030 auf Basis des BVWP 2030 nachgebildet. Für die vorliegende Untersuchung ist lediglich die Prognose des Güterverkehrs mit dem Lkw von Bedeutung. Hierfür ist die Erarbeitung von Güterverkehrsmatrizen, ausgehend von Tonnenmatrizen aus dem BVWP 2030 je Güterabteilung, erforderlich. Darauf aufbauend muss die Transformation in Fahrzeugmatrizen mit gleichzeitiger Verteilung auf verschiedene Fahrzeugklassen vorgenommen und räumlich differenziert aufbereitet werden. Der Bearbeitungsansatz sieht eine Modellierung auf einem konstanten (Analyse-)Netzstand vor, um nicht Maßnahmenwirkungen durch Netzänderungen zu überdecken. Zudem ist bis zur Veröffentlichung des Referentenentwurfs des BVWP 2030 keine Prognosenetzdefinition möglich.

Im BVWP wird auf Basis detaillierter Prognoserechnungen für die Warenströme in/von/nach und durch Deutschland in der Einheit Tonnen pro Jahr eine Lkw-Fahrleistung für den Prognosezeitpunkt 2030 ermittelt. Dementsprechend wächst die Lkw-Fahrleistung im deutschen Straßennetz von 77,6 Mrd. Lkw-km im Jahr 2010 auf 99,7 Mrd. Lkw-km im Jahr 2030 (Intraplan et al. 2014). In Validare liegt analog zum Personenverkehr auch für den Güterverkehr eine kalibrierte Lkw-Nachfrage für die Analyse-Situation vor. Daher ist es möglich, auch die Güterverkehrsprognose 2030 des Referenzfalls abzubilden.

Wie bereits dargestellt, werden die BVWP-Tonnenmatrizen der Analyse 2010 auf NUTS3-Ebene als Grundlage verwendet. Diese liegen in 25 Gütergruppen aufgeteilt vor. So werden gemäß der Einteilung nach NST-2007 (Statistisches Bundesamt 2008) bis zu 20 Gü-

terabteilungen zusammengefasst. Wegekettens des kombinierten Verkehrs wurden ergänzend aufgeteilt. Diese werden in Form von Containern und auf der Straße durch Sattelzüge durchgeführt. Diese Transporte werden gesondert ausgewertet und dem Segment Sattelzug zugeordnet. Im Anschluss an diesen Arbeitsschritt lassen sich die Tonnenmatrizen initial im Validate-Netz umlegen und die jeweiligen Anteile der Güterabteilungen nach transportierten Tonnen und nach Tonnenkilometern auswerten.

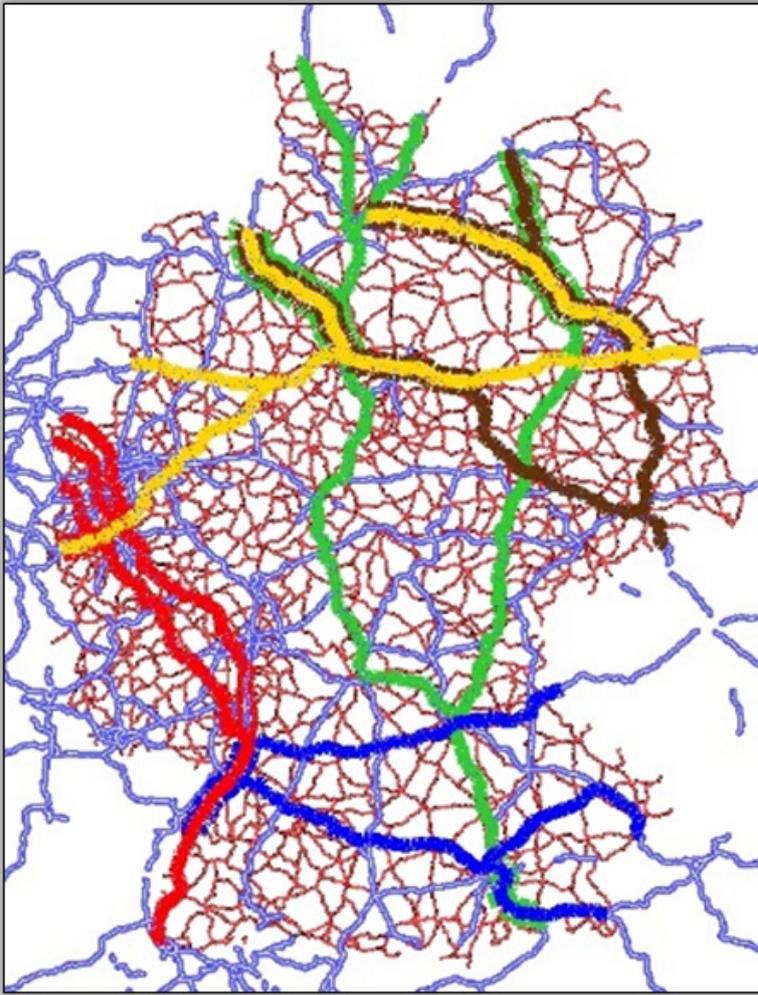
Die Umrechnung der Tonnenströme in netzrelevante Fahrten umfasst mehrere Arbeitsschritte. Datengrundlage hierfür sind neben den Daten zum Referenzfall auch die Statistiken in der Einteilung des Kraftfahrtbundesamtes (KBA). Hier war die bereits beschriebene Unterteilung in Fahrzeuggrößenklassen vorzuhalten. Die folgenden Klasseneinteilungen nach zulässigem Gesamtgewicht (zGG) wurden vorgenommen:

- 3,5 bis 7,5 Tonnen zGG
- 7,5 bis 12 Tonnen zGG
- 12 bis 26 Tonnen zGG und
- Sattelzüge.

Leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 t zGG) sind für HO-Lkw nicht relevant, da sie zu wenig auf Autobahnen verkehren. Wichtig bei der Betrachtung der Fahrzeuggrößen ist die Unterscheidung nach Größenklassen bezüglich Nutzlast und zulässigem Gesamtgewicht. Für jede Güterabteilung und jeden Fahrzeugtyp wird eine distanzabhängige Nutzenfunktion ermittelt. Hier fließen Daten des KBA zu transportierten Tonnen und Transportleistungen ein. Zudem werden Annahmen zur Aufteilung auf Fahrzeugtypen getroffen. Anhand der so ermittelten Anteile werden die Fahrtenmatrizen in Validate aufgeteilt und können für verschiedene Güterabteilungen und Fahrzeugtypen umgelegt und ausgewertet werden. Somit steht der Referenzfall 2030 nicht nur für ein detailliertes Streckennetz zur Verfügung, sondern auch in einer Differenzierung nach Lkw-Größenklassen und Güterabteilungen. Die Daten können gebiets- oder routenbezogen ausgewertet werden. Exemplarisch können die Fahrleistungsanteile von Sattelzugmaschinen auf den transeuropäischen Netzen ausgewertet werden.

Hierfür wurden die Korridore im Netzmodell hinterlegt. Durch Analyse der Verkehrszusammensetzung auf den einzelnen Strecken lässt sich die Fahrleistung auf den Gesamtkorridoren für das betrachtete Fahrzeugsegment ermitteln. Durch die Kenntnis des Modells über Quelle und Ziele der einzelnen Fahrten lässt sich der jeweilige Anteil des Transits an der Streckenbelastung ableiten. Daraus lässt sich der Anteil des Transits an der Fahrleistung der Korridore wie in Tabelle 51 dargestellt ableiten.

Auch wenn der Transitanteil auf den einzelnen Streckenelementen in der Regel recht gering ist, ergeben sich aufgrund der großen Fahrtweite im Transitverkehr recht hohe Anteile im Bereich von 10-20 %. Unter Transit wird hier der gesamte Durchgangsverkehr durch Deutschland verstanden, auch wenn er den jeweiligen Korridor nur abschnittsweise verwendet.



Quelle: PTV, eigene Berechnungen

Abbildung 3: Verkehrsströme auf den TEN-T-Korridoren

Tabelle 51: Transeuropäische Netze – Sattelzug – Fahrleistungsanteil Transit

	5,6	3,4	7,9	4,6	3,5
Fahrleistung Gesamt [Mio. Sattelzug-km]	5,6	3,4	7,9	4,6	3,5
Fahrleistung Transit [Mio. Sattelzug-km]	1,0	0,4	0,9	0,5	0,5
Anteil	17,8%	11,8%	11,4%	10,9%	14,3%

Quelle: PTV, eigene Berechnungen

Auf dieser Datenbasis wurden die netzseitigen Auswertungen durchgeführt. Für die netzseitige Betrachtung des Ausbaus der HO-Infrastruktur wurden verschiedene Modellierungen und -auswertungen auf Basis PTV-Validate durchgeführt. Diese Aufbereitungen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

4.2.1 Auswertung der Distanz zur BAB

Um das Wirkungspotential von Oberleitungs-Lkw auf deutschen Autobahnen abschätzen zu können, ist eine Betrachtung von Anfahrtswegen zur Autobahnanschlussstelle hilfreich. Die technischen Überlegungen in den vorangegangenen Kapiteln kommen zu dem Schluss, dass der HO-Lkw als Batterievariante eine Reichweite von bis zu 100 km ohne Ladevorgang haben kann. Damit dieser Lkw es ggf. ohne Zwischenladen von der Autobahn zum Bestimmungsort und zurück zur Autobahn und somit zur Ladeinfrastruktur schafft, wird für das weitere Vorgehen von einer Fahrtweite von 50 Kilometern abseits der Autobahn ausgegangen.

Für die Analysen wurden im Modell PTV-Validate alle Fahrtbeziehungen betrachtet, die mindestens Start oder Ziel in Deutschland haben; der Transitverkehr mit Start und Ziel im Ausland ist für diese Auswertung nicht relevant. Für alle Fahrtbeziehungen lassen sich über eine Kenngrößenermittlung die zugehörigen Distanzen ermitteln. Aus diesen Daten kann man schließlich erkennen, wie viele Lkw-Fahrten in einer definierten Distanzklasse liegen. Die Gesamtdistanz umfasst dabei alle verwendeten Straßenkategorien inkl. der Autobahnen. Hieraus können Weglängenverteilungen aufbereitet werden (vgl. Abbildung 29).

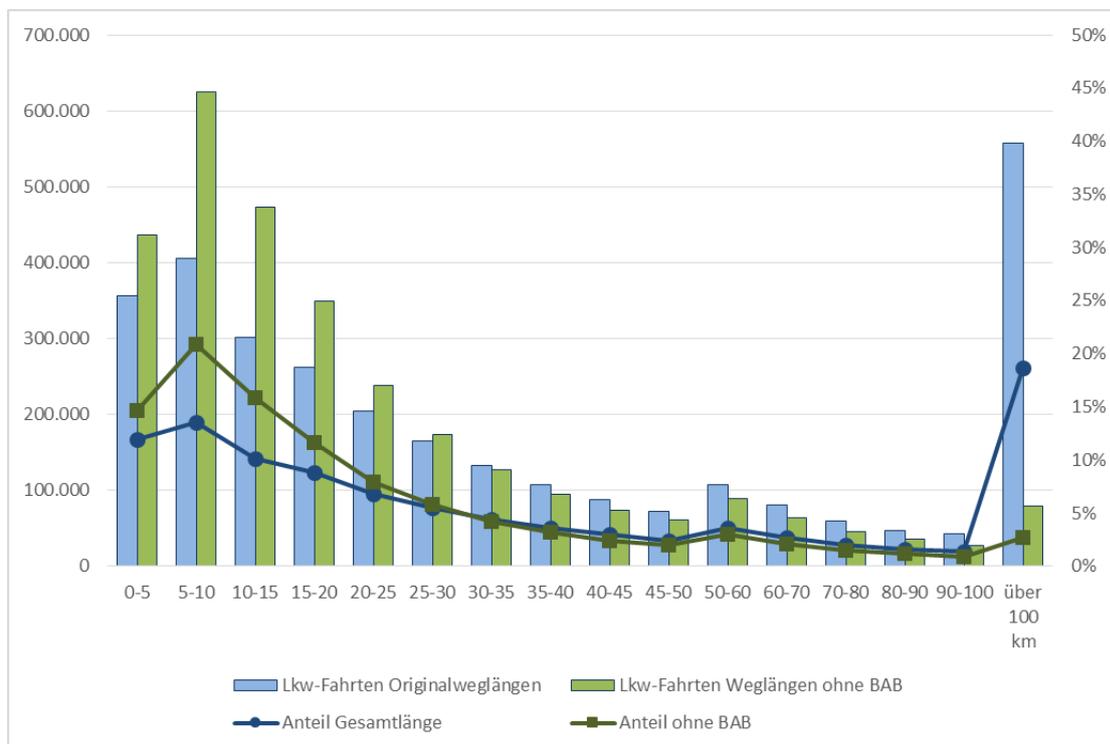


Abbildung 29: Lkw-Fahrten in den Distanzklassen mit und ohne BAB-Anteil

Für alle Routen wurden in einem nächsten Schritt die Distanzen der relevanten Fahrtbeziehungen ohne den Streckenanteil berechnet, der auf Autobahnen zurückgelegt wird. Es liegen jetzt deutlich mehr Fahrten in den niedrigen Distanzklassen. Die verbliebenen

Fahrkilometer setzen sich aus Fahrten ohne BAB-Nutzung und den Fahrtabschnitten von bzw. zur Autobahn zusammen. Während bei der Fahrtlängenverteilung immerhin 19 % mit einer Fahrtstrecke über 100 km identifiziert werden können, reduziert sich dieser Anteil ohne Berücksichtigung der Autobahnkilometer auf 4 %. Dafür nehmen die Fahrten im Bereich bis 25 Kilometer entsprechend deutlich zu. Es kann davon ausgegangen werden, dass genau diese Fahrten nun nur noch den Nicht-Autobahnanteil aufweisen, der deutlich unter den geforderten 50 Fahrkilometern liegt. Die Änderungen im mittleren Distanzbereich von 25 bis 90 Kilometern sind gering – hier sind vermutlich maßgeblich Überlandfahrtbeziehungen ohne nennenswerten BAB-Anteil angesiedelt.

In einem Vergleich der Summenlinien (Abbildung 30) kann man erkennen, dass 89 % der Lkw-Fahrten weniger als 50 Kilometer im nachgeordneten Netz abwickeln.

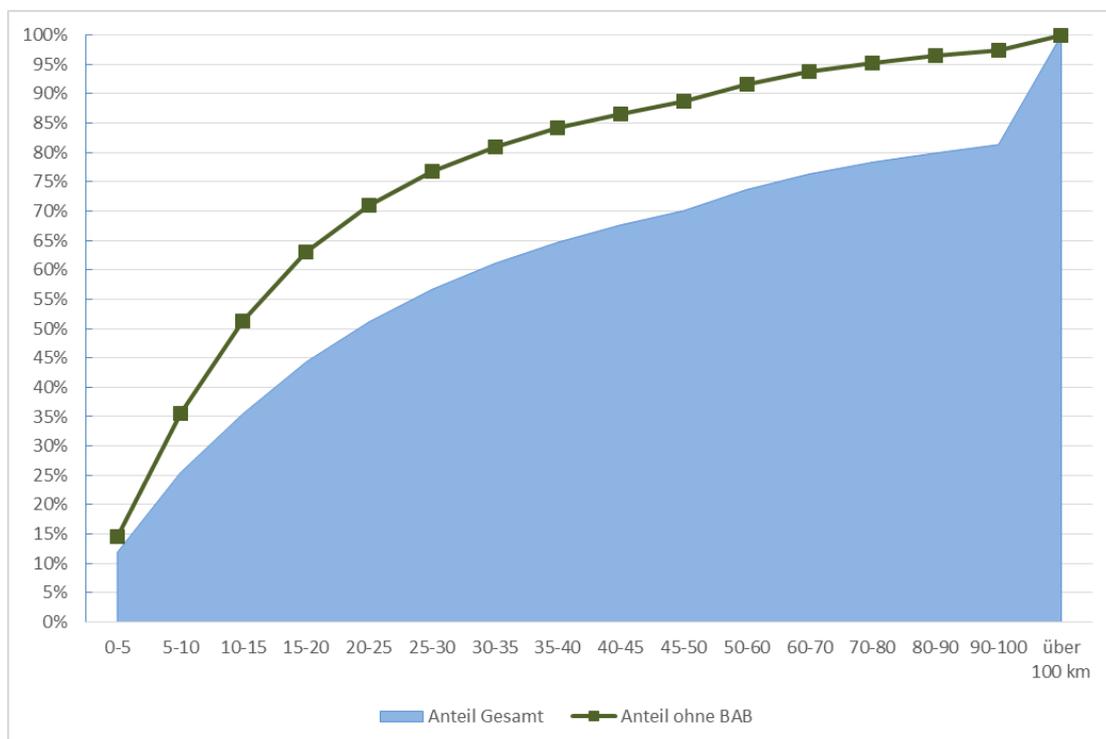


Abbildung 30: Summenlinie der Distanzklassenanteile mit und ohne BAB-Anteil

Dieser Wert setzt sich zusammen aus Fahrten, die gänzlich ohne Autobahnnutzung auskommen und Fahrten, die im untergeordneten Netz von bzw. zur Autobahn verkehren. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass die meisten Fahrten einen Anteil von und einen Anteil zur Autobahn besitzen und somit das Fahrzeug zwischendurch geladen werden kann.

Mit einem Einzugsbereich von rund 50 km um die Autobahnanschlussstellen kann also der überwiegende Teil der Lkw-Fahrten als Potential für eine Elektrifizierung angesehen werden, falls das gesamte Autobahnnetz elektrifiziert wäre. Bei nur einem sehr geringen Anteil an Lkw-Fahrten reichen 50 km für Anbindung an das Autobahnnetz nicht aus. Ein-

schränkend ist jedoch zu ergänzen, dass hier nur einzelne Lkw-Fahrten betrachtet wurden, sodass es bei der Verkettung von mehreren Fahrten ohne Autobahnanteil zu einer Überschreitung der 50 km kommen kann.

4.3 Festlegung der umzusetzenden Korridore

Ziel der Aufbereitung im Projekt war es, eine Streckenauswahl zu treffen, auf dem ein HO-Betrieb von Lkw möglich ist.

Grundlage der Streckenauswahl stellt die gesamte Verkehrsmenge an Lkw dar. Als Auswahlkriterium werden Lkw-Belastungszahlen auf Bundesautobahnen herangezogen, wie die folgende Abbildung 31 zeigt.

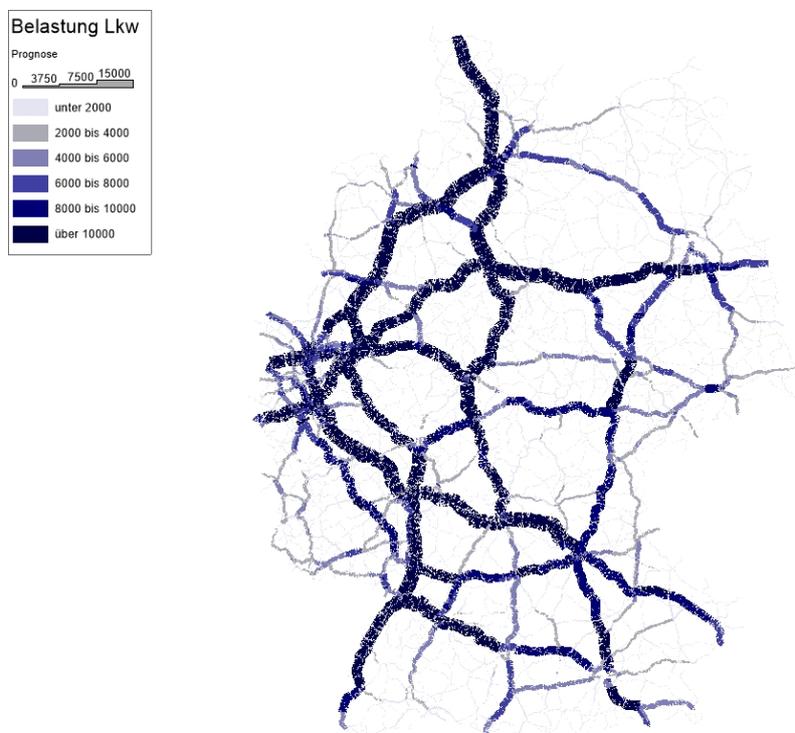


Abbildung 31: Belastungszahlen aller Lkw auf bundesdeutschen Fernstraßen, abgebildet im Validate-Modell (eigene Darstellung)

Die Affinität von Lkw für eine Stromzufuhr während der Fahrt ist bei Sattelzugmaschinen am höchsten. Aus diesem Grund erfolgt eine modellbasierte Betrachtung der Teilmengen der Sattelzugmaschinen auf dem deutschen Autobahnnetz. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 32 dargestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind die folgenden Karten mit gleicher Skalierung der Verkehrsmengen aufbereitet.

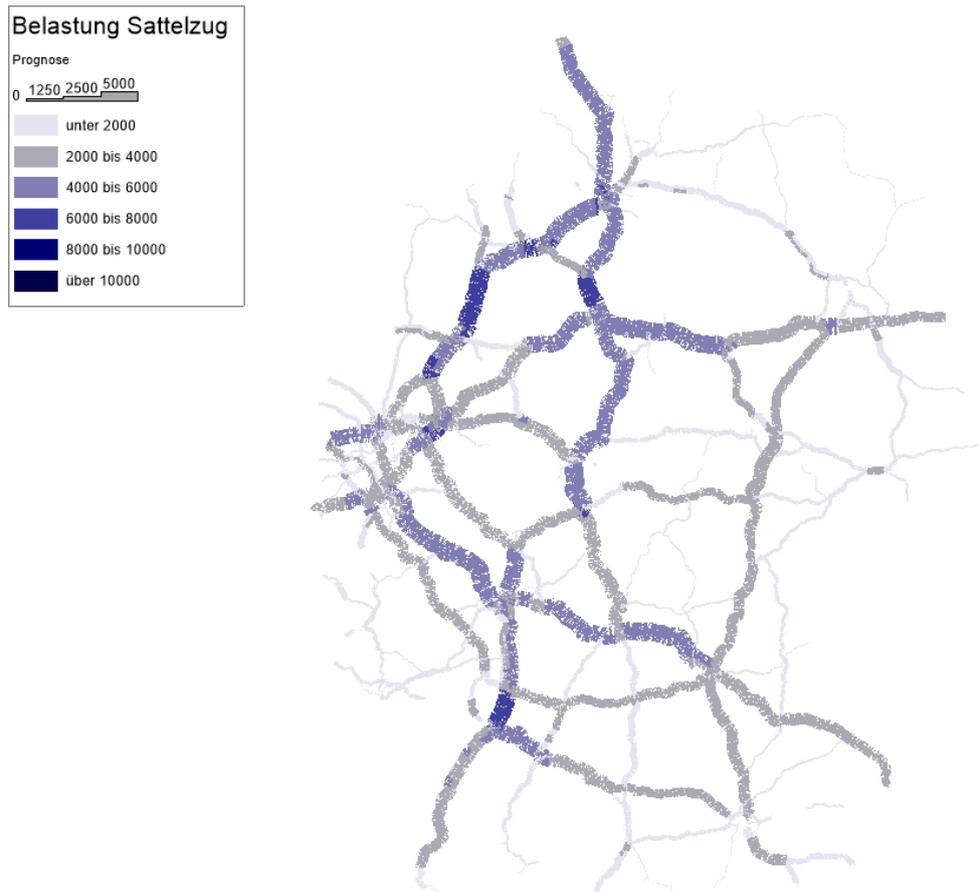


Abbildung 32: Belastungszahlen für Sattelzüge (eigene Darstellung PTV)

Auch wenn mittelfristig eine europäische Lösung anzustreben ist, werden für die Markthochlaufphase als Potential ausschließlich innerdeutsche Fahrten betrachtet. Dies reduziert die Fahrzeugmenge zusätzlich. Auch Abbildung 33 entspricht der identischen Skalierung und Farbgebung der vorausgegangenen Abbildungen.

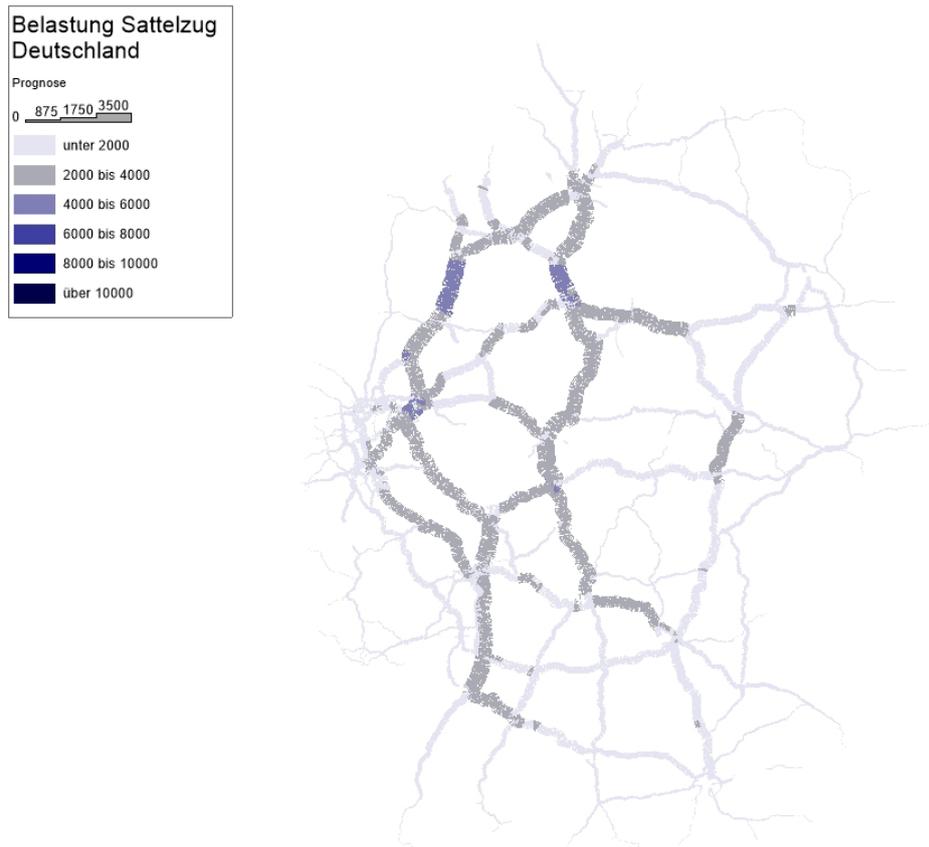


Abbildung 33: Belastungszahlen für Sattelzüge im innerdeutschen Verkehr (eigene Darstellung PTV)

Die gezeigten Verkehrsmengen stellen somit eine erste Potentialeinschränkung für die Affinität im HO-Betrieb dar. Es ist gut zu erkennen, wie sich das Gesamtpotential durch die erforderlichen Einschränkungen sukzessive reduziert. Abbildung 34 zeigt die für die weitere Betrachtung verbleibenden Anteile. Es ist gut zu erkennen, dass es hier regionale Unterschiede gibt, die sich aus der Lage (Grenznähe) und der Netzfunktion der Autobahn ergeben. Je heller ein Streckenabschnitt ist, umso geringer ist der Anteil der für die Untersuchung relevanten Lkw-Fahrten. Für die weitere Betrachtung ist daher eine Differenzierung der Streckenverläufe, über die reine Betrachtung von Verkehrszahlen hinausgehend, erforderlich.

Für die weitere Bearbeitung der Studie wurde die Auswahl an für den HO-Lkw umzusetzenden Autobahnabschnitten in fünf Gruppen gestaffelt abgeleitet. Dabei werden in der ersten Gruppe die vielversprechendsten Autobahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von 1.000 km zusammengefasst. Grundlage hierfür bilden zum einen die beschriebenen Verkehrsverfechtungsdaten, zum anderen fließen aber auch weitere, eher qualitative, Kriterien wie der Netzzusammenhang und die geographische Verteilung in die Entscheidung ein.

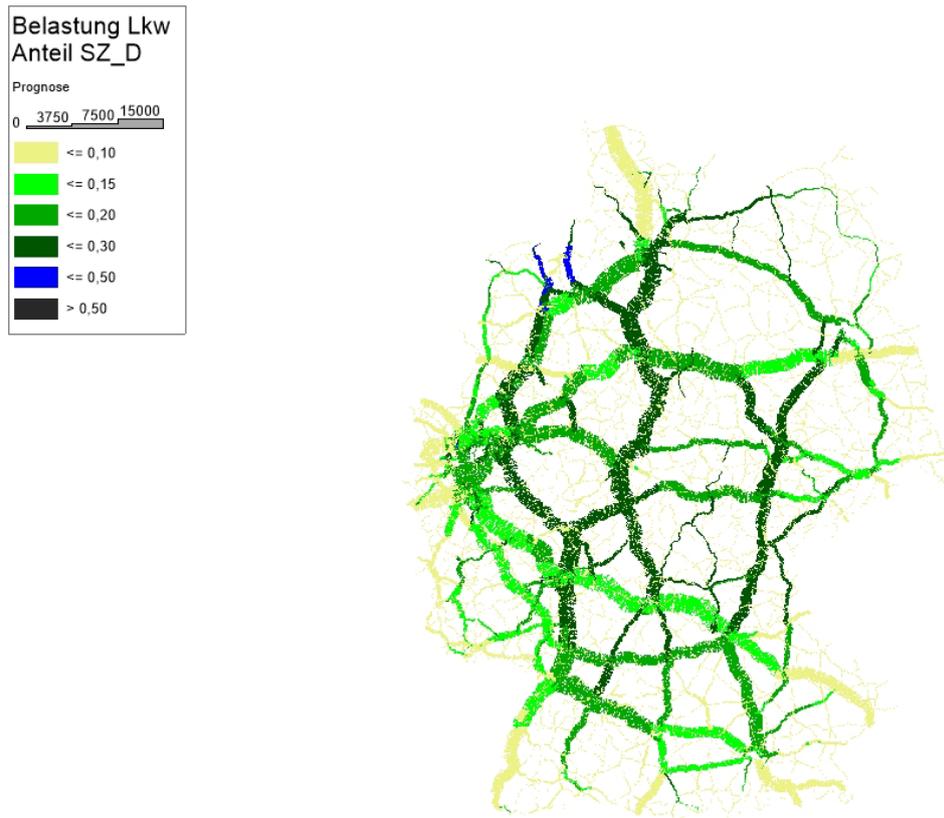


Abbildung 34: Anteile an den reduzierten Potentialen am Lkw-Verkehr (eigene Darstellung PTV)

Die zweite Gruppe („Gruppe 2.000“) erweitert die erste Gruppe um weitere 1.000 km Auswahlstrecke. In der Gruppe 3.000 kommen zu den bereits identifizierten Auswahlstrecken weitere 1.000 km Auswahlstrecken dazu. Mit den in Gruppe 4.000 gefundenen Auswahlstrecken summiert sich die Gesamtlänge auf ca. 4.000 km. Den Abschluss bildet die fünfte Gruppe, in der weitere 4.000 km Strecke zusammengefasst werden, sodass insgesamt ein Auswahlnetz mit einer Gesamtlänge von 8.000 km vorliegt.

Wie oben beschrieben, ist die zugrundeliegende Verkehrsmenge das wichtige Entscheidungskriterium. Daneben werden allerdings auch der Korridorzusammenhang, die geographische Lage, die Quellen, Ziele und Einzugsbereiche sowie der Netzzusammenhang in die Auswahl einbezogen.

Die für die „Gruppe 1.000“ gewählten Kilometer setzen sich aus den folgenden zwei langen Korridoren (siehe Abbildung 35) zusammen:

- HO-Korridor 1: Kreuz Kamen – Hamburg auf der BAB A1
Dieser Korridor hat eine Gesamtlänge von ca. 290 km mit einer durchschnittlichen Sattelzugbelastung von 3.200 Fz/d.
Hier ist eine Verlängerung auf der BAB A1 bis Köln denkbar.

- HO-Korridor 2: Karlsruhe – Hamburg auf der BAB A5/A7
Der Korridor 2 ist ca. 615 km lang und hat eine durchschnittliche Sattelzugbelastung von mehr als 3.200 Fz/d.

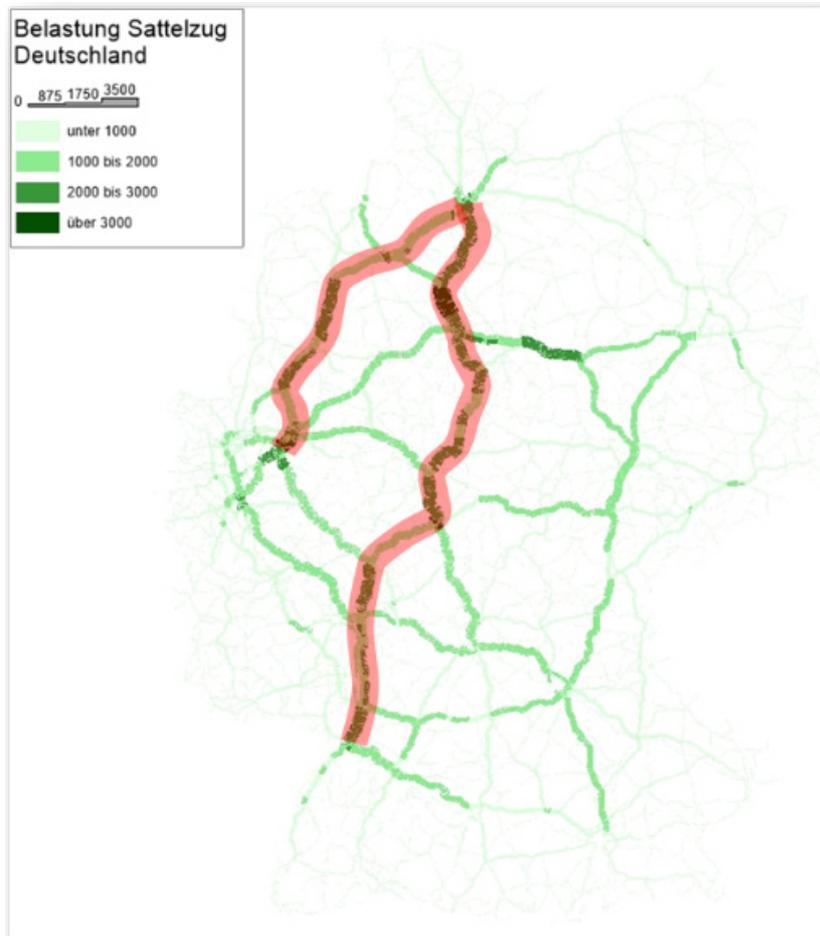


Abbildung 35: Streckenwahl Gruppe 1 (eigene Darstellung PTV)

In der Summe kommen die zwei Korridore auf 900 km Länge und einer Sattelzugfahrleistung von 5,8 Mio. Fz-km/d

Die Auswahl der „Gruppe 2.000“ erfolgte sowohl über die Verkehrsmenge als auch unter dem Aspekt der Verbindungsfunktion zu der ersten Gruppe. Für die zweite Gruppe wurden acht Korridore ausgewertet, in der Abbildung 36 in orange dargestellt. Zum einen ist dies die Weiterführung des Korridors auf der BAB A1 über Kreuz Unna bis zum Kreuz Leverkusen und weiter auf der BAB A3 bis Wiesbaden. Hinzu kommen in West-Ost-Richtung die BAB A44 vom Kreuz Unna bis Kassel und weiter im Süden die BAB A7 und A3 von Kreuz Kirchheim bis Nürnberg. Im Norden ist die BAB A2 von Hannover bis Magdeburg ausgewählt. Als weitere Nord-Süd-Achse in der Auswahl kommt die BAB A9 von Leipzig bis Nürnberg hinzu. Als kleiner Korridor wird die Achse Karlsruhe-Stuttgart auf der BAB A8 gewählt. Insgesamt summieren sich diese Korridore auf weitere 1.060 km Aus-

wahlstrecke und einer Sattelzugfahrleistung von 4,9 Mio. km/d. Auf den zweiten 1.000 km verringert sich die durchschnittliche Belastung über alle Strecken auf 2.300 Fz/d.

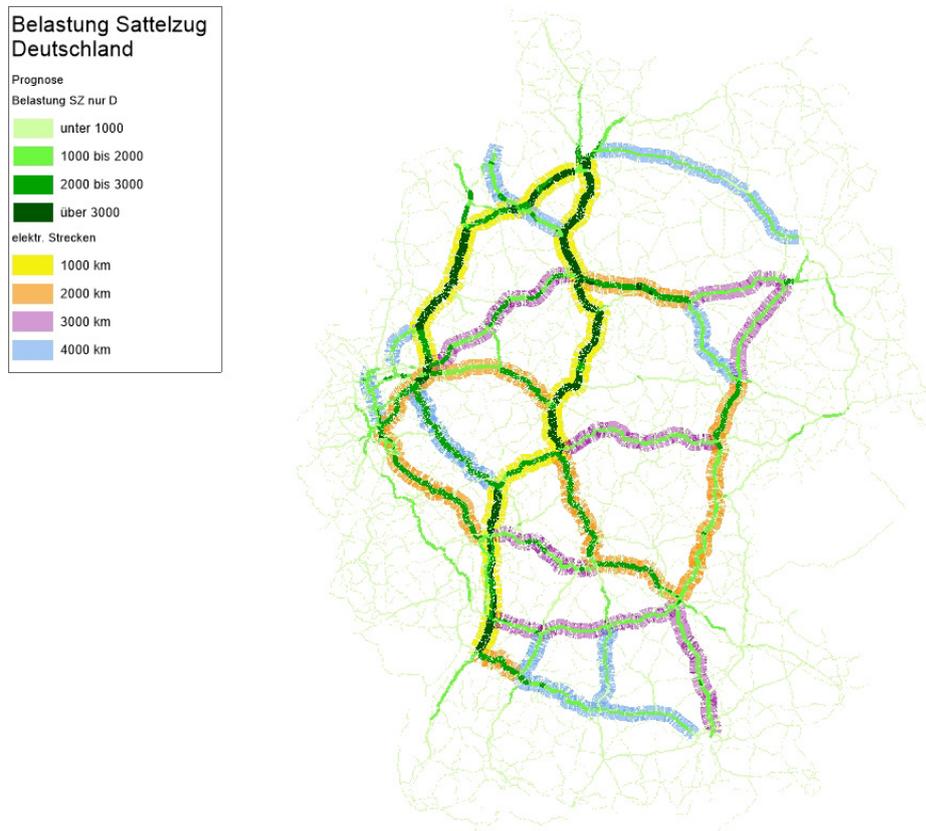


Abbildung 36: Streckenauswahl bis 4.000 km (eigene Darstellung PTV)

In der dritten Auswahlstufe – „Gruppe 3000“ – wurde neben der Verkehrsbelastung vor allem die Verbindungsfunktion zu den vorher ausgewählten Korridoren für die Auswahl herangezogen. Auch hier wurden möglichst zusammenhängende Korridore identifiziert. Es wurden insgesamt sieben Korridore mit einer Gesamtlänge von 1.060 km gewählt. Auf diesen Streckenabschnitten findet sich jedoch eine Durchschnittsbelastung von nur noch 1.700 Fz/d. Die Auswahl umfasst folgende Korridore:

- Hannover Ost bis Kreuz Kamen auf der BAB A2
- Dreieck Werder bis Magdeburg auf der BAB A2
- Dreieck Werder bis Leipzig auf der BAB A9
- Kreuz Kirchheim bis Kreuz Hermsdorf auf der BAB A4
- Kreuz Frankfurt bis Kreuz Biebelried auf der BAB A3
- Kreuz Walldorf bis Kreuz Nürnberg Ost auf der BAB A6
- Kreuz Nürnberg Ost bis München Nord auf der BAB A9.

Die vierte Stufe der Auswahl umfasst Strecken bis 4.000 km Auswahlstrecke. Hier wurden weitere Korridore mit einer Gesamtlänge von 1.100 km ausgewählt. Die durchschnittliche Sattelzugbelastung geht auf diesen Strecken auf 1.600 Fz/d zurück und ist somit nur noch

die Hälfte der Belastung auf den ersten 1.000 km dieser Auswahl. Folgende Korridore werden hier zusammengefasst:

- Kreuz Leonberg bis Dreieck München-Eschenried auf der BAB A 8
- Kreuz Leonberg bis Kreuz Weisberg auf der BAB A81
- Kreuz Magdeburg bis Leipzig auf der BAB A14
- Kreuz Hamburg Ost bis Kreuz Oranienburg auf der BAB A24
- Bremerhaven bis Dreieck Walsrode auf der BAB A27
- Westhofener Kreuz bis Kreuz Gambach auf der BAB A45
- Kreuz Münster Süd bis Kreuz Recklinghausen auf der BAB A43
- Kreuz Leverkusen bis Kreuz Oberhausen auf der BAB A3
- Kreuz Feuchtwangen bis Kreuz Ulm auf der BAB A7.

Wie in Abbildung 36 dargestellt, decken die 4.000 km Auswahlstrecke für den HO-Lkw einen Großteil der durch den Sattelzug gut belasteten Autobahnstrecken ab. Es liegt ein recht vollständiges Netz vor, das alle wichtigen Verbindungen für den Sattelzugverkehr innerhalb Deutschlands einschließt.

Für den weiteren Projektverlauf wurden auch Daten zur Ausbaustufe bis 8.000 km benötigt. Daher umfasst die letzte Gruppe eine weitere 4.000 km mögliche Ausbaustrecke für den HO-Lkw. Diese Streckenauswahl wurde rein über die Sattelzugbelastung auf der Einzelstrecke vorgenommen, daher wurden auch vermehrt kleine und Einzelabschnitte gewählt. Insgesamt hat diese Gruppe eine durchschnittliche Sattelzugbelastung über diese 4.000 km von nur noch 950 Fahrzeugen pro Tag.

In Tabelle 52 werden die wesentlichen Zahlen zu den einzelnen Gruppen zusammengefasst.

Tabelle 52: Zusammenfassung der verkehrlichen Kennwerte

Gruppe	Länge [km]	Anteil Länge an Gesamt BAB	Durchschnittliche Belastung Sattelzüge pro Tag	Anteil Fahrleistung am Gesamtnetz
1.000	900	7 %	3.200	21 %
2.000	1.960	15 %	2.700	38 %
3.000	3.030	23 %	2.400	51 %
4.000	4.130	32 %	2.200	64 %
8.000	8.120	63 %	1.600	91 %
Gesamt BAB	13.000	100 %	1.100	100 %

5 Markthochlaufberechnung

Hauptbearbeiter/innen: T. Gnann, A. Kühn, P. Plötz,
M. Wietschel (Fraunhofer ISI)

5.1 Methodik

5.1.1 Übersicht

Ziel der Markthochlaufberechnung ist, einen realistischen Markthochlauf von Oberleitungs-Lkw unter Annahmen zu den Rahmenbedingungen wie Energieträgerpreisen oder Ausbau der Infrastruktur abzuleiten. Dafür wird ein Modell entwickelt, das die Kaufentscheidung von Lkw-Betreibern unter Berücksichtigung der vielen Nutzungsarten von Lkw abbildet. Abbildung 37 zeigt schematisch die Rolle der Eingangsdaten und Ergebnisse des Modells.

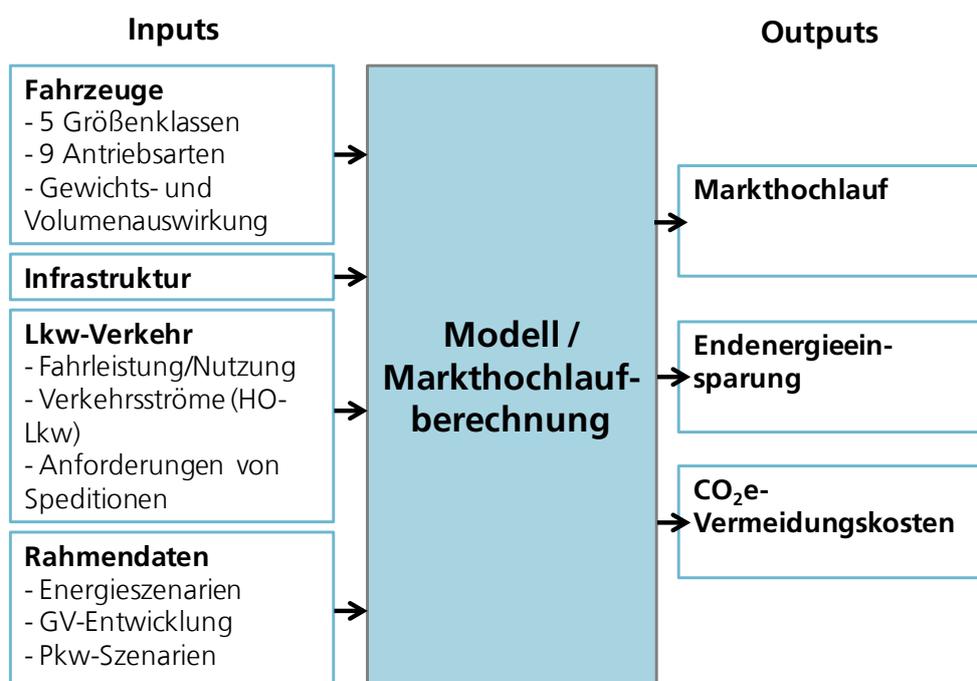


Abbildung 37: Anforderungen an das Modell

Das Modell baut auf das Fahrverhalten von ca. 5.800 Lkw anhand von öffentlich verfügbaren Daten auf und simuliert, welche Gesamtnutzungskosten jeder einzelne Lkw mit verschiedenen Antriebsarten hätte. Dabei gehen eine Reihe von Einflussfaktoren ein, wie die individuelle Jahresfahrleistung, der Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur und das Angebot an Lkw mit unterschiedlichen Antriebsarten. Es werden unter anderem die Gesamtnutzungskosten (engl. Total Cost of Ownership – TCO) berücksichtigt.

Dabei wird im Modell zwischen neun Antrieben und fünf Größenklassen unterschieden. Die Berechnung des Markthochlaufs erfolgt in mehreren Schritten (vgl. Abbildung 38):

1. Berechnung der Gesamtnutzungskosten für jeden Lkw mit seiner Jahresfahrleistung für jeden Antrieb sowie Bestimmung des TCO-minimalen Antriebs.
2. Bestimmung des Anteils der Antriebsarten in den Größenklassen.
3. Da das Modellangebot bei Einführung einer neuen Technologie zunächst begrenzt ist, entscheidet sich nur ein Teil der Käufer dafür. Der tatsächliche Marktanteil wird durch die begrenzte Verfügbarkeit von HO-Lkw-Modellen begrenzt.
4. Durch Multiplikation mit der Gesamtzahl der Neuzulassungen ergeben sich die Neuzulassungen pro Jahr und Pro Antriebsart.
5. Die Neuzulassungen über die Jahre werden mit einem Bestandsmodell zu einem Fahrzeugbestand aggregiert.

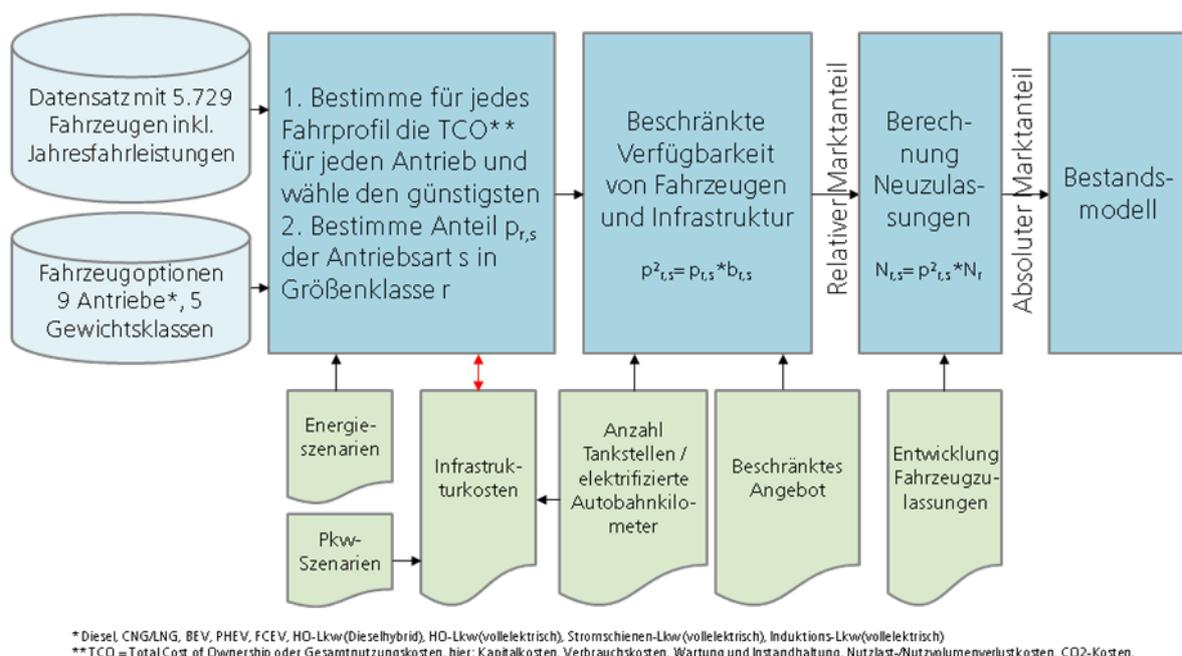


Abbildung 38: Übersicht zur Vorgehensweise im Modell

Der erste Schritt in obiger Darstellung erfordert insbesondere eine Analyse der Auswirkungen von Oberleitungsinfrastruktur auf den einzelnen Lkw. Im Jahr 2015 steht keine Oberleitung zur Verfügung und reine Batteriefahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) können nicht nachladen. Für spätere Jahre hängt der Anteil des Fahrens an der Oberleitung möglicher HO-Lkw davon ab,

- ob das Fahrzeug viel auf der Autobahn fährt (= individueller Autobahnanteil),
- welche Menge an Autobahn und welche Autobahn elektrifiziert ist (= HO-Ausbau),
- und mit welcher Wahrscheinlichkeit dieses Fahrzeug auf der elektrifizierten Autobahn unterwegs ist (= DE-Anteil).

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zur Bestimmung dieser Größen weiter vorgestellt. Das Ergebnis stellt eine Abschätzung dar, welchen Anteil seiner Jahresfahrleistung ein Lkw bei vorgegebenem Oberleitungs-Ausbau elektrifizieren kann. Im Anschluss daran werden die eigentliche TCO-Berechnung und die weiteren Modellschritte dargelegt.

5.1.2 Autobahnanteil der Jahresfahrleistung

Datenbasis für die folgenden Analysen zum Fahrverhalten von Lkw in Deutschland bilden hauptsächlich die öffentlich verfügbaren Daten der KiD2010 (WVI et al. 2010). Darin nutzbare Informationen liegen für 11.706 Lkw bis 3,5 t zGG bzw. für 1.975 für Lkw über 3,5 t zGG und für 955 Sattelzugmaschinen (SZM) vor. Im Rahmen eines Workshops wurden verschiedene andere Datenquellen diskutiert (Wietschel et al. 2016a). Andere Quellen konnten aber im Rahmen des Projektes nicht erschlossen werden. Für diese Stichproben liegen Informationen zu Jahresfahrleistungen, Tagesfahrleistungen, Anzahl der Fahrten am Beobachtungstag sowie die typischen Einsatzgebiete vor.

Auf Basis des Verkehrsmodells PTV Validate konnte der Autobahnanteil von Lkw bei verschiedenen Fahrtenlängen ermittelt werden, und ein mittlerer BAB-Anteil konnte bestimmt werden (siehe Tabelle 53).

Tabelle 53: Anteil von Lkw-Strecken auf Autobahnen

Strecke	Tagesfahrleistung	Autobahnanteil						Mittlerer Anteil BAB	Fit
		0	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %		
[km]	[km]								
10	38,7	96 %	1 %	1 %	1 %	0 %	0 %	2 %	8 %
14	53,6	84 %	4 %	5 %	5 %	3 %	0 %	8 %	10 %
20	75,1	73 %	6 %	7 %	8 %	6 %	1 %	14 %	15 %
28	102,5	61 %	6 %	9 %	12 %	10 %	2 %	22 %	20 %
40	141,3	48 %	7 %	10 %	14 %	16 %	5 %	32 %	27 %
57	191,9	36 %	8 %	11 %	16 %	20 %	9 %	41 %	36 %
80	253,9	27 %	9 %	11 %	15 %	22 %	15 %	49 %	47 %
113	332,4	15 %	9 %	11 %	16 %	25 %	23 %	59 %	59 %
160	430,1	6 %	8 %	11 %	17 %	27 %	32 %	69 %	72 %
226	552,2	2 %	4 %	9 %	15 %	28 %	43 %	78 %	83 %
320	715,8	0 %	1 %	3 %	8 %	25 %	63 %	89 %	92 %
453	950,2	0 %	0 %	0 %	2 %	14 %	83 %	96 %	97 %
640	1.298	0 %	0 %	0 %	2 %	10 %	88 %	97 %	99 %
905	1.814	0 %	0 %	0 %	0 %	4 %	96 %	99 %	100 %

Für die TCO-Berechnung ist aber der Anteil der Jahresfahrleistung auf der Autobahn entscheidend. Dieser wird über die Tagesfahrleistung hochgerechnet, welche sich wiederum aus mehreren Einzelfahrten zusammensetzt. Wie Abbildung 39 zeigt, variiert die durchschnittliche Anzahl der Fahrten pro Tag und damit die typische Länge von Einzelstrecken mit der Jahresfahrleistung (gezeigt sind die Daten sowie lokale Glätter (LOESS in blau und kubische Splines in rot)). Geringe Tagesfahrleistungen zwischen 50 und 100 km setzen sich bei SZM im Mittel aus vier Fahrten zusammen. Dieser Wert sinkt auf zwei Fahrten bei hohen Tagesfahrleistungen von über 600 km. Die mittlere Tagesfahrleistung wurde entsprechend in Tabelle 53 ergänzt gemäß $TFL = \text{Streckenlänge} \cdot (2 + 2 \cdot \exp(-\text{Streckenlänge}/150))$.

Um den mittleren Autobahnanteil später im Modell für beliebige Tagesfahrleistungen verwenden zu können, wurde für diesen ein nichtlinearer Fit durchgeführt. Der mittlere BAB-Anteil ist dann $1 - \exp(-TFL/L_0)$, wobei TFL die Tagesfahrleistung ist, und $L_0 = 127.25$ mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt wurde. Die Anteile und der Fit sind in Abbildung 40 dargestellt. Damit kann abgeschätzt werden, welcher Anteil der Kilometer eines Fahrzeuges auf der Autobahn zurückgelegt wird.

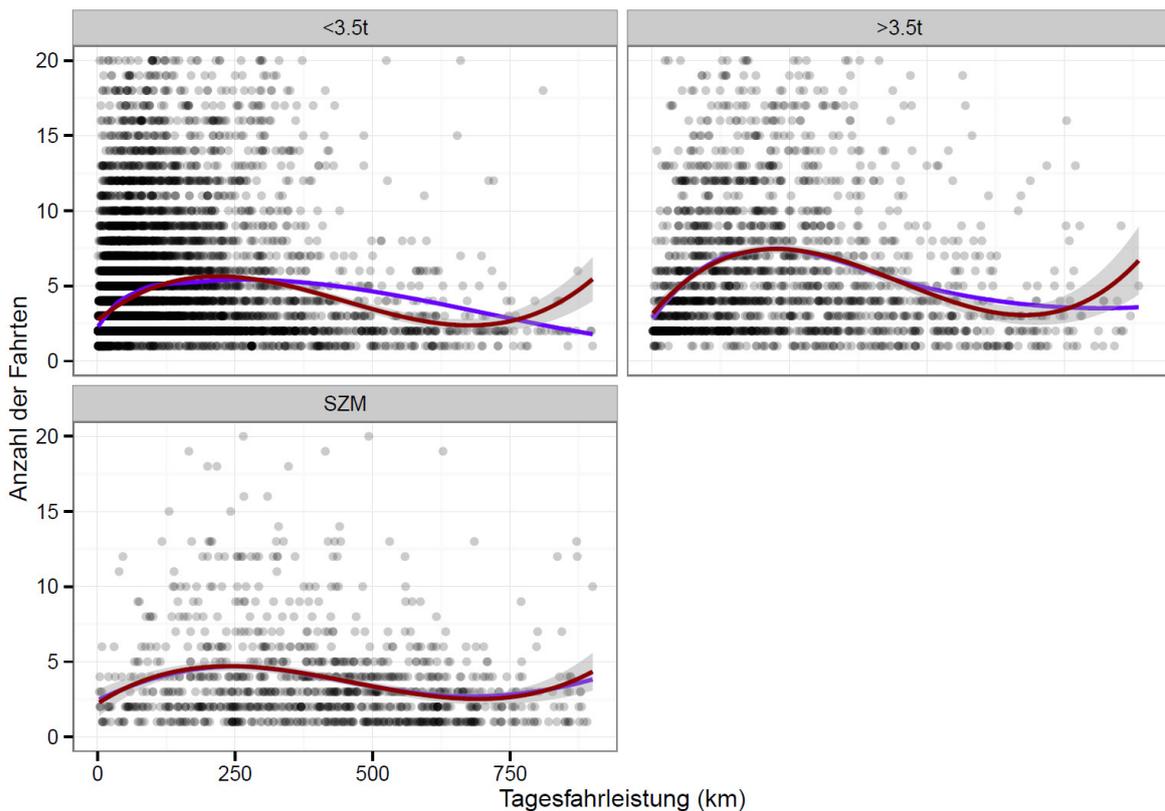


Abbildung 39: Anzahl der Fahrten pro Tag nach Tagesfahrleistung

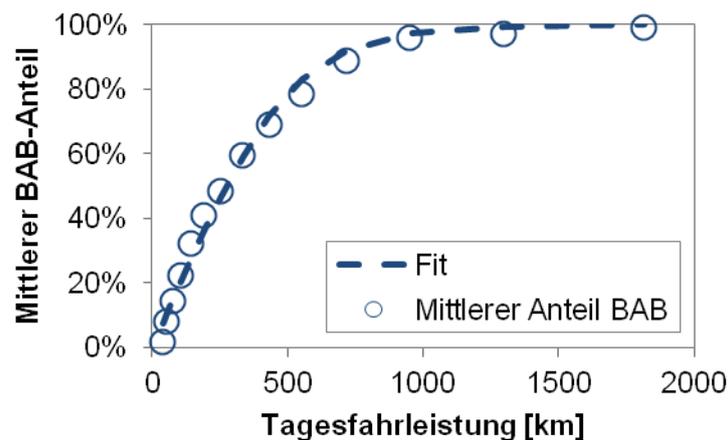


Abbildung 40: Mittlerer BAB-Anteil als Funktion der Tagesfahrleistung

5.1.3 Nutzen elektrifizierter Autobahn

Der durchschnittliche durch Oberleitung elektrifizierte Anteil der Jahresfahrleistung eines Lkw hängt vom Ort und Umfang des Oberleitungsausbaus ab. Für die folgende Betrachtung wird davon ausgegangen, dass zuerst die BAB-Abschnitte mit Oberleitung ausgestattet werden, auf denen der meiste Lkw-Verkehr stattfindet. Dabei musste im Markthochlauf vereinfachend angenommen werden, dass diese Stücke nicht zusammenhängen. Eine ausführliche Diskussion der geeigneten Strecken für einen ersten Ausbau und inwieweit die Annahmen im Markthochlaufmodell leicht überschätzen, erfolgt in Kapitel 4.3.

Datenbasis für die Belastung der BAB bildet die manuelle Verkehrszählung durch das BAST (BAST 2010). Darin sind KFZ pro Tag und Anteil des Verkehrs mit über 3,5 t zGG für alle BAB-Abschnitte angegeben. Um die unterschiedliche Länge der Abschnitte zu berücksichtigen, wurden die Daten mit der aktuellen Mauttabelle verknüpft (MAUT 2016). Insgesamt liegen so die Verkehrsmengen in Lkw pro Tag und die Längen von 1.880 BAB-Abschnitten für die Analysen vor.

Abbildung 41 zeigt die kumulative Verteilung der Lkw-Belastung der BAB (oben links), die kumulative Verteilung der BAB-Abschnittsstreckenlängen sowie den resultierenden Anteil der Lkw-km als Funktion des Anteils an der BAB-Gesamtlänge, die mit Oberleitungen ausgestattet wurde (beginnend bei der Strecke mit der höchsten Belastung).

Die rechtsschiefe Verteilung der Lkw-Belastungen und BAB-Abschnittslängen (man beachte die logarithmische Abszisse in den oberen Grafiken in Abbildung 41) führt zu einem

hohen Nutzen beim Ausbau der ersten BAB-Abschnitte im Vergleich zu späteren weniger stark genutzten Abschnitten.³⁰

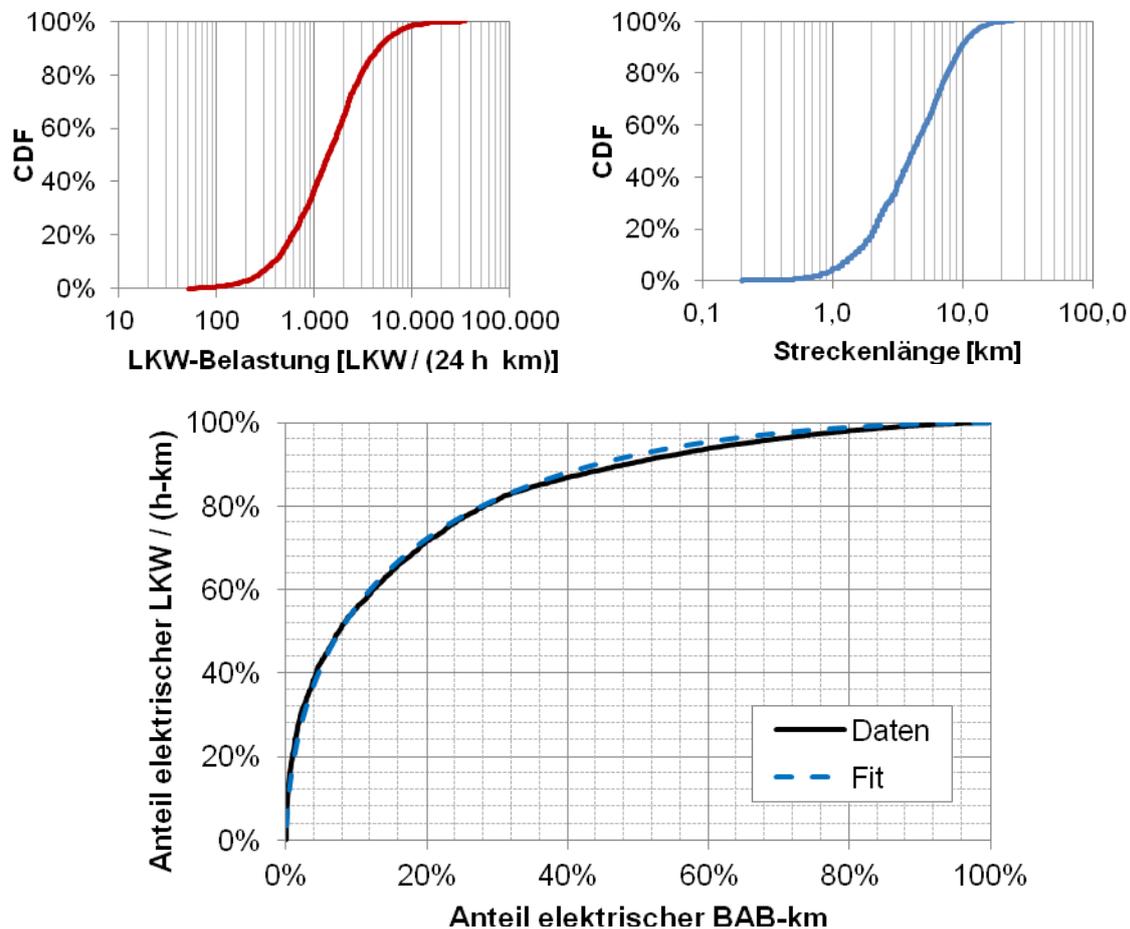


Abbildung 41: Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs bei Elektrifizierung der BAB

Tabelle 54 gibt Beispielwerte für den Nutzen eines Oberleitungsausbaus auf verschiedenen Anteilen des BAB-Netzes. Im Vergleich zur detaillierteren Analyse in Abschnitt 4.3 zeigt sich, dass die Wirkung der Oberleitung hier etwas überschätzt wird und der Markthochlauf damit etwas zu optimistisch ist.

³⁰ Die Ungleichverteilung der Wirkung kann mit der Ungleichheit in der Verteilung von Einkommen verglichen werden. Ein typisches Maß dafür ist der Gini-Koeffizient, der die Fläche unter der Einkommenskurve mit der Fläche unter einer Kurve für gleichverteilte Einkommen vergleicht (Lubrano, 2013). Gini-Koeffizienten liegen zwischen 0 und 1, wobei 0 vollkommene Gleichverteilung (alle haben gleich viel) und 1 vollkommene Ungleichheit (einer hat alles) bedeutet. Die Einkommensungleichheit gemäß Gini-Koeffizient für die BRD ist bspw. 0,3 im Vergleich zu 0,4 in den USA oder 0,6 in Brasilien. Die Verteilung des BAB-Ausbaunutzens in Abbildung 41 hat einen Gini-Koeffizienten von 0,6.

Tabelle 54: Beispiele elektrisches Potential (gesamt 13.000 BAB-km)

Anteil elektr. BAB-km	0 %	5 %	10 %	20 %	50 %	80 %
Anteil elektr. Lkw/(24h* km)	0 %	42 %	56 %	72 %	92 %	99 %

Unter der Annahme log-normalverteilter Daten, lässt sich eine Lorenzkurve und damit die Wirkung von BAB-Elektrifizierung wie folgt darstellen (Lubrano 2013):

$$y(x) = 1 - \Phi(\Phi^{-1}(1 - x) - \sigma^2)$$

Dabei sind y der kumulative Anteil der Lkw/(24h km), x der kumulative Anteil der BAB-km, σ ein Maß für die Schiefe der Verteilung sowie $\Phi(x) = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{erf}(x/\sqrt{2}))$ die Quantilsfunktion der Standardnormalverteilung und $\Phi^{-1}(x) = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(2x - 1)$ ihre Inverse. Für die gezeigten Daten ist die erhaltene Ausgleichskurve mit $\sigma = 1,19$ eine sehr gute Interpolation. Um den Aufwand für Datenerhaltung im Modell gering zu halten, wird im Modell die Ausgleichskurve anstelle der Rohdaten für den Nutzen eines Ausbaus von BAB mit Oberleitungen verwendet.

5.1.4 Anteil der Fahrten in Deutschland

In den vorhergehenden Abschnitten wurde der Anteil der Jahresfahrleistung von Lkw auf den Bundesautobahnen sowie der zu erwartende Nutzen eines BAB-Ausbaus mit Oberleitungen bestimmt. Für den Anteil der Jahresfahrleistung eines Lkw kommt aber einschränkend hinzu, dass dieser sich für den vollen Nutzen der Oberleitungen ausschließlich in Deutschland aufhalten müsste. Gerade bei SZM mit hohen Jahresfahrleistungen wird aber im Mittel ein nennenswerter Anteil der Jahresfahrleistung im Ausland zurückgelegt, bei sehr geringen Jahresfahrleistungen ist vor allem regionaler Verkehr zu beobachten. Abbildung 42 zeigt die Verteilung der mittleren Einsatzgebiete von deutschen Lkw auf Basis der KiD 2010. Dabei waren Mehrfachnennungen bzgl. des typischen Einsatzgebietes möglich. Wo dies der Fall war, wurden Mittelwerte der Antwortkategorien gebildet. Man erkennt deutlich, dass Fahrzeuge $< 3,5$ t zGG hauptsächlich in der Stadt und im Umland eingesetzt werden. Mit zunehmendem zulässigem Gesamtgewicht werden auch größere Gebiete häufiger, und SZM verkehren überwiegend in Gesamtdeutschland und den Anrainer-Staaten.

Der Anteil der Nennung einer Kategorie vom typischen Einsatzgebiet hängt neben der Fahrzeuggröße aber wie zu erwarten auch von der Jahresfahrleistung ab (vgl. Abbildung 43).

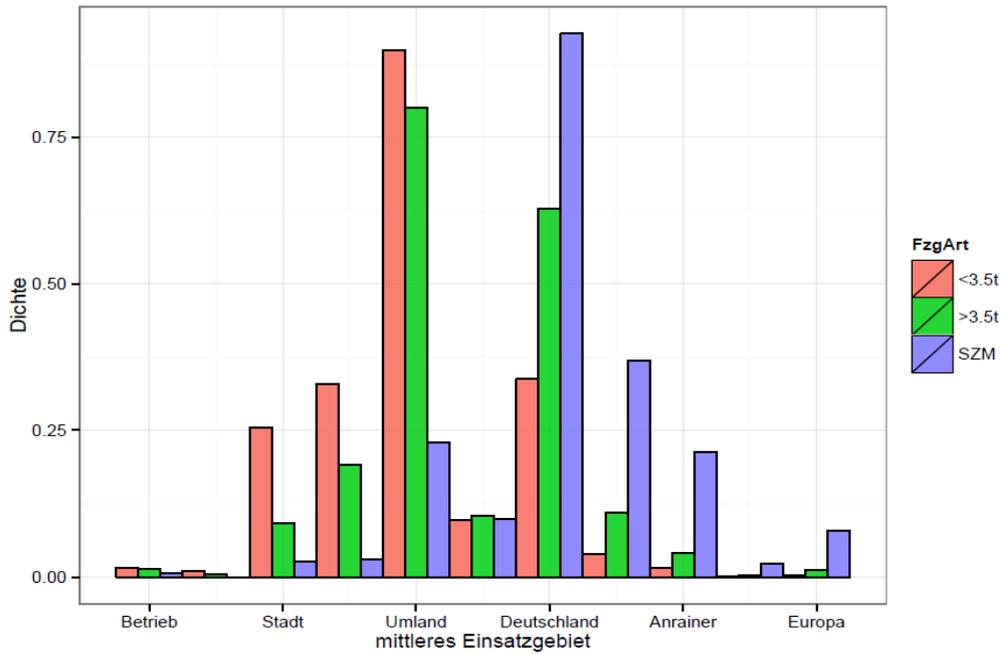


Abbildung 42: Verteilung der mittleren Einsatzgebiete von Lkw (für bessere Vergleichbarkeit wurden die Verteilungsfunktionen normiert)

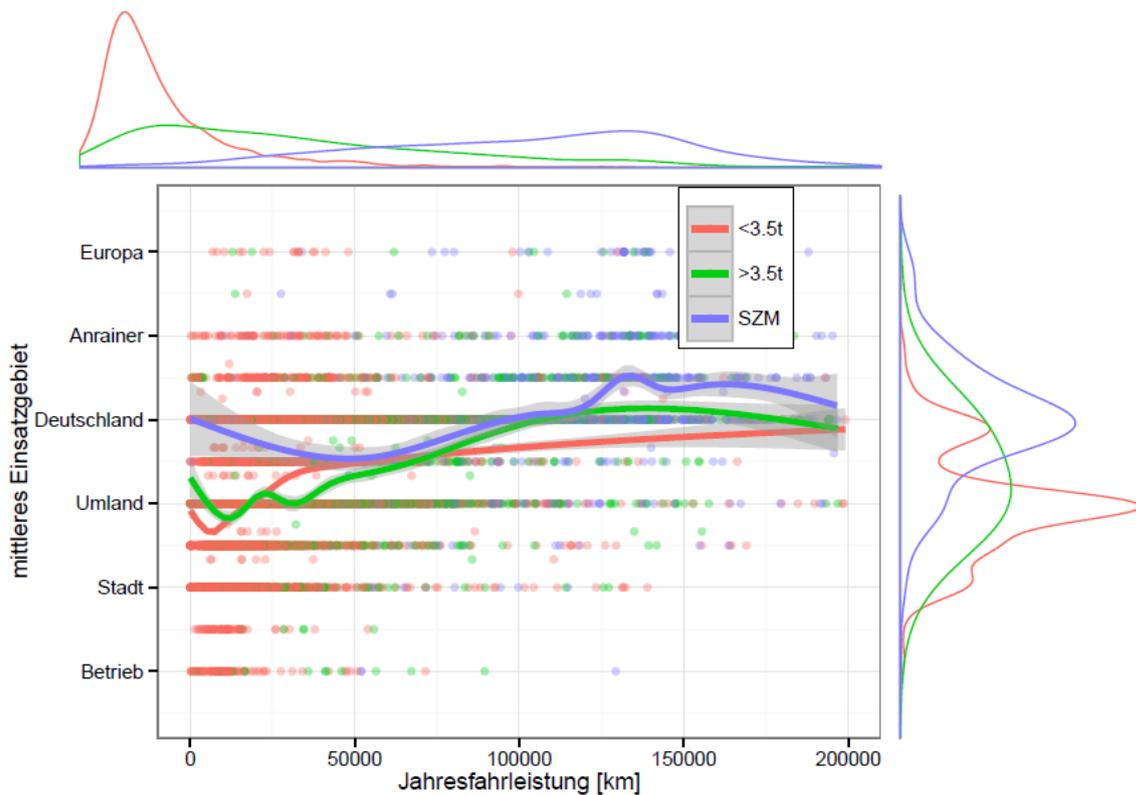


Abbildung 43: Mittleres Einsatzgebiet von Lkw in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung

Für den Nutzen von Oberleitungen wurde auf Basis der gezeigten Daten analysiert, welcher Anteil der Fahrzeuge nur in Deutschland (einzige Nennung) oder zu einem großen

Teil in Deutschland (einzige Nennung oder eine von zwei Nennungen bei Mehrfachnennungen) fährt. Der Anteil hängt dabei von der Jahresfahrleistung ab. Die Ergebnisse einer linearen Regression für die Anteile sind in Tabelle 55 gezeigt. Man erkennt, dass ca. 40 – 50 % der SZM nur in Deutschland fahren (bei Jahresfahrleistungen zwischen 0 und 200.000 km). Dieser Anteil bedeutet, dass nur ca. die Hälfte der deutschen SZM von einer deutschen Oberleitung direkt profitieren, da nur dieser Anteil überwiegend in Deutschland fährt. Der Marktanteil an den Verkäufen von Oberleitungs-Lkw verringert sich entsprechend. Allerdings zeigt dies auch, dass ein gesamteuropäischer Ausbau von Oberleitungen einen großen Hebel für die Elektrifizierung darstellt.

Tabelle 55: Ergebnisse linearer Regression des Anteils der Fahrten in Deutschland in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung

Fahrzeugtyp	Achsenabschnitt	Steigung (mal 1e-6)
Nur Deutschland (Anteil > 90 %)		
< 3,5 t	0,061	4,421
> 3,5 t	0,094	3,672
SZM	0,398	0,402
Meist Deutschland (Anteil > 40 %)		
< 3,5 t	0,102	5,904
> 3,5 t	0,131	4,983
SZM	0,522	1,432

Tabelle 56 zeigt zusätzlich die mittleren Jahresfahrleistungen der verschiedenen Lkw-Gruppen.

Tabelle 56: Mittlere Jahresfahrleistungen von Lkw in Deutschland

Typ	Anteil DE > 0 %			Anteil DE > 40 %			Anteil DE > 90 %		
	Median	Mittel	SD	Median	Mittel	SD	Median	Mittel	SD
< 3,5 t	19.800	27.800	29.500	24.000	32.800	31.000	15.200	21.300	22.000
> 3,5 t	73.300	76.500	39.900	24.000	78.700	47.000	42.600	53.100	42.300
SZM	132.600	123.100	38.500	123.600	120.900	39.000	108.900	110.000	49.100

5.1.5 Anzahl der Fahrtage im Jahr

Aufgrund der beschränkten elektrischen Reichweite von BEV und PHEV ist für die Ersetzbarkeit der Tagesfahrleistung und den elektrischen Fahranteil von PHEV auch die Verteilung der Jahresfahrleistung auf die Tage im Jahr wichtig. Im Modell wurden zwei Verfahren umgesetzt: (1) Es wurden die laut KiD angegebene Tages- und Jahresfahrleistung verwendet; (2) die Tagesfahrleistung ist ein konstanter Bruchteil der Jahresfahrleistung.

tung (Gleichverteilung auf alle Fahrtage des Jahres). Die Ergebnisse beider Vorgehensweisen unterscheiden sich nicht qualitativ. Für die zweite Methode ist eine Annahme zur mittleren Zahl der Fahrtage nötig. Für diese wurde aus der Verteilung der Quotienten von in KiD angegebener Jahres- und Tagesfahrleistung der Median verwendet (vgl. Abbildung 44). Die mittlere Zahl der Fahrtage (Mediane) pro Gruppe sind 313 Tage für Fahrzeuge bis 3,5 t zGG, 259 Tage für Fahrzeuge über 3,5 t zGG und 260 Tage für SZM.

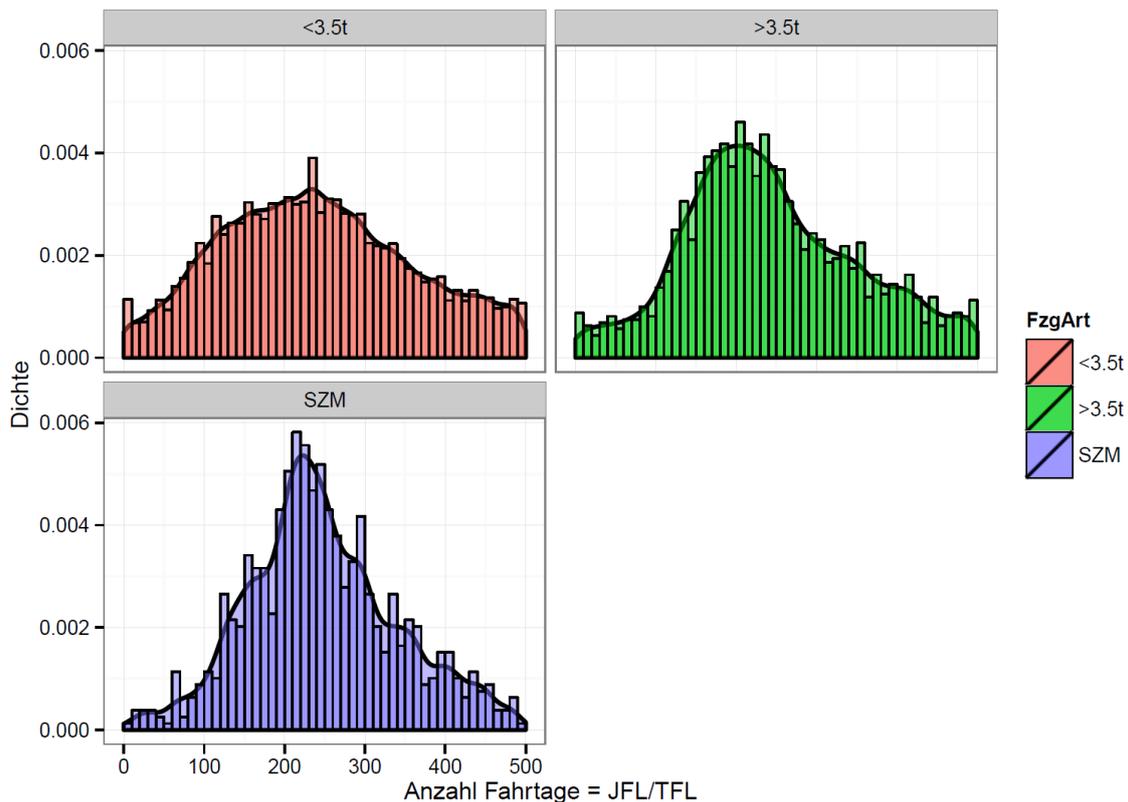


Abbildung 44: Anzahl der Fahrtage pro Jahr als Quotient von Jahres- und Tagesfahrleistung

5.1.6 TCO-Berechnung

Mit den Ergebnissen der vorangegangenen Abschnitte können auf Basis der Jahresfahrleistung für jeden Lkw die Ersetzbarkeit als BEV, der elektrische Fahranteil als PHEV und der elektrische Fahranteil bei vorgegebenem Ausbau der Oberleitung bestimmt werden. Dies sind alles Eingangsgrößen für die Berechnung der Gesamtnutzungskosten (TCO – total cost of ownership), auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Die Möglichkeiten und Grenzen einer Modellierung von Fahrzeugkaufentscheidungen auf Basis von TCO ist ausführlich in (Plötz et al. 2013) erläutert. Die Darstellung der TCO-Berechnung in diesem Abschnitt folgt Plötz et al. (2013).

Die jährlichen TCO für einen Lkw mit Fahrprofil f , d. h. einer gegebenen Jahres- und Tagesfahrleistung, im Jahr t ($TCO_{f,t}^a$) setzt sich aus der Summe der Anschaffungs- und Betriebskosten zusammen:

$$TCO_{f,t}^a = a_{capex}^{f,t} + a_{opex}^{f,t}.$$

Dabei bezeichnen

$TCO_{f,t}^a$: jährliche TCO eines Fahrprofils f im Jahr t

$a_{capex}^{f,t}$: Annuität für die Kapitalkosten eines Fahrprofils f im Jahr t

$a_{opex}^{f,t}$: Annuität für die operativen Kosten eines Fahrprofils f im Jahr t

Dies sind insbesondere die Anschaffungsausgaben die auf ein Jahr diskontiert werden ($a_{capex}^{f,t}$) und die laufenden Kosten ($a_{opex}^{f,t}$). Die einzelnen Summanden werden im Folgenden einzeln dargestellt. Die Annuität³¹ der Anschaffungsausgaben $a_{capex}^{f,t}$ für ein Fahrprofil f im Jahr t ergibt sich gemäß

$$a_{capex}^{f,t} = \frac{(NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt,s,t}) \cdot (1+i)^{T_u} \cdot i}{(1+i)^{T_u} - 1}$$

$NLP_{r,s,t}$: Nettolistenpreis für Fahrzeuggröße r mit Antrieb s im Jahr t [Euro]

$\kappa_{r,s,t}$: Batteriegröße für Fahrgröße r mit Antrieb s im Jahr t [kWh]

$p_{Batt,s,t}$: Batteriepreis für Antrieb s im Jahr t [Euro/kWh]

i : Zinssatz

T_u : Nutzungsdauer des Fahrzeugs in Nutzergruppe u [a]

Die Investitionen setzen sich dabei zusammen aus den Investitionen für das Fahrzeug ($NLP_{r,s,t}$), und denen für die Batterie ($\kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt,s,t}$), welche auf ein Jahr diskontiert werden.

Die Annuität der laufenden Kosten $a_{opex}^{f,t}$ für ein Fahrprofil f im Jahr t ergibt sich aus:

$$a_{opex}^{f,t} = JFL_f \cdot \left(s_{e_{f,t}} \cdot (c_{e_{r,s,t}} \cdot k_{e_t} + k_{e,CO_2}) + (1 - s_{e_{f,t}}) \cdot (c_{c_{r,s,t}} \cdot k_{c_t} + k_{c,CO_2}) \right) + k_{V/G}$$

JFL_f : Jahresfahrleistung des Fahrprofils f [km]

$s_{e_{f,t}}$: elektrischer Fahranteil des Fahrprofils f im Jahr t

$c_{e_{r,s,t}}$: elektrischer Verbrauch eines Fahrzeugs der Größe r und Antriebs s zum Zeitpunkt t [kWh/km]

k_{e_t} : Kosten für elektrischen Strom im Jahr t [Euro/kWh]

k_{e,CO_2} : Kosten für CO₂ im elektrischen Betrieb [Euro/km]

$c_{c_{r,s,t}}$: konventioneller Verbrauch (Benzin oder Diesel) eines Fahrzeugs der Größe r und Antriebs s zum Zeitpunkt t [l/km]

k_{c_t} : Kraftstoffkosten (Benzin oder Diesel) zum Zeitpunkt t [Euro/l]

k_{c,CO_2} : Kosten für CO₂ im konventionellen Betrieb [Euro/km]

$k_{V/G}$: jährliche Kosten für einen eventuellen Gewichts- oder Volumenverlust.

³¹ Siehe Wöhe, Döring und Kaiser (2002, S. 622) für eine Einführung in die Investitionsrechnung.

Es gibt also einen Teil, der von der Jahresfahrleistung (JFL_f) abhängt, und im elektrischen Modus Kosten verursacht ($s_{e_f,t} \cdot (c_{e_r,s,t} \cdot k_{e_t} + k_{e,CO_2})$) und ein Kostenblock im konventionellen Modus ($(1 - s_{e_f,t}) \cdot (c_{c_r,s,t} \cdot k_{c_t} + k_{c,CO_2})$). Der elektrische Fahranteil ist dabei der Anteil, der von PHEV aufgrund der begrenzten elektrischen Reichweite zurückgelegt werden kann bzw. der Anteil den ein HO-Lkw aufgrund seines individuellen Anteils auf Oberleitungsautostrassen elektrifizieren kann.³² Außerdem werden die Kosten für einen möglichen Volumen- oder Gewichtsverlust durch eine Batterie oder einen Wasserstofftank eingerechnet (vgl. Abschnitt 3.3.3.4). Als gleich angenommen und deshalb nicht berücksichtigt werden die Kosten für Kfz-Steuer, die Mautkosten und die Kosten für den Fahrer. Sämtliche Werte für die einzelnen Variablen finden sich in Abschnitt 3.

Diese TCO-Berechnung erfolgt für jeden Lkw, für die Zeitpunkte 2015 und 2030 und für jede Antriebsart. Der jeweils TCO-optimale Antrieb wird gewählt. Der Anteil aller Fahrzeuge einer Fahrzeuggruppe mit TCO-optimalem Antrieb s innerhalb seiner Größenklasse ist der mögliche Marktanteil dieser Antriebsart.

5.1.7 Beschränkte Modellverfügbarkeit

Neben der begrenzten Verfügbarkeit von Infrastruktur ist die begrenzte Auswahl an Marken und Modelle ein Hemmnis für die Verbreitung einer neuen Technologie. Wenn nur eine oder wenige Marken die neue Antriebsart anbieten, werden markentreue Kunden anderer Marken den Kauf eines Fahrzeugs mit neuer Antriebsart nicht Erwägung ziehen. Dies kann den möglichen Marktanteil auf Basis der TCO erheblich reduzieren. Abbildung 45 zeigt beispielhaft die Anteile verschiedener Marken an den Neuzulassungen von SZM in Deutschland.

Für die nachfolgenden Rechnungen wurde eine beschränkte Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur wie folgt angenommen. Für die Infrastruktur wurde die Beschränkung analog zu (Michaelis et al. 2015) verwendet: „Auf Basis bestehender Literatur wird im Modell eine Verfügbarkeit von 100 % unterstellt, sobald 15 % der existierenden Tankstellen Wasserstoff anbieten (Sperling und Kurani 1987).“ Unter der Annahme, dass für Elektrofahrzeuge nur Schnellladestationen maßgeblich sind, wurden die Tankstellenzahlen und ihr geplanter Ausbau von Gasfahrzeugen (engl. Natural Gas Vehicles, NGV), Wasserstoff sowie von Schnellladesäulen ermittelt und mittels logistischem Wachstum fortgeschrieben. Daraus ergibt sich für 2015 eine Infrastrukturverfügbarkeit von 40 % (basierend auf 913 Tankstellen für NGV³³ von 15 % von 14.531, also 2180 Tankstellen). Zu-

³² Für die HO-Batterie-Variante entspricht der konventionelle Anteil dem, der nicht an der Oberleitung zurückgelegt wird.

³³ vgl. (NGV Journal 2015, Statisches Bundesamt 2015, NPE 2014)

dem werden 1 % für FCEV, PHEV, BEV aufgrund der sehr geringen Infrastrukturverbreitung angesetzt.

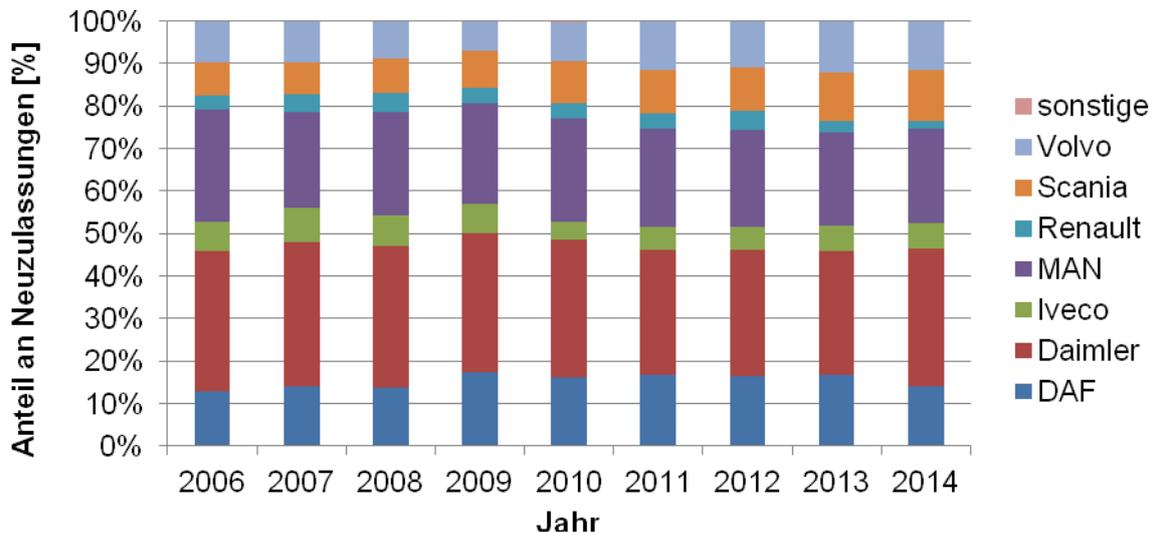


Abbildung 45: Anteil verschiedener Marken an den Neuzulassungen von SZM

Für HO-Lkw wird die Infrastrukturverfügbarkeit explizit abgebildet und daher nicht berechnet.

Für die Fahrzeuge konnten analog dem Vorgehen in (Plötz et al. 2013) keine Ankündigungen über zukünftige Fahrzeuge gefunden werden. Es wurde deshalb die Annahme getroffen, dass eine Beschränkung des Angebots auf 10 % für Gas- und Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2017 und für FCEV- und HO-Lkw bis zum Jahr 2022 gilt. Nach sieben Jahren ist das Angebot nur noch auf 50 % beschränkt. Damit werden logistische Kurven gefittet und so die Verfügbarkeit für jedes Jahr ermittelt.

Multipliziert man nun die beiden Verfügbarkeiten, so erhält man eine Beschränkung der Neuzulassungen durch Fahrzeugangebot und Infrastruktur im Jahr 2015 auf 2 % für Gasfahrzeuge, 0,1 % für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge und 1 % für HO-Lkw (nur Angebotsbeschränkung). Das heißt, im Jahr 2015 werden nur 2 % der wirtschaftlichen Gasfahrzeuge als Marktanteil berücksichtigt, für die anderen 98 % wird die zweitbeste TCO-Lösung gewählt (ggf. ebenfalls mit Beschränkungen). Das führt zu deutlichen Verschiebungen in den Marktanteilen, berücksichtigt aber die Risikoaversität der Käufer hinsichtlich einer neuen Technologie und tatsächliches Kaufverhalten sowie den begrenzten Nutzen bei mangelnder Infrastrukturverfügbarkeit (vgl. Plötz et al. 2013 und weitere Referenzen dort). Für das Jahr 2030 ergeben sich Beschränkungen auf 87 % (NGV, BEV und PHEV) und 58 % für FCEV und HO-Lkw.

5.1.8 Berechnung der Kosten für THG-Emissionen

Die THG-Emissionen werden im Modell als CO₂-Äquivalente berechnet. Dabei wird zwischen den Emissionen der Kraftstoffherzeugung (Well-to-Tank, WtT) und bei der Nutzung zu unterscheiden (Tank-to-Wheel, TtW). Für die Well-to-Tank-Emissionen werden für alle strombasierten Kraftstoffe die Emissionen der Stromerzeugung und die jeweiligen Verluste beim Transport und der Umwandlung angenommen. Hier wird für BEV und PHEV ein Leitungsverlust von 5 % am Niederspannungsnetz und für alle HO-Lkw-Varianten beim Strombezug von der Infrastruktur am Mittelspannungsnetz ein Leitungsverlust von 2 % angesetzt. Für die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse werden ein Leitungsverlust von 5 % beim Strombezug am Niederspannungsnetz, ein Wirkungsgrad von 75 % des Elektrolyseurs und ein Wirkungsgrad von 88 % bei der Komprimierung des Wasserstoffs auf 700 bar angenommen. Für die Gas- und Dieselerzeugung werden pauschal Aufschläge von 20 % der WtW-Emissionen angenommen. Alle Annahmen für Wirkungsgrade stammen aus (Wietschel et al. 2015). Diese Kraftstoffarten sind lokal emissionsfrei, sodass keine TtW-Emissionen entstehen. Für Diesel- und gasbetriebene Lkw werden die Werte aus (DLSV 2013) zugrunde gelegt. Die WtW-Emissionen für das Jahr 2030 bei Durchschnittsemissionen für die Stromerzeugung (vgl. Abschnitt 5.2.1) sind in Tabelle 57 dargestellt.

Tabelle 57: CO₂-Emissionen (WtW) für betrachtete Antriebsarten 2030³⁴

Emissionen WtW	Diesel	NGV	BEV	PHEV Strombetrieb	FCEV	HO-Lkw Strombetrieb
kg CO ₂ /kWh	0,324	0,242	0,202	0,202	0,306	0,196

5.2 Ergebnisse

Im Rahmen der Studie wird eine Vielzahl an Themen untersucht, um HO-Lkw ganzheitlich zu bewerten. Die Untersuchung schließt dabei technische und ökonomische Aspekte (betriebs- und volkswirtschaftliche) der Fahrzeuge und Infrastruktur mit ein. Analysiert werden aber ebenso die energie- und klimapolitischen Auswirkungen und ökologischen Gesichtspunkte des HO-Lkw-Konzepts.

Hierfür werden einheitliche Szenarien für Energieträger und Infrastrukturausbau definiert, die in Abschnitt 5.2.1 detailliert beschrieben sind. Zuvor wurde bereits der mögliche Ausbau einer HO-Infrastruktur in Deutschland anhand der hochausgelasteten Autobahnen analysiert (Kapitel 4). Die Verbreitung der HO-Lkw wird über das in Abschnitt 5.1 beschriebene Modell ermittelt und in den Abschnitten 5.2.2 bis 5.2.8 dargestellt. Hierbei ist

³⁴ PHEV und HO-Lkw im Dieselbetrieb mit gleichen Emissionen wie Diesel-Lkw.

neben der Fahrzeugzahl auch die Endenergieeinsparung und die CO₂-Emissionsreduktion von besonderer Relevanz.

5.2.1 Annahmen und Szenarien

Für Energieträgerpreise, die in zahlreichen Studien im Rahmen der MKS verwendet werden, werden die in Tabelle 58 zusammengefassten, einheitlichen Annahmen verwendet. Alle Preise sind ohne Mehrwertsteuer angegeben.

Tabelle 58: Preisannahmen für Energieträger und Batterien, Batterielebensdauer und CO₂-Emissionen der Stromerzeugung

Parameter (alle Preise ohne MWSt.)	Einheit	2015	2030	Quelle
Batteriepreis	Euro/kWh	509	186	[1]
Batterielebensdauer	Vollzyklen	3.000	5.000	[2]
Dieselpreis	Euro/l	0,98	1,53	[3]
	Euro/kWh	0,10	0,15	
Gaspreis	Euro/kg	0,87	1,48	[4]
	Euro/kWh	0,06	0,11	
Wasserstoffpreis	Euro/kg	8,60	6,65	[5]
	Euro/kWh	0,26	0,20	
Strompreis gewerblich	Euro/kWh	0,21	0,22	[6]
Strompreis Industrie	Euro/kWh	0,14	0,16	[6]
Durchschnittsemissionen dt. Kraftwerkspark	t CO ₂ /MWh		0,192	[7]
Grenzemissionen dt. Kraftwerkspark	t CO ₂ /MWh		0,448	
Dieselpreis ohne Energiesteuer	Euro/l		0,90	[8]
Gaspreis ohne Energiesteuer	Euro/kg		4,66	
Wasserstoffpreis ohne Energiesteuer	Euro/kg		1,04	
Strompreis gewerblich ohne Energiesteuer	Euro/kWh		0,07	
Strompreis Industrie ohne Energiesteuer	Euro/kWh		0,08	
Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur	km	0	4.000	[9]

[1] Thielmann et al. 2015; [2] Wietschel et al. 2016a; [3] Schade und Wietschel 2016; MWV 2016
 [4] Schade und Wietschel 2016; Neumann 2016; [5] McKinsey et al. 2011; [6] Auf der Maur et al. 2015;
 [7] Berechnung auf Basis des Szenarios KS95 in (BMUB 2015); [8] Berechnung auf Basis von (Schade und Wietschel 2016) und (EnStG 2016), [9] eigene Annahme basierend auf (Auf der Maur et al. 2015)

Der Batteriepreis auf Systemebene wird auf Basis von (Thielmann et al. 2015) berechnet, wobei laut einer Vielzahl von Studien eine Reduktion auf knapp ein Drittel des heutigen Wertes möglich ist (Nykvist und Nilsson 2015). Im Rahmen dieser Studie wird, um die Skaleneffekte zu nutzen, davon ausgegangen, dass es zukünftig keine spezielle Batterieentwicklung von Lkw-Lithium-Ionen-Batterien geben wird, sondern diese die gleichen Bat-

teriezellen und -module wie Pkw verwenden. Eine Skalierbarkeit der Batteriezellen ist laut Expertenaussagen gegeben und angestrebt (Wietschel et al. 2016a).

Die Batterielebensdauer gibt an, nach wie vielen Vollzyklen sie aus ökonomischen Gründen ersetzt werden muss³⁵ und ist daher maßgeblich für die Wartungs- und Instandhaltungskosten aller Fahrzeuge, die eine Batterie an Bord haben (vgl. Abschnitt 0). Diese wurden mit zahlreichen FuE-Experten aus Wissenschaft und Industrie abgestimmt, da es wenige Literaturquellen für die Batterielebensdauern gibt (Wietschel et al. 2016a). Es werden 3.000 Vollzyklen für 2015 und 5.000 Vollzyklen für 2030 angenommen.

Sämtliche Energieträgerpreise (alle ohne MwSt.) für 2015 werden Portalen ihrer wichtigsten Verbände entnommen. Für 2030 sind der Diesel und der Gaspreis aus dem Bundesverkehrswegeplan der Bundesregierung entnommen, der für alle MKS-Studien als Vorlage dient. Im Rahmen dieser Studie wird die Energiesteuerreduktion für Erdgas bis zum Jahr 2030 aufgehoben, sodass ein Preis von 1,48 Euro/kg (ohne MwSt.) zu zahlen ist (EnStG 2016). Der Wasserstoffpreis für 2030 basiert auf den Annahmen des Industriekonsortiums McKinsey et al. (2011), allerdings ist auch hier die Energiesteuerbefreiung ausgesetzt.³⁶ Für die Strompreise wird die Studie von Auf der Maur et al. (2015) zugrunde gelegt, in der von einer moderaten Steigerung der Strompreise bis 2020 und einer anschließenden Stagnation bis 2030 ausgegangen wird. Daraus resultieren Strompreise für gewerblich gehaltene Fahrzeuge von 0,22 Euro/kWh und ein Industriestrompreis von 0,16 Euro/kWh. Der Preis für gewerblichen Strom wird für die Bewertung der BEV und PHEV verwendet, da diese zumeist auf ihren Betriebshöfen verwendet werden, während für die Bewertung der HO-Lkw der Industriestrompreis angesetzt wird, da angenommen wird, dass der Strombezug an der Oberleitung den Vergünstigungen der Großabnehmer entsprechen wird.

Bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen (und des Primärenergieaufwands im Kraftwerkspark) tritt stromseitig ein Zuordnungsproblem zur nachgefragten Kilowattstunde Strom auf. Wenn ein Barrel Erdöl eingekauft wird, kann die Emissionswirkung von Experten anhand seiner chemischen Eigenschaften eindeutig bestimmt werden. Wenn eine kWh Elektrizität eingekauft wird, gibt es keine physikalische oder chemische Analyse, die auf die Quelle schließen lässt. Das Stromnetz ist vergleichbar mit einem See, auf dem auf der einen Seite eine Reihe an Stromproduzenten Strom einleiten und auf der anderen Seite Strom entnommen wird.

³⁵ Bei alterungsbedingten Reduktion der Kapazität wird die Batterie in die Zweitnutzung übergeben und nicht mehr in Fahrzeugen eingesetzt.

³⁶ Hierbei ist zu erwähnen, dass dieser Preis auch die Kosten für die Tankstelleninfrastruktur enthält.

Zur Lösung dieses Problems gibt es Ansätze über Marktmechanismen oder statistische Definitionen. Dazu wird zunächst aufgeschlüsselt, welche Kraftwerkstypen in der jeweiligen Stunde zu welchen Kosten Strom produzieren. Anhand des eingesetzten Primärenergieträgers (bei konventionellen Kraftwerken v. a. Gas oder Kohle) können die CO₂-Emissionen und Primärenergieverbräuche für die Kraftwerke berechnet werden. Anhand dieser Werte können mit zwei üblichen Ansätzen die CO₂-Emissionen bzw. Primärenergieverbräuche berechnet werden: Es werden entweder Durchschnittswerte über den gesamten Strommix der jeweiligen Stunde übernommen (statistische Definition) oder mit Grenzwerten gerechnet, die von dem Grenzkraftwerk abgeleitet werden, das unter den aktivierten Kraftwerken die höchsten variablen Kosten aufweist (Marktmechanismus).

Beide Werte werden hier in der Studie angegeben, da sie zwei verschiedene Sichtweisen einnehmen: Entweder wird das Stromangebot gleichmäßig auf die Nachfrager in der Stunde verteilt oder aber es wird eine Reihenfolge unterstellt, die neuen Nachfragern wie hier der HO-Lkw den Einsatz zusätzlicher Kraftwerke zuschreibt, wenn nicht ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien vorhanden ist. Als zusätzliche, weitere Perspektive ließe sich auch argumentieren, dass in der EU durch die Einführung der Obergrenzen für CO₂-Zertifikate die Menge an CO₂-Emissionen reguliert ist und eine direkte Zurechnung der CO₂-Emissionen auf die neuen Verbraucher somit nicht notwendig ist.

Für die Durchschnitts- und Grenzemissionen des Stroms wird das Klimaschutzszenario mit einer Reduktion der THG-Emissionen um 95 % bis 2050 aus BMUB (2015) als Rechengrundlage verwendet. Basierend auf diesem Szenario kann der CO₂-Ausstoß bei der Stromerzeugung simuliert werden, was aufgrund der zu geringen Informationen über Kraftwerksausbau und EE-Einspeisung in (Auf der Maur 2015) nicht möglich ist.

Diese Simulation erfolgt mithilfe eines Fundamentalmodells. Im Fundamentalmodell wird der Day-Ahead-Markt abgebildet, an dem Stromangebot und -nachfrage zusammentreffen. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Annahmen zum Kraftwerkspark, der erneuerbaren Stromerzeugung und der Stromnachfrage werden die stündliche Residuallast und Spotmarktpreise für die zukünftigen Jahre ermittelt. Als Eingangsdaten dienen Energieträger- und CO₂-Preise, techno-ökonomische Parameter der Kraftwerke und Pumpspeicher sowie die stündlichen Verläufe der Stromerzeugung erneuerbarer Energieträger und der Stromnachfrage für die zu simulierenden Jahre. Im Modell wird anhand der variablen Kosten der Erzeuger unter Berücksichtigung von Anfahrkosten und Mindeststillstandszeiten die Merit Order ermittelt. Als Ergebnis werden die Kraftwerkseinsätze und die damit verbundenen stündlichen Spotmarktpreise und CO₂-Emissionen ausgegeben.

Hier ergeben sich durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung von 0,192 t CO₂/MWh für 2030 und 0,448 t CO₂/MWh, sofern Grenzemissionen zur Bewertung herangezogen werden, d. h. die Emissionen, die bei der Zuschaltung eines zusätzlichen Verbrauchers entstehen. Diese sind als Extremfall für alle neuen Verbraucher ansetzbar, wie auch die Nullemissionen, die „grünen“ Verbrauchern keine Emissionen zuweisen. Im Rahmen

dieser Studie werden alle drei Optionen dargestellt, wobei im Basisszenario von den Durchschnittsemissionen ausgegangen wird.

Weiterhin sind in Tabelle 58 die Energieträgerpreise ohne ihre Energiesteuer aufgelistet, die in einer Variationsrechnung verwendet werden. Diese wurden basierend auf der aktuellen Gesetzgebung berechnet (EnStG 2016). Zu guter Letzt bestimmt die Nutzung einer Oberleitungsinfrastruktur ihre Wirtschaftlichkeit, jedoch ist auch die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge vom Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur abhängig, da die Fahrzeuge wesentlich energieeffizienter und günstiger an der Oberleitung fahren. Als Startpunkt für die Analysen wird deshalb im Basisszenario von 4.000 km Ausbau im Jahr 2030 ausgegangen, dieser Wert wird aber in Variationsrechnungen weiter untersucht. Basierend auf den Untersuchungen zur Oberleitungsinfrastruktur in Abschnitt 2 wird für die Variante des HO-Lkw in der Batterie-Variante von einem reduzierten Infrastrukturausbau von etwa 30 % der zu elektrifizierenden Strecken ausgegangen. Die Dieselhybridvariante wird mit einem durchgängigen Infrastrukturausbau untersucht.³⁷

5.2.2 Markthochlauf bis 2030 (Basisszenario)

Für die Untersuchung wird mit Hilfe des zuvor beschriebenen Modells (Abschnitt 5.1), der verschiedenen Fahrzeugparameter (Abschnitt 3) und den eingangs dieses Kapitels beschriebenen Energieträgerpreisen (Abschnitt 5.2.1), der Markthochlauf für sämtliche alternativen Antriebsarten ermittelt. Dabei wird im Wesentlichen (1) der Bestand der Fahrzeuge im Jahr 2030, (2) die damit erzielte Endenergieverbrauchseinsparung (EEV) und (3) die resultierende CO₂-Emissionsreduktion analysiert. Nachfolgend ist die Entwicklung der Fahrzeugneuzulassungen (als Anteil der Neuzulassungen auf der linken Seite) und Fahrzeugbestände (rechts) für alle fünf Fahrzeuggrößenklassen von 2015 bis 2030 grafisch dargestellt (Abbildung 46 bis Abbildung 50). Die Entwicklung aller drei Ergebnisgrößen nach Antriebsarten und Größenklassen untergliedert findet sich in Tabelle 59. Insgesamt kann im Basisszenario durch die Diffusion der alternativen Antriebe in allen Größenklassen ein Fahrzeugbestand von knapp einer Million Lkw mit alternativen Antrieben im Jahr erreicht werden, was einem Anteil von 34 % des Fahrzeugbestands entspricht. Unter den getroffenen Annahmen kann so eine EEV-Einsparung von 7,0 TWh und eine CO₂-Emissionsreduktion von 11,2 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 (-26 %) erzielt werden. Dieses Szenario wird nicht als das wahrscheinlichste Szenario angesehen, dient aber der Orientierung zur Einordnung der später folgenden Sensitivitäts- und Variationsrechnungen.

³⁷ D. h. bei 4.000 km Autobahnausbau werden bei der Batteriehybridvariante nur 1.200 km (30 %) ausgebaut, während für den Dieselhybrid die gesamte Strecke ausgebaut wird.

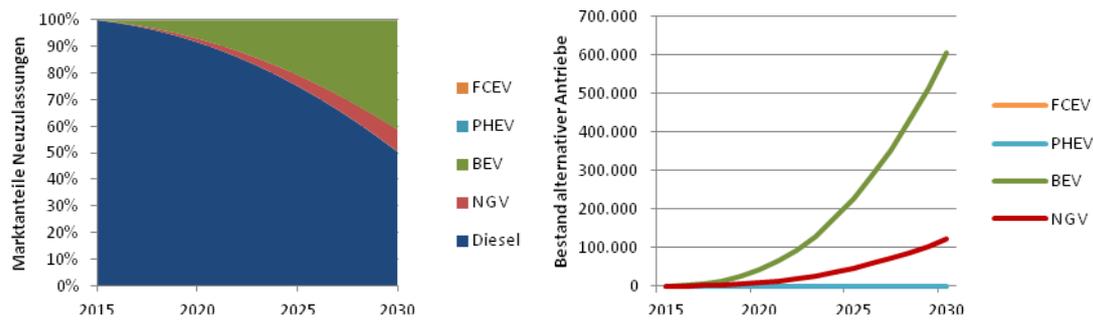


Abbildung 46: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 1 (bis 3,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

In der kleinsten Größenklasse 1 (bis 3,5 t) werden noch bis 2030 Dieselfahrzeuge die Neuzulassungen dominieren. Der wichtigste alternative Antrieb in dieser Größenklassen sind reine Batteriefahrzeuge, die hier vor allem aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz, die sich auf die Verbrauchskosten auswirkt, in den Bestand kommen. Gleichzeitig fahren die ersetzten Fahrzeuge nur so viel, dass sie ihre Reichweitenbeschränkung nicht überschreiten. Für Vielfahrer können sich auch Gasfahrzeuge rechnen. Hier ist der Verbrauchsvorteil gegenüber Diesel aber nicht so groß, sodass große Jahresfahrleistungen notwendig sind, um die höheren Antriebsstrangkosten zu amortisieren. Alle anderen Antriebsarten haben keinen oder keinen nennenswerten Marktanteil an den Neuzulassungen.

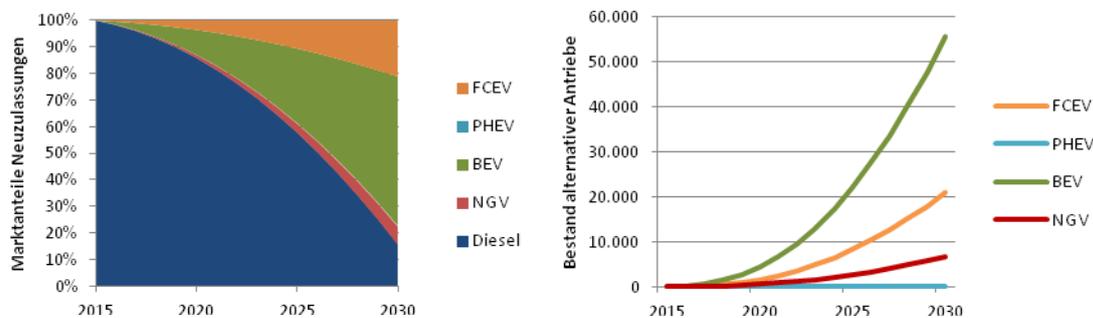


Abbildung 47: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 2 (3,5 t bis 7,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

Da in der Größenklasse 1 viele Fahrzeuge zugelassen werden, ist der Bestand an BEV und Gasfahrzeugen (engl. Natural Gas Vehicles, NGV) mit 600.000 bzw. 120.000 Fahrzeugen im Vergleich zu den anderen Größenklassen hoch (vgl. Tabelle 59). Auch ist der Anteil an den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben dieser Größenklasse vergleichsweise hoch (ca. 70 % der Fahrzeuge) wie auch ihr Beitrag zur EEV-Einsparung. Zur Reduktion der CO₂-Emissionen tragen die Fahrzeuge mit alternativen Antrieben dieser Größenklasse mit 2,6 Mio. t CO₂ jedoch einen geringeren Beitrag bei (20 % der

Gesamteinsparung), da der Beitrag der kleineren Größenklassen geringer ist (vgl. Tabelle 1).

In Größenklasse 2 (3,5-7,5 t) werden Dieselfahrzeuge unter den getroffenen Annahmen aus den Neuzulassungen bis 2030 fast vollständig verdrängt; sie kommen nur noch in den sehr kleinen Reichweitenbereichen zum Einsatz, wo alternative Antriebe ihre Verbrauchsvorteile nicht ausspielen können. Bei geringen bis mittleren Reichweiten dominieren vor allem die BEV mit einem Marktanteil von fast 60 %. Die Fahrzeuge, die im Langstreckeneinsatz sind, werden durch Brennstoffzellen- (20 %) oder Gasfahrzeuge (5 %) ersetzt.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass der Fahrzeugbestand in der Größenklasse 2 deutlich geringer als in der Größenklasse 1 ist (siehe y-Achse). Mit etwa 80.000 Fahrzeugen im alternativen Fahrzeugbestand 2030 trägt GK2 nur etwa 8 % zur Gesamtfahrzeugzahl bei. Der Beitrag der EEV-Einsparung ist mit 1,0 TWh etwas höher (13 %) als in GK1, während die CO₂-Einsparung mit 0,6 Mio. t CO₂ nur etwa 5 % der gesamten CO₂-Reduktion durch den Einsatz alternativer Antriebe in Lkw ausmacht. Dies liegt im Vergleich zu GK1 vor allem an den im Vergleich zu BEV weniger effizienten FCEV, bei denen größere Umwandlungsverluste die CO₂-Bilanz schmälern.

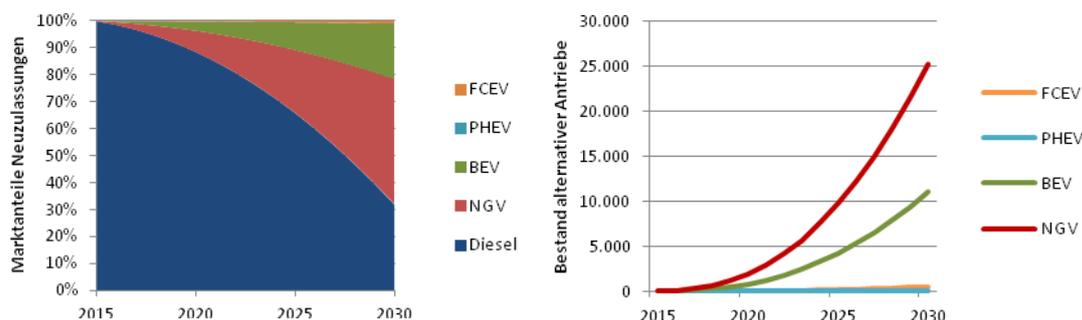


Abbildung 48: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 3 (7,5 t bis 12 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

Die Marktanteile bei den Neuzulassungen von GK3 (7,5-12 t) sind im Jahr 2030 im Wesentlichen von drei Antriebsarten geprägt: Dieselfahrzeuge (30 %, Tendenz sinkend), BEV (20 %, Tendenz steigend) und Gasfahrzeuge (50 %, Tendenz steigend). Brennstoffzellenfahrzeuge liegen bezüglich ihrer TCO nahe an den Gasfahrzeugen. Die Verbrauchsvorteile sind aber gering, sodass sich Brennstoffzellenfahrzeuge vor allem in den großen Reichweitenbereichen und Gasfahrzeuge in den mittleren Reichweitenklassen durchsetzen, bei denen BEV an ihre Reichweitenlimits stoßen.

Im Bestand drückt sich dies in rund 10.000 BEV und 25.000 NGV im Jahr 2030 aus. Hierdurch werden in GK3 zwar 38 % der Fahrzeuge durch alternative Antriebe ersetzt, Jedoch trägt die GK3 dadurch nur mit 3,5 % zum alternativen Antriebsbestand über alle Größenklassen bei. Auch der Beitrag zu EEV-Einsparung ist mit 0,3 TWh 2030 gering

(5 % der gesamten EEV-Einsparung), während die Emissionsreduktion mit 0,7 Mio. t CO₂ einen größeren Beitrag leistet (10 %). Dies liegt unter anderem an den ähnlich angenommenen Verbräuchen von Gasfahrzeugen im Vergleich zu Dieselfahrzeugen, die eine CO₂-Emissionsminderung, jedoch eine geringere EEV-Einsparung mit sich bringt.

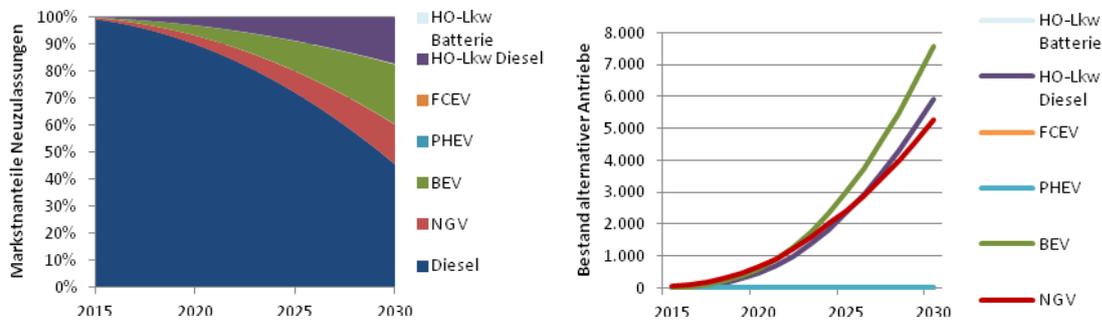


Abbildung 49: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 4 (12 t bis 26 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

In Größenklasse 4 dominieren weiterhin Dieselfahrzeuge die Neuzulassungen (ca. 50 %), während sich die restlichen Marktanteile zu etwa gleichen Teilen auf NGV, BEV und HO-Diesel-Lkw aufteilen. Dabei sind HO-Lkw immer günstiger als Dieselfahrzeuge, wenn sie mit dem elektrischen Fahranteil die Mehrkosten im Vergleich zum Diesel amortisieren können (vgl. Abschnitt 5.1.6). Bei geringeren Jahresfahrleistungen sind BEV die günstigere Alternative, sie stoßen aber häufig an ihre Reichweitengrenzen. Gasfahrzeuge sind ebenfalls in den großen Reichweitenbereichen zu finden, vornehmlich, wenn die Autobahnanteile der HO-Lkw-Diesel nicht groß genug sind (z. B. bei vereinzelt hohen Tagesfahrleistungen, aber geringen Jahresfahrleistungen, vgl. Abschnitt 5.1.5), weil dann der Anteil der Fahrten an Autobahnen zu gering ist.

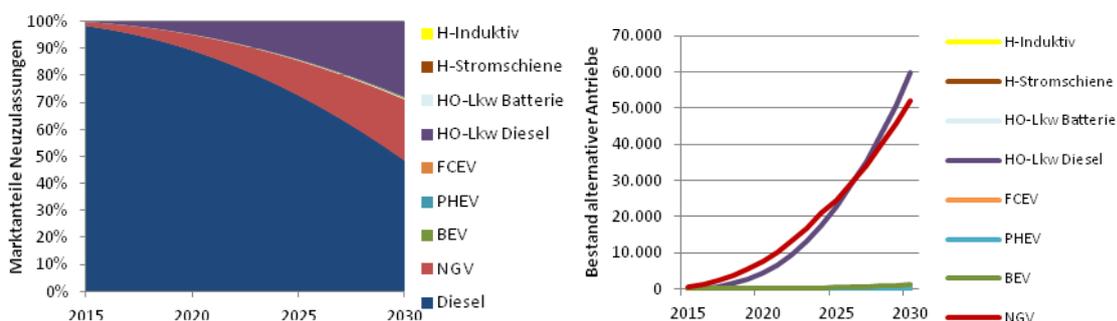


Abbildung 50: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Sattelzugmaschinen (mehr als 40 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

In dieser Größenklasse sind die geringsten Ersetzungen des Bestands zu sehen (etwa 30 %) und die 18.000 Fahrzeuge mit alternativen Antrieben tragen nur knapp 2 % zum alternativen Fahrzeugbestand und 3 % zur EEV-Einsparung bei. Die prozentual höhere

CO₂-Emissionsreduktion von 0,5 Mio. t CO₂ (5 % der gesamten Emissionsreduktion) ist wiederum mit der geringeren Energieeffizienz der Gasfahrzeuge zu erklären, die die Emissionsreduktion (v.a. durch die BEV) reduziert.

In der Größenklasse der Sattelzugmaschinen dominieren neben den rund 53 % Dieselfahrzeugen 2030 vor allem Gasfahrzeuge (22 %) und HO-Diesel-Lkw (25 %) die Neuzulassungen. Die meisten HO-Varianten mit Batterie können nur geringe Reichweiten zur HO-Infrastruktur mit ihrer Batterie zurücklegen und amortisieren sich daher nicht (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.2.4). Gleiches gilt für BEV und PHEV, während FCEV ihren Verbrauchsvorteil im Vergleich zum Diesel-Lkw gegenüber einem HO-Diesel-Lkw mit hohem elektrischen Fahranteil und einem Gasfahrzeug mit ähnlichem Verbrauch kaum ausspielen können. Wenn allerdings aus Klimaschutz Gesichtspunkten Gasfahrzeuge wegfallen und die Einführung von HO-Lkw aus Gründen, die später thematisiert werden, scheitern sollten, sind sie eine valide Option.

Der SZM-Bestand der alternativen Antriebe im Jahr 2030 ist von der Durchdringung der Antriebe HO-Diesel und NGV geprägt, die zusammen 47 % des Bestands der ersetzbaren Sattelzugmaschinen umfassen (113.000 Fahrzeuge).³⁸ Damit tragen sie außerdem zu knapp 12 % des alternativen Fahrzeugbestands bei sowie zu einer EEV-Einsparung von 1,4 TWh (20 %) und einer CO₂-Emissionsminderung von 6,7 Mio. t CO₂ (60 %). Insbesondere die starke Emissionsminderung rührt von den hohen Jahresfahrleistungen und den hohen Fahrzeuggewichten und zeigt, dass diesem Bereich auch zukünftig große Aufmerksamkeit beigemessen werden sollte.

Betrachtet man das Basisszenario hinsichtlich der Antriebsarten, so lässt sich Folgendes feststellen: *BEV* haben Verbrauchsvorteile in allen Größenklassen, sind aber vor allem in den kleineren Größenklassen zu finden, wo die Reichweitenbeschränkungen für viele Fahrzeuge keine Rolle spielt. Der gesamte alternative Fahrzeugbestand 2030 wird auch von BEV dominiert (rund zwei Drittel), sie tragen die 70 % zur EEV-Einsparung, jedoch nur 25 % zur CO₂-Emissionsminderung bei. *Gasfahrzeuge* (Natural Gas Vehicles, NGV) sind mit rund 200.000 Fahrzeugen im Bestand 2030 die zweitgrößte Gruppe der alternativen Antriebe. Während sie zu 60 % zum ermittelten Emissionsreduktionpotential beitragen, ist ihre EEV-Einsparung aufgrund der geringeren Energieeffizienz negativ (die gesamte EEV-Einsparung wäre etwa 30 % höher ohne die Gasfahrzeuge).

³⁸ Hierbei sei nochmals erwähnt, dass alle Baufahrzeuge in GK4 und bei den SZM aufgrund der Spezialanfertigungen heraus gerechnet wurden. Dies sind 38 % in GK4 und 15 % bei den SZM.

Tabelle 59: Lkw-Bestand (auf Tausender gerundet), EEV-Einsparung, CO₂-Emissionsminderung im Basisszenario im Jahr 2030, unterschieden nach Größenklassen und Antriebsarten

Kategorie	GK1	GK2	GK3	GK4	SZM	Gesamt
Gesamtbestand 2030	2.224.000	216.000	100.000	62.000	239.700	2.841.700
Bestand 2030 BEV	604.000	56.000	11.000	8.000	1.000	680.000
Anteil BEV am Bestand 2030	27 %	26 %	11 %	12 %	0 %	24 %
mittlere JFL [km]	22.425	26.466	29.149	29.633	42.930	
Energieverbrauch gesamt [TWh]	4,2	0,8	0,2	0,2	0,1	5,5
EEV-Einsparung 2030 BEV [TWh]	4,1	0,8	0,2	0,2	0,1	5,4
CO ₂ -Emissionsreduktion 2030 BEV [Mio. t CO ₂]	1,8	0,4	0,1	0,1	0,0	2,4
Bestand 2030 FCEV	1.000	21.000	500	0	0	22.500
Anteil FCEV am Bestand 2030	0 %	10 %	0 %	0 %	0 %	1 %
mittlere JFL [km]	129.513	52.626	103.671	0	0	
Energieverbrauch gesamt [TWh]	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,1
EEV-Einsparung 2030 FCEV [TWh]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2
CO ₂ -Emissionsreduktion 2030 FCEV [Mio. t CO ₂]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2
Bestand 2030 HO-Lkw ³⁹	---	---	---	6.000	60.000	66.000
Anteil HO-Lkw am Bestand 2030	---	---	---	10 %	25 %	2 %
mittlere elektrische JFL [km]	---	---	---	44.089	77.611	
Energieverbrauch gesamt [TWh]	---	---	---	0,3	7,4	7,7
EEV-Einsparung 2030 HO-Lkw [TWh]	---	---	---	0,2	4,0	4,2
CO ₂ -Emissionsreduktion 2030 HO-Lkw [Mio. t CO ₂]	---	---	---	0,1	2,2	2,3
Bestand Gasfahrzeuge 2030	122.000	7.000	25.000	5.000	52.000	211.000
Anteil Gasfahrzeuge am Bestand 2030	5 %	3 %	25 %	8 %	22 %	7 %
mittlere JFL [km]	46.035	63.916	72.572	135.279	157.765	
EEV-Einsparung Gasfahrzeuge 2030 [TWh]	0,1	0,0	0,0	-0,2	-2,7	-2,7
CO ₂ -Emissionsreduktion NGV 2030 [Mio. t CO ₂]	0,8	0,1	0,6	0,3	4,5	6,3
Bestand 2030 AFV gesamt	727.000	83.000	37.000	19.000	113.000	979.000
Anteil AFV am Bestand 2030	33 %	38 %	37 %	30 %	47 %	34 %
EEV-Einsparung gesamt 2030 [TWh]	4,1	1,0	0,3	0,2	1,4	7,0
CO ₂ -Emissionsreduktion ges. 2030 [Mio. t CO ₂]	2,6	0,6	0,7	0,5	6,7	11,2
CO ₂ -Emissionen ohne alternative Antriebe Bestand 2030 [Mio. t CO ₂]	8,3	2,7	2,6	3,9	25,6	43,1
mittlere JFL [km]	18.872	35.315	54.459	63.901	113.914	
	CO₂-Reduktion gesamt:			25,9 %		

³⁹ HO-Lkw werden nur in GK4 und bei SZM berücksichtigt und deshalb in GK1-GK3 nicht angegeben.

Die drittgrößte Gruppe bilden *HO-Diesel-Lkw* mit 65.000 Fahrzeugen oder 6 % des alternativen Fahrzeugbestands 2030. Ihre gesamte EEV-Einsparung beträgt 4,2 TWh (60 % der EEV-Einsparung aller alternativen Antriebe), ihr Beitrag zur CO₂-Emissionsminderung ca. 20 %. *Brennstoffzellenfahrzeuge* sind die letzte nennenswerte Gruppe im alternativen Fahrzeugbestand 2030. Sie umfassen jedoch nur 20.000 Fahrzeuge (2 % der alternativen Antriebe) und tragen mit 0,2 TWh (5 %) zur gesamten EEV-Einsparung und mit 0,2 Mio. t CO₂ nur zu 3 % zur gesamten Emissionsminderung bei. Die *HO-Batteriekonzepte* und *PHEV* kommen aufgrund der geringen Oberleitungs- bzw. elektrischen Fahranteile nicht zum Zug. Da diese Aufteilung zahlreichen Annahmen unterliegt, werden im Folgenden Sensitivitäts- und Variationsrechnungen durchgeführt.

In Anbetracht der Unsicherheiten einer Markthochlaufmodellierung zeigt sich zusammenfassend, dass BEV aus Nutzersicht besonders interessant für leichtere Nutzfahrzeuge sind und HO-Lkw für schwere Nutzfahrzeuge. Darüber hinaus spielen FCEV unter den hier getroffenen techno-ökonomischen Annahmen keine nennenswerte Rolle, und Gasfahrzeuge können je nach Besteuerung und Preisen nennenswerte Marktanteile erreichen.

5.2.3 Sensitivitäten und Variationsrechnungen

Die Ergebnisse der Markthochlaufrechnungen unterliegen unterschiedlichen Einflüssen. Diese Einflüsse werden in Sensitivitäts- und Variationsrechnungen untersucht. Bei den Sensitivitätsrechnungen wird je ein Parameter zwischen -25 % und +25 % seines Wertes im Basisszenario variiert, um den Einfluss auf ein bestimmtes Ergebnis zu untersuchen.⁴⁰ In den Variationsrechnungen wird die Logik der Berechnung verändert (z. B. die CO₂-Emissionsbewertung von elektrischen Antrieben mit Nullemissionen anstatt von Durchschnittsemissionen) und der Einfluss auf das Ergebnis untersucht. Im Folgenden wird der Einfluss von Parametersensitivitäten und Berechnungsvariationen auf den Fahrzeugbestand im Jahr 2030 dargestellt und auf die EEV-Einsparung und CO₂-Emissionsreduktion diskutiert. Zunächst werden Sensitivitäten gezeigt, die Einfluss auf die Bestandsentwicklung aller Antriebsarten haben. Anschließend diejenigen mit Einfluss auf ausschließlich eine Antriebsart, und abschließend werden die Ergebnisse der Variationsrechnungen gezeigt.

Sensitivitäten mit Einfluss auf mehrere Antriebsarten

In den Sensitivitätsrechnungen werden sämtliche Energieträgerpreise aus Tabelle 58 variiert. Die beiden Preise mit dem größten Einfluss auf den Fahrzeugbestand mehrerer An-

⁴⁰ Diese Variationen sind unterschiedlich plausibel hinsichtlich ihres Auftretens in der Realität, eine einheitliche Variation dient jedoch der Vergleichbarkeit.

triebsarten hat die Variation des Diesel- und des Gaspreises. Dieser ist in Abbildung 51 dargestellt als Änderung im Fahrzeugbestand (y-Achse) bei Variation der Einflussgröße (x-Achse) für den Dieselpreis (links) und den Gaspreis (rechts).

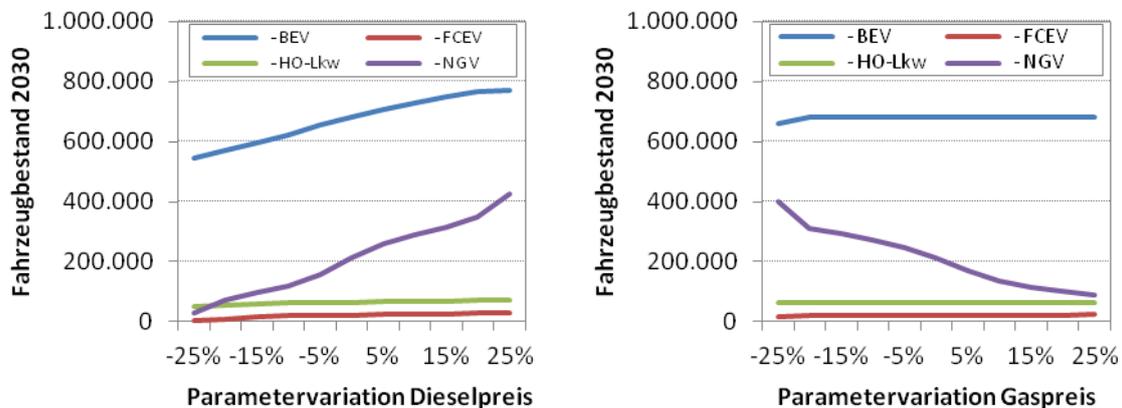


Abbildung 51: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Diesel- und Gaspreisvariation

Man erkennt in der linken Hälfte der Abbildung, dass die BEV und NGV durch ein geringeres bzw. höheres Wachstum des Dieselpreises beeinflusst werden. Das heißt, bei einer Dieselpreissteigerung von +25 % gegenüber dem ursprünglich angenommenen Wachstum auf 1,53 Euro/l (ohne MwSt.) wird eine Erhöhung auf 1,91 Euro/l (ohne MwSt.) im Jahr 2030 angenommen. Hieraus würde eine Steigerung des BEV-Bestands um 25 % (auf knapp 750.000 BEV) und eine Erhöhung des NGV-Bestands um 100 % (auf rund 400.000 Fahrzeuge) resultieren. Ein geringeres Wachstum des Dieselpreises auf 1,15 Euro/l (ohne MwSt.) würde zu einer Reduktion der Fahrzeugbestände dieser beiden Antriebsarten in gleicher Höhe führen (NGV: -100 %, BEV: -25 %). Die Fahrzeugzahlen der FCEV und HO-Lkw werden im Jahr 2030 durch die Dieselpreisänderungen von +/- 25 % kaum beeinflusst. Der Einfluss einer Dieselpreisvariation auf die EEV-Einsparung (auf 5 TWh im Jahr 2030, ohne Abbildung) ist vor allem geprägt durch die Zunahme an NGV, welche die Einsparung aufgrund ihrer geringeren Energieeffizienz im Vergleich zum Dieselfahrzeug reduzieren. Hingegen steigt die Emissionsminderung durch die zusätzlichen Gasfahrzeuge deutlich an (auf 15 Mio. t CO₂, vgl. vorangegangenen Abschnitt). Interessant ist, dass nur bei der Energieeffizienz Kannibalisierungseffekte (Verschiebung vom einen zum anderen alternativen Antrieb) zwischen den Antrieben auftreten, die Erhöhung des Dieselpreises aber in jedem Fall zu einer Vermehrung der Fahrzeugzahl aller alternativen Antriebe und einer höheren CO₂-Emissionsminderung führt.

Die Veränderung des Gaspreises in der rechten Hälfte von Abbildung 51 hat vornehmlich Auswirkungen auf die Zahl der NGV im Jahr 2030: eine Reduktion des Gaspreises um 25 % im Jahr 2030 (1,11 Euro/kg anstatt 1,48 Euro/kg, ohne MwSt.) führt zu einer Verdopplung der Gasfahrzeugzahl, eine Erhöhung um 25 % (1,85 Euro/kg, ohne MwSt.) zu

einer Halbierung. Bei einem Gaspreis unterhalb von 1,25 Euro/kg ist hier ein leichter Kanibalisierungseffekt durch die leichte Reduktion des BEV-Bestands zu erkennen. Die Effekte auf die EEV-Einsparung und die CO₂-Emissionsminderung sind analog zur Sensitivität des Dieselpreises.

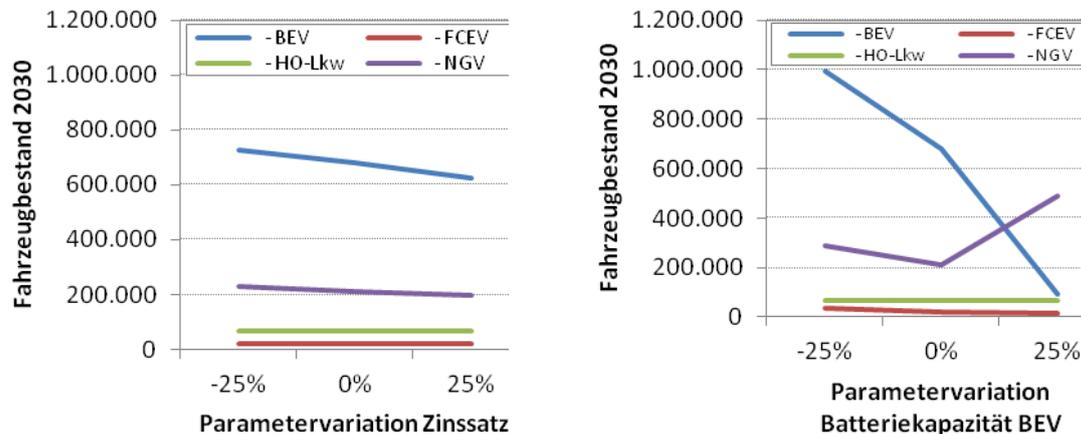


Abbildung 52: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Zinssatz- und BEV-Batteriekapazitätsvariation

Ebenfalls Einfluss auf alle Antriebsarten hat die Variation des angenommenen Zinssatzes (5 % im Jahr 2030) und der Batteriekapazitäten für BEV (vgl. Abschnitt 3.3.3), die in Abbildung 52 dargestellt ist. Der Zinssatz hat demnach eine Reduktion aller alternativen Antriebe zur Folge, allerdings sind BEV und NGV stärker davon betroffen. Das liegt insbesondere an der hohen Marktdurchdringung in den kleineren Größenklassen, in denen die Investition und damit der Zinseffekt im Verhältnis zu den laufenden Kosten eine größere Rolle spielt als bei den größeren Lkw. Das liegt vor allem an den unterschiedlichen Fahrleistungen (durchschnittlich 114.000 km/a für Sattelzugmaschinen gegenüber 19.000 km/a für GK1). Jedoch ist der Einfluss des Zinssatzes in Summe geringer als der Diesel- oder Gaspreis, was die hohe Wichtigkeit der laufenden Kosten nochmals bekräftigt. Die EEV-Einsparung und die CO₂-Emissionsminderung sind kaum von dieser Variation betroffen (Veränderung von maximal 5 %).

Verringert man die Batteriekapazitäten der BEV 2030 in allen Größenklassen (rechte Seite Abbildung 52), so steigt ihre Anzahl deutlich an, da nun die Amortisation nicht mehr so lange dauert (die kleineren Batterien sind günstiger). Allerdings können einige Fahrzeuge aufgrund der geringeren Reichweite nicht mehr mit einem BEV bedient werden, womit der Zuwachs an Gasfahrzeugen zu erklären ist, auch FCEV profitieren leicht davon. Eine Erhöhung der Batteriekapazitäten von BEV im Jahr 2030 führt zu einer Reichweitenverlängerung, allerdings auch zu einer Verteuerung, was sich in einer deutlichen Reduktion des Fahrzeugbestands (-85 %) niederschlägt. Da die BEV-Fahrzeuge nun auch mehr fahren müssen, um ihre höhere Investition für die Batterie zu amortisieren, stehen sie in

Konkurrenz zu FCEV und reduzieren deren Bestand um gut 25 %. Profiteur der Batteriekapazitätserhöhung sind die Gasfahrzeuge, die deutlich Marktanteile von BEV gewinnen und ihren Bestand um 150 % auf eine halbe Million im Jahr 2030 steigern.

Während also deutliche Änderungen des Gesamtbestands der alternativ angetriebenen Fahrzeuge durch diese Sensitivität resultieren, ändert sich die CO₂-Emissionsreduktion nur minimal (bei -25 % Batteriekapazitäten der BEV: 11,6 Mio. t CO₂, bei +25 %: 10,5 Mio. t CO₂) und die EEV-Einsparung ist nur bei einer Erhöhung der BEV-Batteriekapazitäten deutlich betroffen (bei -25 % Batteriekapazitäten der BEV: 7,0 TWh, bei +25 %: 3,5 TWh), was wiederum an der starken Zunahme der NGV liegt.

Sensitivitäten mit Einfluss auf einzelne Antriebsarten

Einige Parameter haben Einfluss insbesondere auf die Entwicklung einzelner Antriebsarten, wohingegen die Entwicklung der anderen Fahrzeugantriebsarten wenig berührt ist. Dies sind für die BEV die Variation der Parameter Batteriekosten und Batterielebensdauer sowie für die FCEV die BZ-Systemkosten, die Kosten für den Druckgastank, die Lebensdauer des BZ-Stacks, die Lebensdauer des Druckgastanks und der Wasserstoffpreis (vgl. Abschnitte 3.3.3.4 und 5.2.1).

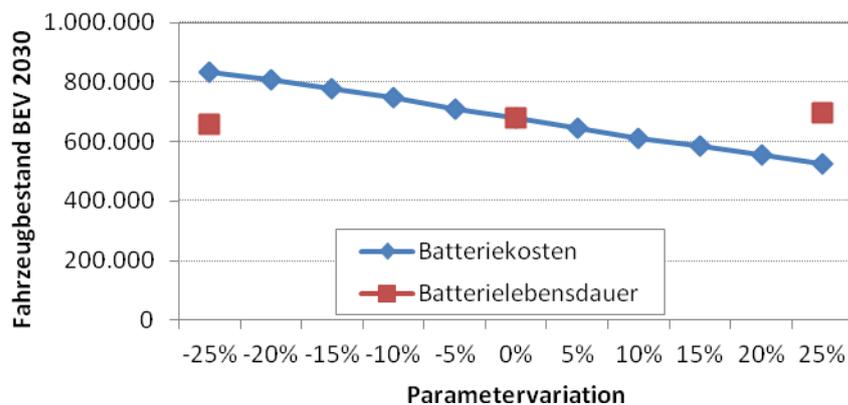


Abbildung 53: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Batteriekosten und -lebensdauern

Der Bestand von BEV im Jahr 2030 erhöht sich bei einer stärkeren Reduktion der Batteriekosten (140 Euro/kWh anstatt 186 Euro/kWh, ohne MwSt.) auf bis zu 840.000 BEV (+23 %). Eine höherer Batteriepreis im Jahr 2030 (233 Euro/kWh) hat eine Reduktion in ähnlicher Höhe zur Folge. Hier wird nochmals deutlich, dass für BEV die Fahrzeuginvestition eine Rolle spielt, da eher kleinere Fahrzeuge mit geringeren Fahrleistungen ersetzt werden. Die Batterielebensdauer, welche direkt in die Wartungs- und Instandhaltungskosten einfließt, hat hier geringeren Einfluss (+/-3 %).

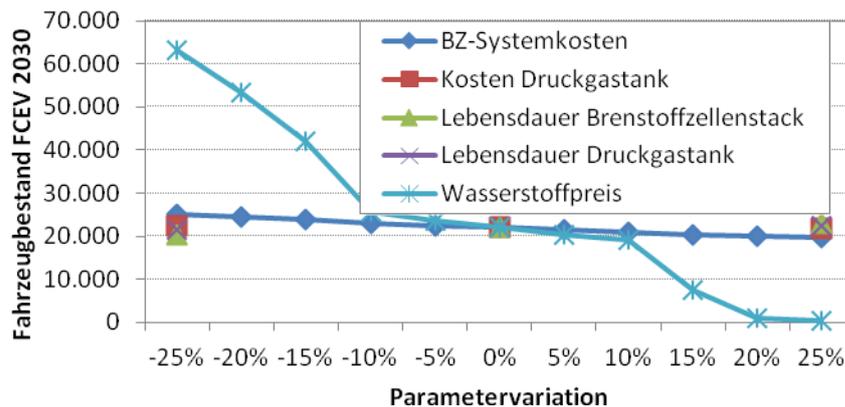


Abbildung 54: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für verschiedene BZ-Parameter

Für Brennstoffzellenfahrzeuge wird eine Reihe von Parametern untersucht, die die Investition und laufende Kosten der Fahrzeuge beeinflussen. Man kann deutlich sehen, dass der Wasserstoffpreis (neben dem bereits oben genannten Dieselpreis) der wichtigste Einflussfaktor auf die Bestandsentwicklung der FCEV bis 2030 ist (bei einem Wasserstoffpreis von 5 Euro/kg kann der Fahrzeugbestand auf rund 60.000 FCEV im Jahr 2030 ansteigen, bei einem Preis von 8,30 Euro/kg ist er bei nahezu null Fahrzeugen im Bestand 2030). Dieser beeinflusst ausschließlich die laufenden Kosten, während die anderen Parameter die Investition der Fahrzeuge adressieren und kaum Einfluss haben. Dies liegt vor allem daran, dass FCEV insbesondere in Fahrzeugen mit sehr hohen Jahresfahrleistungen ökonomisch attraktiv sind, da dann die Mehrinvestition gegenüber den Konkurrenztechnologien (hier vor allem NGV, ansonsten auch Diesel) amortisiert werden können. Da die Kilometerkosten mit einem FCEV und einem NGV unter den getroffenen Annahmen sehr nah beieinander liegen, muss diese Technologie vor allem als Konkurrenz betrachtet werden.

Variationsrechnungen

Weiterhin wird untersucht, welchen Einfluss bestimmte Bemessungsgrundlagen haben. Hierfür wird zunächst ein Szenario gerechnet, in dem Energieträgerpreise ohne Energiesteuern und -abgaben verwendet werden (vgl. Tabelle 58). Weiterhin werden verschiedene Varianten der Emissionsbewertung der alternativen Antriebe untersucht (siehe zur Begründung Kapitel 5.1.8 und 5.2.1) und zu guter Letzt erneuerbares Methanol als Alternative zu Gas analysiert.⁴¹

⁴¹ Diese Option war zu Beginn des Projekts nicht Bestandteil der Betrachtung, wurde aber auf Wunsch der Teilnehmer des ersten Workshops als Zusatzoption hinzugezogen (Wietschel et al. 2016a).

Die bisherige betriebswirtschaftliche Bewertung hat die Sicht der Käufer von Fahrzeugen im Blick. Dabei sind volkswirtschaftliche Aspekte wie Finanzmarktbedingungen, Steuern, Abgaben und Subventionen vorgegebene, exogene Größen, die in die Bewertung einfließen. In einer volkswirtschaftlichen Bewertung stellt sich die Frage, wie die Volkswirtschaft im Sinne einer optimal funktionierenden Gesamtwirtschaft unter vorgegebenen Zielgrößen wie Erreichung von Klimaschutzziele aussehen sollte. Volkswirtschaftliche Größen wie Steuern und Zinsen werden dabei als Steuerungsoptionen für das Handeln von Unternehmen gesehen, die entsprechend zu setzen sind. Hier erfolgt nun der Blickwechsel auf die volkswirtschaftliche Perspektive, die sich die Frage stellt, welche alternativen Antriebe sich dafür anbieten, die energie- und klimapolitischen Ziele aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive am sinnvollsten zu erreichen. Da direkte und indirekte Steuern, Abgaben und Subventionen nur einen Transfer von Finanzmitteln zwischen Haushalten und Unternehmen sowie dem Staat darstellen, werden sie nicht als volkswirtschaftliche Kosten betrachtet. Dies ist eine übliche Vorgehensweise bei derartigen Fragestellungen, siehe z. B. (Os-terttag et al. 2000). Die volkswirtschaftlichen Kosten werden unabhängig davon ermittelt, welche Akteure damit belastet werden. Derartige Verteilungseffekte werden hier nicht behandelt. Ebenfalls nicht thematisiert werden makroökonomische Effekte. Diese umfassen gesamtwirtschaftliche Auswirkungen auf Investitionen, Umsatz, Importe, Bruttoinlandsprodukt und Beschäftigung.

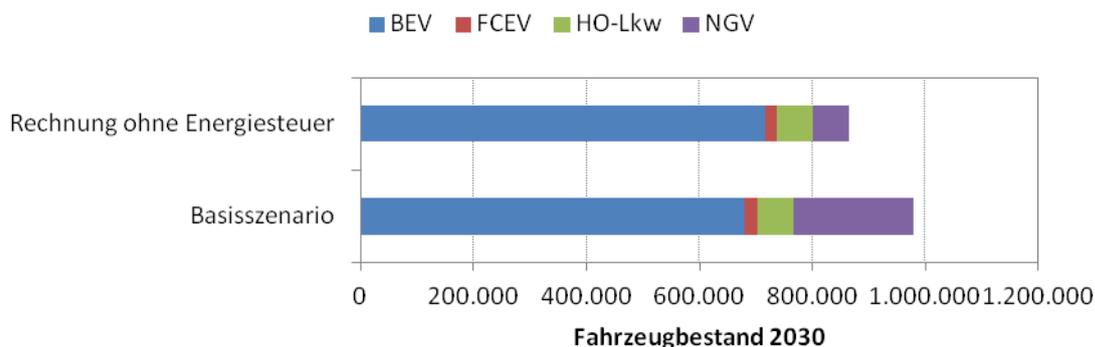


Abbildung 55: Vergleich der Rechnungen mit und ohne Energiesteuern für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030

Die Rechnung ohne Energiesteuern und -abgaben für das Jahr 2030 zeigt die folgenden Effekte: Der Fahrzeugbestand der alternativen Antriebe 2030 verringert sich leicht, weil die höchsten Energiesteuern heute für Diesel gelten und diese Antriebsart damit am meisten von einer Energiesteuerbefreiung profitiert. Außerdem ist eine leichte Zunahme bei BEV und eine deutliche Reduktion bei NGV zu verzeichnen, die Marktanteile an Diesel und BEV verlieren. Nahezu unbetroffen ist der Markthochlauf der HO-Lkw und der FCEV. Für die EEV-Einsparung ist aufgrund der Reduktion der NGV eine leichte Verbesserung, für die CO₂-Emissionsreduktion eine leichte Verschlechterung zu verzeichnen. Damit zeigt diese Analyse, dass sich die Ergebnisse in der Rechnung mit und ohne Energiesteuer nur

unwesentlich unterscheiden, wobei vor allem Gasfahrzeuge von der derzeitigen Energiebesteuerung profitieren.⁴²

Die zweite zu beachtende Variation ist die der Emissionsbewertung der Kraftstoffe von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.⁴³ Der Strom, der in den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (BEV, HO-Lkw) und FCEV (zur Herstellung von Wasserstoff) verwendet wird, kann unterschiedlich hinsichtlich der CO₂-Emissionen bewertet werden. Da diese in die laufenden Kosten der TCO-Rechnung einbezogen werden, kann dies zu großen Unterschieden führen. Grundsätzlich sind drei Arten von Emissionsbewertungen für Strom von neuen Energieträgern zu unterscheiden:

- Nullemissionen: Der Strom, der in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben genutzt wird, wird mit „null“ Emissionen bewertet.
- Durchschnittsemissionen: Der Fahrstrom wird mit den durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung bewertet. Diese Bewertung wird in der Basisvariante berücksichtigt.
- Grenzemissionen: Da für den zusätzlichen Strom der neuen Energieabnehmer Kraftwerke zugeschaltet werden müssen, werden diese mit den CO₂-Emissionen der Grenzkraftwerke bewertet. Weil dies in der Regel fossile Kraftwerke sind⁴⁴, sind diese entsprechend höher als die Grenzemissionen.

Die Durchschnitts- und Grenzemissionen werden mit den in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Fundamentalmodell berechnet.

Für die TCO-Rechnung ist ebenfalls relevant, welche Kosten für die CO₂-Zertifikate angesetzt werden. Hier werden Varianten von 0 Euro/t CO₂, 100 Euro/t CO₂ und 200 Euro/t CO₂ unterschieden, die Werte für die Emissionen der Stromerzeugung finden sich in Tabelle 58. Dies bildet den Einfluss von Klimapolitiken ab. In den sogenannten Klimaschutzszenarien des BMUB bildet sich bei einem 95-%igen THG-Minderungsziel im Jahre 2050 ein CO₂-Preis von 200 Euro/t heraus, im 89 % Minderungsszenario ein Preis von 50 Euro/t (BMUB 2015).

⁴² Hierbei muss nochmals angemerkt werden, dass die Steuerreduktion für Gasfahrzeuge in dieser Studie bereits für das Jahr 2030 ausgesetzt wurde und Erdgas voll versteuert wird. Auch dann ergeben sich noch steuerliche Vorteile.

⁴³ vgl. hierzu auch Abschnitt 5.2.1

⁴⁴ Erneuerbare Kraftwerke haben variable Kosten von annähernd null, während fossile Kraftwerke variable Kosten aufweisen. In der Merit-Order-Kurve (Grenzkostenkurve) der Kraftwerke liegen die fossilen Kraftwerke immer hinter den Erneuerbaren, das heißt sie bilden i.d.R. das sogenannte Grenzkraftwerk. Bei den Durchschnittsemissionen werden die Emissionen aller Kraftwerke gemittelt, d. h. die der Erneuerbaren wie der Fossilen.

Die Ergebnisse der Variationsrechnung in Bezug auf den Fahrzeugbestand finden sich in Abbildung 56 in allen sinnvollen Kombinationen im Vergleich zum Basisszenario (Durchschnittsemissionen und 100 Euro/t für CO₂).

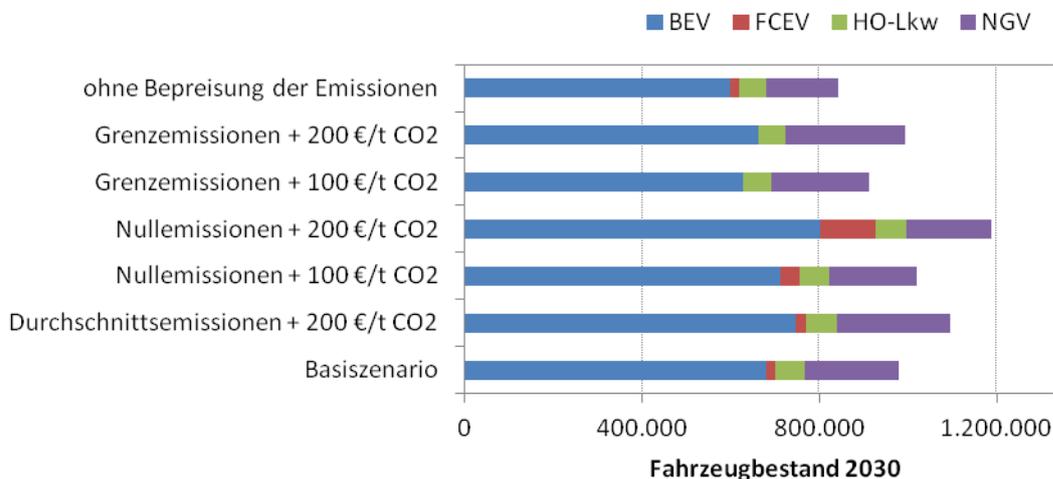


Abbildung 56: Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungsgrundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030

Die erste Variation ist die Erhöhung des CO₂-Preises und Beibehaltung der Durchschnittsbewertung der CO₂-Emissionen. Hier werden vor allem die Dieselfahrzeuge belastet, was zu einer Erhöhung der Anteile für NGV und BEV führt, die geringere Belastungen haben; die Marktanteile von FCEV und HO-Lkw sind davon nicht betroffen. Die Bewertung des Fahrzeugstroms mit Nullemissionen und einem CO₂-Preis von 100 Euro/t bewirkt nahezu keine Veränderung gegenüber dem Basisszenario, einzig die FCEV gewinnen leicht hinzu. Wird der CO₂-Preis jedoch auf 200 Euro/t erhöht, dann steigt vor allem der Bestand der FCEV (+500 %), die deutlich von der Emissionsabgabe der anderen Fahrzeuge profitieren.⁴⁵ Auch der BEV-Bestand erhöht sich in diesem Fall um 20 %, während die anderen Antriebsarten unberührt sind. Wird für die Bewertung des Fahrstromes die Grenzemissionsbetrachtung zugrunde gelegt, so finden sich bei einem CO₂-Preis von 100 Euro/t einige BEV weniger im Bestand (-7 %), der FCEV-Bestand bricht aber bis auf sehr wenige Lkw fast vollständig ein (1.000 Lkw im Bestand 2030). Bei einer höheren Bepreisung von CO₂ mit 200 Euro/t können FCEV sich nicht mehr durchsetzen (hier sind die Umwandlungsverluste im Vergleich zu allen anderen Antriebsarten zu hoch), während der BEV-Bestand steigt, da auch Dieselfahrzeuge stärker belastet werden. Eine Nichtberücksichti-

⁴⁵ Die CO₂-Emissionen der einzelnen Antriebsarten sind in Abschnitt 5.1.8 dargestellt.

gung der CO₂-Emissionen als Abgabe führt zu leichten Reduktionen der Bestände von NGV und BEV.

Es lässt sich demnach festhalten, dass die Abgabe für CO₂ und ihre Bemessungsart am meisten Auswirkungen auf FCEV hat. Hier ist mit einer deutlich höheren Marktdurchdringung zu rechnen, wenn für FCEV keine Emissionsabgabe (aufgrund der lokalen Nullemissionen) gezahlt werden muss, während dies für Dieselfahrzeuge der Fall ist. Weniger stark betroffen sind davon BEV und NGV, bei denen die Schwankungen durch die Veränderungen in der CO₂-Bewertung bei 10-20 % liegen. Der Bestand der HO-Lkw ist von der CO₂-Emissionsbewertung quasi unberührt (Schwankungen bis maximal 5 %).

Als letzte Variationsrechnung wird der Einsatz von synthetisch erzeugtem Methanol in Fahrzeugen anstelle von NGV betrachtet.⁴⁶ Wenn Methanol mit erneuerbarem Strom erzeugt wird (eine der sogenannten Power-to-Liquid(PtL)-Optionen), so können die CO₂-Emissionen deutlich geringer als bei anderen Antriebsarten ausfallen. Deshalb werden in dieser Variationsrechnung ebenfalls die CO₂-Bewertungsmethoden variiert.

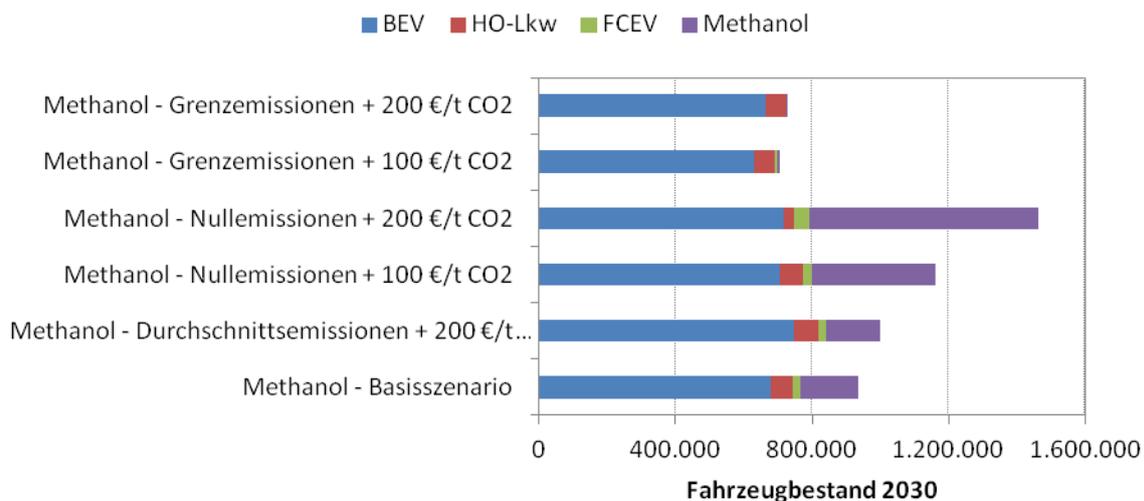


Abbildung 57: Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungsgrundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 unter Einbezug von synthetisch erstelltem Methanol

Die Veränderungen in der Bewertung bei den Emissionen sind dabei ähnlich wie zuvor bei Wasserstoff. Wird der Strom zur Herstellung mit Nullemissionen bewertet, erhöht sich die Anzahl der Methanolfahrzeuge deutlich (+300 % bei einem CO₂-Preis von 100 Euro/t),

⁴⁶ Die spezifischen Emissionen werden mit 0,320 kg CO₂/kWh für Durchschnittsemissionen, der Verbrauch und die Fahrzeugkosten wie bei Gasfahrzeugen angenommen und ein Methanolpreis von 1,44 Euro/kg Methanol im Jahr 2030 angesetzt.

während diese bei der Ansetzung der Grenzemissionen vollständig aus dem Bestand verschwinden.

Methanol ist derzeit bereits ein wichtiges Produkt als Kraftstoff (additiv) bzw. Grundchemikalie und wird weltweit transportiert. Unter Normalbedingungen liegt es in flüssiger Form vor. Der Energiegehalt von Methanol ist im Vergleich zu konventionellen Ottokraftstoffen nur halb so hoch, was den Kundennutzen einschränkt. Methanol hat ein sehr breites Einsatzspektrum bei vielen Mobilitätsanwendungen, gerade dort, wo die geringere Energiedichte sich nicht zu stark bemerkbar macht. Methanol ist (wie viele flüssige Kraftstoffe) toxisch. Methanol kann weiterhin die bestehende Infrastruktur flüssiger Kohlenwasserstoffe wie Benzin oder Diesel nutzen. Allerdings ist für einen Einsatz im Straßenverkehr eine Umrüstung des Vertriebssystems, der Tankstellen und der Fahrzeuge notwendig (vgl. Mineralöl Forum 2000 und FVV 2013). Methanol-Verbrennungsmotoren weisen einen vergleichbaren Wirkungsgrad mit Dieselmotoren auf. Die Methanolerzeugung aus erneuerbarem Strom über die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff und der anschließenden Methanolsynthese hat heute einen Wirkungsgrad von ca. 60 %, und künftig erscheint eine Steigerung auf über 70 % möglich zu sein⁴⁷. Hinzu kommt noch ein Wirkungsgradverlust in Abhängigkeit der CO₂-Quelle, der zwischen 5 bis 15 % liegen kann. Insgesamt ergibt sich Well-to-Wheel⁴⁸ gesehen ein Wirkungsgrad bei Lkw um die 20 %.

Wenn man Methan auf Basis von erneuerbarem Strom als Vergleich heranzieht, kommt man auf etwas geringere Wirkungsgrade (55 % heute, künftig 65 %⁴⁹ plus wieder Wirkungsgradverluste durch die CO₂-Herstellung).

In späteren Studien sollte diese Technologie also detaillierter untersucht werden.

5.2.4 Betriebswirtschaftliche Bewertung der HO-Lkw-Optionen (HO-Diesel, HO-Batterie, Stromschiene, Induktion)

In diesem Abschnitt wird detaillierter auf die HO-Lkw und die Gründe für ihre Marktdurchdringung in der HO-Diesel-Variante bei ausbleibender Marktdurchdringung der HO-Batterie-Variante eingegangen. Außerdem werden die Konzepte zur Stromschiene und Induktion diskutiert.

Zunächst wird analysiert, warum HO-Diesel-Lkw eine Marktdurchdringung schaffen. Da das Modell für den Markthochlauf auf einer TCO-Rechnung basiert, ist in Abbildung 58 ein

⁴⁷ Quellen zu Wirkungsgraden von Elektrolyse und Methanolsynthese: Wietschel et al. (2015), Smolinka et al. (2011), Müller-Syring et al. (2014), Räuchle et al. (2016), Albrecht et al. (2013).

⁴⁸ von der Quelle bis zum Antrieb

⁴⁹ Siehe zu Wirkungsgrad der Methansierung: Herrmann et al. (2014), Jess et al. (2011).

Kostenvergleich von Diesel-Lkw und HO-Diesel-Lkw mit unterschiedlichen Fahrtanteilen an der HO-Infrastruktur in Abhängigkeit ihrer Jahresfahrleistung dargestellt.

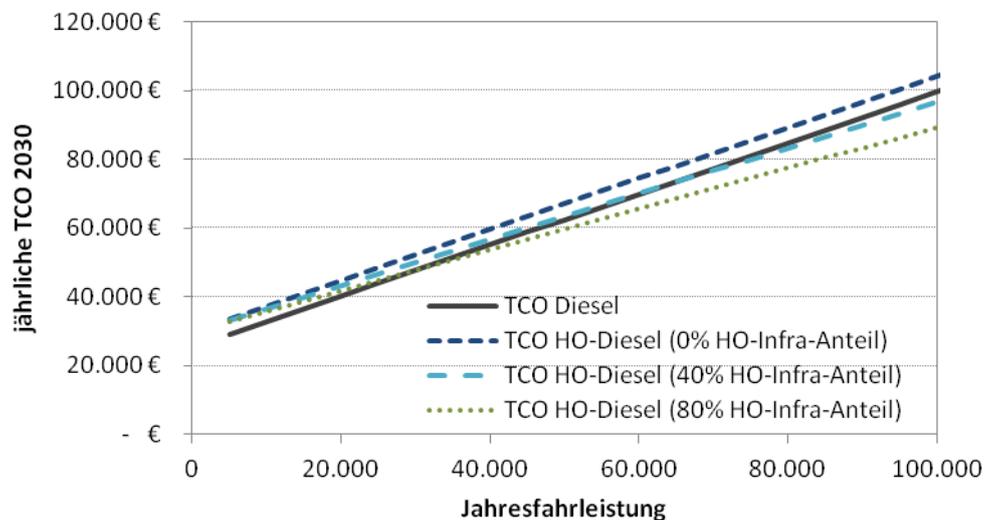


Abbildung 58: Vergleich der jährlichen TCO der Antriebsarten Diesel und HO-Diesel-Lkw mit unterschiedlichen Streckenanteil an der HO-Infrastruktur für Sattelzugmaschinen mit unterschiedlichen Jahresfahrleistungen im Jahr 2030

Man erkennt deutlich, dass der HO-Infrastruktur-Anteil einen großen Einfluss auf die Kosten der HO-Lkw hat, da häufiges elektrisches Fahren einen früheren Schnittpunkt mit der Kurve der Diesel-Lkw bedeutet. So schneidet die Kostenkurve der HO-Diesel-Lkw mit 80 % Fahranteil an der Oberleitung die Kostenkurve des Diesel-Lkw bei rund 35.000 km, während dies bei einem Fahranteil von 40 % an der Oberleitung erst bei etwa 70.000 km der Fall ist. Bei 0 % Oberleitungsanteil liegt die Kostenkurve des HO-Lkw parallel zu der des Diesels, da die laufenden Kosten sich nicht unterscheiden und nur die Mehrinvestitionen des HO-Lkw eine Rolle spielen. D. h., die Fahrleistung an der Oberleitung ist entscheidend dafür, ob der HO-Lkw wirtschaftlich betrieben werden kann. Daher ist in Abbildung 59 der Anteil an der HO-Infrastruktur in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und verschiedenen Ausbauten an Infrastruktur (links) sowie den daraus resultierenden elektrischen Kilometern (rechts) dargestellt.

Man erkennt in der linken Hälfte der Grafik, dass der Anteil der Fahrstreckenanteil an der HO-Infrastruktur mit zunehmender Jahresfahrleistung steigt (vgl. Abschnitt 5.1.2) und dieser nur bedingt mit dem Ausbau der HO-Infrastruktur zunimmt. D. h., der Fahrstreckenanteil an der HO-Infrastruktur nimmt besonders zu Beginn zu, später aber sinkt der Zuwachs proportional ab. Gut sichtbar ist aber auch, dass bei der mittleren Jahresfahrleistung einer Sattelzugmaschine von 114.000 km bereits bei einem Infrastrukturausbau von 1.000 km

durchschnittlich fast 35 % an der Oberleitung gefahren werden.⁵⁰ Im rechten Teil der Grafik sind die daraus resultierenden elektrisch gefahrenen Kilometer für einen HO-Diesel-Lkw dargestellt. Außerdem zeigt die rote gestrichelte Linie die Kilometer an, die aufgrund der Differenz der laufenden Kosten im Diesel- und Strombetrieb die Mehrinvestition des HO-Diesel-Lkw kompensieren würde. D.h. ab etwa 30.000 km, die ein HO-Lkw elektrisch fährt, ist er wirtschaftlicher als ein Diesel-Lkw. Wie man auf der rechten Seite von Abbildung 59 sieht, ist dies bei einem Infrastrukturausbau von 1.000 km bei einer Jahresfahrleistung von 100.000 km der Fall, bei einem Infrastrukturausbau wie im Basisszenario bereits bei 70.000 km. Betrachtet man nun die Jahresfahrleistungsverteilung der Sattelzugmaschinen in Abbildung 60, so erkennt man recht schnell, dass rund 60 % eine Jahresfahrleistung oberhalb von 100.000 km haben und etwa 85 % mehr als 70.000 km fahren. Stünden also nur diese beiden Antriebsarten zur Wahl und es gäbe keine Beschränkungen durch Verfügbarkeit und Geografie (vgl. 5.1.5), so wäre der Marktanteil in den Neuzulassungen im Jahr 2030 bei einem Infrastrukturausbau von 4.000 km bei 85 %.

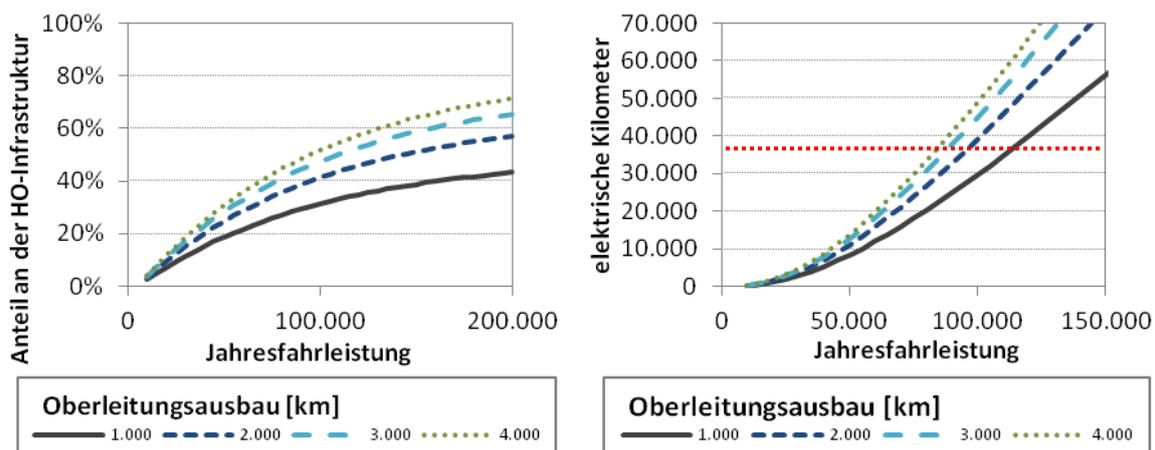


Abbildung 59: Anteil der Strecke, die an der HO-Infrastruktur zurückgelegt wird bei unterschiedlichem HO-Infrastrukturausbau (links) und daraus resultierende elektrische Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung

Damit lässt sich erkennen, warum die HO-Diesel-Lösung eine gute Alternative sein könnte. Es stellt sich jedoch die Frage, warum es die HO-Batterie-Variante nicht in den Bestand schafft. Auch dies ist mit ähnlichen Kurven erklärbar, wie Abbildung 61 zeigt. Hier sind links wieder die Kostenkurven des Diesel- und des HO-Batterie-Lkw dargestellt. Da dieser zu 100 % mit Strom fährt, ist auch die Unterscheidung bezüglich eines Infrastrukturausbaus nicht notwendig. Klar erkenntlich ist, dass ab einer Jahresfahrleistung von 50.000 km die HO-Batterie-Variante günstiger ist als ein Diesel-Lkw. Es ist jedoch zu be-

⁵⁰ Hierbei sei darauf hingewiesen, dass es durchaus Fahrzeuge mit einem geringeren, aber auch mit einem höheren Autobahnanteil geben kann.

rücksichtigen, ob der HO-Batterie-Lkw die Strecke, die er nicht an der Oberleitung fährt, mit seiner Batterie zurücklegen kann.

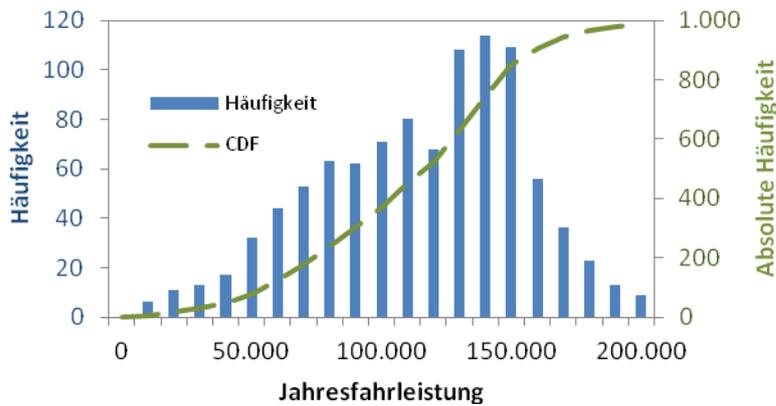


Abbildung 60: Verteilung der Jahresfahrleistungen von Sattelzugmaschinen auf Basis von (WVI et al. 2010)

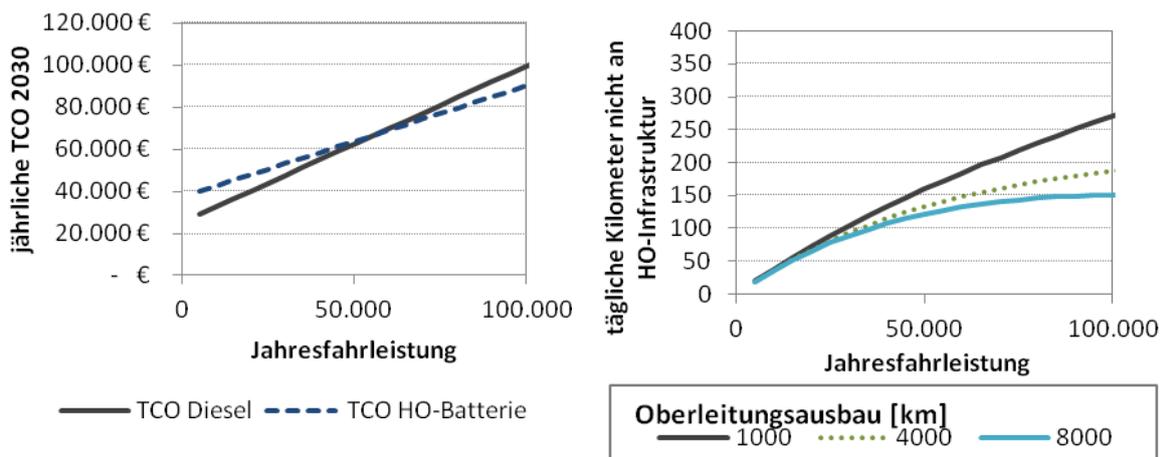


Abbildung 61: Vergleich der jährlichen TCO der Antriebsarten Diesel und HO-Batterie-Lkw mit unterschiedlichen Streckenanteil an der HO-Infrastruktur für Sattelzugmaschinen mit unterschiedlichen Jahresfahrleistungen im Jahr 2030 (links) und tägliche Strecke, die nicht an der HO-Infrastruktur stattfindet bei unterschiedlichem HO-Infrastrukturausbau in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung

Dazu sind auf der rechten Seite von Abbildung 61 die elektrischen Kilometer, die nicht an der Oberleitung stattfinden, in Abhängigkeit ihrer Jahresfahrleistung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die bei einem Infrastrukturausbau wie im Basisszenario von 4.000 km und einer Jahresfahrleistung von 50.000 km im Mittel gut 130 km täglich nicht an der HO-Infrastruktur zurückgelegt würden. Da die Batterien auf eine Reichweite von 100 km ausgelegt sind und diese die TCO mitbestimmen, welche eigentlich für An- und Abfahrt zur Autobahninfrastruktur zu halbieren wäre, könnten aus technischer Sicht eigentlich nur

HO-Batterie-Lkw mit einer Jahresfahrleistung von 20.000 km die Kilometer abseits der Oberleitung bewerkstelligen. Selbst bei einer Ladung über Nacht an einem Unternehmensstandort (also einer täglichen Strecke von 100 km, die nicht an der Infrastruktur stattfindet) wären nur Jahresfahrleistungen um 30.000 bis 40.000 km möglich.⁵¹ Aus diesem Grund wären HO-Batterie-Lkw zwar eine ökonomisch interessante Alternative, jedoch kommen die Fahrzeuge aus technischer Sicht nicht in ökonomisch attraktive Fahrleistungsbereiche, sodass diese HO-Variante nicht die Lösung ist.

Für die Varianten Stromschiene und Induktion gilt sowohl für das Fahrzeug als auch für die Infrastruktur, dass mit Mehrkosten gegenüber der Oberleitungsvariante zu rechnen ist. Insbesondere die Investitionen in die Infrastruktur sind deutlich größer und mit größeren Eingriffen in die Fahrbahn verbunden (siehe ausführliche Darlegung in Kapitel 1). Weiterhin sind die Wirkungsgrade bei der Induktion geringer im Vergleich zu den beiden anderen Lösungen, was die variablen Kosten erhöht.

Eine Parallelnutzung von Pkw zur höheren Auslastung der Infrastruktur ist nur bedingt gegeben, da die Ausstattung ausschließlich der rechten Spuren (für Lkw) gegen verstärkte Nutzung spricht. Bei der Induktionslösung spricht zudem die geringe Nutzbarkeit aufgrund der hohen Geschwindigkeiten auf der Autobahn, der kurzen Länge des Fahrzeugs und der damit verbundenen Stromübertragungszeit in das Fahrzeug gegen große Synergieeffekte. Bei höheren Kosten für Fahrzeug und Infrastruktur ist bei einem TCO-Vergleich keine Verbesserung zu erwarten.

Der Vergleich von Ersparnissen durch HO-Lkw und den Ausgaben für ihre Infrastruktur ist Gegenstand der Rechnung im nachfolgenden Abschnitt.

5.2.5 Bewertung des HO-Lkw-Systems unter Einbezug der Kosten für den Infrastrukturaufbau

Die bisherigen Rechnungen haben die Kosten für den Infrastrukturaufbau der Oberleitungen nicht berücksichtigt. Es wurde dabei die Sichtweise der Nutzer der Infrastruktur eingenommen, ohne dass sie die Investitionen und laufenden Kosten der Infrastruktur zu zahlen haben. Damit wurde implizit unterstellt, dass der Staat die Infrastruktur finanziert, so wie es auch mit anderen Infrastrukturprojekten in der Vergangenheit passiert ist (Grube 2004).

Es stellt somit die Frage, ob ein wirtschaftlicher Gesamtnutzen auch dann noch erkennbar ist, wenn die Kosten der Infrastruktur einbezogen und auf die Nutzer umgelegt werden.

⁵¹ Hier ist die Tagesfahrleistung berechnet als Jahresfahrleistung geteilt durch 260 Arbeitstage, was eine Vereinfachung darstellt, das Ergebnis aber nicht wesentlich beeinflusst – auch eine Berechnung 350 Tagen im Jahr würde zum gleichen Ergebnis führen.

Hierfür kann man zunächst die Anzahl der HO-Lkw in Abhängigkeit des Ausbaus der Oberleitungsinfrastruktur darstellen (siehe Abbildung 62). Hier erkennt man, dass sich schon bei einem sehr geringen Infrastrukturausbau für zahlreiche Lkw der Umstieg auf HO-Diesel-Lkw sinnvoll wäre (30.000 HO-Lkw bei 500 km Oberleitungsinfrastruktur). Das hängt vor allem damit zusammen, dass die Lkw mit sehr hohen Jahresfahrleistungen (> 150.000 km) schon mit sehr kleinen Anteilen an der HO-Infrastruktur wirtschaftlicher als Diesel-Lkw betrieben werden können. Da der Infrastrukturausbau zuerst die häufig befahrenen Autobahnen berücksichtigt, kann mit ihrem Ausbau bereits eine Vielzahl an Lkw elektrifiziert werden (vgl. Abschnitt 5.1.3: auf den am häufigsten befahrenen 1.000 km findet 43 % der Verkehrsleistung von Lkw statt). Für die Interpretation von Abbildung 62 ist allerdings zu beachten, dass für den Bestand nicht nur der Autobahnausbau wichtig ist, sondern auch die begrenzte Verfügbarkeit von Oberleitungs-Lkw-Modellen sowie der generelle Zeitverzug zwischen Neuzulassungen und Bestandsentwicklung.

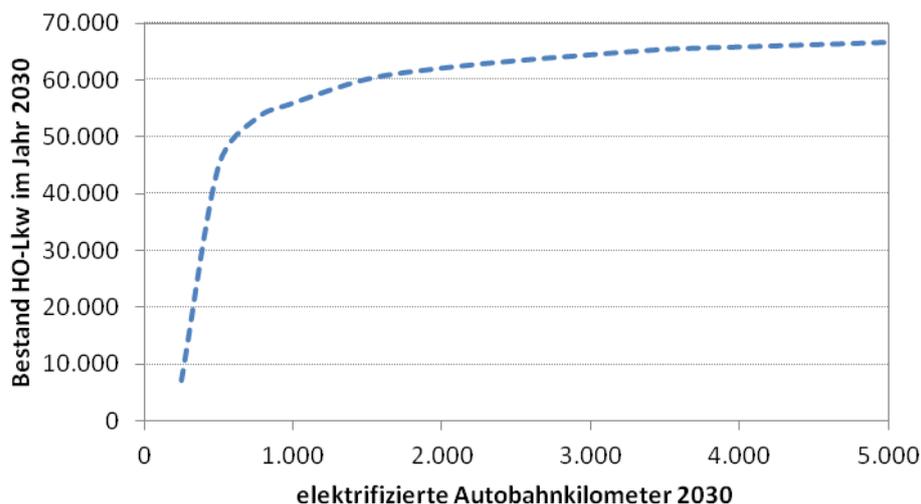


Abbildung 62: Bestand an HO-Lkw 2030 (alles HO-Diesel) in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer 2030

Auch nach diesen ersten 1.000 km steigt die Anzahl der HO-Lkw im Bestand noch an, allerdings kann man hier einen Rückgang der Steigung und eine Sättigung mit zwei Stufen erkennen: Ab 1.000 km ist ein Rückgang der Zuwachsraten zu verzeichnen und ebenso ab 2.000 km. Interessant ist es deshalb, beide Kurven mit Kosten zu belegen, um eine ganzheitliche wirtschaftliche Perspektive einzunehmen und dieses Ergebnis besser zu bewerten.

In Abbildung 63 ist das Ergebnis dieser Bewertung dargestellt. Auf der Abszisse ist die Anzahl der elektrifizierten Autobahnkilometer dargestellt, während die Ordinate die Kosten

für die HO-Infrastruktur bzw. die Einnahmen oder Ersparnisse durch die Nutzung der HO-Lkw angibt. Für die HO-Infrastruktur, die mit der roten Geraden dargestellt ist, wurden die Investitionen (2,2 Mio. Euro/km⁵²) bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren und 5 % Zinssatz abgezinst und als Annuität ihren laufenden Kosten (Wartung- und Instandhaltung) im Jahr 2030 zugerechnet. Die grün dargestellte Einnahmekurve berechnet sich über die Einsparungen der einzelnen HO-Lkw gegenüber einem Dieselfahrzeug nach der Amortisation, d. h. dies sind die monetären Ersparnisse durch die HO-Lkw für die HO-Lkw-Nutzer. Die Differenz der beiden Kurven ist mit der violetten Kurve dargestellt.

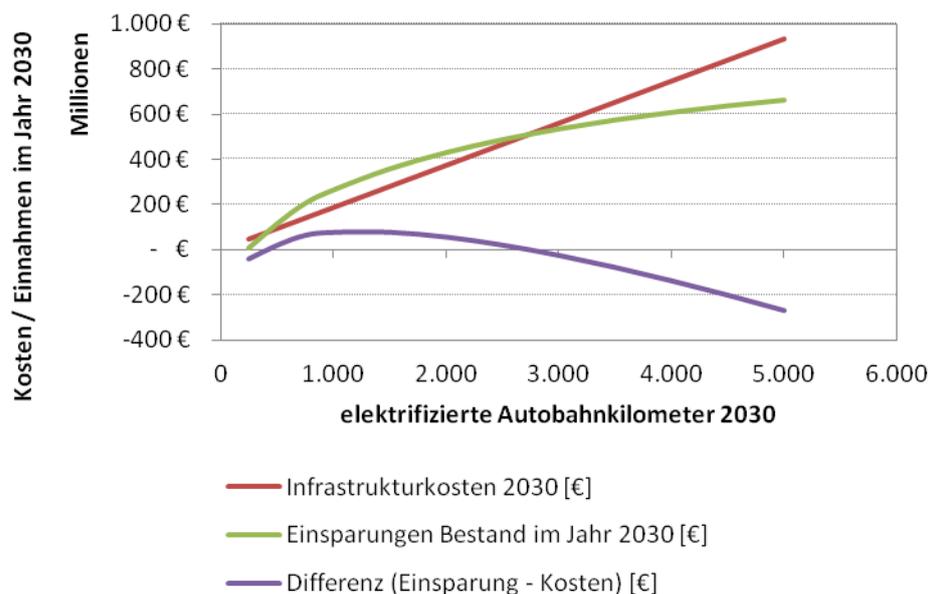


Abbildung 63: Kosten für Infrastrukturaufbau und Ersparnis des Fahrzeugbestands in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer im Jahr 2030

Man erkennt, dass bei geringem Infrastrukturausbau bis 2030 ihre Kosten die Einnahmen übersteigen (bis 500 km), aber danach ein gesamtwirtschaftlich positiver Effekt entsteht. Der größte Gesamtnutzen stellt sich zwischen 750 km und 1.500 km Infrastrukturausbau ein und das Gesamtsystem bleibt bis etwa 2.700 km positiv. Bei einem größeren Ausbau übersteigen die Infrastrukturkosten die Summe der Ersparnisse der Nutzer.

⁵² Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist der Aufbau einer HO-Infrastruktur zunächst mit hohen Investitionen verbunden. Je nach Quelle finden sich Angaben zwischen 1,1 Millionen Euro/km (Grontmij 2011), 2,2 Mio. (UBA 2016a), 2 bis 3 Mio. (den Boer et al. 2013) und 2,5 Mio. (SRU 2012). Die Angaben beziehen sich auf die Elektrifizierung von jeweils einer Fahrspur in jede Fahrtrichtung. In den Investitionen enthalten sind alle erforderlichen Einrichtungen ab der Anbindung an das Mittelspannungsnetz eines Energieversorgungsunternehmens, also insbesondere Umspannstationen, Leitungen und Masten.

Wie lassen sich diese Ergebnisse interpretieren? Wenn man bis zum Jahr 2030 die Infrastruktur auf bis zu 2.700 km ausbaut und dabei die Autobahnen gemäß ihrer Auslastung mit Oberleitungen ausstattet, kann man gesamtwirtschaftlich einen positiven Effekt erzielen. Das bedeutet nicht, dass die Infrastruktur bis zum Jahr 2030 gut ausgelastet ist und mit ihr Gewinne erwirtschaftet werden können, wenn man beispielsweise vor 2030 versucht, die Ersparnisse über eine Infrastrukturabgabe abzuschöpfen. Hier muss mit Defiziten in den ersten Jahren gerechnet werden. Die Umstellung der Lkw erscheint aufgrund der vergleichsweise geringen Mehrinvestitionen nicht unwahrscheinlich, sodass die durchaus üblichen Vorinvestitionen für Infrastruktur als ein guter Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors erscheinen.⁵³ Wenn dies die Zielsetzung der Einführung von HO-Lkw ist, dann kann auch ein weiterer Ausbau zu größeren Emissionsreduktionen führen, wie Abbildung 64 zeigt, in der die CO₂-Emissionsreduktion von HO-Lkw im Jahr 2030 in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer dargestellt ist.

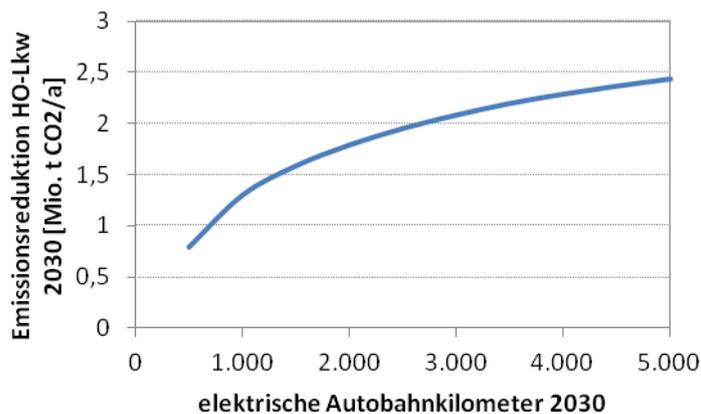


Abbildung 64: CO₂-Emissionsreduktion durch HO-Lkw im Jahr 2030 in Abhängigkeit des Infrastrukturausbaus im Jahr 2030

Man erkennt gut, dass ein weiterer Zubau an HO-Infrastruktur auch über 2.700 km eine größere Reduktion der CO₂-Emissionen mit sich bringt, da nun die HO-Lkw mehr elektrisch fahren können. Die sich deshalb anschließende Frage ist: Was passiert bis zum Jahr 2030 und was danach? Möglichkeiten hierfür werden im Folgeabschnitt diskutiert.

⁵³ Auch bei Dieselfahrzeugen und Gasfahrzeugen musste zunächst in die Infrastruktur investiert werden, bevor die Fahrzeugadoption begann (vgl. Greene 1996, Yeh 2007, Grube 2004, Grübler 1990).

5.2.6 Marktpotentiale vor und nach 2030 (kurz- und langfristig)

Geschäftsmodell Traktionsdienstleister

Wie bereits gezeigt, hängt die Wirtschaftlichkeit von HO-Lkw wesentlich von der elektrisch zurückgelegten Jahresfahrleistung ab. Nur bei ausreichend hohen elektrischen Fahrtanteilen gleichen die im Vergleich zum Dieselfahrzeug niedrigeren Betriebskosten die höheren Investitionen bei der Fahrzeuganschaffung aus. Aus Sicht von Speditionen ist dies vor allem bei einem noch im Aufbau befindlichen, lückenhaft elektrifizierten Streckennetz ein zusätzliches Risiko, das die Anschaffung unattraktiv macht.

Eine mögliche Alternative stellen Traktionsdienstleistermodelle dar. Dabei bietet ein auf HO-Lkw spezialisierter Dienstleister Transporte an einem elektrisch gut ausgebauten Streckenabschnitt an. Die HO-Fahrzeuge verkehren dabei im Pendelverkehr zwischen den beiden Enden der elektrifizierten Strecke. An beiden Endpunkten befinden sich Terminals, an denen Anhänger von Dieselfahrzeugen auf HO-Fahrzeuge und umgekehrt gewechselt werden können. Ähnliche Konzepte wurden bereits 1994 für den Schwerlastverkehr im Kontext der Alpenüberquerung diskutiert (Bohm et al. 1994). Die fortschreitende Vernetzung im Systemverkehr (Daimler AG 2016b) kann entsprechende Ansätze ebenfalls unterstützen.

Dieses Geschäftsmodell bietet folgende potentielle Vorteile:

- *Wirtschaftlichkeit in der Aufbauphase*

Das Traktionsdienstleistermodell ermöglicht es, auch bei einem verhältnismäßig geringen elektrifizierten Autobahnanteil hohe elektrische Fahrtanteile zu generieren. Gleichzeitig können bereits elektrifizierte Abschnitte frühzeitig hoch ausgelastet werden. Voraussetzung ist jedoch die Auswahl von Strecken mit hohem Güterverkehrsaufkommen und Verkehrsströmen, die möglichst den gesamten elektrifizierten Abschnitt nutzen.

- *Verbesserung der Arbeitsbedingungen für Lkw-Fahrer*

Ein erklärtes Ziel der Bundesregierung ist es, die Arbeitsbedingungen im Transportsektor zu verbessern (CDU, CSU, SPD 2013). Bei dem vorgestellten Modell würden Fahrer im näheren Umkreis für Pendelfahrten eingesetzt und könnten daher ihre freie Zeit „zu Hause“ verbringen. Dadurch könnte eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen erreicht werden. Derzeit ist es in Deutschland schwer, Lkw-Fahrer unter den heutigen Rahmenbedingungen zu finden.

Mögliche Probleme:

- *Zusätzlicher Kapitalbedarf*

Bei der Errichtung der Terminals entstehen zusätzliche Kosten, die entsprechend in der Kalkulation berücksichtigt werden müssen. Um einen hohen Anteil elektrischer Fahrzeuge zu ermöglichen, müssen diese zur Verfügung stehen. Beispielsweise wurde bereits 1994 für die Alpenstrecke (295 km) ein Bedarf von 250 Fahrzeugen in der Flotte des Traktionsdienstleisters ermittelt, wenn der komplette Verkehr elektrifiziert wer-

den sollte (Bohm et al. 1994). Für eine wirtschaftliche Nutzung der Infrastruktur müssten Transportdienstleister also verhältnismäßig große Flotten aufbauen.

- *Akzeptanz und Kosten für die Umspannung*

Aktuell sind vernetzte Systemverkehre mit Fahrzeugwechsel noch nicht etabliert, auch wenn Fahrzeughersteller entsprechende Lösungen forcieren (Daimler AG 2016b). Es ist daher unklar, ob Traktionsdienstleistermodelle, trotz Preisvorteil, in logistischen Systemen integriert werden können und von etablierten Logistikdienstleistern akzeptiert und genutzt werden. Beim Wechseln der Anhänger auf vom konventionellen auf den elektrischen Sattelschlepper entstehen zusätzliche Kosten für das Umspannen. Diese sind in der Logistik häufig das Argument gegen vernetzte Verkehre.

Es stellt sich also die Frage, ob bereits heute eine Wirtschaftlichkeit mit dem Traktionsdienstleistermodell dargestellt werden kann. Es entstehen folgende Kostenbestandteile:

- $k_{Station}^a$: Investition für die Wechselstationen, mit Annuitätenmethode auf ein Jahr umgelegt
- k_{Infra}^a : Investition für den Ausbau von Infrastruktur, mit Annuitätenmethode auf ein Jahr umgelegt
- $\Delta k_{Fahrzeug}^a$: Mehrinvestition für den HO-Lkw im Vergleich zu einem Diesel-Lkw, mit Annuitätenmethode auf ein Jahr umgelegt.
- $k_{Umspannen}$: Kosten für das Umspannen der Fahrzeuge (Einmalzahlung bei Wechsel)

Diese Kosten müssen durch die Ersparnis aus den laufenden Kosten Δe_{var}^a gedeckt werden. Abhängig von der Länge der Strecke (km) und des darauf stattfindenden Infrastrukturausbaus muss also gelten:

$$2 \cdot k_{Station}^a + km \cdot k_{Infra}^a + y \cdot \Delta k_{Fahrzeug}^a + x \cdot k_{Umspannen} < x \cdot km \cdot \Delta e_{var}^a$$

Wobei x die Anzahl der Fahrten an der Oberleitung darstellt und y die Anzahl der Lkw. Wählt man y so, dass die Fahrzeuge sehr hoch ausgelastet sind und die geringste Anzahl an Fahrzeugen für das Modell gewählt wird, dann kann man y bestimmen als:

$$y = \frac{x}{365 \cdot \text{floor}\left(\frac{24 \cdot 70}{km}\right)}$$

Es wird also berechnet, wie viele Kilometer ein Lkw am Tag fahren kann. Dies wird durch die Ausbaustrecke geteilt und abgerundet, um die maximale Anzahl an Fahrten pro Lkw und Tag zu erhalten. Bei einer Nutzung des Modells an 365 Tagen im Jahr ergibt sich über die Fahrtengesamtzahl die Fahrtenzahl pro Lkw.

Unter der Annahme, dass die Wechselstationen im Vergleich zu den Infrastrukturausbaukosten vernachlässigbar sind, die Kosten für zweimal Umspannen am Fahrzeug eine Stunde dauern und damit 27 Euro (= Fahrerkosten pro Stunde) kosten und mithilfe aller

Werte aus Kapitel 2 und 3 ergeben sich Ergebnisse wie in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 60: Berechnungen zum Traktionsdienstleistermodell

Ausbau­strecke und Jahr	Hamburg – Wuppertal 2015	Frankfurt (Oder) – Aachen 2015	Hamburg – Wuppertal 2030	Frankfurt (Oder) – Aachen 2030
km	380	700	380	700
k_{infra}^a	184.000 Euro/a			
$\Delta k_{Fahrzeug}^a$	16.352 Euro/a		4.596 Euro/a	
Δe_{var}^a	0,066 Euro/km		0,185 Euro/km	
x	---	---	1,77 Mio.	1,36 Mio.
y	---	---	1.213	1.865

Es zeigt sich also, dass mit den heutigen Kostenannahmen keine Wirtschaftlichkeit mit dem Traktionsdienstleistermodell darzustellen ist, weil die Mehrkosten für das Fahrzeug (bei 500.000 km entspricht das 0,033 Euro/km) und die Kosten für das Umspannen (für die Strecke Hamburg-Wuppertal: 27 Euro/(380 km/2) = 0,14 Euro/km, für die Strecke Frankfurt(Oder)-Aachen: 0,08 Euro/km) bereits die Ersparnis durch die verminderten Kraftstoffkosten aufbraucht (siehe hierzu Abbildung 65).

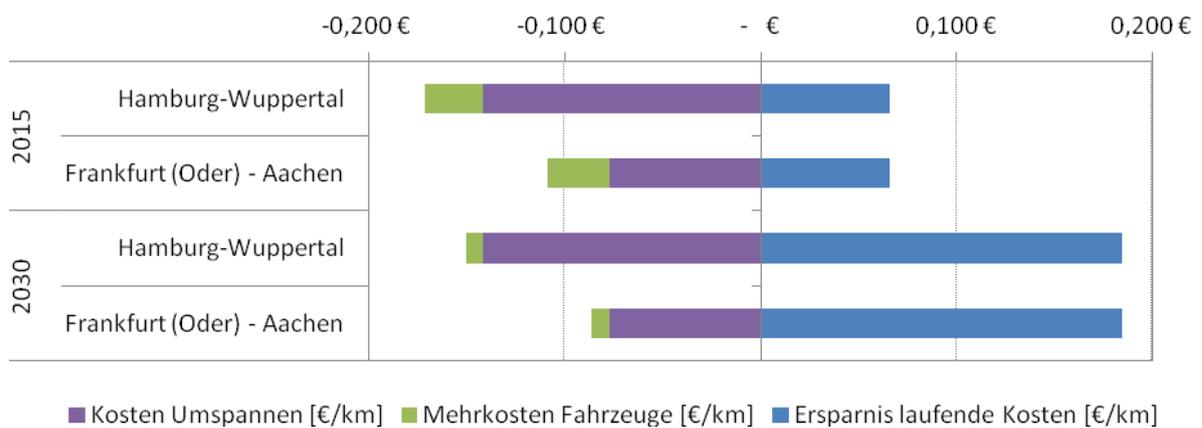


Abbildung 65: Vergleich der Kosten für Umspannen, Fahrzeugmehrinvestitionen und laufender Kostenersparnis im Traktionsdienstleistermodell

Entsprechend können die Kosten für die Infrastruktur in diesem Modell heute nicht gedeckt werden, weil bereits die Fahrzeug- und Umspannkosten die der Infrastruktur übersteigen.

Im Jahr 2030 ist hingegen ein wirtschaftlicher Betrieb mit 1.200 bis 1.800 Fahrzeugen (abhängig von der Streckenlänge) möglich. Dies erfordert aber eine sehr hohe Auslastung der Fahrzeuge und berücksichtigt keine Streckenausfälle oder Staus.

Diese Rechnungen stellen erste Überschlagsrechnungen dar und sollten weiter verifiziert werden.

Für den Ausblick nach 2030 werden zweivereinfachte Annahmen getroffen: (1) die Beschränkung durch den DE-Anteil (vgl. Abschnitt 5.1.4) ausgesetzt, (2) die Modellverfügbarkeit ist unbeschränkt. Es wird demnach das volle ökonomische Potential der HO-Lkw als Marktanteil angesetzt. Alle weiteren Parameter wurden nicht variiert und auf den zuvor angegebenen Werten für 2030 konstant gehalten. Dieser Ausblick dient nur der Orientierung und ist nicht als detaillierte Modellrechnung anzusehen. Es ergibt sich jedoch eine gute Orientierung, wie sich die Situation nach 2030 entwickeln könnte.

In diesem Fall ergibt sich ein Marktanteil für HO-Lkw von 83 % des Bestands, der zu einer deutlichen Umwälzung des Verkehrssektors führen würde. Damit könnten bei einem Ausbau von 4.000 km Autobahn mit Oberleitung jährliche Ersparnisse für die Nutzer von ca. 2 Mrd. Euro erzielt werden, die Ausgaben von knapp 750 Mio. Euro/a für die Infrastruktur gegenüberstünden.⁵⁴ Also ergibt sich ein deutlich positiver gesamtwirtschaftlicher Fall. Die EEV-Einsparung betrüge 15,9 TWh/a und die Emissionsreduktion 8,8 Mio. t CO₂ (rund 20 % des Schwerlastverkehrs).⁵⁵ Dies hängt natürlich auch von den Entwicklungen der Diesel- und Strompreise ab, die in Abbildung 66 für einen Ausbau von 4.000 km (links) und 8.000 km Oberleitungsinfrastruktur (rechts) variiert wurden.

Man erkennt, dass die in blau dargestellten Einnahmen bei einer Erhöhung der Dieselpreise noch deutlich ansteigen würden. Nur sofern der Dieselpreis deutlich fallen würde, hätte man kein gesamtwirtschaftlich positives Ergebnis. Eine Strompreiserhöhung hätte eine gesamtwirtschaftlich negative Auswirkung, insgesamt bliebe man aber noch im positiven Bereich. Dies würde sich bei einem Infrastrukturausbau auf 8.000 km (rechts) leicht ändern, aber auch dann könnte man ein positives Ergebnis erzielen. Detailrechnungen zeigen, dass sich der wirtschaftlich größte Nutzen bei einem Infrastrukturausbau von 5.000 km im betrachteten Fall einstellt, wobei, wie auch im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, die CO₂-Emissionen mit einem weiteren Ausbau weiter sinken.

Damit lässt sich festhalten, dass die Einführung von HO-Lkw langfristig ein wirtschaftlich positives Modell ist, mittelfristig aber (für 4.000 km) Zufinanzierung notwendig ist, ggf.

⁵⁴ Vgl. Abschnitt 5.2.5.

⁵⁵ Hierbei sei angemerkt, dass Rechnung mit Werten von 2030 und dem damit vorgegebenen Strommix gerechnet wurde. Die Emissionsreduktion sollte also deutlich größer ausfallen, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter voranschreitet.

auch über 2030 hinaus. Die Phase des Markthochlaufs (bis 2030) ist wirtschaftlich bei einem 2.700-km-Ausbau noch positiv und bei einer Gesamtdurchdringung sind auch 8000 km langfristig gesamtwirtschaftlich positiv, auch wenn die Infrastruktur als Abgabe eingepreist wird. Den größten Nutzen erhält man unter den hier getroffenen Modellannahmen langfristig bei einem Ausbau von ca. 5.000 km, danach bewirkt jedoch ein weiterer Ausbau von Infrastruktur eine höhere CO₂-Emissionsreduktion, was im Rahmen von Klimaschutzstrategien sinnvoll sein könnte.

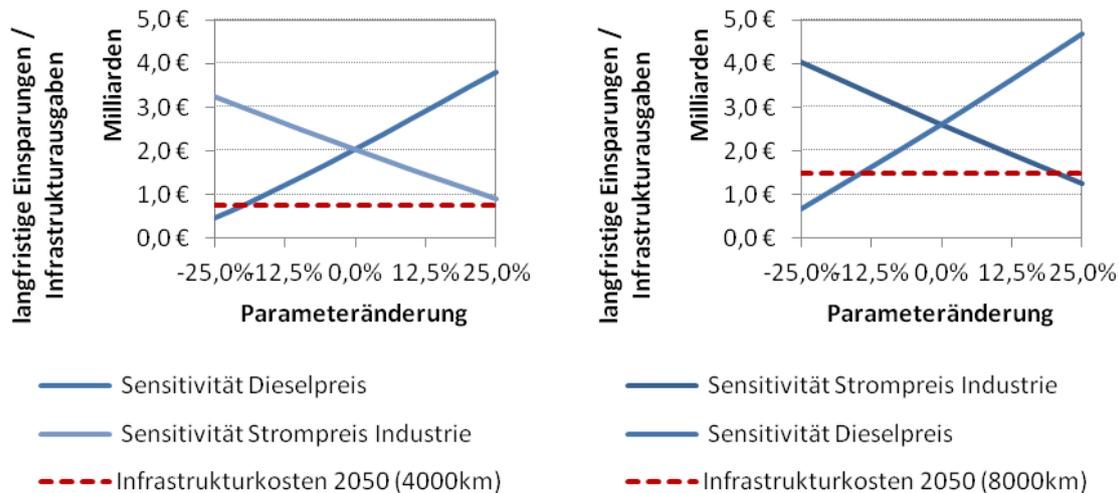


Abbildung 66: Kosten für Infrastrukturaufbau und Ersparnis des Fahrzeugbestands in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer auf lange Sicht

5.2.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Markthochlaufs basieren auf einer TCO-Rechnung, die um die beschränkte Fahrzeugverfügbarkeit und die Beschränktheit durch einen Oberleitungsausbau nur in Deutschland statt europaweit erweitert wurde. Hierbei ist anzumerken, dass ein Ansatz zur Berechnung des Marktpotentials auf Basis einer TCO-Rechnung nicht alle Aspekte einer Kaufentscheidung abbildet (vgl. hierzu Diskussion in Plötz et al. 2013), allerdings spielt bei den hier betrachteten gewerblichen Pkw-Nutzern der Kostenaspekt eine größere Rolle als bei privaten (vgl. Globisch et al. 2013) und insbesondere im Lkw-Bereich ist der Kostendruck für Logistikunternehmen entscheidend. Ein TCO-Ansatz sollte demnach wichtige Hinweise auf Marktpotentiale geben. Die Beschränkung durch das Fahrzeugangebot und den Ausbau reduziert zudem den rein kostenmäßig ermittelten Marktanteil und bildet somit einen Teil der Hemmnisse aus Sicht der Fahrzeughalter ab.

Zu diskutieren ist ebenfalls, ob sich die Vielzahl der alternativen Antriebe in den Szenarien durchsetzen wird (Pluralismus der alternativen Antriebe), oder ob einer sich gegen die anderen durchsetzen wird (Dominanz eines alternativen Antriebs). Hierzu sei angemerkt, dass es nicht ein alternativer Antrieb die Ergebnisse dominiert. Während der WtW-

Wirkungsgrad bei stromgetriebenen Antrieben eindeutig am höchsten ist, sind Fahrzeuge mit Batterie Reichweiten-beschränkt und kommen auf Basis der getroffenen Annahmen nicht für Fahrzeuge mit Langstreckenbetrieb in Betracht. Diese Limitationen sind bei Brennstoffzellenfahrzeugen geringer, jedoch ist der Wirkungsgrad für CO₂-neutral erzeugten Wasserstoff deutlich kleiner. Gas- und dieselbetriebene Fahrzeuge haben diese Limitationen nicht, jedoch sind die aus ökologischer Sicht nachteilhaft. Für alle alternativen Antriebe bedarf es zunächst eines Aufbaus einer zu Beginn unterausgelasteten und damit defizitären Infrastruktur. Ein primär kostengetriebenes Ergebnis würde die alternativen Antriebsarten analog zum Basisszenario aufteilen, das in Abbildung 67 nochmals gemäß der Anteile im alternativen Fahrzeugbestand aufgeteilt ist.

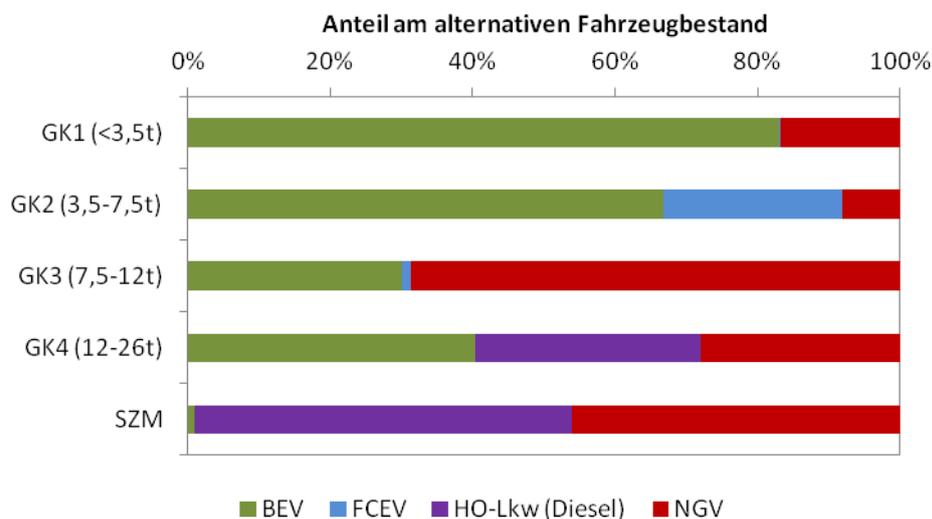


Abbildung 67: Anteile der verschiedenen alternativen Antriebsarten am alternativen Fahrzeugbestand im Jahr 2030 im Basisszenario unterteilt nach Größenklassen

Abbildung 67 zeigt die Marktanteile am alternativen Fahrzeugbestand im Jahr 2030 im Basisszenario unterteilt nach Größenklassen. Hier ist klar zu erkennen, dass die Reichweiten-limitierten BEV eher in den kleinen Größenklassen einzusetzen sind, in denen auch weniger gefahren wird (vgl. Tabelle 1). Die nicht Reichweiten-beschränkten Gasfahrzeuge sind in allen Größenklassen vertreten und ersetzen vor allem Fahrzeuge mit größeren Jahresfahrleistungen als BEV. Noch höhere Jahresfahrleistungen werden von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen (bis zum Reichweiten-Limit) oder HO-Diesel-Lkw ersetzt, die ihre Mehrinvestition mit den Verbrauchsvorteilen kompensieren können.

Behält man also eine rein kostengetriebene Sicht bei, so kann eine radikale Reduktion der CO₂-Emissionen nicht erreicht werden. Ein Pluralismus der alternativen Antriebsarten erscheint jedoch auch auf lange Sicht sinnvoll, wenn nur noch emissionsfreie Antriebe eingesetzt werden dürfen. Dann kann die Direktnutzung von Strom über Batterien in

Fahrzeugen mit kleinen Bewegungsradien eine Alternative zu Dieselfahrzeugen sein, für die mittleren Strecken können gasförmige und für sehr große Reichweiten flüssige Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Eine Differenzierung der Antriebsarten erscheint aus heutiger Sicht sinnvoll und angebracht. Nicht in die Betrachtung einbezogen wurde allerdings die Frage, ob die Stückzahlen für die alternativen Antriebe ausreichen, damit die Lkw-Hersteller rentabel arbeiten können und die Kostendegressionen über Skalen- und Lerneffekte erreicht werden. Hierfür wären weltweite Betrachtungen notwendig.

5.2.8 Zusammenfassung der Markthochlaufergebnisse

Im Rahmen der Markthochlaufberechnungen wurde eine Reihe an Ergebnissen dargestellt, deren wichtigsten Punkte in Bezug auf HO-Lkw hier nochmals zusammengefasst werden sollen.

1. HO-Lkw sind bei gut ausgelasteter Infrastruktur sinnvoll, da die Direktnutzung von Strom am effizientesten ist und Treibhausgase eingespart werden. Auf lange Sicht sind CO₂-freie Alternativen nur mit Power-to-Gas (PtG, z. B. in Form von Wasserstoff oder Methan) oder sogenannten synthetischen Kraftstoffen (Power-to-Liquid, PtL, z. B. in Form von erneuerbarem Methanol) zu erreichen.
2. HO-Diesel-Lkw haben geringe Mehrinvestitionen im Vergleich zu Diesel-Lkw und sind ökonomisch für viele Fahrzeuge auch schon mittelfristig sinnvoll. HO-Lkw als Variante mit Stromabnehmer und Batterie ist ohne eine Verhaltensänderung (gezielter Einsatz auf Strecken mit Oberleitung) oder großen Technologiesprüngen bei der Batterie (deutliche Erhöhung der Batteriedichte) nicht wirtschaftlich einsetzbar.
3. Große Sensitivitäten zeigen sich bei der Variation von Einflussfaktoren, welche die laufenden Kosten betreffen, z. B. Energieträgerpreise und Wirkungsgrade. Die Konkurrenztechnologien zu HO-Lkw sind mittelfristig Gas, Wasserstoff und Methanol, da mit ihnen ähnliche Kilometerkosten erzielbar sind.
4. Eine HO-Infrastruktur wird lange unterausgelastet sein und kann erst langfristig nutzungsabhängig finanziert werden. Dies ist jedoch keine Besonderheit von HO-Lkw, sondern auch bei anderen infrastrukturabhängigen Technologien der Fall.
5. Kurz- bis mittelfristig kann auch ein Traktionsdienstleistermodell sinnvoll sein. Dies könnte von Logistikunternehmen auf Teststrecken betrieben werden, um auch Fragen der Akzeptanz weiter zu erörtern.

TEIL 3: AUSWIRKUNGEN EINER VERBREITUNG VON HO-LKW

6 Treibhausgas-Lebenszyklusbetrachtung des HO-Lkw-Systems

Hauptbearbeiter/innen: D. Rüdiger (Fraunhofer IML), A. Rödl (TUHH/IUE)

6.1 Einleitung

Die Einordnung der HO-Lkw-Technologie hinsichtlich der für Deutschland relevanten CO₂e-Vermeidungspotentiale erfolgte auf Basis einer fokussierten Treibhausgas-Lebenszyklusbetrachtung, die an die Normenreihe DIN EN ISO 14040 sowie der technischen Spezifizierung DIN EN ISO 14067 angelehnt ist. Fokussiert bedeutet an dieser Stelle, dass lediglich die Umweltwirkungskategorie Treibhausgaseffekt betrachtet wird. Weitere Umweltwirkungskategorien, wie z. B. der Abbau von Ressourcen oder andere Luftschadstoffpotentiale werden im Rahmen der Untersuchung nicht berücksichtigt.

Gemäß den Anforderungen internationaler Standards (u. a. Kyoto-Protokoll (UNFCCC 1997), GHG Protocol (Greenhalgh et al. 2004)) werden alle sechs Treibhausgase in der Äquivalenteinheit CO₂e bewertet. Der Bilanzraum umfasst dabei nicht nur die Nutzungsphase, sondern u. a. auch die materiellen Mehraufwände im Bereich der Infrastrukturerüchtigung sowie der Umrüstung von Fahrzeugen. Übergeordnet wird den allgemeinen Grundprinzipien der ökologischen Bewertung gefolgt. Entscheidungen basieren also grundsätzlich auf Überlegungen zu (siehe auch Greenhalgh et al. 2004, S. 8):

- Relevanz
- Vollständigkeit
- Konsistenz
- Transparenz
- Genauigkeit.

Jedes Ergebnis einer ökologischen Bewertung ist von einer fundamentalen Unsicherheit charakterisiert. Das liegt daran, dass die real hervorgerufenen THG-Emissionen nicht gemessen, sondern mittels Verbrauchswerten, Annahmen und Emissionsfaktoren abgeschätzt werden. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird der Thematik der Unsicherheit mittels einer Sensitivitätsbetrachtung für ausgewählte Einflussgrößen begegnet. Eine Gegenüberstellung zu den Ergebnissen der ENUBA-2-Studie (Edel et al. 2014) ist allerdings nicht möglich, da der Bewertungsumfang bei ENUBA-2 nicht deckungsgleich ist. Zudem bildet der Bericht zu ENUBA-2 nicht das für eine Gegenüberstellung erforderliche Detailniveau ab. Es fehlen wichtige Angaben zu Annahmen und Parametern.

Vor diesem Hintergrund ist der Anspruch dieses Berichts, ein hohes Maß an Transparenz zu erreichen. Hierzu werden alle wesentliche Verbrauchswerte und Annahmen der Bewertung vorgestellt (Kapitel 6.2). Auch das methodische Vorgehen und der definierte Bilanzraum werden im Detail vorgestellt. Lediglich die verwendeten Emissionsfaktoren der Ecoinvent-Datenbank (Weidema et al. 2013) dürfen aus Lizenzgründen *nicht* publiziert werden. Stattdessen werden die verwendeten Module der Datenbank genannt, sodass

andere Wissenschaftler die verwendeten Emissionsfaktoren identifizieren und Bewertungsergebnisse nachvollziehen können.

6.2 Modellierung

6.2.1 Methodische Grundlagen

Für die Abschätzung von zusätzlichen bzw. eingesparten Treibhausgasemissionen durch Bau, Betrieb und Wartung der Lkw-Infrastruktur wird ein Ökobilanzansatz verwendet. Im Allgemeinen können mit Hilfe der Ökobilanzmethode, die auch unter dem Begriff LCA (Life Cycle Assessment) bekannt ist, verschiedene Emissionen und Umweltwirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebensweg abgeschätzt werden. Dazu werden in verschiedenen Phasen zunächst die relevanten In- und Outputs in das System erfasst (Sachbilanz) und anschließend in einem weiteren Schritt verschiedenen Wirkungsbereichen zugeordnet und nach dem Ausmaß ihrer Wirkung bewertet (Wirkungsbilanzierung siehe auch Abbildung 68). Die ISO-Norm DIN EN ISO 14040/44 regelt das grundsätzliche Vorgehen.

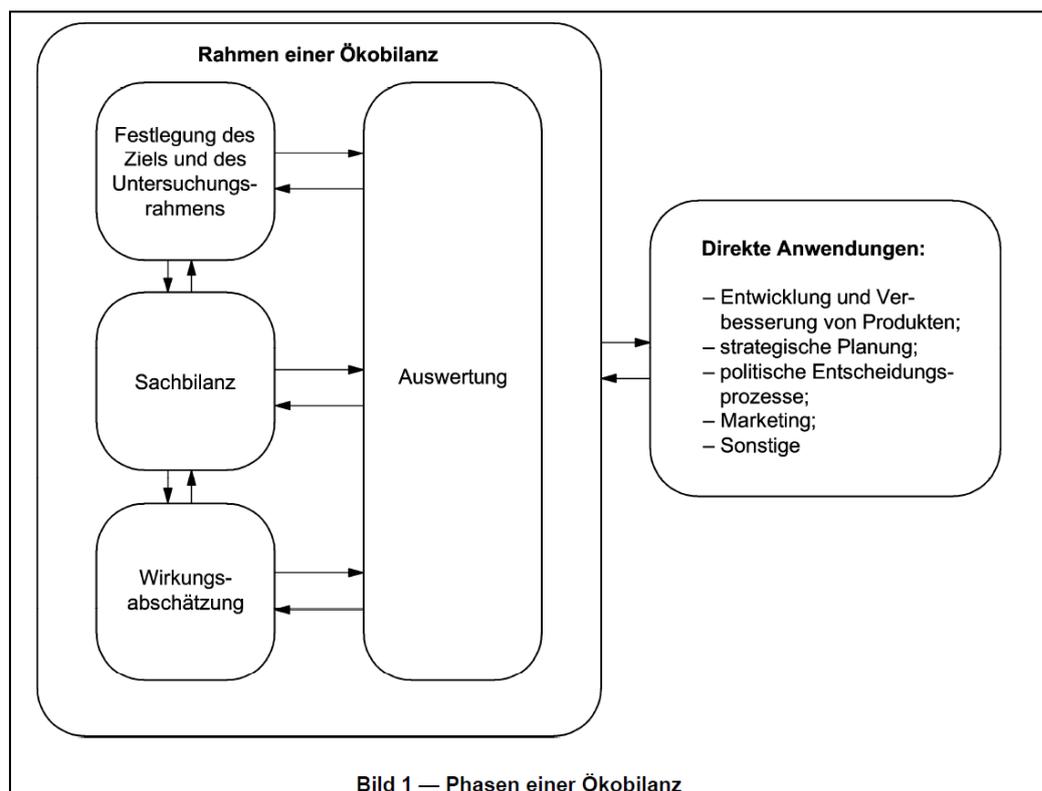


Abbildung 68: Vorgehensmodell einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040/44)

Bei der Ermittlung der Umweltwirkungen in dieser Studie werden lediglich Klimagase betrachtet (vgl. DIN CEN ISO/TS 14067). Dafür werden alle relevanten Treibhausgase (THG) zu einer Wirkungskategorie „Treibhausgaspotential“ (GWP 100) zusammengefasst

(CML2001 nach Guinée 2002) und ihr Wirkungspotential, bezogen auf 100 Jahre, berechnet. Andere Emissionen und Wirkungskategorien wurden vernachlässigt.

Einmalaufwände für den Aufbau der Infrastruktur (Materialmengen und Emissionen) werden für das gesamte Streckennetz erfasst. Instandhaltungen, die u. U. mehrfach im Lebenszyklus anfallen, werden in Abhängigkeit der jeweiligen Nutzungsintensität in die Bilanz aufgenommen. Alle Aufwendungen, die für die Errichtung und Instandhaltung der Oberleitungsinfrastruktur während der gesamten Lebensdauer nötig sind, werden auf 100 km und 1 Jahr herunter gebrochen. Dies ist demnach die funktionelle Einheit der Bewertung.

Aufwendungen (Materialmengen und Emissionen) für die Umrüstung, Konstruktion bzw. Wartung eines für den Oberleitungsbetrieb geeigneten Lkw werden für seine gesamte Nutzungsdauer erhoben und danach auf 1 Jahr herunter gebrochen.

Treibhausgas-Emissionen aus dem Bereich Infrastruktur-Errichtung, Betrieb und Wartung sowie dem Fahrzeugbetrieb werden anschließend zu einem Wert (in t CO₂e p.a.) zusammengefasst, der eine Aussage über die potentiellen Einsparungen bzw. Mehremissionen durch den Aufbau eines Oberleitungs-Lkw-Systems ermöglicht.

Bei der Erfassung der Inputs werden Listen aller verwendeten Materialien erstellt. Mit Hilfe von Emissionsfaktoren werden danach die Treibhausgasemissionen berechnet, die durch die Bereitstellung und Verarbeitung all dieser benötigten Materialien freigesetzt werden. Die verwendeten Emissionsfaktoren wurden der Datenbank „Ecoinvent v3.2“ (Weidema et al. 2013) entnommen. Genauere Angaben zu den verwendeten Emissionsfaktoren finden sich im Abschnitt 6.2.4. Mit Hilfe der Abschätzungen sollen potentielle Mehremissionen bzw. Emissionseinsparungen gegenüber dem derzeitigen Logistiksystem mit dieselbetriebenen Lkw ermittelt werden. Die entsprechenden Prognosen zur Entwicklung des Fahrzeugbestandes werden in Kapitel 3 beschrieben.

Des Weiteren werden im Rahmen der Lebenszyklusanalyse die Treibhausgasemissionen bzw. Einsparungen durch den Fahrzeugbetrieb mit Strom ermittelt und mit dem herkömmlichen Dieselantrieb verglichen. Dafür werden die potentiellen Mehraufwendungen in THG-Einheiten den potentiellen THG-Einsparungen des elektrobetriebenen Lkw gegenübergestellt. Die Angaben beziehen sich zunächst auf einen Fahrzeug-Kilometer pro Jahr und werden dann in verschiedenen Szenarien auf den Ausbaustand im Jahr 2030 hochgerechnet. Dafür werden aus anderen Arbeitspaketen Angaben über die potentiell mit Oberleitungen ausgestatteten Autobahnkilometer sowie die angenommenen Fahrzeuge im System übernommen. Die Gesamtbilanz gibt Auskunft über den zu erwartenden Effekt eines Oberleitung-Lkw-Systems in Bezug auf die Treibhausgasemissionen des Lastverkehrs in Deutschland.

Für die Berechnung der THG-Einsparungen durch die Nutzung von Hybrid-Lkw im Oberleitungssystem anstatt rein dieselbetriebener Lkw werden Emissionsfaktoren der Strom-

bereitstellung im Bezugsjahr 2030 herangezogen (siehe Abschnitt 2.2.1). Ein weiterer wichtiger Berechnungsfaktor ist die Umwandlungseffizienz der Hybrid-Fahrzeuge sowie der Dieserverbrauch der Referenzfahrzeuge.

Wie in Abschnitt 6.2.5 noch näher erläutert wird, werden die Einsparungen gegenüber einem reinen Diesel-Lkw-Verkehr mit Hilfe der Angaben zur Gesamtanzahl der Fahrzeuge, die im Bezugsjahr die Oberleitungsinfrastruktur nutzen, sowie deren Fahrleistung im System ermittelt.

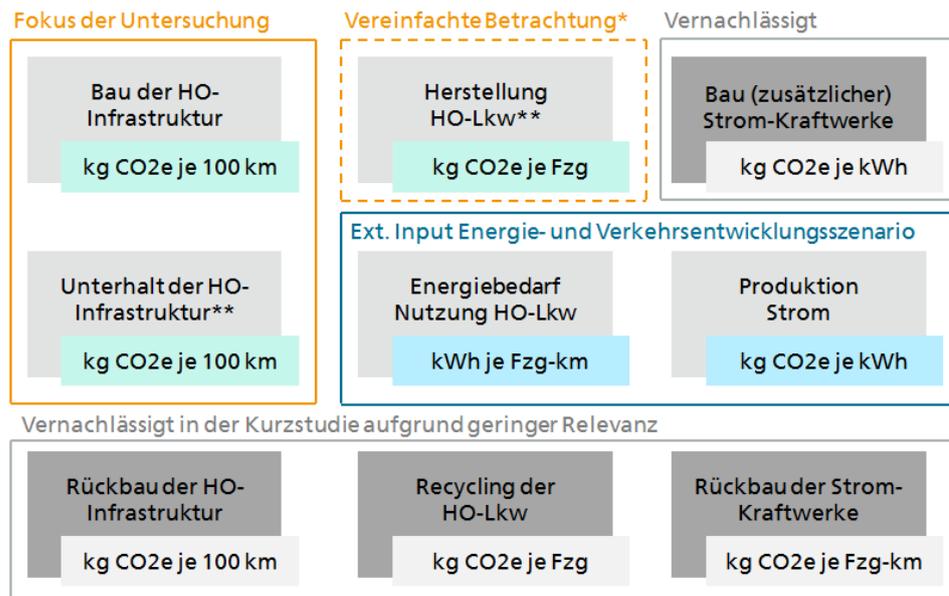
6.2.2 Systemgrenzen und funktionale Einheit

In der vorliegenden Untersuchung werden Inputs der Errichtung, des Betriebs sowie der Wartung eines Lkw-Oberleitungsnetzes sowie zur Umrüstung von Fahrzeugen erfasst und die daraus resultierenden Beiträge zum Treibhausgaseffekt (GWP100) ermittelt. Auf Fahrzeugebene werden dabei lediglich die Komponenten in der Bilanz berücksichtigt, die zusätzlich zu einem herkömmlichen Lkw mit Dieselantrieb benötigt werden. Der Rückbau und die Entsorgung des Infrastrukturnetzes sowie der Fahrzeugkomponenten werden aufgrund der geringen Relevanz in dieser Studie nicht betrachtet. Für die Stromversorgung des Oberleitungssystems wird eine Einspeisung aus dem normalen deutschen Stromnetz angenommen. Die zugrundeliegenden THG-Emissionen der Strombereitstellung entsprechen im Basisszenario einem potentiellen Strommix, der sich aus den Annahmen zum Klimaschutzszenario 95 der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ (BMUB 2015) ableitet. Auf die genannten Klimaschutzsszenarien wird auch im Kapitel 7.2 näher eingegangen.

Tabelle 61: Annahmen über Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung im deutschen Netz für 2030 (vgl. Kapitel 7.2 sowie BMUB 2015)

Szenario	g CO ₂ e/kWh _{el}
KS 95 – Strommix Deutschland 2030	192
KS 80 – Strommix Deutschland 2030	290

Abbildung 69 gibt einen Überblick über den Untersuchungsrahmen der LCA-Studie und die dabei einbezogenen bzw. vernachlässigten Elemente.



* Differenzbetrachtung zum Diesel-Lkw auf Basis von Literaturwerten
 ** Umlegung der Emissionen auf Fahrleistung erforderlich (Einfluss durch Varianten)

Abbildung 69: Systemgrenzen der THG-Emissions-Untersuchungen

Als Betrachtungszeitpunkt wird das Jahr 2030 definiert. Aus den Ergebnissen zum Markthochlauf (vgl. Kapitel 5) werden die Angaben zum Netzausbau, den Fahrzeugen im System, sowie der Fahrleistung übernommen (siehe Tabelle 62).

Tabelle 62: Angaben zum Gesamtsystem der Oberleitungsinfrastruktur und ihrer Nutzung

Netzgröße	4.000 km
Anzahl Fahrzeuge im System (insg.)	66.125
Fahrleistung an Oberleitung pro Jahr (insg.)	4,6 Mrd. km
Anzahl Fahrzeuge je 100 km Oberleitungsnetz	1.653

Für die Errichtung einer funktionsfähigen Oberleitungsinfrastruktur werden die folgenden Komponenten benötigt, die auch in der hier vorgenommenen Lebenszyklusanalyse berücksichtigt werden:

- Masten inkl. Fundamenten und Auslegern
- Fahrdraht inkl. Seitenhaltern, Tragseilen und Querverbindungen
- Unterwerke inkl. der notwendigen Komponenten zur Spannungstransformation
- Zuleitungen

Die gesamten Mengen der verwendeten Materialien für die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur werden einmalig in die Berechnung einbezogen und auf ihre jeweilige Lebensdauer aufgeteilt. Die jeweils unterstellten Lebensdauern einzelner Komponenten sind im Folgenden dargestellt (**Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**).

Tabelle 63: Unterstellte Lebensdauern der verschiedenen Materialien bzw. Komponenten

Komponente/Material	Lebensdauer [in Jahren]
Zusatzkomponenten Hybrid-Lkw (Generator, Elektromotor, Umrichter, Stromabnehmer) mit Traktionsbatterie (1 kWh)	10
Zusatzkomponenten Hybrid-Lkw (Generator, Elektromotor, Umrichter, Stromabnehmer) mit Speicherbatterie (180 kWh)	6
Zuleitung zum Unterwerk (Kupferleiter + Isolierung)	35
Leitung Einspeisung Fahrleitung (Kupfer + Isolierung)	25
Materialien Gleichrichter	30
Materialien Schaltanlage	40
Materialien Transformator	30
Materialien Unterwerk-Container	40
Fundament Unterwerk und Fundament Stahlmasten	60
Tragseile und Querverbindungen; Seitenhalter	20
Fahrdraht	7
Materialien Masten	40

Die Product Category Rules for Railways (PCR Railways, Toller 2013) schreiben vor, dass für die Schieneninfrastruktur eine Lebensdauer von 60 Jahren für die Berechnungen der Umweltauswirkungen zugrunde gelegt werden soll. Weitere Annahmen zu Lebensdauern der Masten und Oberleitungen wurden in Anlehnung zu Angaben im Schienenverkehr getroffen (Schmied et al. 2013).

Die Lebensdauer des Unterwerk-Containers richtet sich nach den höchsten Lebensdauern seiner Komponenten (vgl. VARIEL 2016). Es ist wahrscheinlich, dass der gesamte Container ausgetauscht wird, wenn die elektrischen Komponenten veraltet sind. Zur Lebensdauer des Fundamentbeton wurden eigene Abschätzung getroffen. Die Lebensdauern von Transformator und Schaltanlage entsprechen den Annahmen von Jorge et al. (2012). Informationen zu Lebensdauern von Zuleitungskabeln wurden (Brugg Cables 2009) entnommen und die von Einspeisekabeln in die Fahrleitung in Anlehnung an die Kabel von Solaranlagen getroffen (VOKA 2016).

Über den Verschleiß der einzelnen Komponenten wurden folgende Annahmen getroffen:

- 0 % des gesamten Materialbedarfs für Mastfundament
- 0,33 % des gesamten Materialbedarfs für Masten und Oberleitungen
- Verschleiß von 49,6 mg Kupfer je Fahrzeugkilometer für die Fahrleitungen (nach einem auf Messwerten basierten Berechnungsansatz aus (Edel et al. 2014))
- 0,01 % des gesamten Materialbedarfs für Stromzufuhr und Unterwerke (Default Annahme, da keine spezifischen Informationen vorhanden sind, aber dennoch ein symbolischer Wert berücksichtigt werden sollte.)

6.2.3 Datengrundlage und Annahmen

6.2.3.1 Infrastruktur

Für die Lebenszyklusbetrachtung der THG-Emissionen der Oberleitungsinfrastruktur werden ähnliche Annahmen wie in Kapitel 2 getroffen. Es wird von der Errichtung einer Oberleitungsstrecke je Fahrtrichtung ausgegangen. Die Oberleitungsinfrastruktur wird nur auf flacher Strecke errichtet. Die Masten werden in gleichmäßigem Abstand aufgebaut. Nähere Angaben zu den einzelnen Annahmen für die Ausgestaltung der Oberleitungsinfrastruktur können dem Kapitel 2 entnommen werden. Weiterhin werden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- kein Ausbau von Tunneln
- keine Brücken
- kein Versetzen oder Anpassen von Lärmschutzwänden
- keine Überführungen von Schilderbrücken.

Masten und Leitungen

Es ist davon auszugehen, dass eine entsprechende Oberleitungsinfrastruktur mithilfe bewährter Komponenten aus dem Straßen- und Eisenbahnbau aufgebaut würde. Deshalb wird auch für die Abschätzung der benötigten Materialien und Mengen auf Angaben von Herstellern der entsprechenden Komponenten zurückgegriffen. Für einen funktionsfähigen Oberleitungsbetrieb werden vor allem Masten und Fahrdrähte benötigt. In der vorliegenden Studie wird von konisch-runden Stahlmasten mit 40 cm Durchmesser und einer Länge von 8 m ausgegangen. Dessen Ausleger bestehen aus Rundrohr mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 6 m. Die Stützrohre bestehen aus 7 cm starkem Vierkantrrohr und haben eine Länge von 1 m. Abbildung 70 vermittelt einen Eindruck vom Aussehen und den Komponenten eines gängigen Masts im Nah- und Fernverkehr (Europoles 2014). Die Abschätzungen zum Stahlverbrauch für die Masten und Ausleger basieren auf einem Gespräch mit der Firma Pfeiffer (Pfeiffer 2016). Demnach wird von einer Gesamtmasse von 1,5 t Stahl für Mast und Ausleger ausgegangen, wobei 1,2 t auf den Mast entfallen und 0,3 t auf den Ausleger. Für die Gründung der Masten wird ein Betonfundament benötigt. Dabei werden 0,3 m³ Beton mit einer Dichte von 2.300 kg/m³ und 2 Vol. % Bewehrungsstahl pro Mast verwendet (Schmied et al. 2013).

Für die Befestigung des Fahrdrahts werden je Mast zwei Seitenhalter aus Aluminium eingesetzt. Die Abschätzungen beruhen auf Angaben aus dem Siemens Produktkatalog 2012 zu Fahrleitungsmaterial für den Nah- und Fernverkehr (Siemens AG 2012b).

Der Fahrdraht besteht aus möglichst reinem Kupfer. Für die Bilanzierung werden pro Mast zwei Kupferseile (120/19-E-Cu) als Fahrdraht mit seitlichen Rillen und 120 mm² Querschnittsfläche angenommen, in die die Halteklemmen der Hänger greifen. Die zwei Tragseile je Mast bestehen aus Bronze. Für die Querverbindungen wird von zwei Stahlseilen

je Mast ausgegangen. Als Quelle diente das Handbuch Eisenbahninfrastruktur von Fendrich und Fengler (2013).

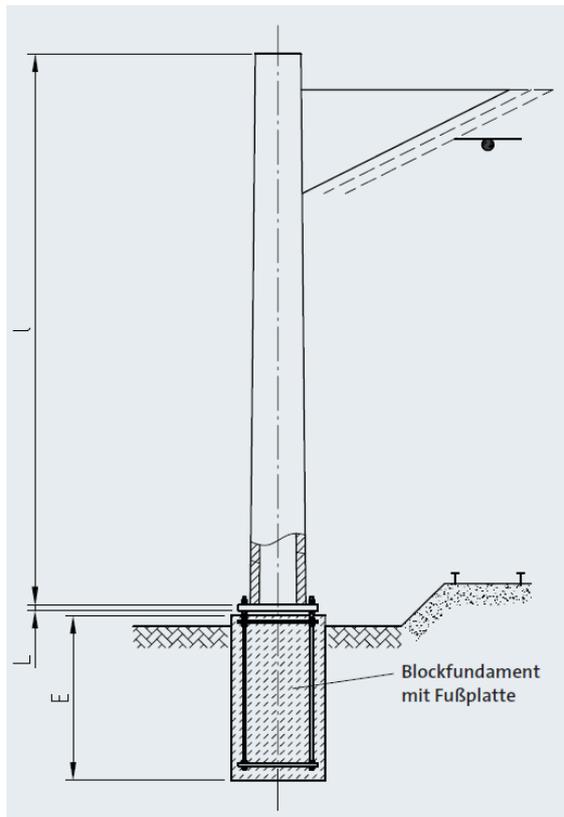


Abbildung 70: Beispielhafte Darstellung der Mastkonstruktion (Europeles 2014)

Folgende Materialmengen wurden für die Errichtung der Masten- und Oberleitungsinfrastruktur in der Sachbilanz erfasst (Tabelle 64).

Tabelle 64: Bewertungselemente und -materialien bei Masten und Leitungen

Hauptgruppe	Element	Material	Menge	Einheit
Masten	Fundament	Beton	690	kg je Mast
Masten	Fundament	Stahl	47,1	kg je Mast
Masten	Masten	Stahl	1200	kg je Mast
Masten	Ausleger vom Mast	Stahl	300	kg je Mast
Masten	Vertikales Stützrohr	Stahl	50	kg je Mast
Masten	Seitenhalter	Aluminium	20	kg je Mast
Oberleitung	Fahrdraht	Kupfer	2,12	kg je Meter (beide Fahrrichtungen)
Oberleitung	Tragseile/Seile	Bronze	2,12	kg je Meter (beide Fahrrichtungen)
Oberleitung	Querverbindungen/ Hänger	Stahl	0,276	kg je Meter (beide Fahrrichtungen)

Für die Anlieferung der einzelnen Komponenten an die Ausbaustrecke wurden für den Beton 100 km, für Mastkomponenten und Querverbindungen 200 km und für die Querverbindungen und Tragseile jeweils 300 km Transportdistanz unterstellt. Der Transport erfolgt jeweils mit einem Lkw mit 40 t zulässigem Gesamtgewicht. Der Beton wird in einem Betonmischer angeliefert. Die Angaben wurden auf Basis von Schmied et al. (2013) getroffen.

Die jeweiligen Annahmen zu Lebensdauern und Verschleiß wurden bereits im vorhergehenden Abschnitt 6.2.2 beschrieben.

Stromversorgung (Unterwerke)

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, wird für den Fahrbetrieb Gleichspannung (1.450 V) benötigt. Um Strom aus dem Mittelspannungsnetz nutzen zu können, müssen ca. alle 3 km Umspannstationen, sogenannte Unterwerke aufgebaut werden. Abbildung 6 liefert einen schematischen Überblick über die notwendigen Komponenten für die Stromversorgung der Oberleitungen.

Nach der Siemens-ENUBA-Studie (Siemens AG 2012a) werden diese Unterwerke als kompakte Container mit allen notwendigen Komponenten ausgerüstet, fertig angeliefert, aufgestellt und in Betrieb genommen. Zu den berücksichtigten Komponenten des „Container-Unterwerks“ gehören:

- Transformator
- Gleichrichter
- Mittelspannungsschaltanlage (20 kV, 10-15 MVA)
 - Kabel
 - Erdkabel vom Einspeisepunkt bis zur Autobahn ca. 500 m in städtischen Gebieten, 2-3 km in ländlichen Gebieten
 - Leitung/Rückleitung (Einspeisung in die Fahrleitung).

Für die Berechnung der Emissionen, die mit der Herstellung der genannten Komponenten sowie deren einzelner Materialien verbunden sind, wurde auf Produktdatenblätter, EPDs sowie andere Studien bzw. Patente zurückgegriffen. Eine genaue Auflistung der Annahmen zu den einzelnen Komponenten sowie der verwendeten Quellen zur Abschätzung der Materialmengen zeigt die folgende Tabelle 65. Bei dem Container wurde von einem handelsüblichen 20-Fuß-Container mit einem Holzfußboden ausgegangen, der entsprechend mit den Unterwerk-Komponenten ausgestattet wird und außerdem eine Außenverkleidung aus Holz erhält (Siemens AG 2012a). Die Emissionsdaten für die Herstellung eines Standard-Containers wurden dem entsprechenden Datensatz in Ecoinvent v3.2 entnommen (Weidema et al. 2013). Materialien und Mengen, aus denen der Container aufgebaut ist, wurden anhand des Gesamtgewichts und der jeweiligen spezifischen Gewichte der einzelnen Materialien abgeschätzt.

Eine Übersicht über die in der Bilanz berücksichtigten Materialmengen der einzelnen Komponenten des Unterwerks bietet Tabelle 66.

Tabelle 65: Annahmen und Quellen für die Berechnung des Materialverbrauchs der einzelnen Unterwerkskomponenten

Elemente Unterwerk	Annahmen	Quellen
Container	Standardcontainer 20 Fuß, aus Stahl mit einem Boden aus Sperrholz (L: 9,6 x B: 3 x H: 3,4 m) Gewicht: 2.330 kg	Emissionsdaten der Herstellung aus Ecoinvent v3.2 "intermodal shipping container production, 20-foot" (Weidema et al. 2013)
Boden (Sperrholz)	28,8 m ² , 12 mm stark; ca. 420 kg/m ³	eigene Berechnung (mithilfe von Behrens-Wöhlk 2015)
Außenverkleidung	Fichte, imprägniert 480 kg/m ³ ; 143 m ² , Stärke: 20 mm	http://www.gdholz.net/fachwissen-holz/rohdicke.html
Fundament	Normalbeton: 2.000-2.600 kg/m ³ (Mittel 2400 kg/m ³) Annahme 6 Punktfundamente à 40 x 40 cm, 80 cm tief	Berechnung anhand: http://www.hausjournal.net/fundament-berechnen auch Informationen aus (Steinecker 2012) Emissionen aus ecoinvent v3.2: market for concrete, sole plate and foundation (Weidema et al. 2013)
Transformator	Transformator 16 MVA	Informationen aus Siemens Produktkatalog (Siemens AG 2007) Emissionsdaten in Anlehnung an (ABB 2003)
Schaltanlage/ Gleichrichter	Gleichspannungs-Schaltanlage mit integriertem Gleichrichter (z. B. SIEMENS Sitras CSG) 1450 VDC	Produktdatenblatt (Siemens AG 2012c) Mengen abgeschätzt mithilfe Ecoinvent Datensatz: Inverter production, 500 kW Materialien angelehnt an Mersiowsky (2003, Table 3, S. 6, Consumer substation 24 kV, SF6 Insulated)
Kabel (Leiter und Isolierung)	1 ankommend, Zuleitung (AC): Leiter Kupfer, Isolierung HDPE 1 abgehend, Einspeisung Fahrleitung (1,5 kV DC): Leiter: Kupfer; Isolierung: flammbeständige Polymermischung	Anteil Kupfer angegeben in (Faber Kabel 2016) Produktdatenblatt S. 2 Einspeisekabel siehe (VOKA 2016) Informationen zu Isolierung aus Patent zur flammbeständigen halogenfreien Polymermischung (Fascella et al. 2012)

Tabelle 66: Übersicht über die in die Bewertung einbezogenen Materialmengen der einzelnen Komponenten eines Unterwerkes

Komponenten und Materialien	Gewicht [kg]
<i>Container</i>	
Stahl	2.185
Boden (Sperrholz Okoume oder Ceiba ca. 420 kg/m ³)	145
Verkleidung (Holzpanele/Latten ca. 420 kg/m ³)	1.204
Fundament (Punktfundament)	2.016
<i>Mittelspannungsschaltanlage</i>	
SF6	10
Aluminium	45
Kupfer	253
Stahl	1.387
Elektroblech	75
Epoxidharz	353
Kunststoffe	21
Keramik	37
<i>Transformator</i>	
Aluminium (0,2 %)	36
Stahl (24,3 %)	4.311
Kupfer (21,1 %)	3.743
Elektroblech (25,3 %)	4.485
Isolationsmaterial (1,6 %)	284
<i>Gleichrichter</i>	
Stahl (47 %)	475
Kupfer (23 %)	232
Alu (4 %)	40
Polyethylen (1 %)	10
Polyamid (2 %)	20
Polyester (1 %)	10

6.2.3.2 Fahrzeuge, Fahrleistungen und Komponenten

Im Rahmen der Studie werden zwei Lkw-Klassen berücksichtigt, vgl. Kapitel 3. Zum einen sind das Fahrzeuge der Gewichtsklasse 4 mit über 12 t und zum anderen Sattelzugmaschinen (SZM). Als Antriebsvarianten werden von beiden Lkw-Klassen jeweils eine Variante mit Hybrid-Antrieb und einer kleinen Traktionsbatterie (1 kWh) sowie ein Hybrid-Antrieb mit einer großen Speicherbatterie (180 kWh) zugrunde gelegt. Lkw mit großen Speicherbatterien können auch Fahrstrecken ohne Oberleitungsinfrastruktur im Elektrobetrieb zurücklegen. Während die Fahrzeugvariante mit der kleinen Batterie auf den Fahrstrecken außerhalb des Oberleitungssystems auf Dieselbetrieb umschalten muss. Die folgenden Fahrzeugkonfigurationen wurden den Berechnungen zugrunde gelegt:

1. Lkw (bis 40 t) mit Hybrid-Antrieb inkl. Verbrennungsmotor, Generator, Elektromotor 300 kW (vgl. Edel et al. 2014), Umrichter, Stromabnehmer, Traktionsbatterie (1 kWh). Zusatzgewicht 1t
2. Gewichtsklasse 4 (> 12 t) Lkw mit Hybrid-Antrieb inkl. Verbrennungsmotor, Generator, Elektromotor, Umrichter, Stromabnehmer und großer Speicherbatterie (138 kWh)
3. Sattelzugmaschine mit Hybrid-Antrieb inkl. Verbrennungsmotor, Generator, Elektromotor, Umrichter, Stromabnehmer) und großer Speicherbatterie (180 kWh)

In der Tabelle 67 sind die Annahmen zu Verbrauch und Energiedichte für die verschiedenen Lkw-Varianten und Zeithorizonte dargestellt, woraus das notwendige Gewicht der Batteriezellen inklusive Einhäusung, Batteriekühl- und -managementsystem berechnet wird. Die Energiedichte derzeit verfügbarer Li-Ionen Batterien liegt bei ca. 150 Wh/kg (Sattler 2010). Für 2030 wird entsprechend ENUBA-Bericht (Edel et al. 2014) eine Steigerung der Energiedichte auf 315 Wh/kg angenommen.

Tabelle 67: Berechnung der Batteriegewichte inkl. Gehäuse⁵⁶

Kategorie	Einheit	Speicherbatterie				Traktionsbatterie
		2015		2030		
Bezugsjahr		2015		2030		2015
Fahrzeugklasse		> 12 t	SZM	> 12 t	SZM	> 12 t/SZM
Verbrauch	kWh/km	1,38	1,80	1,23	1,60	
Reichweite	km	100	100	100	100	
Energie (ideal)	kWh	138	180	123	160	1,0
Energie (real) ⁵⁷	kWh	216	281	192	250	1,6
Energiedichte	Wh/kg	150	150	315	315	150
Gewicht (Zellen)	kg	1.441	1.875	610	794	10
Einhäusung ⁵⁸	kg	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Gesamtgewicht	kg	2.378	3.094	1.007	1.310	17

Das zusätzliche Gewicht für die Komponenten des Hybrid-Oberleitungs-Lkw im Vergleich zum herkömmlichen Dieselfahrzeug wird in (Edel et al. 2014) mit 1 t angegeben. Die Materialliste für die zusätzlichen Komponenten in der Sachbilanz addiert sich allerdings zu

⁵⁶ nach dem Verfahren: <https://www.vde.com/de/e-mobility/fahrzeugtechnik/batteriesystem/seiten/default.aspx>

⁵⁷ Bedingt durch Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, Materialfehler in der Batterie und die Problematik einer Voll-Ladung wird die Batterie mit 80 % der Nennenergie betrieben. Aufgrund der Alterung der Batterie gehen 20 % der Nennenergie verloren.

⁵⁸ Das Zellgewicht erhöht sich durch die Crash-sichere Einhäusung, das Batteriekühlsystem und das Batteriemanagementsystem um ca. 65 %.

über 2 t Mehrgewicht (2.162,6 kg). Aus diesem Grund konnten die Daten der genannten Studie in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt werden.

Nach (Björkman 2013) ergibt sich durch die zusätzlichen Komponenten für einen Oberleitung-Lkw ohne Batterie (Antriebsstrang und Stromabnehmer) ein zusätzliches Gewicht von 615 kg. Die dabei verwendeten Materialien sind in Tabelle 68 aufgelistet.

Tabelle 68: Materialliste für zusätzliche Komponenten für einen Oberleitung-Lkw ohne Batterie (Catenary lorry nach Björkman 2013, A.1, S. 76)

Material	Menge [kg/Lkw]
Aluminium	92,4
Kupfer	35,5
Stahl	478,4
Neodym	2,6
Plastik = Kabel	2,2
Circuit board	1,8
Nylon	0,002
Blech	0,05
Eisen	1,6
Nickel	0,04
Zinn	0,04
Summe	614,6

Aus Björkman (2013) wurde außerdem der Energieverbrauch für die Montage der Komponenten entnommen. Es handelt sich dabei um eine grobe Abschätzung. Wie Björkman (2013) in ihrer Studie diskutiert, macht jedoch die Montagephase ohnehin nur einen sehr kleinen Teil der Gesamtemissionen aus.

Gängige Stromabnehmermodelle für Straßenbahnen bzw. Züge wiegen nach Herstellerangaben ca. 130 kg und bestehen aus Stahlrohren, Aluminium, Gießharzisolatoren und dem Schleifstück aus Kohle (Stemann 2012). Durch Addition des Batteriegewichts mit den Gewichten der anderen Komponenten, ergibt sich das Zusatzgewicht eines Oberleitung-Lkw gegenüber einem Diesel-Lkw (Tabelle 69).

Im Ecoinvent-Datensatz wird eine LiMn2O4/Graphit-Batterie modelliert (Weidema et al. 2013). In (Björkman 2013) wird eine Materialliste einer LiFePO₄-Batterie präsentiert. In der Literatur finden sich weitere Angaben zu CO₂e-Faktoren für die Produktion verschiedener Li-Ionen-Batterietypen (Tabelle 70). Im Durchschnitt aller Literaturquellen zu verschiedenen Batterietypen ergibt sich ein Emissionsfaktor von 150 kg CO₂e/kWh Batterieleistung (Helmers und Marx 2012, S. 10). Der Datensatz „battery production, Li-ion, rechargeable,

prismatic | battery, Li-ion, rechargeable, prismatic | APOS, S” in Ecoinvent liefert einen Emissionsfaktor von 6,2 kg CO₂e/kg Batterie (inkl. Gehäuse).

Tabelle 69: Gewicht der zusätzlichen Komponenten der verschiedenen Lkw-Varianten und Zeithorizonte (Hybrid-Antriebsstrang nach Björkman 2013, S. 76 für Oberleitung-Lkw ohne Batterie)

Komponenten	Einheit	Speicherbatterie				Traktionsbatterie
		2015		2030		2015
Fahrzeugklasse		> 12 t	SZM	> 12 t	SZM	> 12 t
Antriebsstrang (Hybrid)	kg	485	485	485	485	485
Stromabnehmer	kg	130	130	130	130	130
Batterie	kg	2.378	3.094	1.007	1.310	17
Zusatzgewicht insg.	kg	2.993	3.709	1.622	1.925	632

Tabelle 70: Vergleich verschiedener Angaben zu THG-Emissionen für Herstellung von Speicherbatterien pro kWh

Quelle	kg CO ₂ e/kWh Batterieleistung (real)
Mittel Literaturwerte nach Review von Helmers und Marx (2012)	154 ± 83
Ecoinvent v3.2 (Weidema et al. 2013)	105

Für die oben beschriebenen Antriebsvarianten ergäben sich bei Verwendung des Ecoinvent-CO₂e-Faktors folgende THG-Emissionen für die Produktion der Batterien (Tabelle 71). Der Ecoinvent-Datensatz beinhaltet auch das Gehäuse der Batteriezellen.

Tabelle 71: Berechnung der THG-Emissionen durch die Herstellung unterschiedlicher Speicherbatterien

Aspekt	Einheit	Speicherbatterie				Traktionsbatterie
		2015		2030		2015
Fahrzeugklasse		> 12 t	SZM	> 12 t	SZM	> 12 t
Gesamtgewicht	kg	2.378	3.094	1.007	1.310	17
THG-Emissionen	kg CO₂e/Fzg	14.650	19.061	6.201	8.068	105

THG-Emissionen, die durch die Produktion (Bereitstellung der Rohstoffe und Halbwaren sowie deren Montage) der zusätzlichen Komponenten eines HO-Lkw entstehen, wurden mit Hilfe der Angaben in Tabelle 71 sowie der Ecoinvent-Datenbank v3.2 in Open-LCA berechnet. Als Ergebnis erhält man THG-Emissionen von 4.026 kg CO₂e für die Materialbereitstellung und Produktion von Antriebsstrang und Stromabnehmer pro Fahrzeug.

Als Vergleichs- bzw. Orientierungswert wurde der Datensatz zur Herstellung eines Elektromotors aus Ecoinvent v3.2 herangezogen (electric motor production, vehicle, electric powertrain). Die Angaben beziehen sich dort auf einen 53 kg schweren Elektromotor mit einer Leistung von 100 kW. Die THG-Emissionen werden mit rund 10,9 kg CO₂e je kg Elektromotor angegeben. Für den gesamten Motor (53 kg) ergeben sich daraus rund 576 kg CO₂e. Nimmt man an, dass die THG-Emissionen linear mit der Leistung des Motors zunehmen, ergäben sich für einen 300-kW-Elektromotor (wie für den Hybrid-Lkw angenommen) THG-Emissionen in Höhe von 1.728 kg CO₂e. Im Vergleich dazu erscheinen die hier berechneten rund 4.000 kg CO₂e für den Lkw-Antriebsstrang plus Stromabnehmer plausibel. Denn der Antriebsstrang setzt sich neben dem Elektromotor noch aus vielen weiteren Komponenten zusammen, und außerdem wird noch der Stromabnehmer berücksichtigt.

Tabelle 72: Berechnete THG-Emissionen je Fahrzeug für die verschiedenen Lkw-Varianten und Betrachtungszeitpunkte

Aspekt	Einheit	Speicherbatterie				Traktionsbatterie
		2015		2030		2015
Fahrzeugklasse		> 12 t	SZM	> 12 t	SZM	> 12 t
Antriebsstrang & Stromabnehmer	kg CO ₂ e/Fzg	4.026	4.026	4.026	4.026	4.026
Batterie	kg CO ₂ e/Fzg	14.650	19.061	6.201	8.068	105
Gesamt	kg CO₂e/Fzg	18.676	23.087	10.227	12.094	4.131

6.2.4 Emissionsfaktoren

Tabelle 73 gibt einen Überblick über die verwendeten Bewertungsmodule. Aus Lizenzgründen dürfen die einzelnen Emissionsfaktoren nicht öffentlich publiziert werden.

Im Fall der Materialien „Polymermischung“ und „Isolationsmaterial“ wurden eigene Berechnungen vorgenommen. Beide Posten setzen sich aus einem Gemisch verschiedener Einzelmaterialien zusammen, deren Emissionsfaktoren ebenfalls der Ecoinvent-Datenbank entnommen wurden. Die Zusammensetzung der beiden Materialien sowie die jeweils verwendeten Datensätze für die Berechnung der Emissionsfaktoren sind in der nachfolgenden Tabelle 74 und Tabelle 75 dargestellt.

Mit dem Begriff „Polymermischung“ wird eine halogenfreie Polymermischung für Kabel bezeichnet, die besonders schwer entflammbar ist und häufig für technische Einrichtungen verwendet wird (Schöb 2014). Da keine entsprechenden Daten in Ecoinvent-Datenbank hinterlegt waren, wurde zur Ermittlung der Zusammensetzung der Polymermischung und damit zur Berechnung des Emissionsfaktors auf Angaben eines Patentes zurückgegriffen (Fascella et al. 2012).

Tabelle 73: Verwendete Ecoinvent-Module für die Bewertung der Oberleitungsinfrastruktur (entnommen aus Weidema et al. 2013)

Material	Prozessbezeichnung in Ecoinvent v3.2
Beton	market for concrete, sole plate and foundation APOS, S
Stahl	market for steel, low-alloyed APOS, S
Kupfer	copper production, primary copper APOS, S
Aluminium	market for aluminium, primary, ingot APOS, S
Bronze	market for bronze APOS, S
Blei	primary lead production from concentrate lead APOS, S
Glas	market for flat glass, uncoated APOS, S
HDPE	market for polyethylene, high density, granulate APOS, S
PP	market for polypropylene, granulate APOS, S
Sperrholz	plywood production, for indoor use APOS, S
Holzverkleidung	lath, softwood, raw, kiln drying to u=20 % APOS, S
Elektroblech	market for ferrosilicon APOS, S
Polyamid	glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection APOS, S
Polyester	market for polyester resin, unsaturated APOS, S
SF6	market for sulfur hexafluoride, liquid APOS, S
Epoxidharz	market for bisphenol A epoxy based vinyl ester resin APOS, S
Polymermischung	eigene Berechnung anhand der Datensätze aus Ecoinvent v3.2
Ethylen Vinylacetat-Copolymer	market for ethylene vinyl acetate copolymer APOS, S
Polyethylen	market for polyethylene, high density, granulate APOS, S
Polypropylen-ethylen-copolymer	market for polypropylene, granulate APOS, S
ATH, gemahlen	market for aluminium hydroxide APOS, S
Isolationsmaterial	eigene Berechnung Isolation f. Transformatoren (Epoxid, Polyester, ...)
PET (Polyethylenterephthalat)	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous APOS, S
Glasfaser	market for glass fibre, GLO APOS, S

Tabelle 74: Übersicht über die Zusammensetzung der halogenfreien Polymermischung nach (Schöb 2014) sowie deren Emissionsfaktoren je kg (Weidema et al. 2013)

Komponente	Vol %	Gewichts %	kg CO ₂ e
Ethylen Vinylacetat-Copolymer)	13 %	31 %	2,14
Polyethylen	19 %	28 %	2,05
Polypropylen-ethylen-copolymer	23 %	30 %	2,07
ATH, gemahlen	34 %	11 %	0,69
Polymermischung (gewichtetes Mittel)			1,94

In den Unterlagen zur Materialverwendung bei der Herstellung von Transformatoren findet sich lediglich der Oberbegriff „Isolationsmaterialien“, der ein Gemisch von Stoffen zur Isolierung leitender Elemente bezeichnet. Genaue Angaben über deren Beschaffenheit und Eigenschaften konnten nicht gefunden werden, deshalb wurden anhand von Herstellerkatalogen (z. B. Von Roll 2016 und ISOVOLTA 2012) häufig zur Isolation verwendete Materialien identifiziert und daraus ein theoretisches Mengenverhältnis abgeleitet. Anhand dieses Mengenverhältnisses wurde mit Hilfe der Emissionsfaktoren der einzelnen Komponenten aus der Ecoinvent-Datenbank ein theoretischer Emissionsfaktor für Isolationsmaterial berechnet. Nähere Angaben finden sich in Tabelle 75.

Tabelle 75: Zusammensetzung von Isolationsmaterialien für Transformatoren für die Berechnung eines durchschnittlichen Emissionsfaktors (je kg Material)

Komponente	Anteil am Isolationsmaterial insgesamt	kg CO _{2e}
Glasfaser	25 %	2,43
PET	50 %	2,91
Epoxidharz	25 %	6,08
gewichtetes Mittel		3,58

6.2.5 Konfiguration des Basisszenarios

Für das vorliegende Bewertungsmodell wurden mehrere Variablen definiert, um unterschiedliche Infrastruktur-, Verkehrs- und Energieversorgungszenarien flexibel abbilden zu können. Im Unterschied zur Datengrundlage (Abschnitt 6.2.3) geht es hierbei nicht um einzelne Materialien (z. B. Kupferfahrdraht) und spezifische Materialmengen, sondern um Häufigkeiten und Nutzungsintensitäten im Kontext des Gesamtsystems. Das Basisszenario bezieht sich auf ein vollständiges Ausbaustadium von 4.000 Autobahnkilometer, die mit jeweils einer Oberleitung je Fahrtrichtung ausgestattet sind.

Die Variablen des Bereichs Infrastruktur sind:

- Anteil elektrischer Autobahn-Kilometer [%]
- Ø-Mastabstand [Meter]
- Ø-Abstand Unterwerke [Meter]
- Ø-Länge der Stromversorgungskabel je Unterwerke (Stromanschluss) [Meter].

Die Variablen des Bereichs der Verkehrsszenarien sind:

- Anzahl Fzg im System in der Klasse > 12 t [Fzg]
 - davon Anteil Diesel-Hybrid [%]
 - davon Anteil Batterie-Hybrid [%]
- Anzahl Fzg im System in der Klasse SZM [Fzg]
 - davon Anteil Diesel-Hybrid [%]
 - davon Anteil Batterie-Hybrid [%]

- Ø-Fahrleistung je Fzg pro Jahr (> 12 t) [km]
 - Fahrleistungsanteil an der Oberleitung [%]
 - Fahrleistungsanteil abseits der Oberleitung [%]
- Ø-Fahrleistung je Fzg pro Jahr (SZM) [km]
 - Fahrleistungsanteil an der Oberleitung [%]
 - Fahrleistungsanteil abseits der Oberleitung [%]

Die Variablen des Bereichs der Energieszenarien sind:

- Durchschnittsverbrauch 2030 Standard-Diesel-Lkw in der Klasse > 12 t [l/km]
- Durchschnittsverbrauch 2030 Standard-Diesel-Lkw in der Klasse SZM [l/km]
- Durchschnittsverbrauch 2030 Diesel-HO-Lkw in der Klasse > 12 t [kWh/km]
- Durchschnittsverbrauch 2030 Diesel-HO-Lkw in der Klasse SZM [kWh/km]
- Durchschnittsverbrauch 2030 Batterie-HO-Lkw in der Klasse > 12 t [kWh/km]
- Durchschnittsverbrauch 2030 Batterie-HO-Lkw in der Klasse SZM [kWh/km]
- THG-Emissionen der Energiebereitstellung von Diesel (WTW) [g CO₂e/l]
- THG-Emissionen der Energiebereitstellung von Strom (WTW) [g CO₂e/kWh].

Mittels Expertengesprächen, eigener Analysen und Literaturrecherche konnte ein Basisszenario im Projekt erarbeitet werden. Die Belegung der einzelnen Variablen wird nachfolgend präsentiert (vgl. Tabelle 76, Tabelle 77 und Tabelle 78).

Tabelle 76: Parameter der Infrastruktur-Konfiguration im Basisszenario

Variable	Wert	Kommentar / Verweis
Anteil elektrischer Autobahn-Kilometer [%]	100	Ergebnisse Kap. (2.1)
Ø-Mastabstand [Meter]	50	Ergebnisse Kap. (2.1)
Ø-Abstand Unterwerke [Meter]	3.000	Ergebnisse Kap. (2.1)
Ø-Länge der Stromversorgungskabel je Unterwerke (Stromanschluss) [Meter]	2.000	Ergebnisse Kap. (2.1)

Tabelle 77: Parameter der Verkehrsszenario-Konfiguration im Basisszenario

Variable	Wert	Kommentar / Verweis
Anzahl Fzg im System in der Klasse > 12 t [Fzg]	6.200	Ergebnisse Kap. (3)
davon Anteil Diesel-Hybrid [%]	100	Ergebnisse Kap. (3)
davon Anteil Batterie-Hybrid [%]	0	Ergebnisse Kap. (3)
Anzahl Fzg im System in der Klasse SZM [Fzg]	59.925	Ergebnisse Kap. (3.2)
davon Anteil Diesel-Hybrid [%]	100	Ergebnisse Kap. (3.2)
davon Anteil Batterie-Hybrid [%]	0	Ergebnisse Kap. (3.3.2)
Ø-Fahrleistung je Fzg pro Jahr (> 12 t) [km]	64.000	Ergebnisse Kap. (5.1.3)
Fahrleistungsanteil an der Oberleitung [%]	40	Ergebnisse Kap. (5.1.3)
Fahrleistungsanteil abseits der Oberleitung [%]	60	Ergebnisse Kap. (5.1.3)
Ø-Fahrleistung je Fzg pro Jahr (SZM) [km]	114.000	Ergebnisse Kap. (5)
Fahrleistungsanteil an der Oberleitung [%]	65	Ergebnisse Kap. (5)
Fahrleistungsanteil abseits der Oberleitung [%]	35	Ergebnisse Kap. (5)

Tabelle 78: Parameter der Energieszenario-Konfiguration im Basisszenario

Variable	Wert	Kommentar / Verweis
Durchschnittsverbrauch 2030 Standard-Diesel-Lkw in der Klasse > 12 t [l/km]	0,189	Ergebnisse Kap. (3.3)
Durchschnittsverbrauch 2030 Standard-Diesel-Lkw in der Klasse SZM [l/km]	0,246	Ergebnisse Kap. (3.3)
Durchschnittsverbrauch 2030 Diesel-HO-Lkw in der Klasse > 12 t [kWh/km]	1,2	Ergebnisse Kap. (3.3)
Durchschnittsverbrauch 2030 Diesel-HO-Lkw in der Klasse SZM [kWh/km]	1,6	Ergebnisse Kap. (3.3)
Durchschnittsverbrauch 2030 Batterie-HO-Lkw in der Klasse > 12 t [kWh/km]	1,4	eigene Abschätzung
Durchschnittsverbrauch 2030 Batterie-HO-Lkw in der Klasse SZM [kWh/km]	1,8	eigene Abschätzung
THG-Emissionen der Energiebereitstellung von Diesel (WTW) [g CO _{2e} /l]	3.240	DIN EN 16258
THG-Emissionen der Energiebereitstellung von Strom (WTW) [g CO _{2e} /kWh]	192	BMUB 2015

6.3 Bewertung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der CO_{2e}-Bewertung für das definierte Infrastruktur- und Verkehrssystem präsentiert. Entsprechend der methodischen Grundlagen geht es um eine fokussierte Lebenszyklusbilanz. Ergebnisse werden für die Umweltwirkungskategorie Treibhauseffekt ermittelt.

6.3.1 Infrastruktur

Aufgrund unterschiedlicher Lebensdauern technischer Module und Komponenten und unterschiedlicher Aufwände der Instandhaltung bzw. Wiederbeschaffung ist es bei ökologischen Bewertungen üblich, jahresbezogene Emissionsanteile zu ermitteln. In Abbildung 71 ist das Ergebnis der THG-Bewertung für das HO-System in der Ausbaustufe 2030 dargestellt. Demnach werden der Infrastruktur nach einer Lebenszyklusbilanzierung rund 933 t CO₂e pro Jahr je 100 km zugeordnet. Bei einem Infrastrukturausbau von 4.000 km resultiert eine jährliche Emissionsmenge von rund 37.325,5 t CO₂e. Dieser Wert umfasst die Phasen Produktion, Logistik und Instandhaltung. Gemäß der in Kap. 6.2 formulierten Annahmen und Vereinfachungen werden die Phasen der Beseitigung und Verwertung nicht betrachtet.

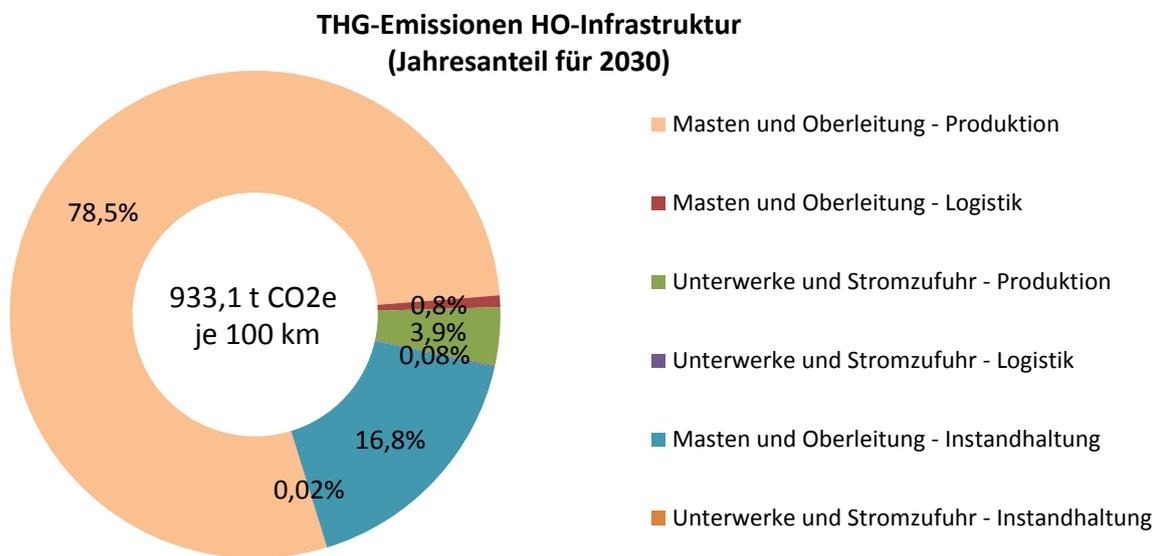


Abbildung 71: THG-Emissionen der HO-Infrastruktur

Das Ergebnis basiert auf einer auf einer detaillierten Betrachtung der Bereiche „Masten und Oberleitung“ sowie „Unterwerke und Stromzufuhr“. Daher können die in Abbildung 71 präsentierten Ergebnisse weiter verfeinert und im Detail ausgewertet werden.

In Abbildung 72 ist dargestellt, wie sich die THG-Emissionsanteile des Bereichs „Masten und Oberleitung“ im Detail weiter aufteilen. Demnach resultieren THG-Emissionen der Produktionsphase hauptsächlich aus der Menge benötigten Stahls der Masten (31,1 %), der benötigten Menge Kupfer für den Fahrdrabt (30,1 %) sowie dem Bedarf an Bronze für die Tragseile (21,7 %).

Für die Instandhaltung des Systems ist aus Klimaschutzaspekten insbesondere der Fahrdrabt relevant (66,2 %). Dabei wird die Höhe des Verschleißes durch die Höhe der Inanspruchnahme des Systems wesentlich bestimmt. Die Zahlen repräsentieren ein modera-

tes Nutzungsszenario. Weiterhin lässt sich der Wartungsbedarf der Stahlmasten als relativ hoch einstufen (19,4 %). Aufgrund geringer Relevanz wird auf eine Detaildarstellung der Logistik (0,8 % der gesamten THG-Emissionen) verzichtet.

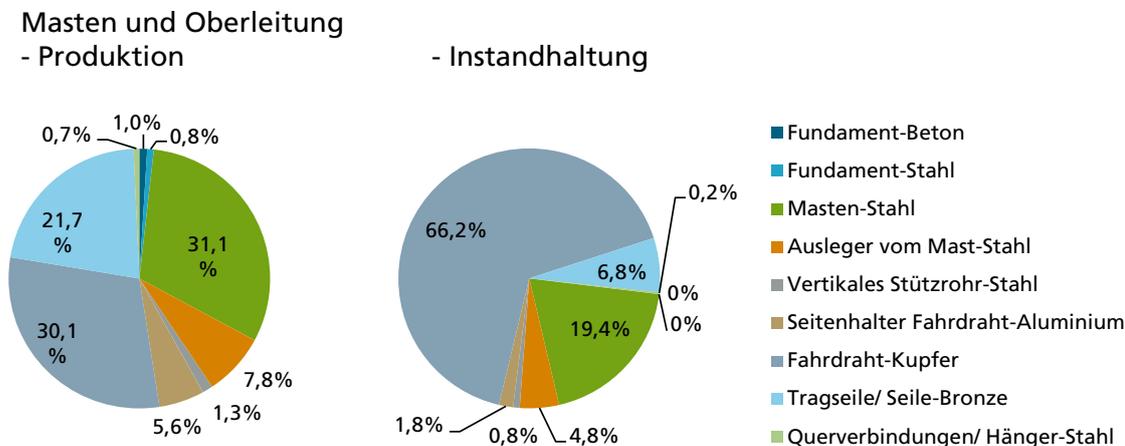


Abbildung 72: THG-Emissionen der HO-Infrastruktur (Masten und Oberleitung)

In Abbildung 73 ist dargestellt, wie sich die THG-Emissionen des Bereichs „Unterwerke und Stromzufuhr“ im Einzelnen aufteilen. Demnach sind aus Produktionsperspektive die Aspekte Transformator (55,9 %) und Versorgungskabel (26,2 %) relevant. Weiterhin sind die THG-Emissionen zur Herstellung von Schaltanlagen bedeutsam (12,9 %). Auf eine Detailbetrachtung der Instandhaltung (0,02 % der gesamten THG-Emissionen) und Logistik (0,08 % der gesamten THG-Emissionen) wird mangels Relevanz verzichtet.

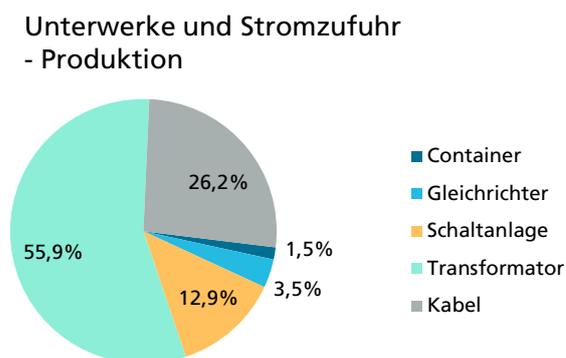


Abbildung 73: THG-Emissionen der HO-Infrastruktur (Unterwerke und Stromzufuhr)

6.3.2 Fahrzeuge

Entsprechend der methodischen Vorgaben aus Kapitel 3 geht es um eine Betrachtung der Differenzmengen und -emissionen von konventionellen Diesel-Lkw und HO-Lkw. Aufgrund der zusätzlichen Batterietechnik und besonderer Rohstoff- und Materialanforderungen sind die THG-Emissionen der Produktionsphase von HO-Lkw allgemein höher als bei

vergleichbaren Diesel-Lkw. Im gegebenen Verkehrsszenario (6.200 > 12 t zGG Solo-Lkw und 59.925 SZM/LZ) belaufen sich die zusätzlichen THG-Emissionen, die der Produktionsphase der Lkw zugeordnet werden können, auf rund 1.087 t CO₂e pro Jahr und 100 km (Netzausbau 4.000 km). Demnach entspricht die Höhe der THG-Emissionen der Fahrzeugkomponenten in etwa der Höhe der Infrastrukturelemente (gilt für Basis-Verkehrsszenario, d. h. Dieselhybrid-Technologie). Wie in Tabelle 79 darstellt ist, können die THG-Emissionen der Fahrzeuge höher ausfallen, wenn neben der Diesel-Hybrid-Technologie auch die Batterie-Hybrid-Technologie betrachtet wird (Ansatz zur Elektrifizierung der Autobahn-Anschlussstraßen). Dann können diese Emissionen der Fahrzeugproduktion um einen Faktor 2,6 bis 3,0 höher liegen als zuvor beschrieben.

Tabelle 79: Verhältnis der THG-Faktoren von Diesel- und Batterie-Hybridfahrzeugen

Fahrzeugklassen	Diesel-Hybrid	Batterie-Hybrid (138/180 kWh Batterie)
SoloLkw > 12 t	1	2,6
SZM	1	3,0

6.3.3 Nutzung des Infrastruktursystems

Im Basisszenario können gegenüber der Nutzung der Diesel-Technologie (2030-Effizienz des Dieselmotors) durch den Aufbau, die Vermarktung und Nutzung des HO-Infrastruktursystems THG-Einsparungen in Höhe von rund 2,2 Millionen Tonnen CO₂e erreicht werden. Dies ist in Abbildung 74 dargestellt.

Aufgrund des zweifachen Umweltvorteils der HO-Lkw gegenüber Diesel-Lkw (vgl. Wirkungsgrad und Energievorkette) sind die Einsparungen auf Fahrzeugebene signifikant und die sogenannten „Upstream-Emissionen“ (d. h. Produktion, Anlieferung und Instandhaltung für Infrastrukturelemente und Fahrzeugkomponenten) relativ gering. Der Anteil an den Gesamtemissionen, die pro Jahr durch das HO-System hervorgerufen werden, beträgt lediglich 2,5 %. Für das Jahr 2030 wird auf Basis von Tremod ein Erwartungswert in Höhe von rund 55 Mio. t CO₂e für den Straßengüterverkehr prognostiziert (Kranke et al. 2011, S. 26). Demnach kann das HO-Lkw-System im Basisszenario dazu beitragen, eine Minderung von rund 4,0 % zu erzielen. Ohne Berücksichtigung der Lebenszyklusemissionen der Infrastruktur- und Fahrzeugkomponenten beträgt die Einsparung etwas mehr, nämlich rund 2,3 Mio. t CO₂e. Zur weiteren Veranschaulichung der Höhe der vier relevanten Berichtskategorien (1. Einmalaufwände Infrastruktur, 2. Instandhaltung/Verschleiß, 3. Mehraufwände Fahrzeugproduktion, 4. Nutzungsphase) dient Abbildung 75.

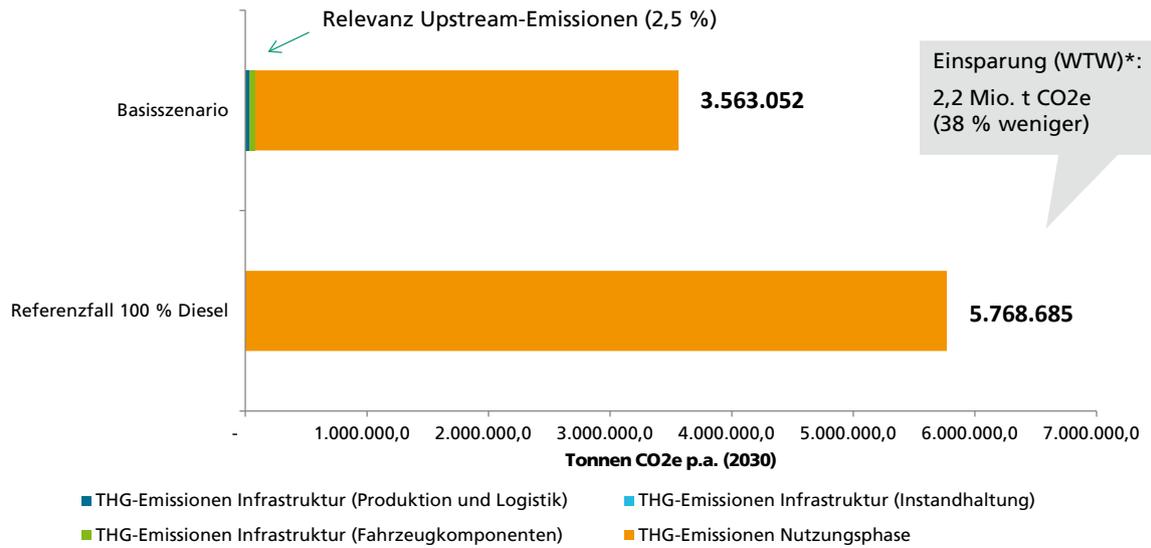


Abbildung 74: Vermiedene THG-Emissionen durch das HO-Lkw-System in 2030

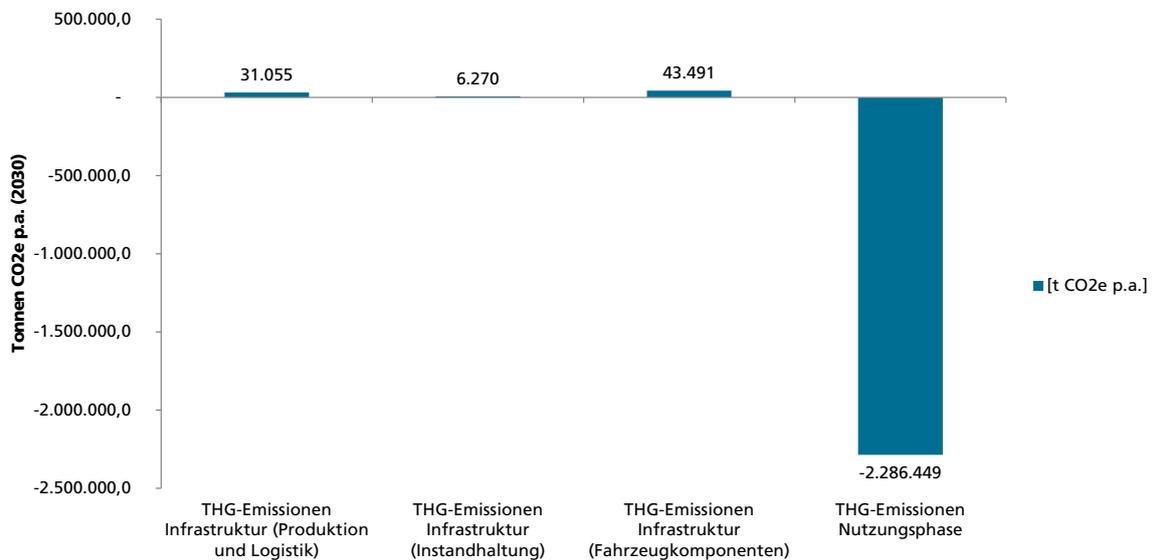


Abbildung 75: THG-Relevanz der Infrastruktur- und Fahrzeugkomponenten

Es lässt sich somit festhalten, dass die vorliegende Untersuchung zu den Klimaeffekten des HO-Lkw-Systems zu dem Schluss kommt, dass eine Realisierung des Systems aus Klimaschutzgesichtspunkten sinnvoll ist. Dabei wird die Höhe der CO₂e-Einsparung durch zwei Faktoren wesentlich beeinflusst:

6. Energieproduktionsszenario für Strom in 2030 und
7. elektrische Fahrleistungsanteile der Lkw.

Beide Aspekte werden in der Sensitivitätsbetrachtung weiter thematisiert.

6.3.4 Sensitivitätsbetrachtung

Zur näheren Beschreibung des Modellverhaltens sowie zur Plausibilitätsprüfung wird exemplarisch eine Sensitivitätsbetrachtung für zwei zentrale Aspekte vorgenommen.

Variation Fahrzeugtechnologie

Dem Basisszenario liegt ein Verkehrsszenario zugrunde, das definiert, dass ein HO-Lkw der Klasse Solo-Lkw > 12 t zGG im Rahmen einer durchschnittlichen Fahrt vom Start- bis zum Zielort rund 60 % im Dieselmodus und 40 % im Oberleitungsmodus fährt. Für SZM und LZ gilt analog: 35 % Dieselmodus und 65 % im Oberleitungsmodus. Aus technischer Sicht ist anstatt eines Diesel-HO-Lkw auch die Realisierung eines Batterie-HO-Lkw bis 2030 vorstellbar. Dies hätte den Vorteil, dass die Streckenanteile abseits der Autobahn und verfügbaren Oberleitungsinfrastruktur auch elektrisch absolviert werden können. So können weitere THG-Emissionen vermieden werden. Es wird angenommen, dass diese technische Variante tendenziell eher für die Fahrzeugklasse SZM/LZ ist als für Solo-Lkw > 12 t zGG geeignet ist. Denn der verfügbare Raum zur Platzierung einer ausreichend großen Batterie auf einem SZM/LZ-Fahrzeug ist vergleichsweise höher.

Wird eine Einzelparametervariation des Anteils der Batterie-HO-Lkw in der genannten Fahrzeugklasse (Fzg-Klasse) am Gesamtbestand HO-Lkw der Fzg-Klasse vorgenommen, ergibt sich der in Abbildung 76 abgebildete funktionale Zusammenhang zum relativen THG-Vorteil gegenüber vergleichbaren Diesel-Lkw (2030).

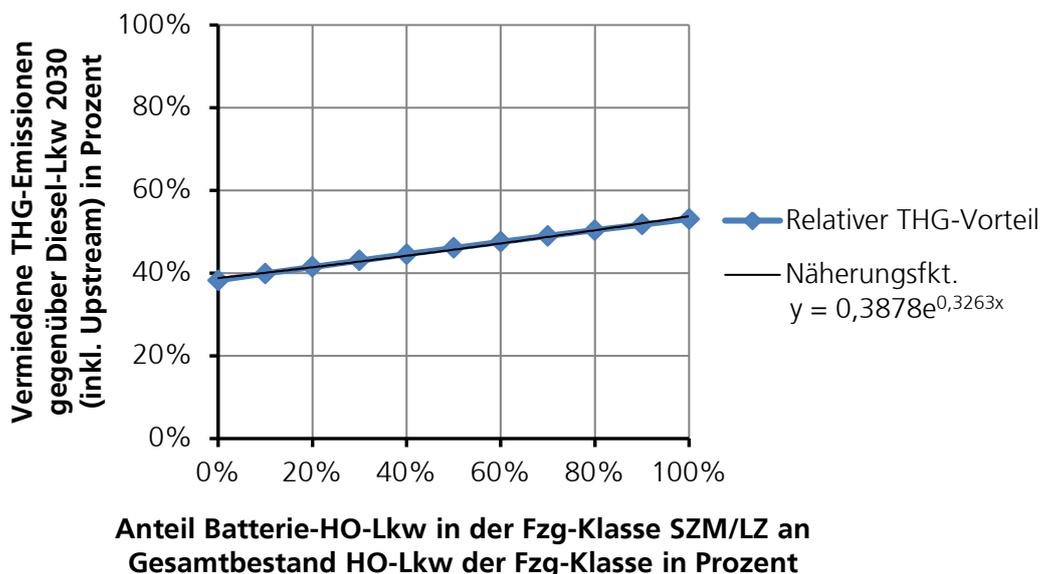


Abbildung 76: Parametervariation – Batterie-Hybride statt Diesel-Hybride

Demnach kann der relative Vorteil von rund 38 %, der im Basisszenario erreicht wird, durch Entwicklung und Verbreitung von Batterie-HO-Lkw auf bis zu rund 53 % erhöht

werden. In absoluten Zahlen entspricht dies einer zusätzlichen THG-Minderung von 856.000 t CO₂e pro Jahr (ab Ausbaustufe 2030).

Der funktionale Zusammenhang kann nicht als linear beschrieben werden, da der Verbrauch eines Batterie-HO-Lkw gegenüber einem Diesel-HO-Lkw als leicht höher angenommen wird. Dies wird mit dem zusätzlichen Batteriegewicht begründet, das im negativen Fall bis zu zwei Tonnen ausmachen kann. Zudem sind die Upstream-Emissionen für die Fahrzeugkomponenten beim Batterie-HO-Lkw relativ höher. Im Falle einer Modellierung von 100 % Batterie-HO-Lkw verschiebt sich das Verhältnis zwischen Upstream-Emissionen und Fahrzeug-Emissionen auf 6,5 % zu 93,5 % statt 2,5 % zu 97,5 %.

Variation Treibhausgase der Stromproduktion

Eine besondere Relevanz für den relativen THG-Vorteil des HO-Lkw-Systems gegenüber vergleichbarer Diesel-Technologie haben die Treibhausgase, die mit der Stromproduktion und -versorgung einhergehen. Bei gegebenen Verbrauchsfaktoren von rund 1,2 bis 1,6 Kilowattstunden Strom je Kilometer für einen Diesel-HO-Lkw im Oberleitungsfahrbetrieb wird die Höhe vermiedener Emissionen durch den Emissionsfaktor für Strom bestimmt. Im Basisszenario wird einer positiven Entwicklung gemäß dem Klimaschutzszenario 95 für das Jahr 2050 gefolgt. Dies entspricht einem CO₂e-Emissionsfaktor von rund 192 g CO₂e je kWh_{el} im Jahr 2030⁵⁹. Im Jahr 2015 liegt ein vergleichbarer Wert, der den Kraftwerksmix verschiedener Primärenergien sowie Energiewandlungs- und Bereitstellungsverluste berücksichtigt, bei rund 558 g CO₂e je kWh_{el}.⁶⁰ Hieraus folgt, dass in den nächsten fünfzehn Jahren die CO₂e-Effizienz des HO-Lkw sich mindestens um einen Faktor von 2,9 erhöht. Dies entspricht einer Verbesserung von 66 %. Wie in Abbildung 77 veranschaulicht ist, ist es allerdings bereits ausreichend, eine Verbesserung von rund 11 % zu erreichen, um einen relativen THG-Vorteil des HO-Lkw-Systems gegenüber der Diesel-Technologie zu erzielen. Denn im Basisszenario liegt die Nutzenschwelle (d. h. Break-Even-Point) zur Kompensation der Mehremissionen durch den Infrastrukturaufbau bereits bei rund 494 g CO₂e je kWh_{el}.

Vor dem Hintergrund definierter Ausbauziele für regenerative Energien bis 2030 und darüber hinaus erscheint der Stromemissionsfaktor prinzipiell kein kritisches Element zu sein. Dennoch gilt, je mehr erneuerbare Energien ausgebaut werden, desto höher sind die THG-Minderungspotentiale des HO-Lkw-Systems.

⁵⁹ eigene Berechnungen im Projekt durch Fraunhofer ISI

⁶⁰ Fritsche & Greß (2015): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2014 sowie Ausblicke auf 2015 und 2020, S. 4

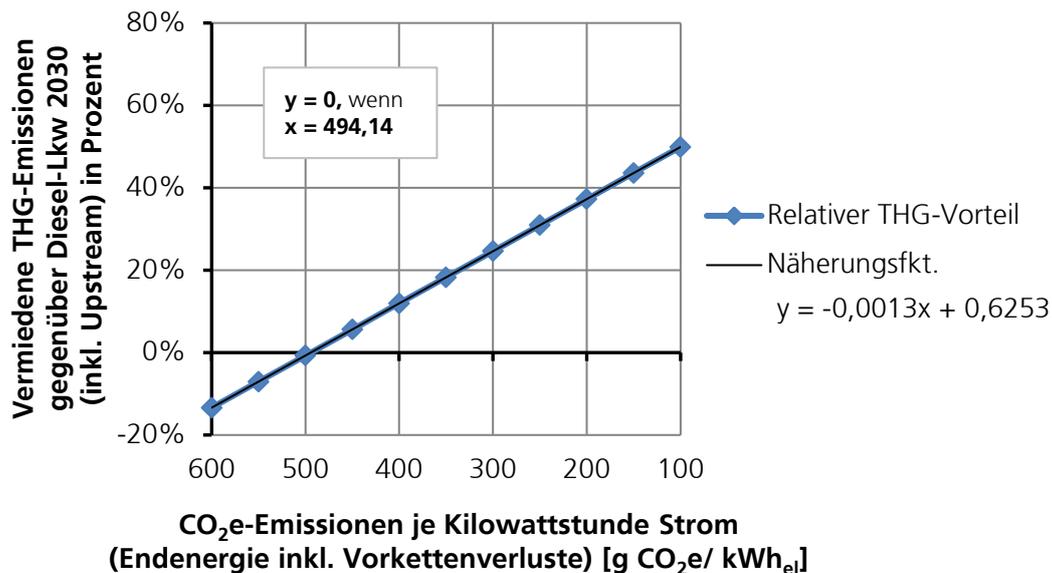


Abbildung 77: Parametervariation – THG-Emissionen der Stromproduktion

6.4 Diskussion und Ausblick

Zusammenfassung

Durch die Realisierung des Hybrid-Oberleitungssystems für Lkw und unter Betrachtung eines moderaten Nutzungsszenarios könnten in der vollen Ausbaustufe des Systems ab 2030 rund 2,2 Mio. t CO₂e pro Jahr gegenüber konventionellen Diesel-Lkw eingespart werden. Wird für den Güterverkehrssektor ein Erwartungswert von 55 t CO₂e für das Jahr 2030 angenommen (Knörr et al. 2012), entspricht dies in 2030 einer Einsparung von 4 %, die das HO-System bewirken kann.

Der durchschnittliche elektrische Fahranteil dabei beträgt 60 % für kleinere Lkw und 35 % für größere Lkw. Werden auch Nicht-Oberleitungsstreckenanteile, d. h. Wege abseits der Autobahnen, zu 100 % batterie-elektrisch bewältigt, könnten weitere THG-Emissionen in Höhe von rund 1,2 Mio. t CO₂e in 2030 eingespart werden (entspricht einer Verminderung von 6,2 %). Diese quantitative Darstellung gilt für eine Stromproduktion gemäß des Klimaschutzszenarios 95.

Beim direkten Vergleich der Alternativen Diesel-Lkw 2030 und HO-Lkw 2030 ergeben sich Umwelt- und Effizienzvorteile für den HO-Lkw in zweierlei Hinsicht. Einerseits ist der Wirkungsgrad der Wandlung von Endenergie in Nutzenergie beim HO-Lkw höher als beim Diesel-Lkw. Andererseits liegt die Nutzenschwelle (d. h. Break-Even-Point) zur Kompensation der Mehremissionen durch den Infrastrukturaufbau bereits bei rund 494 g CO₂e je kWh_{el} (Durchschnitt 2030). Vor dem Hintergrund definierter Ausbauziele für regenerati-

ve Energien bis 2030 und darüber hinaus erscheint das anzunehmende Energieversorgungsszenario kein kritischer Pfad zu sein. Folglich gilt für 2030:

Der HO-Lkw benötigt weniger Endenergie und verursacht fahrzeugseitig (TTW) als auch in der Energiebereitstellungskette (WTT) weniger CO₂e als der Diesel-Lkw.

Gegenüberstellung

Auch in Gerhardt et al. (2015) ist der Oberleitung-Lkw eine zentrale Technologie zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs. In dieser Studie wurde von einer weniger optimistischen Entwicklung der Effizienz des Dieselantriebs ausgegangen. Hier wird für 2030 ein durchschnittlicher Verbrauch von 0,213 l/km in der Klasse > 12 t zGG und von rund 0,25 l/km in der Klasse SZM modelliert (Gerhardt et al. 2015, S. 60). Werden diese Werte in dieser Studie für den Referenz-Diesel-Lkw in 2030 eingesetzt, würde das ausgewiesene THG-Minderungspotential noch größer ausfallen. Diese Studie bestätigt also prinzipiell die Ergebnisse von Gerhardt et al. (2015).

Nach Edel et al. (2014) nimmt der Referenz-Diesel-Lkw (Klasse > 12 t zGG) in 2030 einen Wert von rund 650 g CO₂e je km ein (Edel et al. 2014, S. 28). Im Rahmen dieser Untersuchung liegt der entsprechende Wert bei rund 612 g CO₂e je km. Würde also der Annahme von ENUBA-2 gefolgt werden, wäre die ermittelte THG-Einsparung ebenfalls höher. Diese Untersuchung bestätigt also auch die ENUBA-2-Ergebnisse.

Im Detail gibt es jedoch relevante Unterschiede, die bei einer fahrzeugbezogenen Gegenüberstellung dieser Ergebnisse und mit anderen Studien zu beachten sind. In ENUBA-2 wird z. B. von einer Energiedichte des Dieseldraftstoffs in Höhe von 9,926 kWh je Liter Diesel ausgegangen (Edel et al. 2014, S. 24). In dieser Untersuchung beträgt dieser Wert hingegen 9,86 kWh je Liter Diesel. Des Weiteren beträgt der Strombedarf des HO-Lkw in der Klasse > 12 t zGG bei ENUBA-2 im Jahr 2030 1,27 kWh/km. In dieser Untersuchung wird im Falle der Diesel-HO-Lkw Technologie ein Wert von 1,2 kWh/km bzw. im Falle der Batterie-HO-Lkw-Technologie ein Wert von 1,4 kWh/km angenommen.

Allgemein ist zu beachten, dass die Ergebnisse dieser Studie die Ergebnisse der zitierten Studien erweitern, da einerseits der Bilanzraum hinsichtlich der HO-Infrastruktur erweitert wurde. In ENUBA-2 werden lediglich die fahrzeugbezogenen materiellen Mehraufwände bewertet (Edel et al. 2014, S. 27), und in Gerhardt et al. (2015) werden die vorgelagerten THG-Emissionen gar nicht berücksichtigt. Andererseits wurde in dieser Studie erstmalig ein Verkehrsszenario für die HO-Lkw-Infrastruktur hinterlegt, sodass absolute THG-Minderungspotentiale kalkuliert werden konnten. Im Kontext der zu erwartenden Steigerung der CO₂e-Emissionen des Verkehrssektors in Deutschland kann die Einführung des HO-Lkw-Systems einen Zielbeitrag von 4,0 % liefern.

Ausblick

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden THG-Emissionen und Energiebedarf fokussiert. Nicht betrachtet wurden Potentiale hinsichtlich der Vermeidung von Luftschadstoffen oder Lärm. Hinsichtlich dieser Wirkungskategorien ist ein relativer Vorteil der HO-Lkw Technologie gegenüber der Diesel-Lkw Technologie zu erwarten. Überlegungen zur globalen Ressourcenverfügbarkeit und zur Wirkungskategorie Ressourcenabbau durch das HO-Lkw-System haben ebenfalls keinen Eingang in die Untersuchung gefunden.

Abschließend sei auch darauf verwiesen, dass die Emissionsfaktoren, die für regenerative Energieformen gemäß aktueller Datenbanken (z. B. Ecoinvent) anzusetzen sind, von einer hohen Unsicherheit gekennzeichnet sind. Grundlegend ist, dass es keinen Null-Emissionen-Strom gibt. Denn wie diese Studie zeigte, müssen vorgelagerte THG-Emissionen, die mit dem Ausbau regenerativer Energiequellen, der Entwicklung des Versorgungsnetzes sowie der Instandhaltung dieser technischen Systeme einhergehen, grundsätzlich berücksichtigt werden. Für eine Erhöhung der Genauigkeit der vollzogenen Bewertung ist es daher wichtig, sich mit den Emissionsfaktoren des Stromsektors im Kontext des Jahres 2030 näher zu beschäftigen.

7 Energiewirtschaftliche Auswirkungen der HO-Lkw

*Hauptbearbeiter/innen: M. Wietschel, P. Plötz, B. Boßmann,
M. Michaelis (Fraunhofer ISI)*

7.1 Einleitung

Eine starke Verbreitung von Oberleitungs-Lkw hätte verschiedene energiewirtschaftliche Auswirkungen. Die folgenden Analysen beschränken sich auf direkte Auswirkungen: (1) der Umfang (Gesamtstromnachfrage), (2) den Zeitverlauf über den Tag (Lastgang) sowie (3) den Ort (regionale Laständerung) der zusätzlichen Stromnachfrage. Bevor auf die einzelnen Auswirkungen eingegangen wird, wird zuerst das energiewirtschaftliche Szenario, was zur Bewertung benötigt wird, festgelegt.

7.2 Energiewirtschaftliche Szenario

Im Rahmen der Energiewende und einer Energiepolitik zur Erreichung von Klimaschutzziele haben Szenarien eine große Bedeutung. Energieszenarien versuchen, mögliche alternative Entwicklungen des Energiesektors zu skizzieren und damit eine Handlungsgrundlage für Entscheidungen zu schaffen. Dabei liefern Energieszenarien i.d.R. sowohl eine Prognose für die Entwicklung der Energieerzeugung und -nachfrage als auch eine Abschätzung zur Weiterentwicklung von Energieträgerpreisen und Treibhausgasemissionen.

Für eine Analyse der energiewirtschaftlichen Auswirkungen der Einführung von HO-Lkw sind konsistente Rahmendaten über die Zeit, die Nachfrageentwicklung anderer Stromnachfrager sowie die Entwicklung des Kraftwerkparcs erforderlich. Da die Erstellung eines konsistenten Entwicklungspfades des Energiesektors aufgrund von zur Verfügung stehender Ressourcen in dieser Studie nicht realisiert werden kann, wird auf ein bestehendes und anerkanntes Energieszenario inklusive dessen Rahmendaten zurückgegriffen. Aufgrund der Aktualität, der veröffentlichten Detailtiefe und dem Umstand, dass das Fraunhofer ISI an der Erstellung der Szenarien beteiligt war und die Daten für die Analysen damit auch in dem notwendigen Umfang zur Verfügung stehen, wird auf die sogenannten Klimaschuttszenarien zurückgegriffen (siehe BMUB 2015). Das Klimaschuttszenario 2050 wurde 2015 (zweite Modellierungsrunde) veröffentlicht. Es wurde in Zusammenarbeit vom Öko-Institut und Fraunhofer ISI entwickelt und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Auftrag gegeben. Der betrachtete Zeithorizont der Studie ist 2010 bis 2050. Es ist aufgeteilt in drei Szenarien: Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS), das Klimaschuttszenario 80 (KS80) und das Klimaschuttszenario 95 (KS95) (zweite Modellierungsrunde).

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS) werden die Maßnahmen berücksichtigt, die bis Ende Oktober des Jahres 2012 ergriffen wurden. Es spiegelt somit den aktuellen Stand

der energie- und Klimaschutzpolitischen Rahmenbedingungen wider. Auf dieser Basis wird die Entwicklung bis zum Jahre 2050 fortgeschrieben. Die energie- und Klimaschutzpolitischen Ziele der Bundesregierung werden in diesem Szenario weitgehend verfehlt.

Das Klimaschutzszenario 80 beschreibt ein Szenario, in welchem die festgelegten energie- und Klimaschutzpolitischen Ziele für Treibhausgasemissionen, Energieeffizienz und erneuerbare Energien erreicht werden, wobei für das Treibhausgasziel 80-%-Reduzierung gegenüber 1990 im Jahr 2050 angenommen werden. Im Klimaschutzszenario 95 werden die Ziele ebenfalls erreicht, allerdings werden bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990 gemindert (BMUB 2015).

Die Szenarien unterscheiden sich vor allem in der Entwicklung der Strompreise sowie in der Entwicklung der CO₂-Zertifikatspreise. Einige Rahmendaten wie der Ölpreis, das BIP und die Bevölkerung, sind in allen drei Szenarien gleich (BMUB 2015).

7.3 Auswirkungen auf die Stromnachfrage

Eine relevante Fragestellung für die energiewirtschaftlichen Auswirkungen durch HO-Lkw ist die Höhe der Stromnachfrageentwicklung. Dazu werden drei Varianten des Oberleitungsausbaus und Zeitpunkte verglichen:

- Markthochlauf bis 2030 bei 1.000 km Oberleitungsausbau
- Markthochlauf bis 2030 bei 4.000 km Oberleitungsausbau
- Langfristige Maximalperspektive: Alle Fahrzeuge über 12 t und Oberleitungsausbau auf dem gesamten Autobahnnetz (ca. 13.000 km)

Abbildung 78 zeigt die zusätzliche Stromnachfrage in TWh durch HO-Lkw in den genannten Varianten. In den Markthochlaufvarianten liegt die zusätzliche Stromnachfrage durch HO-Lkw im Bereich 0 – 8 TWh/a. Zum Vergleich kann die erwartete Stromnachfrage von 6 Mio. Elektroautos herangezogen werden (Ziel der Bundesregierung für 2030), die ca. 14 TWh/a verbrauchen würden (bei angenommenem Verbrauch von 0,16 kWh/km und 14.300 km Jahresfahrleistung). Auch wenn die Zahl der SZM klein im Vergleich zu den 45 Mio. Pkw in Deutschland ist, kann durch HO-Lkw doch eine nennenswerte zusätzliche Stromnachfrage entstehen.

Wenn man die potentielle Stromnachfrage in Relation setzt zu der prognostizierten Stromnachfrage aus den Klimaschutzszenarien (siehe zu den Szenarien Abschnitt 5.2.1) die für das Jahr 2030 eine Stromnachfrage von 501 TWh (im KS95-Szenario) und 593 TWh (im AMS-Szenario) nennen, dann bedeuten 8 TWh eine Stromnachfragesteigerung von 1,3 bis 1,6 % und 36 TWh eine Steigerung von 6 bis 7 %. Damit stellt sich die Forschungsfrage, wie gerade bei einer höheren Marktpenetration von HO-Lkw die Stromnachfrage am sinnvollsten im Einklang mit energie- und klimapolitischen Zielen gedeckt werden sollte.

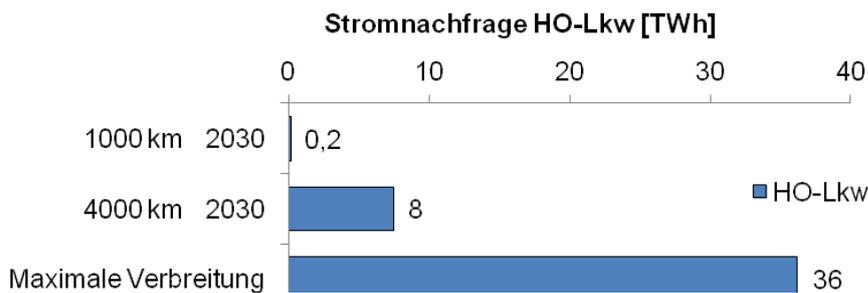


Abbildung 78: Stromnachfrage durch HO-Lkw in Abhängigkeit vom Ausbau der Oberleitungen bzw. der Verbreitung von HO-Lkw

7.4 Auswirkungen von HO-Lkw auf die Stromlastganglinie

Energiewirtschaftlich relevant ist aber nicht nur die gesamte Nachfrage, sondern auch die stündliche Verteilung der durch HO-Lkw nachgefragten Stromnachfrage. Die Frage ist, ob die HO-Lkw zu einer relevanten Verschiebung der Lastganglinie führen und welchen Einfluss dies auf den künftigen Kraftwerkspark hat.

Zur Ermittlung der Lastganglinie der HO-Lkw (stündliche Stromnachfrage) an Werktagen wird folgende Vorgehensweise gewählt:

- Extraktion aller Werktagsfahrten aus der KiD2010, die von SZM mit Start und Endpunkt in Deutschland durchgeführt werden, die länger als 50 km, 100 km bzw. 150 km sind. Für alle Fahrten sind Start- und Endzeitpunkt sowie die Fahrtlänge angegeben.
- Gleichmäßige Verteilung der Fahrleistung auf die Zeitscheiben zwischen Start- und Endzeitpunkt der Fahrt.
- Aufsummierung der Fahrleistung je Zeitscheibe und Normierung auf die gesamte Fahrleistung aller Zeitscheiben.

SZM, deren Fahrten nicht in Deutschland starten und enden, sind ausgenommen, da sie zumindest für den Beginn des Markthochlaufes kaum infrage kommen dürften. Sie könnten aber einen höheren Fahranteil in der Nacht haben. In der Abbildung 79 sind die aus obigem Vorgehen resultierenden Lastprofile dargestellt. Man erkennt einen deutlichen Unterschied der Anteile der Fahrleistungen am Tag, die deutlich höher sind im Vergleich zu den Fahranteilen in der Nacht. Für die Fahrten über 150 km Länge verläuft der Lastgang insgesamt etwas flacher. Transitfahrten, die hier ja ausgenommen sind, könnten evtl. einen höheren Fahranteil in der Nacht haben.

Die Lastprofile wurden anhand eines Vergleiches zu den Analysen in (Harder 2014) überprüft. Hier wurden übermittelten Verkehrsdaten der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) an Zählstellen ausgewertet für Lkw > 3,5 t mit Anhänger und Sattelzüge ohne Differenzierung, ob es sich nur um Deutschlandfahrten handelt oder um Transitverkehr. Somit unterscheiden sich die Datengrundlage sowie die erfassten Fahrzeuge von denen der in der vorliegenden Studie. Im Ergebnis wird in (Harder 2014) ebenfalls ein deutlich höherer

Lastgang tagsüber gesehen, wenn auch der Unterschied zwischen Tag und Nacht nicht ganz so deutlich ist wie in der vorliegenden Studie. Weiterhin wird ein etwas deutlicherer Nachmittagspeak gesehen. In (Harder 2014) wurde auch der Lastgang über das ganze Jahr analysiert. Fazit dabei ist, dass es an deutschlandweiten Feiertagen sowie im sogenannten „Sommerloch“ im August zu einem geringeren Lastgang kommt Harder (2014). Insgesamt kann der Jahresverlauf der Lastganglinie allerdings als recht stabil über das Jahr angesehen werden. Zwischen den Wochentagen ergibt sich insbesondere an den Wochenenden ein starker Einbruch der Lastganglinie (u. a. wegen der eingeschränkten Fahrerlaubnis und dem unterschiedlich Bedarf an Güteranlieferungen). So geht er an Samstagen auf ca. ein Drittel zurück und an Sonntagen fast auf null (siehe Harder 2014).

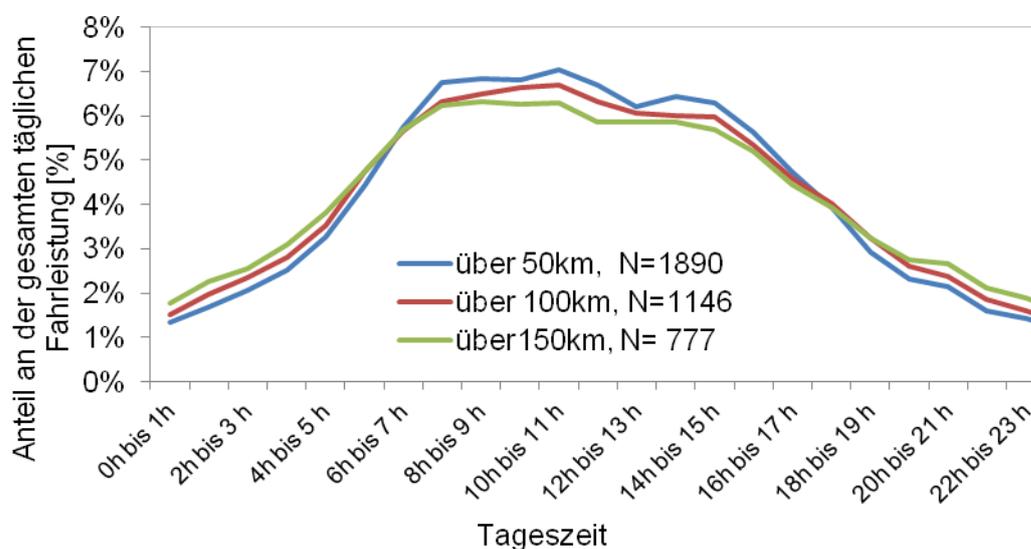


Abbildung 79: Stündliche Verteilung der Fahrleistung von SZM in Deutschland (nur in-nerdeutsche Verkehre) an einem Werktag

Für die vorliegende Studie wird zur Analyse der energiewirtschaftlichen Auswirkungen auf die Lastganglinie mit Fahrten größer 150 km zurückgegriffen. Dies ist erstens ein Ergebnis des zweiten MKS-Fachworkshops mit Experten (Wietschel et al. 2016b), die die Lastganglinie mit 50 km Fahrten als zu extrem in ihrer Differenzierung eingestuft haben, und zweitens gibt es eine größere Übereinstimmung mit den Lastganglinienanalysen in (Harder 2014).

Die Analysen zum Einfluss der HO-Lkw auf den Stromlastgang werden mit dem Modell eLoad (energy LOad curve ADjustment tool) berechnet. eLOAD ist ein Bottom-up-Simulationsmodell mit integrierten Optimierungselementen. Es kommt für die langfristige Projektion stündlicher nationaler Systemlastkurven sowie für die Abschätzung anwendungsspezifischer Lastmanagement(LM)-Potentiale zum Einsatz.

Für die Projektion von Systemlastkurven in eLOAD wird die Methode der partiellen Dekomposition verwendet, um die Auswirkungen struktureller Änderungen in der jährlichen

Stromnachfrage auf die stundenscharfe Systemlastkurve eines Jahres zu berücksichtigen. Dabei wird basierend auf einer historischen Lastkurve die Gewichtung der Lastverläufe einzelner Anwendungen angepasst, die eine überdurchschnittliche Änderung ihrer Stromnachfrage, z. B. Wärmepumpen, über den Projektionszeitraum aufweisen oder einen neuen Verbraucher darstellen, z. B. strombasierte Pkw, und somit starkes Gewicht auf die Änderung der gesamten Stromnachfrage ausüben. In Abbildung 80 ist die Vorgehensweise am Beispiel der Nachtspeicherheizung, deren Bedeutung abnimmt, und der Wärmepumpe, die als neue Nachfrage hereinkommt, illustriert. Von der Gesamtlastganglinie wird die Nachtspeicherheizung abgezogen und die Wärmepumpe mit ihrem Tagesprofil hinzugenommen und aus der Differenzbetrachtung die neue Gesamtlastganglinie konzipiert. Eine ausführliche Beschreibung des Modells findet sich in (Boßmann 2015)

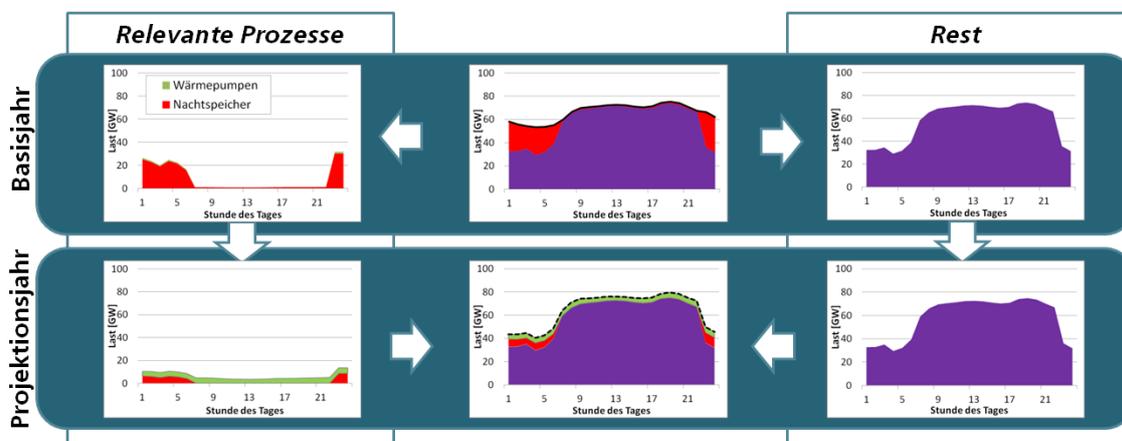


Abbildung 80: Illustration der Dekompositionsmethodik zur Analyse der Lastgänge

Für drei Stromnachfrageszenarien (8, 20 und 40 TWh) wurde die stündliche Stromnachfrageentwicklung an einem Werktag berechnet (siehe Abbildung 81). Die HO-Lkw heben das Niveau der Lastkurve tagsüber substantiell an. Als Faustformel lässt sich festhalten, dass 4 TWh zusätzliche Last von HO-Lkw zu einem 1 GW Lastzuwachs in den Mittagsstunden führt. Dies ist gerade im Sommer wegen der gleichzeitig hohen PV-Erzeugung an sonnigen Tagen gut vereinbar. Dies ist für den Süden wegen den dort hohen installierten PV-Leistungen relevant. Im Norden von Deutschland mit dem dort voranschreitenden Ausbau der Windkraftanlagen ist dies aber eher etwas kritisch zu sehen. Der Trend zu immer größeren Nabenhöhen bei Windkraftanlagen sowie immer mehr Off-Shore-Anlagen führt dazu, dass mehr Strom in der Nacht als am Tag durch Windkraft erzeugt wird.

Betrachtet man die Veränderung der gesamten Lastganglinie in Deutschland in der Summe für das unterstellte Szenario mit 8 TWh zusätzlicher Nachfrage durch HO-Lkw, ergibt sich das in Abbildung 82 dargestellte Resultat. Der Einfluss der HO-Lkw auf die Entwicklung der absoluten Lastspitzen in Deutschland ist eher begrenzt. Dies liegt daran, dass die HO-Lkw nur eingeschränkt zum dem Winterabend-Peak, an dem in Deutschland im Jahr üblicherweise die höchsten Lastspitzen auftreten, beiträgt.

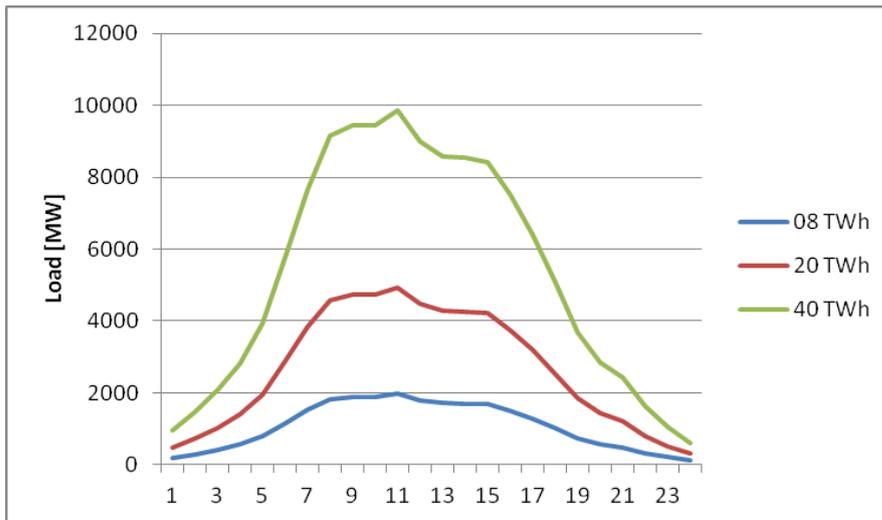


Abbildung 81: Lastprofil von SZM in Deutschland (nur innerdeutsche Verkehre) an einem Werktag für drei Stromnachfrageszenarien

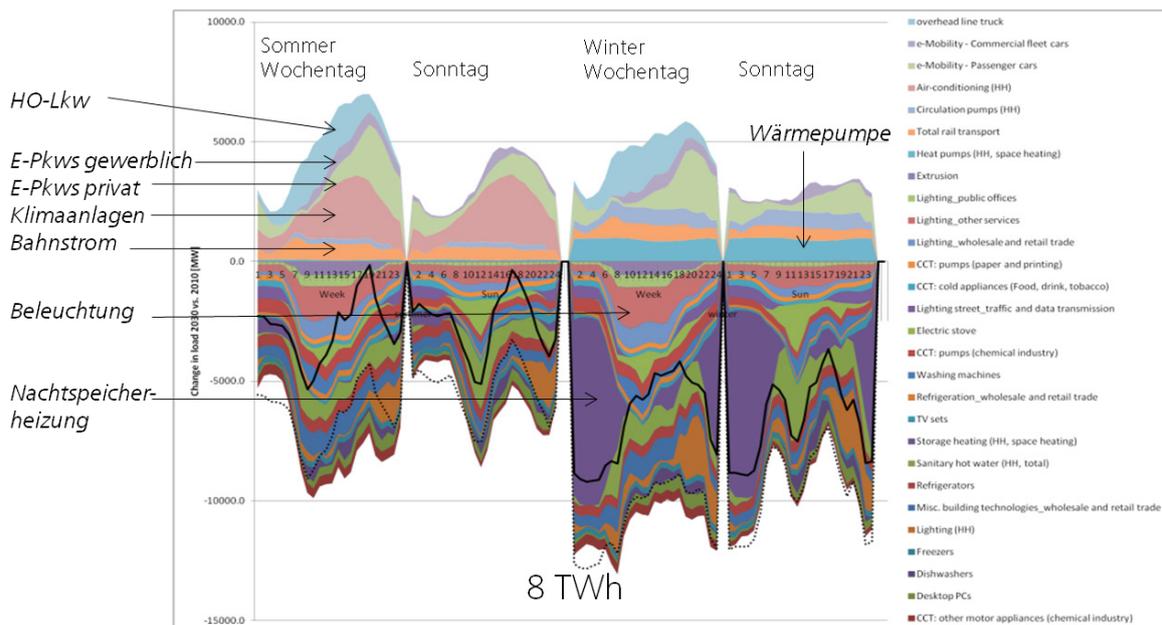


Abbildung 82: Veränderung der Last über alle Prozesse (Differenzbetrachtung 2030 vs. 2010) in Deutschland

Die zusätzliche Nachfrage durch HO-Lkw kompensiert Effizienzgewinne, die tagsüber auftreten (ICT, weiße Ware, Industrieprozesse). Deshalb kommt es zu einer begrenzten zusätzlichen Systembelastung durch HO-Lkw. Die zusätzliche Nachfrage liegt (zeitlich) vor dem Ladepeak der Elektro-Pkw (E-Pkw), wenn bei diesen ein Laden nach dem letzten Weg unterstellt wird.

Was in der Studie nicht betrachtet wird, sind autonom fahrende Lkw, die künftig gegebenenfalls in größerer Stückzahl fahren könnten. Als großer Vorteil dieser autonom fahrenden

den Lkw wird gesehen, dass man dann nachts auf leeren BAB ungestört die Langstrecke abwickeln kann. Dies könnte zu einer Win-Win-Situation führen, da

- diese Lkw nachts planbar ohne Stau elektrisch fahren können,
- keine teuren Fahrer bezahlt werden müssen (Gewinn aus Sicht der Spedition),
- die BAB tagsüber von Lkw entlastet werden und folglich weniger Staus und Risiken für Pkw entstehen.
- die Stromnachfrage von HO-Lkw nachts erfolgt, d. h. anti-zyklisch zur Ganglinie (bleibt aber unflexibel).

Zusammenfassend stellt eine nennenswerte Marktdurchdringung von HO-Lkw energie-wirtschaftlich eine Herausforderung dar, denn diese zusätzliche Last ist nicht verschieb-bar. Für eine langfristige Verbreitung müssten die Integration in ein zukünftiges Energie-system daher weiter untersucht werden. Gerade auch der mögliche Einfluss von autonomem Fahren bedarf einer weiteren Untersuchung.

7.5 Regionale Stromnachfrage: Auswirkungen auf die Stromnetze

Die zusätzliche Stromnachfrage durch HO-Lkw entsteht im Gegensatz zur zusätzlichen Nachfrage von bspw. Elektro-Pkw nur an Autobahnen, sodass je nach Ausbau und Belastung lokal eine deutliche Lastzunahme erfolgen könnte. Diese regionale Verteilung und Lastzunahme wird im Folgenden genauer untersucht.

Für die Analyse der lokalen Nachfrageänderung müssen Annahmen zum Ort des Ausbaus der Autobahnen mit Oberleitungen getroffen werden. Dafür wird folgendes Vorgehen gewählt:

- Nur innerdeutsche BAB-Strecken werden betrachtet (keine Grenznahe).
- Es wird mit durchgehenden Strecken höchster Lkw-Belastung begonnen.
- Anschließend werden Abschnitte mit nächsthöherer Lkw-Belastung ausgebaut.
- Diese Abschnitte werden zu vollen Strecken verbunden und einzelne isolierte Abschnitte entfernt.

Als Hintergrund für dieses Vorgehen zeigt die Lkw-Belastung auf deutschen BAB-Abschnitten. Im linken Teil der Abbildung ist die Belastung durch alle Lkw mit über 3,5 t zGG auf deutschen BAB dargestellt, im mittleren nur für SZM. Da im Markthochlaufmodell angenommen wird, dass erst einmal nur in Deutschland Oberleitungen ausgebaut werden, sind nur Fahrten von SZM relevant, die in Deutschland starten und enden. Die rechte Grafik in Abbildung 83 zeigt daher die Belastung durch SZM mit nur innerdeutschen Fahrten. Die BAB-Abschnitte, die entsprechend zuerst ausgebaut werden sollten, sind in Abbildung 84 gezeigt.

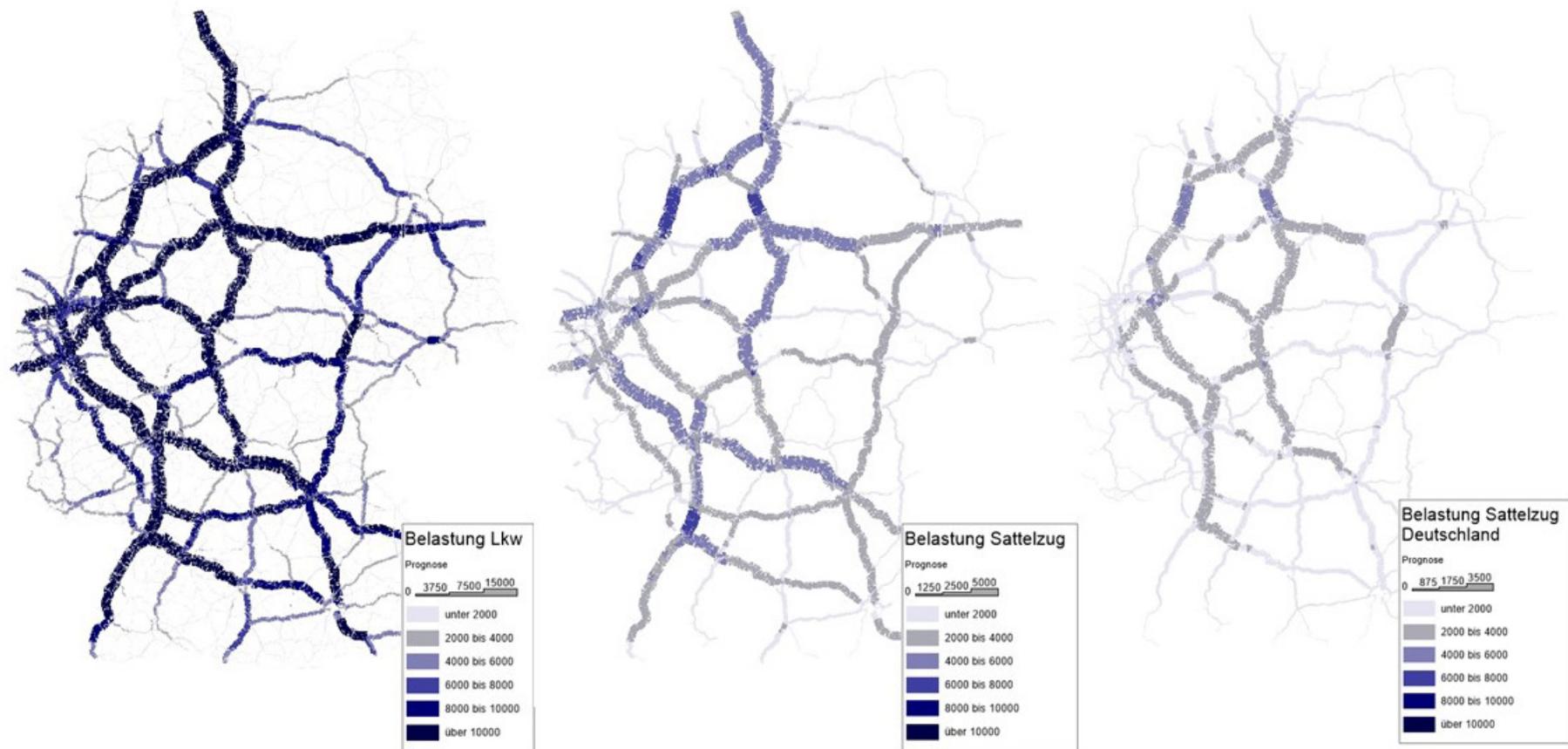


Abbildung 83: Energiewirtschaftliche Auswirkungen HO-Lkw

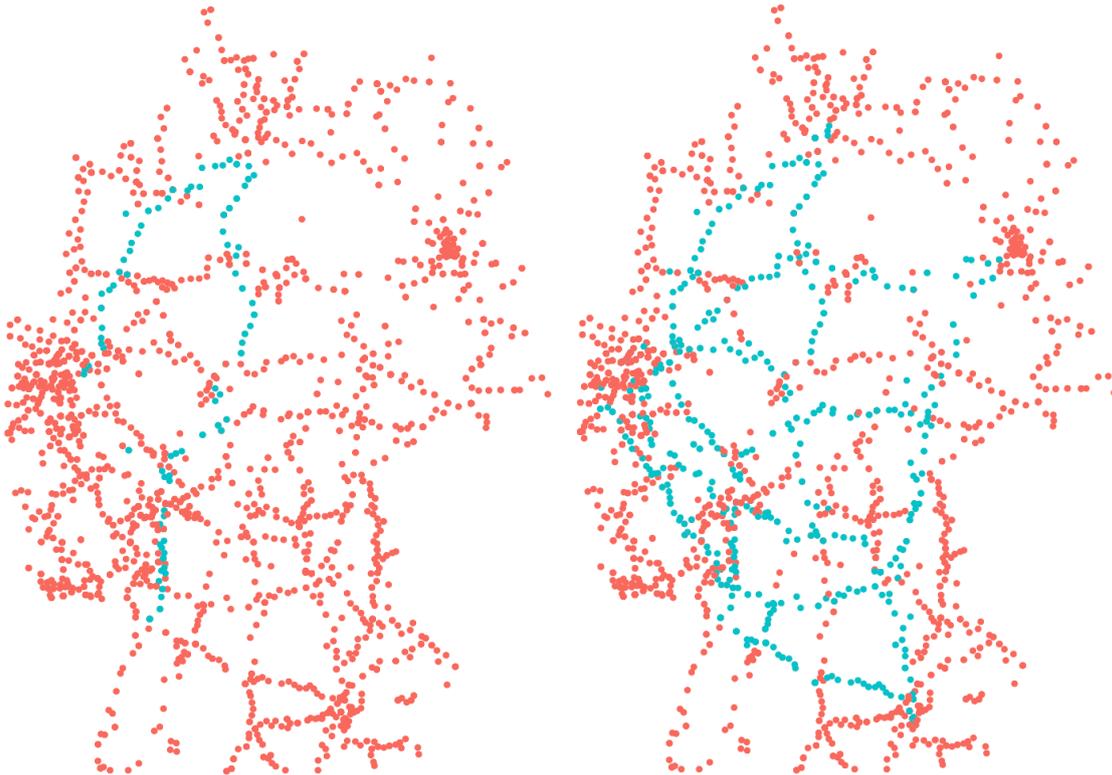


Abbildung 84: Angenommener Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur (grüne Punkte) entlang deutscher BAB (alle Punkte). Links: Ausbau der ersten 1.000 km; Rechts: Ausbau der ersten 4.000 km

Die zusätzliche Stromnachfrage in GWh wird anhand der spezifischen Energieverbräuche und der gesamten Jahresfahrleistung aller HO-Lkw berechnet und gemäß der lokalen Lkw-Belastung auf den individuellen BAB-Abschnitt umgelegt. Zur besseren Veranschaulichung und dem Vergleich mit einer Referenzentwicklung erfolgt eine Aggregation auf Landkreise und kreisfreie Städte (NUTS-3⁶¹).

Die zusätzliche Stromnachfrage in GWh allein sagt wenig über die Belastung der lokalen Energienetze aus. Wichtiger ist die relative Änderung gegenüber einer Referenzentwicklung. Da sich die Bevölkerung und Stromnachfrage in einigen Landkreisen bis 2030 deutlich verändern werden, wird als Referenz nicht der Status quo verwendet, sondern die erwartete Entwicklung bis 2030 auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte. Die Bestimmung der lokalen Referenznachfrage erfolgt hierbei auf Basis des Netzentwicklungsplanes mit einer Umrechnung der gesamtdeutschen Prognose des Modells FORECAST auf die Landkreise.

⁶¹ NUTS (französisch Nomenclature des unités territoriales statistiques) bezeichnet eine hierarchische Systematik zur eindeutigen Identifizierung und Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten der amtlichen Statistik. NUTS-3-Ebene mit 402 Regionen in Deutschland entspricht der Kreisebene (Landkreise/Kreise und kreisfreie Städte).

Das Modell FORECAST ist ein Bottom-up-Modell, in dem die Energienachfrage der Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr detailliert und Technologie-scharf abgebildet und die zukünftige Nachfrage modelliert wird. Dafür werden Aktivitätsgrößen ermittelt, die direkt mit dem Energieverbrauch korrelieren, und Prognosen dieser Aktivitätsgrößen ermöglichen so eine Projektion des Energieverbrauchs. In einem zweiten Schritt wird die Entwicklung der Technikstruktur modelliert, welche direkte Auswirkungen auf den Energieverbrauch zeigt. Dieser technologische Wandel findet im Modell über die Diffusion von Effizienztechnologien und -maßnahmen statt (Matthes et al. 2013). Die so bestimmte zukünftige gesamtdeutsche Stromnachfrage wird auf die Landkreise und kreisfreien Städte umgelegt. Dabei wird die lokale Änderung der Bevölkerung und Haushaltsstruktur berücksichtigt (vgl. BBSR 2012). Weitere Details und eine Beschreibung des Modells FORECAST finden sich unter <http://www.forecast-model.eu/forecast-en/content/methodology.php> sowie bspw. in Elstrand (2016).

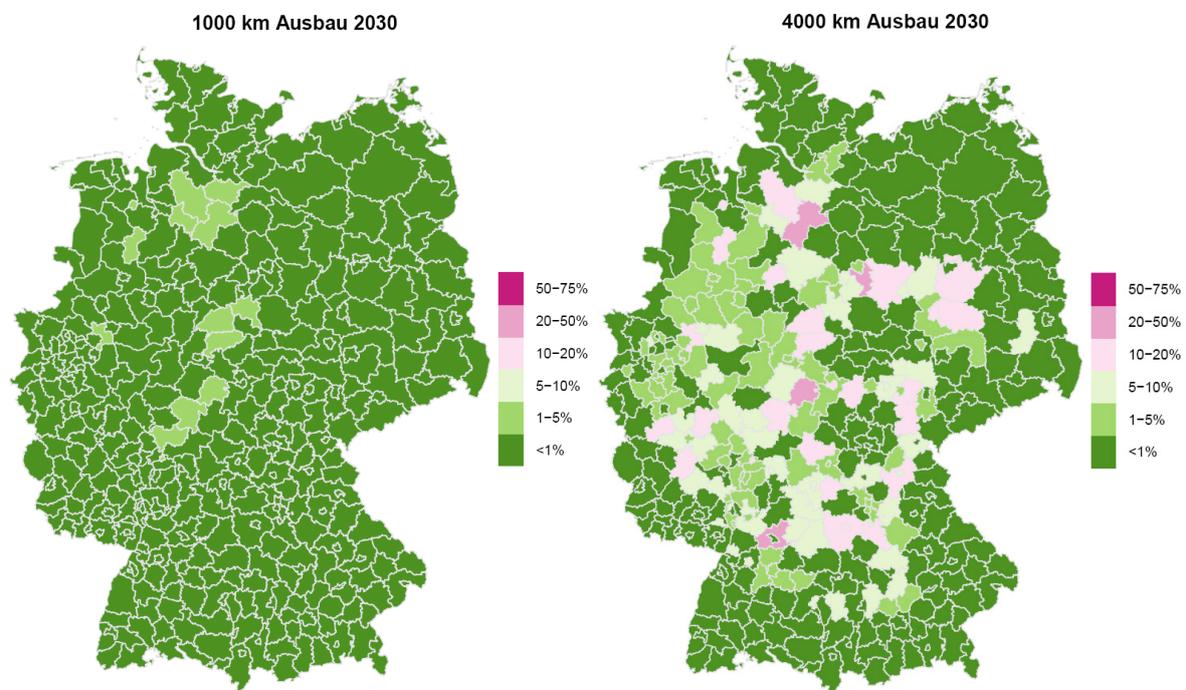


Abbildung 85: Relative Änderung der lokalen Stromnachfrage gegenüber der Referenzentwicklung 2030

Abbildung 85 zeigt die relative Änderung in den oben beschriebenen Varianten: links: Marktdiffusion von HO-Lkw bei 1.000 km Oberleitungsausbau; rechts: Marktdiffusion von HO-Lkw bei 4.000 km Oberleitungsausbau. Bei einem Ausbau von 1.000 km (entsprechen 56.000 HO-Lkw im Bestand und ca. 0,2 TWh/a) ergeben sich nur leichte Erhöhungen der Stromnachfrage von maximal 5 % (in Soltau-Fallingbommel). In den meisten Landkreisen liegen Änderungen im Bereich von 1 bis 3 % (Göttingen, Northeim, Oldenburg, Rotenburg (Wümme), Vogelsbergkreis, Vechta, Hersfeld-Rotenburg, Goslar, Harburg) oder noch geringer. Bei stärkerem Ausbau von 4.000 km Oberleitung (entsprechen 66.000 HO-Lkw im Bestand und ca. 8 TWh/a) erhöht sich die lokale Stromnachfrage in einigen Landkrei-

sen auf 20 bis 30 % (Helmstedt, Soltau-Fallingb., Hersfeld-Rotenburg, Heilbronn, Kitzingen) sowie in 27 weiteren Landkreisen auf 10 bis 20 %. Man erkennt, dass die relative Zunahme am größten in Landkreisen ausfällt, in denen vergleichsweise wenig Strom nachgefragt wird, aber eine stark befahrene BAB verläuft oder sogar zwei BAB sich kreuzen.

Die größtmögliche Belastung wäre in folgendem Szenario maximalen Ausbaus zu erwarten: Alle Lkw > 12 t seien HO-Lkw und alle Autobahnen seien mit Oberleitung ausgestattet. Im Ergebnis führte ein solcher Ausbau der gesamten Autobahnen in ländlichen Regionen zu teilweise deutlich erhöhter Last (vgl. Abbildung 86). Diese Variante stellt jedoch ein Extremszenario für eine sehr langfristige Entwicklung dar und ist gesondert zu betrachten.

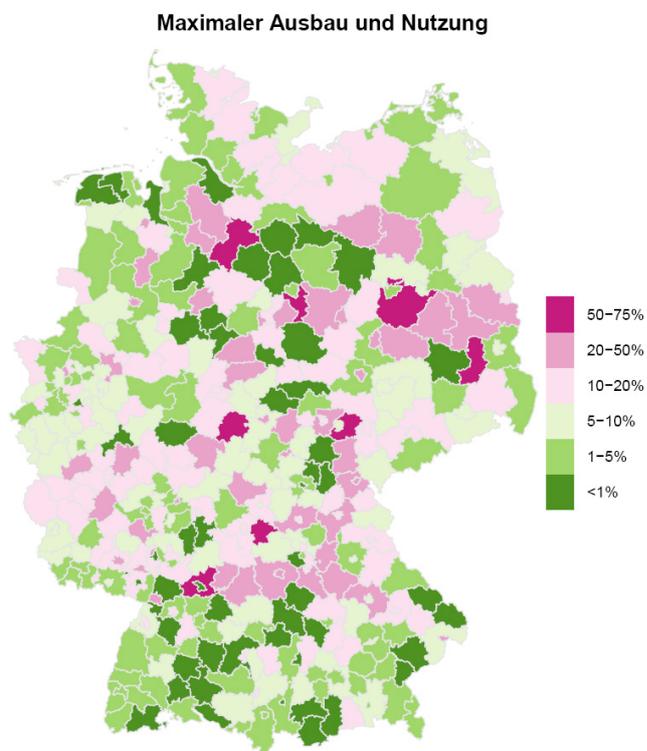


Abbildung 86: Relative Änderung der lokalen Stromnachfrage gegenüber der Referenzentwicklung bei sehr starker Nutzung

Neben der relativen Zunahme der Stromnachfrage ist es entscheidend, ob die erhöhte Nachfrage zu Netzproblemen führt. In den ersten beiden realistischen Varianten zeigt sich nur eine leichte Erhöhung der lokalen Last. Aufgrund der erwarteten Lastganglinie von HO-Lkw würde diese eher über Tag eintreten und angesichts des erwarteten Ausbaus von Photovoltaik(PV)-Anlagen gerade auch im ländlichen Raum, häufig mit einem Mittagspeak in der PV-Einspeisung zusammenfallen. Aus Sicht der Netzbetreiber entstehen lokale Probleme eher durch zu hohe PV-Einspeisung, sodass eine zusätzliche Last durch HO-Lkw diese Probleme eher dämpfen als verschärfen würde. Für ein Szenario mit langfristig sehr starkem Ausbau könnten aber lokal deutlich erhöhte Lasten auftreten, sodass

hier für präzisere Aussagen weitere Arbeiten auch unter Berücksichtigung lokaler Netzstrukturen erforderlich scheinen.

In Summe lässt sich folgendes festhalten:

- HO-Lkw können je nach Ausbau-Szenario eine nennenswerte Steigerung der Stromnachfrage bedeuten,
- im Jahr 2030 bei ambitioniertem Ausbau insgesamt im Bereich weniger Prozente Steigerung der Nachfrage Deutschland,
- nennenswerte zusätzliche Lasten entstehen in ländlichen Regionen mit Autobahnkreuzen, scheinen aber in realistischen Ausbau-Szenarien tragbar.

7.6 Zusammenfassung und weitere Forschungsfragen

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Einfluss der HO-Lkw ab einer gewissen Marktdurchdringung energiewirtschaftlich relevant ist. Dies trifft auf die gesamte Stromnachfragemenge zu (die je nach Szenario um bis zu 7 % steigen kann). Weiterhin ist die Nachfrage weitgehend unflexibel, was das Energiesystem vor Herausforderungen stellt, weil dies zu neuem Flexibilitätsbedarf führt (mehr andere verlagerbare Lasten, neue Speicher, zusätzlicher Netzausbau). Der Lastgang der HO-Lkw ist ungleichmäßig: mit einer deutlich stärkeren Nachfrage tagsüber als nachts und einer sehr deutlich stärkeren Nachfrage an Werktagen als an den Wochenenden. Dies führt zu weiteren Herausforderungen der Strombereitstellung sowie Anforderungen an die Flexibilität des Stromsystems. Gerade der besonders hohe Einfluss auf die Lastganglinie tagsüber an Werktagen deckt sich mit dem künftig erwarteten PV-Ausbau, aber nur bedingt mit dem künftig erwarteten Windkraftausbau.

In der regionalen Verteilung entsteht zusätzliche Nachfrage durch HO-Lkw entlang der ausgebauten Autobahnabschnitte. Nennenswerte relative Änderungen gegenüber der prognostizierten lokalen Stromnachfrage können sich an Autobahnkreuzen im ländlichen Raum ergeben. Allerdings bedeutet die zusätzliche Last durch HO-Lkw in diesen Gebieten eher eine Entlastung der Verteilnetze, da diese in Zukunft häufiger mit hoher Einspeisung durch erneuerbare Energien belastet sein werden.

In Anbetracht der Ergebnisse sollte der künftige Forschungsschwerpunkt darauf liegen, in Systemmodellen die energiewirtschaftliche Implikation der HO-Lkw auf das gesamte Erzeugungssystem näher zu untersuchen. Dabei sind Rückkopplungen auf das restliche Energiesystem sowie die Auswirkungen der nicht-verschiebbaren Last durch HO-Lkw besonders relevante Felder. Darüber hinaus könnte der Einsatz anderer alternativer Kraftstoffe wie bspw. Wasserstoff in einer Systembetrachtung zusätzliche Vorteile für diese Kraftstoffe bieten, da sie auch in anderen Bereichen wie der chemischen Industrie eingesetzt werden können.

8 Auswirkungen für die Hersteller und Logistikunternehmen

Hauptbearbeiter/innen: S. Stütz, M. Schellert (Fraunhofer IML)

8.1 Einleitung

Ein Geschäftsmodell (engl. Business Model) ist eine modellhafte Repräsentation der logischen Zusammenhänge, wie eine Organisation bzw. Unternehmen Mehrwert für Kunden erzeugt und einen Ertrag für die Organisation sichern kann. Eine allgemein anerkannte Definition, was ein Geschäftsmodell umfasst, existiert nicht. Osterwalder et al. (2005) begründen die unterschiedlichen Ansätze in der Geschäftsmodelldefinition darin, dass verschiedene Autoren nicht zwingend den gleichen Gegenstand meinen, wenn sie den Begriff Geschäftsmodell definieren (Osterwalder et al. 2005, S. 8, weiter auch: Bucherer 2010, S. 17; Weiner et al. 2010, S. 16, 20).

Für die hier vorliegende Auswertung wird folgende Definition zu Grunde gelegt:

Ein Geschäftsmodell beschreibt das Grundprinzip, nach dem eine Organisation Werte schafft, vermittelt und erfasst. Es ist ein Konzept, das die Logik, nach der ein Unternehmen seine Gewinnerzielungsabsicht genau umsetzt, erklärt werden kann.

8.2 Verkehrsmittel Lkw im Allgemeinen

Das Geschäftsmodell eines Fuhrunternehmers ist es üblicherweise, Transportdienstleistungen im Güterverkehr bereitzustellen. Dies umfasst in der Regel Bereitstellung von Fahrer und Fahrzeug für die entsprechende Relation.

Die Gründe, weswegen sich Fuhrunternehmen für den Einsatz von Lkw entscheiden, sind vielfältig. Neben technischen Eigenschaften spielen Kosten als auch Kundenanforderungen eine wichtige Rolle. Zu den technischen Gründen zählen die hohe Flexibilität des Verkehrsträgers in Kombination mit der einfachen Einsetzbarkeit. Lkw sind für den Einsatz im Nah-, Regional-, und Fernverkehr in ausreichender Anzahl verfügbar. Verloader können Relationen und Touren innerhalb weniger Stunden erstellen und befahren lassen, da am Markt eine Vielzahl von Akteuren Transportdienstleistungen anbietet. Es sind verschiedene Fahrzeugtypen für Standard- und Spezialtransporte einsetzbar, die eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Art des Gutes ermöglichen. Gepaart mit vergleichsweise günstigen Kosten haben sich Lkw in der Vergangenheit in vielen Anwendungsfällen gegen die anderen Verkehrsträger Bahn, Binnenschiff und Rohrfernleitung durchgesetzt, sodass (bezogen auf die Beförderungsleistung) gegenwärtig rund 71 % (Hütter 2016, S. 49) des Güterverkehrs in Deutschland auf der Straße abgewickelt wird.

Gründe für die Verwendung von Lkw:

- kurzfristig und mit relativ geringem organisatorischem Aufwand einsetzbar

- flexibel und universell auf Güterarten anpassbar
- breites Angebot an Dienstleistern mit Lkw-Fuhrpark führt zu hoher Ausfallsicherheit
- oft kostengünstiger für Endkunden als die nicht immer verfügbaren Alternativen Bahn und Binnenschiff
- im Gegensatz zu Bahn und Binnenschiff nicht an feste Routen und Umschlagpunkte gebunden, sondern an deutlich engmaschigeres Straßennetz.

Die technischen Herausforderungen des HO-Lkw liegen in der Kombination der Antriebsarten gepaart mit der Netzbindung. So ist die Motorleistung (Stand der gegenwärtigen Prognose) eingeschränkt gegenüber Dieselantrieben. Die gegenwärtige Entwicklungsprognose sieht Antriebsleistungen von rund 200 kW vor, die für einen Standard-Lkw ausreichen, jedoch für Spezialtransporte oder Fahrzeuge mit Nebenverbrauchern (z. B. Betonmischer) in der Regel nicht ausreichend sind. Insbesondere im Vor- und Nachlauf zur Autobahn bei Einsatz des seriellen Hybridantriebs ist diesbezüglich mit Einschränkungen zu rechnen. Des Weiteren einschränkend wirkt sich die systembedingt hohe Bindung des HO-Lkw an die Infrastruktur aus. Die Mehrkosten des Erwerbs lassen sich tendenziell nur dann amortisieren, wenn hinreichend viele Relationen mit einem hohen (Oberleitungs-) Autobahn-Anteil befahren werden.

8.2.1 Produkte des Lkw-Fernverkehrs

Der straßengebundene Güterverkehr ist vielfältig und dynamisch. Verschiedene Produkte und Dienstleistungen sind im Nah- Regional- und Fernverkehr verfügbar. Nachfolgend werden die wesentlichen Produkte des Fernverkehrs dargestellt.

8.2.1.1 Stückgutssystemverkehr

Stückgut bezeichnet in der Logistik jedes Transportgut, das sich einzeln am Stück transportieren lässt. Durch die Anordnung von Knoten (Quellen und Senken von Ladungen) und deren Verknüpfung über Kanten (Netzwerkprozesse) entstehen Netzwerkstrukturen. Knoten stellen in diesem Netzwerk Umschlag- und Lagerorte und Kanten die Transportwege dar. Über die drei Kriterien Dichte (Anzahl der im Netzwerk verbundenen Depots), Stufigkeit (Anzahl der Ebenen der hierarchischen Verknüpfung der im Netzwerk verbundenen Depots) und Dislozierung (räumliche Verteilung) kann das Netzwerk charakterisiert werden. In der Regel ist ein einzelnes Unternehmen nicht in der Lage, solch ein Netzwerk wirtschaftlich zu betreiben, sodass die meisten Speditionen kooperativ organisiert sind. Diese Verbünde arbeiten mit Güterverteilungszentren an Verkehrsknotenpunkten (Verteilerzentren). Ähnlich wie bei Paketdienstleistern überspannt ein Netz aus Linienverkehren und Knotenpunkten den gesamten Zustellungsbereich, sodass die genutzten Lkw optimal eingesetzt und hoch ausgelastet werden können.

Der Einsatz von HO-Lkw erscheint im Stückgutssystemverkehr allenfalls bei Depot-Depot-Verbindungen (Hauptlaufverkehr) als sinnvoll. Die vor- und nachgelagerten Sammel- bzw.

Verteilverkehre finden regional statt und bedienen in enger zeitlicher Folge einzelne variable Kundenstopps, die in der Regel nicht unmittelbar an Fernstraßen (und damit in der Nähe der HO-Lkw-Infrastruktur) liegen. Hauptlaufverkehre bedienen sich üblicherweise des Bundesautobahnnetzes. Da für sie zudem oft feste Fahrpläne zur Einhaltung zugesagter Beförderungszeiten gelten, sind Hauptlaufverkehre grundsätzlich für Stückgutnetze ein möglicher Transportmodus, wenn sichergestellt ist, dass die HO-Lkw-Lösung keine substantziellen Nutzlasteinbußen mit sich bringt.

8.2.1.2 Ladungsverkehr

Der Ladungsverkehr ist hauptsächlich durch das Sendungsgewicht der transportierten Güter (meist Industriegüter ohne spezielle Handlingbedürfnisse), das zwischen 2,5 Tonnen (Teilladung, Less Than Truck Load/LTL) und 25 Tonnen (Vollladung, Full Truck Load, FTL) liegt, gekennzeichnet. Ladungsverkehr ist eine Form der Transportabwicklung, bei der Güter zu einer Ladeinheit zusammengefasst sind und die Einheit ohne Auflösung direkt vom Versender (Quelle) zum Empfänger (Senke) transportiert wird (im Gegensatz zum Stückgutverkehr oder Paketdienst, bei denen eine Bündelung erst in Umschlagslagern erfolgt). Der Transport der Ladung erfolgt typischerweise in Wechselaufbauten, Satelaufliegern oder Containern. Der Ladungsverkehr wird auf verschiedenen Verkehrsträgern abgewickelt, wobei auch eine Kombination der Verkehrsträger möglich ist (kombinierter Ladungsverkehr) (Schieck 2008, S. 260 ff, Eikelau 1998, S. 49-53, Melzer 1998, S. 128 f).

Die Eignung von HO-Lkw im Ladungsverkehr kann nicht pauschal beurteilt werden. Die konkrete Lage von Versender und Empfänger im Verhältnis zur verfügbaren HO-Lkw-Infrastruktur ist dafür entscheidend, ob der HO-Lkw aus logistischer Sicht als relevant erachtet wird. Es darf festgehalten werden, dass all jene Verkehre, die zwischen zwei oder mehreren Standorten pendeln und dabei hauptsächlich über (potentiell mit Oberleitung ausgestattete) Bundesautobahnen verkehren, für das Konzept HO-Lkw geeignet sind. Im Ladungsverkehr werden Fahrzeugrouten jedoch so geplant, dass Rundverkehre entstehen, die eine möglichst hohe Auslastung (Transportleistung) ermöglichen. Ein Einsatz von HO-Lkw führte für Fuhrunternehmer dazu, dass Fahrzeuge mit deutlich geringerer Einsatzflexibilität im Fuhrpark vorhanden wären. Die besondere Stärke der elektrischen Traktion wäre nur auf elektrifizierten Autobahnstrecken abrufbar. Deren Nutzung ist jedoch bei ad hoc gebildeten Rundverkehren nicht immer geben. Es bestehen damit gewisse Opportunitätskosten in der Beschaffung von HO-Lkw in Kombination mit einer eingeschränkten Flexibilität, die Fahrzeuge bestmöglich einsetzen zu können.

8.2.1.3 Hub-Verkehre KEP

Paketdienstleister sind bei ihren Hub-Verkehren auf Fernverkehre angewiesen.⁶² Bei den Hub-Verkehren werden die im Vorlauf in den Depots eingesammelten Pakete im sogenannten Hauptlauf konsolidiert und über einen Hub umgeschlagen (vergleichbar Stückgutverkehre). Die Kanten stellen somit die Verbindungen des bzw. der Hubs zu den Depots bzw. Hubs untereinander dar. Vor allem jene Pakete passieren vom Startdepot bis zum Zieldepot einen oder mehrere Hubs, bei denen direkte Verknüpfungen zwischen den Regionen des Start- und des Zieldepots keine kompletten Lkw-Ladungen ausmachen. Die indirekte Verbindung über Hub-Strukturen erlaubt konsolidierte, höher ausgelastete Hub-Verkehre als im Direktverkehr. In der Praxis werden sich einzelne Regionen mit hohem wechselseitigen Paketaufkommen jedoch außerhalb der Hub-Struktur Direktverkehre unter Umgehung des/der Hubs etablieren.

Hubverkehre im Bereich KEP verknüpfen Sortierzentren der Paketdienstleister miteinander, von denen aus kleinere Fahrzeuge die Verteil- und Sammelaufgaben erledigen. Die hier relevanten Verkehre lassen sich analog dem Stückgutssystemverkehr betrachten: Sammel- und Verteilverkehre sind für den HO-Lkw-Einsatz ungeeignet, während eine gewisse Chance besteht, Hauptlaufverkehre mit HO-Lkw abzuwickeln.

8.2.1.4 Spezialtransporte

Ein weiteres Produkt im Fernverkehr sind Spezialtransporte. Diese sind durch besondere Anforderungen der Ladung gekennzeichnet, die hinsichtlich verschiedener Kriterien unterschieden werden. Abweichungen von den üblichen Maßen sind in diesen Fällen häufig durch das Ladungsgewicht und -maße, wodurch eine höhere Leistungsfähigkeit an das Zugfahrzeug gestellt wird. Dazu zählen auch Großraum- und Schwertransporte, die von den Vorschriften der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) abweichen. Eine einheitliche Legaldefinition dieser Begriffe gibt es nicht. In Anlehnung an die technischen Vorgaben der StVZO werden vier Möglichkeiten unterschieden (StVZO 2012, §32 ff in Verbindung mit StVO 2013, §29(3)):

- Großraum: große Abmessungen bei geringem Gewicht (zum Beispiel ein Blechsilo, Tank, Schwimmbecken)
- Schwertransporte: geringe Abmessungen, jedoch sehr hohes Gewicht (z. B. Betonträger, Kranballast)

⁶² Im Kontext der Stückgut- und Paketlogistik versteht man unter einem „Hub“ ein Logistikzentrum, das dazu dient, einzelne Sendungen zu sortieren, damit konsolidierte Transporte über längere Strecken sich Fahrzeugen bedienen können, die über ein besonders günstiges Verhältnis von Ladekapazität und Einsatzkosten verfügen (Furmans et al. 2008, S. 17).

- Großraum- und Schwertransporte: eine Kombination aus den zwei vorherigen (z. B. Großtransformatoren, Turbinen, Gasphasenreaktoren)
- Langtransporte: Güter mit Maßen in der Länge über 20 Meter (z. B. Holz-Dachbinder, Flügel von Windkraftanlagen, Mastschüsse, ein Maibaum)

Da diese Transporte laut Straßenverkehrsordnung (StVO) eine übermäßige Straßenbenutzung verursachen, sind für die Durchführung Sondergenehmigungen notwendig (StVO 2013, §29(2) in Verbindung mit StVZO 2012, §70).

Die Natur des Begriffs „Spezialtransport“ macht eine pauschale Aussage zum Einsatzpotential des HO-Lkw schwierig. Es ist festzuhalten, dass zumindest jene Spezialtransporte im Hinblick auf den HO-Lkw als problematisch zu betrachten sind, die besonders leistungsstarke Nebenantriebe erfordern. Ebenfalls sind Spezialtransporte auszuschließen, die größtenteils abseits bestehender Infrastrukturen stattfinden, bspw. die Belieferung von Baustellen.

8.2.2 Branchenüberblick Speditionsgewerbe / Fuhrunternehmer

Die Branche der Spediteure und Logistikdienstleister ist heterogen und mittelständisch geprägt.

Der Spediteur führt nicht automatisch den Transport durch. Die Transporte werden, wenn nicht durch den Spediteur (Selbsteintritt), durch Dritte durchgeführt. Dies sind Frachtführer, Verfrachter oder Carrier. Im Jahr 2010 betrieben 39 % der Speditionen eigene Lkw, mit abnehmender Tendenz (DLSV 2015, S. 9). Der Betrieb einer modernen Spedition umfasst neben den Beförderungsleistungen weitere, auf die Beförderung oder den Umschlag bezogene Leistungen wie die Versandverpackung und Paketkennzeichnung bis hin zur Palettenbewirtschaftung. Insgesamt sind rund 532.000 Beschäftigte (2014) in der Branche Spedition und Logistik in Deutschland tätig (DSLVL 2015, S. 26). Tabelle 80 zeigt die Leistungsbereiche von Speditionen (Auszug; Mehrfachnennungen möglich). Es ist zu erkennen, dass rund die Hälfte der Unternehmen⁶³ im Stückgutverkehr aktiv ist, und damit Teil eines entsprechenden Stückgut-Netztes ist. Ein Viertel ist im Paket- und Expressgeschäft aktiv. Rund zwei Drittel sind jeweils im nationalen und internationalen Lkw-Verkehr aktiv, aber nur 39 % betreiben Lkw-Fernverkehre selbst. Dass 49 % der Unternehmen auch Nahverkehr durchführen, zeigt, dass die Unternehmen sehr heterogen sind und ein breites Produktportfolio anbieten.

Des Weiteren ist die Branche mittelständisch geprägt. In einer Umfrage des Deutschen Speditions- und Logistikverbands (DLSV 2015) wurden Unternehmen nach ihrer Betriebs-

⁶³ Strukturanalyse der Mitglieder des Deutschen Speditions- und Logistikverbands (DSLVL) im Jahr 2014

struktur befragt. Erhebungseinheit war dabei der einzelne Betrieb, auf den sich alle Angaben beziehen. Dies bedeutet, dass Niederlassungen und Zentralen eines Unternehmens als „Betrieb“ behandelt werden. In Tabelle 81 ist zu erkennen, dass rund drei Viertel aller Betriebe in Deutschland einen Mitarbeiterstamm von maximal 100 Beschäftigten hat.

Tabelle 80: Betriebe nach Leistungsbereich (Auszug; Mehrfachnennungen möglich)
(DLSV 2015, S. 9)

Tätigkeitsbereich	Anzahl Nennungen (Bezugsgröße 2.500 Betriebe)
Stückgutverkehre	52 %
Paket und Expressdienste	25 %
Befrachtung Lkw nationale Verkehre	63 %
Befrachtung Lkw internationale Verkehre	66 %
Güterfernverkehr mit eigenem Lkw (Selbsteintritt)	39 %
Speditionsnahverkehr	49 %

Tabelle 81: Betriebsgröße nach Zahl der Beschäftigten (DSLIV 2015, S. 23)

Beschäftigte pro Betrieb	Anteil
1 bis 10	17 %
11 bis 50	36 %
51 bis 100	20 %
101 bis 200	13 %
> 200	14 %
Gesamt	100 %

Die Zahlen des DSLIV weisen darauf hin, dass die Beschaffung einzelner HO-Lkw durch einen Klein- oder Mittelbetrieb kaum zu erwarten sind. Oben wurden bereits die hohen Opportunitätskosten gegenüber einem nicht-leitungsgebundenen Fahrzeug genannt. Hinzu kommt, dass für HO-Lkw stets ein geringerer Sekundärmarkt existiert als für einen Lkw, der ohne Oberleitungsinfrastruktur auskommt. Die Beschaffung eines HO-Lkw stellt also ein Transaktionsrisiko dar, das gerade für Klein- und Mittelbetriebe relativ hoch ausfällt: Je kleiner der Fuhrpark, umso größer ist bei Beschaffung eines HO-Lkw der Anteil des Transportvolumens, das für HO-Lkw-Transporte geeignet sein muss. Folglich kann erwartet werden, dass die Anschaffung eines HO-Lkw für Unternehmen mit einem großen Fuhrpark ein deutlich geringeres wirtschaftliches Risiko mit sich bringt.

HO-Lkw weisen gegenüber konventionellen Lkw in der Beschaffung einen höheren finanziellen Aufwand auf. Aus Finanzierungssicht ist daher die Beschaffung von HO-Lkw für kapitalstarke Großbetriebe risikoärmer und für kleinere Speditionsbetriebe sowohl risikobehaftet als auch mit höheren Kosten verbunden und daher wirtschaftlich weniger attrak-

tiv. Die Minderung des Risikos der Anschaffung ist also gerade für die durch kleine und mittlere Betriebe geprägte Logistikbranche ein wesentlicher Hebel, damit HO-Lkw auch für Unternehmen dieser Betriebsgröße eine wirtschaftliche Option sind. Im Folgekapitel wird daher der Fall der Lkw-Vermietung dargestellt, da Vermietung Nutzung und Eigentumsrisiko entkoppelt.

8.2.3 Marktdynamik am Beispiel Lkw-Vermietung

Als Folge der Weltwirtschaftskrise haben Spediteure erkannt, dass flexible Fahrzeugflotten ein Vorteil für den Betrieb sind. Fester Bestandteil des Nutzfahrzeuggeschäfts sind Leasing und Finanzierung von Fahrzeugen. Als weitere Möglichkeit dient die Miete von Nutzfahrzeugen, um die Flexibilität zu erhöhen. Hierdurch haben Fuhrunternehmer eine bessere Möglichkeit, auf saisonale Schwankungen oder kurzfristige Ausfälle zu reagieren bzw. in schwachen Betriebsphasen zuerst die Mietfahrzeuge stillzulegen. Darüber hinaus sind die Kosten im Vorfeld gut kalkulierbar. Die Monatsraten umfassen üblicherweise die Kosten für Werkstatt, Versicherung, Rundfunkbeitrag und die fälligen Steuern. Des Weiteren bindet die Lkw-Miete weniger Kapital als der Fahrzeugwerb.

Der Markt der Lkw-Vermieter befindet sich gegenwärtig in einem starken Wachstum. Mieter haben eine große Auswahl an Fahrzeugen, sowohl kleine Fahrzeuge der 7,5-t-Klasse bis zu Schwerlastzugmaschinen. Ebenso können Anhänger, Auflieger oder Spezialfahrzeuge wie beispielsweise für Tiefkühltransporte oder Bau angemietet werden. Die Mietdauer kann mehrere Jahre bis hin zu wenigen Tagen umfassen. Der Trend geht hin zu Kurzzeitmieten, die wenige Wochen oder Monate umfassen (Gnamm et al.2010, S. 4).

In den vergangenen Jahren ist der Markt für Lkw-Vermietung gewachsen. Während der Anteil an Miet-Lkw im Jahr 2006 bei rund 10 % lag, sind es gegenwärtig (2016) rund 15 % der neu zugelassenen Fahrzeuge. Für die kommenden Jahre wird erwartet, dass der Wert 20 % erreicht (Jesgulke 2016; Gnamm et al.2010, S. 4). Damit liegt der Markt in Deutschland jedoch hinter Märkten in anderen Staaten; in Skandinavien und im Vereinigten Königreich liegt der Anteil von Miet-Lkw bei rund 30 %, in den USA bei 50 % (Gnamm et al. 2010, S. 4).

Das Beispiel Lkw-Vermietung zeigt, dass Fuhrunternehmer bereit sind, die bisherigen markttypischen Strukturen zu ändern, wenn sich unternehmerische Vorteile ergeben.

In Kombination mit Hybrid-Oberleitungs-Lkw vermindert ein Leasing- oder Vermietungsmodell die Risiken für den Fuhrunternehmer. Die Anforderung eines wirtschaftlichen Betriebs sowie die Risiken aus Anschaffung, Wartung und Restwert bzw. Wiederverkaufswert eines HO-Lkw fallen dadurch nicht mehr auf den Fuhrunternehmer zurück. Dies wird dazu beitragen, die kurzfristige Verwendung von HO-Lkw durch die Fuhrunternehmer zu unterstützen. Bei einer möglichen Änderung des Aufkommens zwischen Quellen und Senken ist der Fuhrunternehmer im Vergleich zum Erwerb eines HO-Lkw nicht an das

Fahrzeug gebunden. Andererseits kann für geeignete Relationen kurzfristig ein HO-Lkw eingesetzt werden. Dies entspricht dem oben genannten Trend zum kurzfristigen Einsatz von Miet-Fahrzeugen im Straßengüterverkehr.

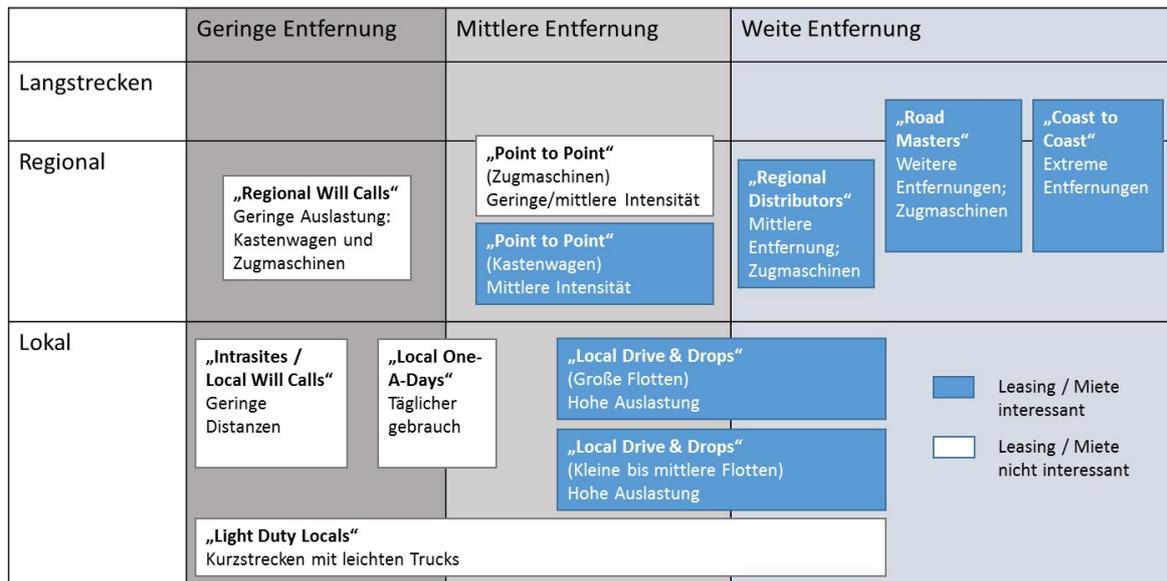


Abbildung 87: Lkw-Mieten und -Leasing (eigene Darstellung basierend auf Gnamm et al. 2010, S. 7)

Das ökonomische Risiko von Anschaffung und Eigentum am HO-Lkw wird in dieser Betrachtungsweise beim Lkw-Nutzer (Führerunternehmen) aufgelöst, da nun spezielle Vermietungsunternehmen als Eigentümer der HO-Lkw auftreten. Die Vermietung von HO-Lkw stellt für diese Unternehmen natürlich auch ein unternehmerisches Risiko dar, und zwar umso eher, je mehr sich die Gesamtnachfrage nach Transportdienstleistungen von der HO-Infrastruktur wegbewegt. Da die erforderliche Infrastruktur jedoch am aktuellen Fernverkehrsaufkommen ausgerichtet wird und das Verkehrsaufkommen wiederum durch die bundesdeutsche Siedlungsstruktur maßgeblich bestimmt wird, ist kaum davon auszugehen, dass hier massive Strukturbrüche in der Transportnachfrage zu erwarten sind. Folglich lässt die bundesweite Vermietung von HO-Lkw gegenüber der Eigentümerschaft durch Führerunternehmen geringere Eigentumsrisiken erwarten. Mehr noch kann ein hier engagierter Lkw-Vermieter durch Beschaffungsvorteile günstigere Einstandspreise erzielen als einzelne Führerunternehmen. Im Sinne eines Markthochlaufs bietet dieses Modell ebenfalls Planungssicherheit für die Anbieter von HO-Lkw, die die bereitzustellenden Stückzahlen besser planen und aufgrund weniger großer Nachfrager von einer geringen Marktkomplexität profitieren können. Wird die Vermietung von HO-Lkw mit dem Betrieb der Infrastruktur gekoppelt, ließen sich weitere Synergien erschließen. Für ein mögliches Betreibermodell könnten die Einnahmen aus der Vermietung direkt in Betrieb und Ausbau des HO-Netzes fließen. Die Risiken, die Infrastruktur hinreichend durch HO-Lkw-Betrieb auszulasten und für eine hohe Fahrleistung der vermieteten HO-Lkw zu sorgen, würden

von derselben Organisation getragen. Dies wäre mit dem Fall des Kabelfernsehens vergleichbar, bei dem einzelne Anbieter Eigentümer der Breitbandkabel sind und die Anschlusspunkte beim Kunden selbst vermarkten, um die Breitbandinfrastruktur durch Abonnement-Verträge kontinuierlich hinreichend auszulasten, sodass die generierten Erlöse die Netzkosten decken können. Derartige Marktconstellations sind jedoch vor unerwünschten monopolistischen Tendenzen zu schützen.

8.3 Lkw-Hersteller – aktuelle Position und mögliche Anreize

Der deutsche Markt für schwere Nutzfahrzeuge (Lkw und Sattelzugmaschinen) wird im Wesentlichen von den sieben Herstellern

- DAF,
- Iveco,
- MAN,
- Mercedes-Benz,
- Renault,
- Scania und
- Volvo.

bestimmt (vgl. Abbildung 88). Es ist zu beachten, dass Renault Trucks zum Volvo-Konzern gehört, während MAN und Scania Tochterunternehmen der Volkswagen AG sind. Es verbleiben damit fünf Unternehmen, die Deutschland mit Fahrzeugen versorgen, die für eine Nutzung einer Oberleitungsinfrastruktur infrage kommen (Wildhage 2016).

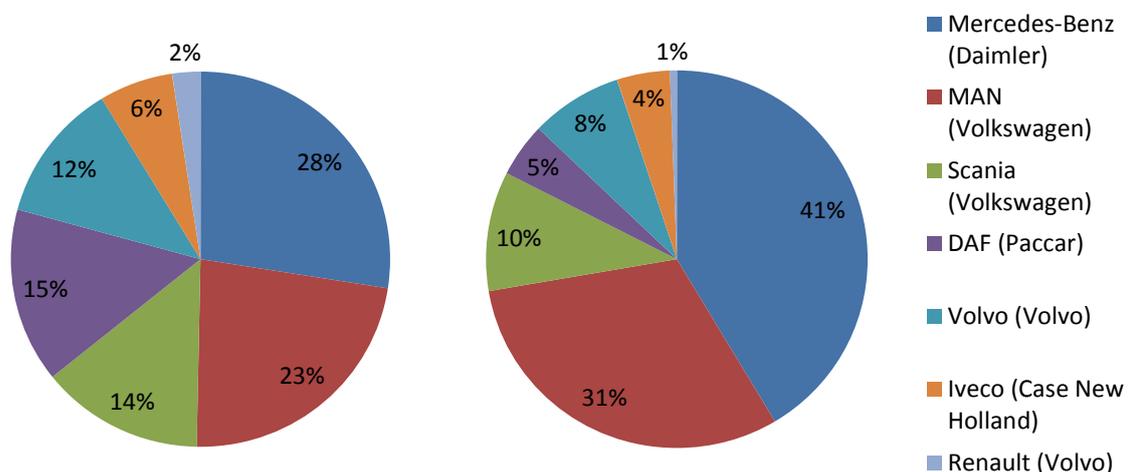


Abbildung 88: Marktanteile Lkw und Sattelzugmaschinen in Deutschland im Jahr 2015 (eigene Darstellung basierend auf Wildhage 2016)

Im Folgenden wird zunächst dargestellt, welche dieser Unternehmen eine Affinität zum Oberleitungs-Lkw aufweisen bzw. aufgrund von Engagement im Bereich der Hybridisierung und Elektromobilität haben könnten.

Wie zuvor dargestellt, stellen Fahrzeuge des **Daimler-Konzerns** den größten Anteil am Lkw-Markt dar. Ein Engagement für den HO-Lkw seitens Daimler würde demzufolge ein sichtbares Signal die Branche der Fuhrunternehmer senden, diese Technik zu evaluieren und ggf. einzusetzen. Die Reaktionen von Daimler auf die Siemens-Projekte ENUBA und ENUBA2 sind als abwartend bis skeptisch zu bezeichnen (Köhn und Ruhkamp 2012; Schulze 2012). Das Unternehmen betont vielmehr die Flexibilität und Potentiale von Hybrid-Konzepten sowie Anstrengungen, die Kraftstoffeffizienz bestehender Fahrzeugkonzept durch bauliche Maßnahmen (bspw. Aerodynamik) zu heben (Schumacher 2014). Im Laufe des Jahres 2016 gab Daimler bekannt, auf der Internationalen Automobilausstellung in Hannover im September 2016 das Fahrzeugkonzept „urban eTruck“ der Öffentlichkeit vorzustellen. Das Fahrzeug soll frühestens 2020 in die Serienfertigung gehen. Zusammen mit dem Blick auf aktuelle Feldversuche des leichten Nutzfahrzeugs „Fuso Canter“ in Stuttgart zeigt sich die Einschätzung des Daimler-Konzerns zur Elektromobilität im Güterverkehr deutlich: Das Ziel ist offensichtlich, Lösungen für den urbanen Verteilerverkehr mit bis Tourlängen von 200 km anzubieten. Das Konzept „urban eTruck“ ist explizit nicht als Langstreckenfahrzeug vorgesehen (Knop 2016; Handelsblatt 2016), hier setzt Daimler auf Fahrzeuge, deren Elektroantrieb über eine Wasserstoffbrennstoffzelle mit Energie versorgt wird. Das bisher zurückhaltende Engagement im Bereich der Elektromobilität seitens Daimler rechtfertigt Daimler-Nutzfahrzeugvorstand Dr. Wolfgang Bernhard indirekt mit der Risikoscheu der Daimler-Kunden (Transportunternehmen), deren Zahlungsbereitschaften bereits bei besonders kraftstoffeffizienten konventionell angetriebenen Fahrzeugmodellen überschritten seien, da in der Transportbranche geringe Margen und hoher Kostendruck das Handeln bestimme (Hausmann 2016).

Der **Volkswagenkonzern** ist Eigentümer von MAN und Scania und kontrolliert damit nach Daimler zugleich den zweit- und den drittgrößten Anbieter für schwere Lkw in Deutschland. Da Volkswagen ebenfalls als Anbieter leichter Nutzfahrzeuge auftritt, finden sich auch verschiedene Aussagen von VW-Konzernvertretern zur Bewertung der Elektromobilität. Im Jahre 2013 kündigte Dr. Eckard Scholz, damals Sprecher des Markenvorstands Volkswagen Nutzfahrzeuge, eine elektrifizierte Variante des Modells „Caddy“ an (Wolf 2013). Zwei Jahre später bekräftigte VW-Markenchef Herbert Diess, dass seitens VW Nutzfahrzeuge im Hinblick auf Elektromobilität der Fokus auf Kleintransporter (speziell dem Modell „Caddy“) läge (Ruzic 2015). Andreas Renschler, für das Lkw-Geschäft verantwortlicher VW-Vorstand, bestätigte zu verschiedenen Gelegenheiten, dass seitens VW Nutzfahrzeuge elektrische Fahrzeuge allenfalls für Zustelltransporte oder Verteilerverkehr der „letzten Meile“ von etwa 30-40 km Tourenlänge denkbar seien. Für Fernverkehrsfahrzeuge betrachtet VW Nutzfahrzeuge keine elektrifizierten Fahrzeuge und fokussiert sich auf die Effizienzsteigerung bestehender konventioneller Antriebskonzepte (Grünig und Voigt, 2016; Hausmann 2016). Aktivitäten zu elektrischen Antrieben für schwere Nutzfahrzeuge werden erwartungsgemäß den Konzernunternehmen MAN und Scania überlassen.

Die Marke **MAN** gilt im Volkswagen-Konzern als Anbieter für besonders robuste Nutzfahrzeuge, während man die Marke Scania als Anbieter klassischer Langstreckenfahrzeuge betrachtet (Grünig und Voigt 2016). MAN befasst sich seit etwa 2010 mit der Hybridisierung des Dieselantriebs. Die 2010 und 2012 jeweils vorgestellten Modelle „MAN TGL 12.220 Hybrid“ und „MAN Metropolis“ waren jeweils für den Einsatz im Nah- und Regionalverkehr vorgesehen, wobei ersteres Aufgaben des klassischen Verteilerverkehrs (Stückgut) erledigen und letzteres im Stadtverkehr besonders schwere Lasten bewegen sollte. Das Schwerlastfahrzeug, welches dem HO-Lkw konzeptionell am nächsten kommt, sollte dabei als Plug-in-Hybrid ausgelegt sein und das rein elektrische Fahren unterstützen. Das Stückgutfahrzeug hingegen wurde rein aus Gründen einer erhöhten Kraftstoffeffizienz hybridisiert. Vollelektrischer Verkehr war nicht vorgesehen (Nadelhofer 2012; MAN 2010a). Dasselbe galt für das 2014 zur IAA vorgestellte Fahrzeugkonzept „MAN TGX Hybrid“, das MAN explizit als schweres Nutzfahrzeug für den Fernverkehr vorstellte: Die parallele Hybridisierung sollte hier ebenfalls nur durch Entlastung Effizienzgewinne beim Dieselantrieb ermöglichen, jedoch keine vollelektrische Traktion. Dies wurde in der Umsetzung als zu komplex erachtet (Lampersbach 2014). Die für die IAA 2016 angekündigten, ersten Ansätze zur Vollelektrifizierung auf Basis der MAN TGM-Baureihe (Handelsblatt 2016) sollen im Jahr 2018 zu einer ersten Kleinserie und schließlich 2021 zur Serienfertigung von Elektro-Lkw mit etwa 200 km Reichweite fortgeführt werden (Bönninghausen 2017). MANs Schwesterunternehmen **Scania** bekräftigt seit einiger Zeit in der Außendarstellung ein großes Interesse an der Elektrifizierung des Güterverkehrs (Rathmann 2014). Als Partner von Siemens stellt Scania die Fahrzeuge für den sog. „eHighway“ her (Scania 2016; Schweikl 2016). Als skandinavisches Unternehmen unterstützt Scania die Bestrebungen, in Schweden 2030 energieeffiziente und erdölfreie Straßentransporte zu ermöglichen (Hartmann 2016; Scania 2016). Für den Verteilerverkehr in der Stadt setzt Scania auf Diesel-Hybrid-Fahrzeuge, wie den 2016 vorgestellten Parallelhybrid „Scania P 320“ (Brüggmann 2016).

Das Engagement des niederländischen Anbieters **DAF** beschränkt sich auf Hybridisierung von mittelschweren Lkw, deren Einsatz im Verteilerverkehr gesehen wird. Auf der IAA 2010 wurde das Fahrzeug „DAF LF Hybrid“ vorgestellt. Dieser Parallelhybrid sollte nach Plänen von DAF an Unternehmen abgegeben werden, die stadtnahe Belieferungsverkehre bedienen und im Speziellen von Emissionsgesetzgebung und Einfahrtrestriktionen betroffen sind (DAF 2010). Ein intensiveres Engagement im Bereich Hybrid- oder Elektromobilität ist nicht bekannt, obwohl die Fahrzeuge von DAF oftmals die Ausgangsbasis für niederländische Retrofit-Anbieter bilden (Emoss 2016b und VDL Groep 2016).

Volvo ist Siemens-Partner des „eHighway“ in Kalifornien über die US-Marke „Mack“, die zu Volvo gehört (AQMD 2016; Reh 2014). In der Strategie von Volvo bilden jedoch Verbrennungsmotoren und die Verbesserung ihrer Effizienz und Ökobilanz eine zentrale Rolle. Dabei setzt Volvo auf bauliche Maßnahmen der Fahrzeuge sowie Flottenmanagement und die Substitution von Diesel durch Dimethylether (DME). Eine Hybridisierung von Die-

sel-Fahrzeugen wird verfolgt, steht aber nicht im primären Fokus (Eriksson 2012). Bei Diesel-Hybrid- und vollelektrischen Antrieben konzentriert sich Volvo zunächst auf den Bereich der Kraftomnibusse. Primär unter der Marke „**Renault Trucks**“ erprobt Volvo seit 2011 sowohl Batterie-elektrische als auch Diesel-hybrid-getriebene Lkw, z. B. in Paris (Renault Maxity Electric, Renault Truck D), aber auch in der Schweiz (Renault Midlum). In Schweden wird der Hybrid-Lkw „Volvo FE“ seit Sommer 2014 erprobt. All diesen Vorhaben ist gemein, dass ein Einsatz auf Kurzstrecken sowie im urbanen Raum vorgenommen wird. Der Fokus liegt auf der Senkung lokaler Lärm- und Emissionsbelastungen (Volvo 2014). Die Versuche in Frankreich wurden 2015 um Fahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle erweitert, um die Einsatzradien der Renault Maxity Electric auf rd. 200 km auszudehnen (Volvo 2016).

Iveco verfolgt bei alternativen Antrieben die Strategie, elektrische und Diesel-hybrid-getriebene Fahrzeuge für kleinere Belieferungsverkehre vorzusehen und Langstreckenfahrzeuge, d. h. Schwerlast-Lkw und Zugmaschinen, künftig mit Flüssiggasantrieb (LNG-Antrieb) auszustatten (Iveco 2016). Speziell in dem sich entwickelnden Markt der LNG-Antriebe schwerer Nutzfahrzeuge strebt Iveco die Marktführerschaft an (Hausmann 2016; IWR 2016). Hybrid- und Elektro-Lkw sieht Iveco für Regional- und stadtnahe Belieferungsverkehre vor, Erdgas-Fahrzeuge (CNG bzw. LNG) werden als Langstreckenlösung betrachtet (Iveco 2016). Entwicklungsaktivitäten für alternative Antriebe bündelt Iveco in dem separaten Unternehmensteil „Altra“ (Altra 2016). Aktuell verfolgt Altra das Vorhaben, durch Hybridisierung und weitere Optimierungen den Kraftstoffverbrauch konventioneller schwerer Langstrecken-Lkw um 30 % zu senken (Convenient 2016).

Auf Grundlage der Recherchen lässt sich resümieren, dass die Lkw-Hersteller beim Angebot elektrifizierter Fahrzeuge konservativ vorgehen: Es werden allenfalls zunächst nur Hybridkonzepte erprobt und nur zurückhaltend am Markt angeboten. Rein elektrische Antriebe oder damit enger verwandte serielle Hybride kommen praktisch nur im Kontext der von Siemens initiierten eHighway-Projekte in Deutschland, Schweden und den USA vor. Tabelle 82 fasst zusammen, wie sich gegenwärtig die Marktorientierung der für Deutschland maßgeblichen Lkw-Hersteller in Bezug auf den Antriebsstrang darstellt.

Tabelle 82: Strategische Ausrichtung von Anbietern schwerer Lkw (eigene Darstellung)

Anbieter/Marke	Engagement im Bereich alternativ angetriebener schwerer Lkw
Daimler	Wasserstoff-Brennstoffzelle
MAN	Paralleler Dieselhybrid, batterie-elektrischer Lkw
Scania	Serieller Dieselhybrid als HO-Lkw
DAF	Unklar: Hybridisierung aufgegeben?
Volvo	Paralleler Dieselhybrid, serieller Dieselhybrid als HO-Lkw in USA
Iveco	Flüssigerdgas (LNG)

Das Engagement von MAN im Bereich der Diesel-Hybrid-Antriebsstränge zeigt in besonders bemerkenswerter Weise den teils experimentellen Charakter der Hybridisierung, da einmal ein hybrider Antriebsstrang explizit auch rein elektrische Traktion ermöglichen, einmal lediglich nur Effizienzgewinne des Verbrennungsmotors befördern soll. Die zu beobachtende Uneinigkeit der Industrie sowie die von den Unternehmen unterschiedlichen verfolgten Strategien lassen sich im Wesentlichen auf zwei Hauptargumente zurückführen:

1. Konservative Argumente, weil unter hohem Kostendruck operierende Kundschaft nur mäßiges Interesse und geringe Zahlungsbereitschaft für Fahrzeuge mit innovativen Antrieben äußert.
2. Kernkompetenzen und Selbstverständnis der Hersteller von Verbrennungsmotoren, Getrieben und Antriebssträngen: Sie haben ein gewisses Beharrungsvermögen, sich Hybridisierung oder Vollelektrifizierung zu öffnen (z. B. (Volvo 2016) oder (MAN 2014)).

Diese Aspekte sind Ausgangspunkte einer Betrachtung möglicher Anreize, ein Angebot von HO-Lkw auf Herstellerseite zu stimulieren. Die Diskussion einer Nutzung von HO-Lkw durch Fuhrunternehmen führte zu zwei denkbaren Einsatzfeldern:

- HO-Lkw werden parallel zu konventionellen Langstreckenfahrzeugen von Fuhrunternehmen direkt beschafft und betrieben.
- HO-Lkw werden primär durch Traktionsdienstleister beschafft und auf Leihbasis an Fuhrunternehmen abgegeben, um Beschaffungs- und Eigentumsrisiken für die meist mittelständischen Unternehmen zu reduzieren.

Geht man davon aus, dass kein Traktionsdienstleister existiert, ist von einem vergleichsweise kleinen Markt für HO-Lkw auszugehen, da vornehmlich Großunternehmen mit regelmäßigen Linienverkehren als Käufer und Nutzer infrage kommen. Diese verfügen über hinreichende Mengen liquider Mittel bzw. Sicherheiten für die Beschaffung und sind durch Fehlinvestitionen in wenige HO-Lkw nicht unmittelbar existenziell bedroht. Die abzusetzende Stückzahl an HO-Lkw entspräche damit im Höchstfall der in Deutschland regelmäßig entlang der Oberleitungsinfrastruktur verkehrenden Hauptlauf-Linienverkehre (im Wesentlichen KEP und Stückgut, seltener Ladungsverkehre). Gelegenheitsanwender würden

die Nutzung von HO-Lkw scheuen, da einer Kraftstoffkostensparnis im Einzelfall hohe Beschaffungskosten und ein unsicherer Sekundärmarkt gegenüberstehen. Das Problem des unsicheren Sekundärmarkts könnte herstellerseitig gelöst werden, indem für HO-Lkw der Rückkauf gebrauchter Fahrzeuge zu bestimmten Restwerten ausgesprochen werden.

In Summe ist davon auszugehen, dass die Gründung von Traktionsdienstleistern ebenfalls Gelegenheitstransporteure in Teilen zum Umstieg auf die HO-Lkw-Lösung bewegen kann. Für Lkw-Hersteller hätte ein solcher Markt einen weiteren Vorteil: Die HO-Lkw würden an mehrere auf die Nutzung dieser Fahrzeuge ausgerichteten Spezialisten verkauft, d. h. Verhandlungs- und Planungsprozesse im Vorfeld der Serienfertigung wären mit weniger Aufwand verbunden als bei Absatz der HO-Lkw an Logistiker, die aktuell primär Diesel-Lkw nutzen. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass Traktionsdienstleister größere Stückzahlen an HO-Lkw ordern und regelmäßig auf Dienstleistungen für Instandhaltung und Wartung auf den jeweiligen Hersteller zurückgreifen würden.

Zusammengefasst: Die Etablierung auf HO-Lkw spezialisierter Traktionsdienstleister bietet Lkw-Produzenten mehr Planungs- und Investitionssicherheit als der Verkauf der HO-Lkw an Endnutzer. Die Gründung solcher Traktionsdienstleister sollte stimuliert werden.

Für die Neugründung von Traktionsdienstleistern kann von einem substanziellen Kapitalbedarf ausgegangen werden, da ein Dienstleister zu Marktstart eine gewisse Flotte vorhalten müssen, um glaubhaft HO-Lkw-basierte Verkehre anbieten zu können. Ein solches Investitionswagnis wird aus unternehmerischer Sicht nur dann eingegangen, wenn davon auszugehen ist, dass der Betrieb von HO-Lkw als Dienstleister langfristig möglich ist, um die Anfangsinvestitionen amortisieren zu können. Dies hängt wiederum davon ab, dass der Betrieb von HO-Lkw für den Endnutzer als Kunde des Traktionsdienstleisters langfristig substanzielle Vorteile gegenüber aktuellen konventionellen Lkw bietet.

Die wesentlichen Vorteile eines Fuhrunternehmens aus dem Einsatz von HO-Lkw liegen in

- monetären Ersparnissen in Form eingesparter Kraftstoffkosten, saldiert um die Stromkosten der elektrischen Traktion sowie in
- nicht-monetären Einsparungen von Schadstoffemissionen.

Die langfristige Entwicklung der wesentlichen Bestimmungsfaktoren der monetären Ersparnisse, der Preise für Dieselöl und Strom, ist nicht vorherzusagen. Daher können lediglich Maßnahmen getroffen werden, die darauf abzielen, die Teuerungsraten für Strom unterhalb der Teuerung für Dieselöl zu halten. Denkbar wäre eine Begünstigung des Fahrstroms analog zum Bahnstrom, jedoch auch dynamisch angepasste Energiesteuersätze zur Etablierung bestimmter Mindestpreisabstände zwischen Dieselöl und Strom.

Die nicht-monetären ökologischen Ersparnisse könnten zudem über regulatorische Instrumente im Kalkül der Fuhrunternehmen verankert werden (Internalisierung). Ein erster Schritt in diese Richtung wäre es, Anbieter gewerblicher Straßenferntransporte zu verpflichten, den Schadstoffausstoß einer Ladung zu ermitteln und in den Frachtpapieren

transparent auszuweisen. Eine solche Regelung beträfe sämtliche Straßenfrachten, auch HO-Lkw und ihre konventionellen Alternativen und könnte – unter der Annahme eines ökologischer effizienteren HO-Lkw – zunächst als Mittel der wettbewerblichen Differenzierung dienen. In einem nächsten Schritt können die gesammelten Informationen über Schadstoffemissionen benutzt werden, um nachweislich schadstoffärmer durchgeführten Transporten Sonderrechte einzuräumen. Diese könnten bspw. darin bestehen, Langstreckenverkehre auch nachts oder sonntags durchführen zu können, für Innovationen (Autonome Fahrzeuge, Platooning-Verkehre, etc.) bevorzugt Betriebserlaubnisse zu erhalten oder im Vor- oder Nachlauf erweiterte Zeitfenster beim Befahren lärm- oder emissionssensibler Zonen zu erhalten. Eine direkte Internalisierung der Emissionskosten wäre schließlich möglich durch Definition von Zielgrößen, die Straßenferntransporte einhalten müssen (bspw. spezifiziert in g CO₂e/tkm), bei gleichzeitiger Festsetzung monetärer Strafen, die sich am Grad der Grenzwertüberschreitung bemessen.

Zusammengefasst: Die Gründung eines Traktionsdienstleisters stellt ein substantielles Investitionsprojekt dar, das bei privater Finanzierung eine positive Wirtschaftlichkeitsbeurteilung erfordert. Damit eine Amortisation erwartet werden kann, müssen für Nutzer dauerhafte, sich in Form ersparter Transportkosten messbare Vorteile durch die Nutzung der von Traktionsdienstleistern bereitgestellten HO-Lkw ergeben. Um diese abzusichern, können energiesteuerliche Maßnahmen, Sonderrechte für HO-Lkw sowie emissionsorientierte Maßnahmen (Internalisierung) getroffen werden.

Eine direkt auf die Hersteller wirkende Maßnahme besteht schließlich darin, die Schadstoffemissionen der einzelnen Lkw-Modelle als Ansatz für Sondersteuern zu nutzen. So könnte ein spezifischer Schadstoffgrenzwert pro Lkw-Größenklasse definiert werden, dessen Überschreitung den Lkw-Hersteller verpflichtet, für jedes grenzwertüberschreitende Exemplar eine Sondersteuer abzuführen. Diese Steuer könnte in Form von Sondereinzelkosten Eingang in die Preiskalkulation finden und entsprechend vom Lkw-Anbieter an die Käufer weitergeben werden. Abgasärmere Lösungen wie HO-Lkw wären von einer solchen Regelung auszunehmen.

8.4 Schlussfolgerungen

Schlussfolgernd stellt die Einführung des HO-Lkw eine Herausforderung an die Güterverkehrsbranche dar. Der Betrieb des Hybrid-Oberleitungs-Lkw ist wechselseitig mit der verfügbaren Infrastruktur gekoppelt. Um den Aufbau der Infrastruktur ökonomisch und ökologisch zu rechtfertigen, ist diese so zu gestalten, dass sie für die mit ihrer Hilfe fahrenden HO-Lkw ökonomisch attraktiv ausgebaut ist. Vom Netzausbau hängt ab, wie viele Quellen und Senken und damit wie viele Verlagerer und Kunden angefahren werden können. Bei den betriebswirtschaftlichen Überlegungen eines Fuhrunternehmens ist dies eine entscheidende Fragestellung. Die zentralen Produkte des Straßenfernverkehrs sind Stückgutverkehr, Ladungsverkehr, Hub-Verkehre (KEP) sowie Spezialtransporte. Hierbei beruhen Stückgut- und HUB-Netzwerke auf wiederkehrenden Verbindungen und sind dadurch

gut planbar. Ladungsverkehre und Spezialtransporte sind aufgrund ihrer Ladungsspezifika durch direkte Verbindungen zwischen Quelle und Senke mit Anschlussfahrten bei anderen Kunden gekennzeichnet. Netzwerke mit wiederkehrenden Verbindungen sind für den Einsatz von HO-Lkw aufgrund ihrer besseren Planbarkeit und definierbarer Routenwahl sowie gleichbleibender Auslastung des Verkehrsmittels besser geeignet als Ladungsverkehre und Spezialtransporte, die aufgrund ihrer kurzfristigen und variablen Routenwahl bzw. ihrer Ladungsspezifika besondere Leistungsanforderungen haben.

Die Branchenbetrachtung hat gezeigt, dass diese heterogen und mittelständisch geprägt ist. Die meisten Unternehmen beschränken sich nicht auf ein Produkt, sondern sind in mehreren Leistungsbereichen (z. B. Nah- und Fernverkehr) aktiv. Ein Hybrid-Oberleitungs-Lkw, der für den Fernverkehr konzipiert ist, kann somit nur unter Einschränkungen im wechselnden Einsatz für verschiedene Leistungsbereiche genutzt werden. Des Weiteren führen nur 39 % der Unternehmen Lkw-Fernverkehrsleistungen selbst durch. D. h., es wird rund 60 % der Aufträge an Subunternehmen weitergegeben, was bedeutet, dass in diesen Fällen der Spediteur unter Umständen keine Verfügung über die Wahl des Verkehrsmittels bzw. die Antriebsart hat.

Dem Hybrid-Oberleitungs-Lkw kommt der Trend zugute, dass mehr und mehr Fahrzeuge kurzfristig gemietet oder geleast werden. Die unternehmerischen Vorteile dieses Betriebs lassen sich auf den HO-Lkw übertragen, sodass unternehmerische Risiken (u. a. hinreichende Auslastung, Amortisation der Anschaffungskosten und Wartungsaufwände, Eigentümerrisiko, Wiederverkaufswert) für die Transportwirtschaft minimiert werden.

Der ideale Nutzer des Hybrid-Oberleitungs-Lkw ist folglich durch die folgenden Merkmale gekennzeichnet:

- Relationen mit hohem Autobahnanteil im HO-Netz
- Quelle und Senke liegen im Radius der Diesel-Hybrid-Reichweite rund um das HO-Netz
- Wiederkehrende Verbindungen mit gleichbleibendem Aufkommen
- Ladungen entsprechen Maßen eines Standard-Sattelauflegers
- Von der Zugmaschine wird keine überdurchschnittliche Leistung gefordert, etwa für Nebenverbraucher
- Investitionsbereitschaft + 18,1 % (2030 SZM: 128.673 Euro vs. 152.000 Euro, s. Tabelle 33 und Tabelle 36)
- Ausreichende Betriebsressourcen um potentiellen Ausfall der neuen Technologie ausgleichen zu können
- Notwendiges Know-how für Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge durch eigenes Personal oder Dienstleister gewährleistet
- Affinität zu Lkw-Miet- oder -Leasingmodellen.

Einen Impuls könnte die HO-Technologie erfahren, wenn diese mit anderen innovativen Technologien kombiniert wird. So könnte durch die Verknüpfung mit dem hochautomatisierten Fahren ein Transportnetzwerk entstehen, in dem auf wiederkehrenden Verbindungen (HO-Netz) Güterverkehre zuverlässig und im Linienverkehr stattfinden könnten unter Nutzung der technologischen Vorteile und Synergien aus Skaleneffekten (bspw. Nutzlast durch neuartige Fahrzeugkonzepte).

8.5 Zusammenfassung und Forschungsbedarf

Stückgutssystemverkehre und Hub-Verkehre im KEP-Bereich zeigen ein gewisses Potential für den Einsatz von HO-Lkw. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass weder Stückgut- noch KEP-Transportnetze völlig von der intendierten HO-Lkw-Infrastruktur erfasst werden. Die betroffenen Dienstleister wären also nicht in der Lage, alle Hauptlaufrelationen mit HO-Lkw zu bedienen. Es stellt sich die Frage, ob und unter welchen Voraussetzungen hier die Bereitschaft besteht, sich der HO-Technik zu öffnen, zumal deren Einsatz praktisch homogenen, dieselbetriebenen Flotten einen neuen Fahrzeugtyp hinzufügt und so ggf. eine Anpassung zahlreicher interner, auf Dieselfahrzeuge ausgerichteter Prozesse erzwingt.

Im Ladungsverkehr besteht die Schwierigkeit, dass HO-Lkw nur einen Teil der dort bedienten Relationen abdecken können und insbesondere bei Rundverkehren Inflexibilitäten aufweisen. Hier ist zu erforschen, inwieweit Fuhrunternehmen bereit sind, derartige Inflexibilitäten hinzunehmen, bzw. welche Ersparnisse die Teilstrecken mit elektrischer Traktion beitragen müssen, um HO-Lkw auch dann wirtschaftlich interessant zu machen, wenn sie nur teilweise optimal genutzt werden können.

Spezialtransporte werfen verschiedene Fragen auf. Eine pauschale Beurteilung sämtlicher Sondereinsatzmöglichkeiten verbietet sich, eröffnet aber eine Fülle an Forschungsoptionen. Hier wären zum Beispiel zu nennen, in welchen Fällen tatsächlich die Belastung durch Nebenantriebe den Einsatz von HO-Lkw ausschließt. Zudem wäre zu prüfen, welche Einsatzfelder gerade von der Auslegung als Hybridfahrzeug und einer Elektrifizierung des Aufbaus profitieren könnten. Beispielsweise wäre die Nutzung des Basis-HO-Lkw als Grundlage für jene Baustellenfahrzeuge prüfen, die einen Großteil ihrer produktiven Zeit an einem festen Ort verbringen und über vorhandene Infrastrukturen extern mit Strom versorgt werden könnten, anstelle die Nebenantriebsleistung durch Verbrennung von Dieselmotoren zu generieren.

Unabhängig vom Transportzweck bietet der HO-Lkw die Möglichkeit, den fahrtbedingten Schadstoffausstoß zu mindern. Hier stellt sich die Frage, ob künftig aus diesem Umstand heraus neue Geschäftsmodelle und Einnahmequellen für Fuhrunternehmen entstehen können. In der Diskussion zur Stimulation des HO-Lkw-Angebots wurde auf Emissionsgrenzwerte und die Internalisierung der Emissionswirkungen verwiesen. Daraus ergibt sich unmittelbar die Anschlussfrage, inwiefern Grenzwerte, Emissionsreporting bzw.

-abgaben das Entstehen und die dauerhafte Tragfähigkeit neuer Geschäftsmodelle begünstigen. Interessant ist, dass auf emissionsarmen bzw. -freien Transporte aufsetzende Geschäftsmodelle natürlich nicht per se den Einsatz von HO-Lkw bedingen. Insbesondere auf der letzten Meile existieren hier zahlreiche Alternativen. Es ist daher nicht nur zu fragen, wie der Einsatz von HO-Lkw durch derartige Maßnahmen stimuliert werden kann, sondern auch, welche Effekte sich auf andere Technologien wie bspw. vollelektrische Antriebe ergeben und ob diese Effekte komplementär oder konfliktär auf das Ziel einer Verbreitung von HO-Lkw wirken.

Es wurde darauf hingewiesen, dass die mittelständische Struktur der Logistikwirtschaft die Beschaffung von HO-Lkw durch Fuhrunternehmer aus zwei Gründen problematisch macht: Das Risiko einer Anschaffungsfinanzierung sowie das Risiko eines fehlenden Sekundärmarktes. Beide Risiken können mit gezielten Maßnahmen gelindert werden. In Bezug auf den Sekundärmarkt wurde genannt, dass die Lkw-Anbieter selbst einen Rückkauf der Fahrzeuge für einen garantierten Preis anbieten können. In Bezug auf die Finanzierung wären ähnliche staatliche Zuschüsse denkbar, wie sie derzeit bei der Förderung batterie-elektrischer Fahrzeuge existieren (Mehrkostenförderung). Es stellt sich die Frage, inwiefern gezielte, auf die Linderung der genannten Risiken gerichtete Maßnahmen gerade für mittelständische Logistikunternehmen einen Anreiz bewirken können, HO-Lkw als Teil ihrer Flotten aufzunehmen.

Das Geschäftsmodell des Traktionsdienstleisters als HO-Lkw-Flottenbetreiber ähnlich eines Lkw-Vermieters wurde angeregt, um als Mittler zwischen HO-Lkw-Hersteller und potentiellen Nutzern eine Risikominderung und Transaktionskostensenkung zu bewirken. Die Frage, wer als Traktionsdienstleister auftreten sollte, konnte nicht abschließend geklärt werden. Da hier ein zweiseitiger Markt vorliegt, sprechen gewisse Argumente dafür, die Infrastrukturbetreiber auch als Traktionsdienstleister auftreten zu lassen, wobei Fragen der Marktstruktur und Marktmacht ebenfalls noch zu untersuchen wären. Ebenso könnte der Frage nachgegangen werden, ob es gesamtwirtschaftlich wünschenswert wäre, die Anbieter von HO-Lkw in der Rolle der Traktionsdienstleister zu etablieren.

Aus der Diskussion der aktuellen Marktlage der für Deutschland relevanten Anbieter für Lkw ergab sich ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der strategischen Orientierung der betrachteten Unternehmen. Fest steht gleichwohl, dass in Deutschland ausschließlich Scania (als Partner von Siemens) Kompetenzen im Bereich des HO-Lkw aufbaut und dass Volvo über seine Unternehmenstochter Mack dies in den USA tut. Fest steht ebenfalls, dass hybridisierte und elektrisch betriebene Lkw von den Herstellern als Lösungen für lokale und regionale, speziell stadtnahe Verkehre betrachtet werden. Besonders bei der Vollelektrifizierung besteht für Zulieferunternehmen wie bspw. Benteler, Bosch oder ZF-TRW eine Chance, sich als neuer Marktteilnehmer im Nutzfahrzeugbereich zu etablieren. Es stellt sich hier daher sowohl aus Gründen dieser Marktdynamik als auch vor dem Hintergrund von Fortschritten in Batterie-, Energiespeicher- und Brennstoffzellentechnik

die Frage, inwiefern die Zurückhaltung der Fahrzeugindustrie beim HO-Lkw darin begründet liegt, dass in absehbarer Zukunft neuartige vollelektrische Fahrzeuge ohne Infrastrukturbindung deutlich effizienter Transportleistungen erbringen und das Konzept HO-Lkw bedrohen könnten.

In der Diskussion von Maßnahmen zur Stimulierung des Angebots von HO-Lkw durch die Industrie wurde herausgestellt, dass letztendlich eine Stimulation der Nachfrage nach HO-Lkw einen wesentlichen Hebel darstellt. Diese Nachfragestimulation erfordert jedoch langfristige und messbare ökonomische Vorteile aus dem Betrieb von HO-Lkw für den Fuhrunternehmer, sodass er sich für die Beschaffung eines solchen Fahrzeugs entscheidet. Messbare Vorteile ergeben sich aus der Nettoersparnis wegfallender Dieselmotorkosten abzüglich der Kosten für Elektrotraktion. Hier wurden verschiedene Maßnahmen genannt, die dazu dienen, laufende Ersparnisse zu sichern. Da für die Beschaffungsentscheidung von HO-Lkw die Einsatzmöglichkeiten sowie die Kosten für Beschaffung und Betrieb („Total Cost of Ownership“) zentral sind, bietet es sich an, die wichtigsten Stellschrauben dieser Kalkulationen genau zu untersuchen: Welche Möglichkeiten bestehen, durch eine Gestaltung der Energiesteuer der Gefahr vorzubeugen, dass HO-Lkw aufgrund ungünstiger Dieselmotorkosten- und Strompreise kaum noch nachweisbare Ersparnisse erwirtschaften? Dieser Fall ist für CNG-Nutzfahrzeuge seit einiger Zeit eingetreten und hat bspw. bei Kraftomnibussen zu einem deutlichen Rückgang der bundesdeutschen Flotte geführt (KBA 2012, 2013, 2014c, 2015a, 2016; zu den Gaspreisen gibt Eurostat 2016 einen Überblick). Die Unmöglichkeit, langfristige Marktconstellations vorauszusehen zeigt die Wichtigkeit, ökologische Vorteile ins ökonomische Kalkül der Fuhrunternehmer zu integrieren (Internalisierung). Der Erfolg solcher Regulationen ist davon abhängig, ob es gelingt, die Entscheidungen in politisch gewünschte Richtungen zu beeinflussen. Daher sollte im Kontext der angeregten Fahrzeugbesteuerung und Grenzwertsetzung erforscht werden, welche tatsächlichen Steuersätze und Grenzwerte benötigt werden und wie die konkrete Ausgestaltung derartiger fiskalischer Maßnahmen erfolgen muss, um Fuhrunternehmen aus ökonomischen Gründen zu motivieren, Alternativen zum bisher benutzten Diesel-Lkw ernsthaft zu erwägen. Wie bereits oben angedeutet, stellt sich auch hier die Frage nach Spill-Over-Effekten. Es ist daher nicht nur zu fragen, ob ein Erfolg in Bezug auf den HO-Lkw unter bestimmten Konstellationen erwartet werden darf, sondern auch, wie die untersuchten Maßnahmen die Fahrzeugbeschaffungsentscheidung im Hinblick auf weitere mögliche Transportmittel beeinflusst.

9 Finanzierungsmodelle einer Oberleitungsinfrastruktur

*Hauptbearbeiter/innen: J. Buch (Fraunhofer IML),
M. Wietschel (Fraunhofer ISI)*

9.1 Einleitung

Bei der Finanzierung von HO-Infrastruktur stehen Politik und Industrie – wie häufig bei alternativen Antriebssystemen im Verkehr – vor dem sog. „Henne-Ei“-Problem: ohne Infrastruktur keine Fahrzeugentwicklung und ohne Fahrzeuge keine Infrastrukturentwicklung. Präziser: Logistikunternehmen werden erst in Oberleitung-Hybrid-Lkw investieren, wenn ausreichend Infrastruktur vorhanden ist, um hohe Fahrleistungen zu erzielen, sodass die höheren Investitionen in die Fahrzeuge sich für sie mit einer angemessenen Amortisationszeit wirtschaftlich rechnen. Auf der anderen Seite kann eine HO-Infrastruktur erst in einem „eingeschwungenen“ Zustand wirtschaftlich ausgeglichen (oder ggf. rentabel) betrieben werden (vgl. Abschnitt 3.4.4). Dafür bedarf es einer guten Auslastung, die während des Markthochlaufes nicht erreicht werden kann. Das folgende Kapitel beschäftigt sich deshalb mit verschiedenen Finanzierungsmodellen für die Aufbauphase der Oberleitungsinfrastruktur.

9.2 Alternative Finanzierungsmodelle

Mobilität gilt als Bestandteil der Daseinsvorsorge. Die Bereitstellung von Infrastruktur für Mobilität lässt sich daher als Aufgabe des Staates auslegen, der dadurch ein öffentliches Gut bereitstellt (siehe dazu Stock und Bernecker 2014). Auch aktuelle rechtliche bzw. regulatorische Anforderungen können die Annahme stützen, eine HO-Infrastruktur für den Fernverkehr als Teil einer Bundesautobahn aufzufassen, ähnlich wie Mautbrücken, Beleuchtung, Tank- und Rastanlagen etc. Die Verantwortung aller damit verbundenen Aufgaben liegt beim Staat.

Gesetze, die die Einstufung einer HO-Infrastruktur als Teil einer Autobahn bedingen könnten sind: Grundsätzlich werden Versorgungsleitungen nach §8 FStrG durch sogenannte Sondernutzung geregelt. Sondernutzung liegt vor, wenn die Benutzung der Bundesfernstraßen über den Gemeingebrauch hinausgeht und bedarf der Erlaubnis der Straßenbaubehörde (§8 FStrG Abs. 1 (Bundesfernstraßengesetz)). Bei einem HO-System lässt sich allerdings Gemeingebrauch unterstellen (d. h. keine Sondernutzung), denn „kein Gemeingebrauch liegt vor, wenn jemand die Straße nicht vorwiegend zum Verkehr, sondern zu anderen Zwecken benutzt“ (§7 FStrG Abs. 1 (Bundesfernstraßengesetz)).

Prinzipiell ist aber auch die Bereitstellung auf Initiative der Privatwirtschaft vorstellbar. Eine mögliche entsprechende Vorgehensweise für die Errichtung von Oberleitungen lässt sich bei Straßenbahn- bzw. Obusinfrastruktur beobachten. Hier wird in der Regel von ei-

nem (privatwirtschaftlichen oder öffentlichen) Unternehmen eine Genehmigung für die Errichtung bei der zuständigen Behörde beantragt (vgl. PBefG §2 Abs. 2 und §11 Abs. 1 (Personenbeförderungsgesetz)).

Die Errichtung einer HO-Infrastruktur auf derselben Grundlage wie Straßenbahninfrastruktur ist allerdings nicht möglich, sondern lediglich als Vorgehensmodell zu betrachten. Zum einen liegt die Zuständigkeit im Falle von Straßenbahnen bei den Genehmigungsbehörden der betroffenen Bezirke und nicht, wie im Falle von Autobahnen, beim Bund bzw. in dessen Auftrag bei den Landesstraßenbehörden⁶⁴. Zum anderen ist die rechtliche Grundlage das Personenbeförderungsgesetz, welches sich nicht auf eine HO-Infrastruktur anwenden lässt. (Trivial: Es handelt sich nicht primär um Personenbeförderung.) Ein weiteres aktuelles Beispiel privatwirtschaftlicher Initiative im Bereich Infrastrukturbereitstellung ist „H2-Mobility“ – ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen mit dem Ziel, flächendeckend Wasserstoff-Tankstellen zu errichten (vgl. h2-mobility 2016).

Unabhängig allerdings, ob die Initiative von der Privatwirtschaft oder von öffentlicher Seite ausgeht, wird ohne Veranlassung durch den Staat bzw. dem Bund eine Bereitstellung von HO-Infrastruktur nicht möglich sein, da er Eigentümer der Autobahnen ist; bei privatwirtschaftlichen Initiativen müssen zunächst entsprechende rechtliche Grundlagen geschaffen werden, die Autobahn und HO-Infrastruktur voneinander trennen. Außerdem birgt ein Projekt dieser Größenordnung Risiken, die ein privatwirtschaftlicher Akteur kaum alleine tragen wird, was ebenfalls der öffentlichen Seite eine entscheidende Rolle zukommen lässt. Des Weiteren kann dem Staat selbst unterstellt werden, besonders auf Grund von CO₂-Minderungszielen, dass er durchaus ein (volkswirtschaftliches) Interesse an der Errichtung einer HO-Infrastruktur (oder ggf. vergleichbaren Technologien) haben kann. Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich daher stärker mit Bereitstellung von Seiten des Staates und dabei mit Einbindungsmöglichkeiten der Privatwirtschaft über sog. Public-Private-Partnerships (PPP). Prinzipiell gibt es aber besonders zwischen PPP und einer rein privatwirtschaftlichen Initiative große inhaltliche Überschneidungen, womit die beiden Richtungen der Initiative nicht vollständig getrennt voneinander zu betrachten sind.

Liegt die Verantwortung der HO-Infrastrukturbereitstellung beim Staat gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Finanzierungsinstrumente: Haushaltsfinanzierung und Nutzerfinanzierung. Haushaltsfinanzierung kann auf Grund der Abgrenzung zu Nutzerfinanzierung im Folgenden mit Steuerfinanzierung gleichgesetzt werden (vgl. Daehre et al. 2012). Nutzerfinanzierung bezieht sich besonders aus Gründen der praktischen Umsetzbarkeit im Kontext einer HO-Infrastruktur auf Gebührenfinanzierung (Stockund Bernecker 2014). Eine Kombination der beiden Instrumente ist ebenfalls möglich. Beispielsweise kann eine

⁶⁴ Aktuelle Pläne der Bundesregierung zielen allerdings darauf ab, in Zukunft dem Bund über eine Bundesfernstraßengesellschaft die alleinige Verantwortung zu übertragen.

Infrastruktur mit Steuermitteln vorfinanziert und anschließend über Nutzergebühren refinanziert werden, um die Kosten längerfristig gesehen, nicht dem Steuerzahler aufzubürden.

Im Bereich von Steuerfinanzierung bezüglich einer HO-Infrastruktur ist vor allem die Möglichkeit einer Erhöhung allgemeiner Steuern zu nennen (für weitere bzgl. HO-Infrastruktur weniger relevante Optionen siehe (Daehre et al. 2012)). Steuererhöhungen sind im politischen Kontext insbesondere in der Legislaturperiode 2013 bis 2017 ein sensibles Thema und daher für HO-Infrastruktur wahrscheinlich nur bedingt als Finanzierungsinstrument anzusehen. Trotzdem soll dieser Abschnitt prinzipielle Möglichkeiten aufzeigen: Bei der Betrachtung von ergiebigen Steuerarten (Einkommens-, Körperschafts-, Mehrwert-, Energie-, KFZ-Steuer) kommen u. a. auf Grund von Fragen der sozialen Gerechtigkeit und internationaler Wettbewerbsfähigkeit lediglich Steuern aus dem Verkehrsbereich infrage (Energie- und KFZ-Steuer). Eine Erhöhung der Kfz-Steuer um etwa 10 % würde rund 750 Mio. Euro Mehreinnahmen pro Jahr bedeuten (vgl. Daehre et al. 2012). Bei der kraftstoffbezogenen Energiesteuer würde eine Erhöhung von etwa 5 EuroCent je Liter 3 Mrd. Euro Mehreinnahmen pro Jahr generieren (vgl. Daehre et al. 2012). Würde der Aufbau der HO-Infrastruktur mit den Klimaschutzziele begründet, würde die Erhöhung der Energiesteuern sogar einen zusätzlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten. Aus Sicht des Klimaschutzes eine Win-Win-Situation.

Bei Nutzerfinanzierung sollen die Nutzer u. a. über Gebühren für die Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur aufkommen. Gebühren sind in unmittelbarem Zusammenhang mit der in Anspruch genommenen Leistung zu setzen. Für die Ermittlung der Gebührenhöhe sind vor allem politische Interessen und rechtliche Rahmenbedingungen (besonders das Europäische Gemeinschaftsrecht), die eine übermäßige Belastung der Nutzer vermeiden sollen, mit ausschlaggebend (vgl. Stock und Bernecker 2014). Als Beispiele für Nutzerfinanzierung sind die deutsche Lkw-Maut oder mit Einschränkungen auch Vignetten-Systeme, wie aus der Schweiz und Österreich bekannt, zu nennen. Als konkretes Instrument der Nutzerfinanzierung, das dem deutschen Staat derzeit in Hinblick auf eine HO-Finanzierung zu Verfügung steht, ist die Lkw-Maut. Dabei könnte zusätzlicher Finanzierungsbedarf über eine Erhöhung und/oder Ausweitung der Lkw-Maut gedeckt werden. Die Erhöhung der Lkw-Maut stellt eine Anhebung der Gebühren dar. Dabei sind die Grenzen der Anhebung vor allem durch die EU-Wegekostenrichtlinie (Richtlinie 1999/62/EG geändert durch 2006/38/EG (siehe Europäische Gemeinschaft (1999)) festgesetzt. Die Wegekostenrichtlinie schreibt vor, dass die Höhe der Maut sich an den Infrastrukturkosten orientieren soll. Das heißt, wenn die HO-Infrastruktur als Teil der Verkehrsinfrastruktur interpretiert werden kann, lassen sich deren Kosten im Kern bei den Mautgebühren integrieren. Dies gilt es insbesondere rechtlich zu klären. Eine Ausweitung der Lkw-Maut lässt sich prinzipiell über Ausweitung des Streckennetzes oder über die Ausweitung auf weitere Lastenklassen realisieren. Die folgende Tabelle zeigt Einnahmepotentiale.

Tabelle 83: Einnahmepotentiale der Lkw-Maut

Ausweitung...	Erwartete zusätzliche jährliche Einnahmen
... des Streckennetzes für alle Lkw > 12 t zGG auf alle derzeit nicht bemauteten Bundesstraßen	2,3 Mrd. Euro
... des Streckennetzes für alle Lkw > 12 t zGG zusätzlich auf alle Straßen (Landes-, Staats-, Kreis- und gemeindliche Hauptstraßen)	0,8 Mrd. Euro
... der Lastenklassen für alle Lkw von 3,5 – 12 t auf den derzeit bemauteten Straßen	0,5 Mrd. Euro
... der Lastenklassen für alle Lkw von 3,5 – 12 t zusätzliche auf alle Straßen	0,8 Mrd. Euro

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Daehre et al. 2012, S. 63-81)

Die Summe der möglichen Mehreinnahmen beläuft sich also auf 4,4 Mrd. Euro jährlich.

Anmerkung: Der hier zu Grunde gelegte Bericht ist aus dem Jahr 2012. Im Oktober 2015 wurde die Lkw-Maut bereits auf Lkw > 7,5 t ausgeweitet. Die erwarteten jährlichen Mehreinnahmen belaufen sich auf ca. 0,4 Mrd. Euro (vgl. DSLV 2015). Damit reduziert sich das Potential der kumulierten Mehreinnahmen auf ca. 4 Mrd. Euro jährlich. Außerdem ist in der aktuellen Koalitionsvereinbarung für die 18. Legislaturperiode (2013-2017) eine Ausweitung der Gebührenpflicht auf Bundesstraßen festgehalten, die zum 1. Juli 2018 in Kraft treten soll.

Für eine tiefere und umfassende Auseinandersetzung mit allgemeinen Verkehrsinfrastruktur-Finanzierungsmöglichkeiten in Deutschland empfiehlt sich der Bericht der „Daehre Kommission“. Diesem und dem Vorgängerbericht, der „Pällmann Kommission“, sowie dem Nachfolgebericht, der „Bodewig Kommission“, werden maßgebliche Anteile am Anstoß der Diskussion zur Nutzerfinanzierung zugesprochen. Die Berichte geben praxisnahe Empfehlungen für verschiedene Finanzierungsinstrumente und befassen sich mit dem Investitionsdefizit im deutschen Verkehrssektor.

Im Zusammenhang mit Nutzerfinanzierung wird häufig die Einrichtung von Fonds diskutiert. Sie werden als ein mögliches Instrument angesehen, zweckgebundene Nutzerfinanzierung institutionell abzubilden. Dabei soll ein haushaltsexterner Fonds zur Infrastrukturfinanzierung vor allem aus Nutzungsgebühren gespeist und nach Bedarf durch Haushaltsmittel ko-finanziert werden (Bernecker und Fichert 2013). Ein Fonds bietet also auch die Möglichkeit, Steuer- und Nutzerfinanzierung zu kombinieren. Fonds in einer Größenordnung von 12 Mrd. Euro oder größer sind zwar unüblich, aber durchaus vorstellbar. Besonders die relativ sinkenden Transaktionskosten (für Einrichtung und Verwaltung) bei steigendem Volumen lassen diese Überlegung sinnvoll erscheinen.

Betrachtet man nun die konkreten Finanzierungsoptionen des Staates im aktuellen politischen und gesellschaftlichen Kontext, so ist eine Haushaltsfinanzierung aus Steuermitteln auf Grund des allgemein festgestellten jährlichen Investitionsdefizits im Bereich Verkehr

von 7,2 Mrd. Euro (davon 4,7 Mrd. Euro im Bereich Straße) sehr fraglich (vgl. Daehre et al. 2012). Hinzu kommt, dass ein HO-System mit dem von der EU forcierten Ausbau der Schiene in Konflikt steht. Bis 2050 sollen 50 % des Güterverkehrs für Entfernungen > 300 km auf den Eisenbahn- und Schiffsverkehr verlagert werden (vgl. Kapitel 10). Auch die gesellschaftliche Akzeptanz (also die des Steuerzahlers) ist bislang wenig untersucht. Dies lässt einen politischen Konsens, um Steuermittel einer Größenordnung von 8-10 Mrd. Euro freizugeben, wenig wahrscheinlich erscheinen.

Eine Kreditaufnahme zur Finanzierung durch den Bund (bzw. den Ländern) ist wegen der im Grundgesetz verankerten Schuldenbremse derzeit keine Option für eine HO-Infrastruktur. In Art. 109 GG Abs. 3 (Grundgesetz) ist festgehalten: „Die Haushalte von Bund und Ländern sind grundsätzlich ohne Einnahmen aus Krediten auszugleichen.“

Damit rückt als Finanzierungsinstrument die Nutzerfinanzierung in den Mittelpunkt der Überlegungen, z. B. in Form einer Maut. Da eine auf Nutzergebühren basierte Finanzierung allerdings erst Einnahmen generiert, wenn die Infrastruktur steht und ausreichend genutzt wird, ist eine Vorfinanzierung nötig. Hier wird vor allem die Einbindung privaten Kapitals diskutiert (vgl. z. B. Stock und Bernecker 2014).

Um privates Kapital bei der Realisierung von Infrastrukturprojekten einzubinden, haben sich seit Ende der 1990er-Jahre sog. Public-Privat-Partnerships (PPP) oder zu Deutsch öffentlich-private-Partnerschaften (ÖPP) als Instrument immer häufiger etabliert. „[PPP] bezieht sich im Allgemeinen auf Formen der Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Stellen und Privatunternehmen zwecks Finanzierung, Bau, Renovierung, Betrieb oder Unterhalt einer Infrastruktur oder die Bereitstellung einer Dienstleistung“ (EU 2004). Bis Mitte 2015 wurden im Bereich Straßenbau 17 Projekte mit einem Gesamtvolumen von 2,8 Mrd. Euro dokumentiert (vgl. PPP-Projekt Datenbank). Wesentliche Merkmale von PPP sowie mögliche Vor- und Nachteile lassen sich z. B. in (Cruz und Marquez 2013) nachlesen. Der größte Diskussionspunkt bzgl. PPP, weshalb u. a. der Bundesrechnungshof von PPP abrät, sind die möglicherweise höheren Kosten gegenüber rein öffentlicher Finanzierung.

In mancher Literatur werden PPP als Finanzierungsinstrument dargestellt. Die Vielfalt der unter den Begriff PPP fallenden Modelle und Teilaspekte lässt allerdings eine Trennung der Begriffe sinnvoll erscheinen, da je nach Ausgestaltung der PPP verschiedene Ausgestaltungsvarianten infrage kommen. Übergeordnet wird bei der Finanzierung häufig zwischen Forfaitierung mit Einredeverzicht und Projektfinanzierung unterschieden (vgl. Leidinger et al. 2010). Bei Forfaitierung „steht der Auftraggeber nach Abnahme der Bauleistungen und Ausstellung des Einredeverzichts in der Pflicht, den Schuldendienst unabhängig von der Bewirtschaftungsqualität des privaten Betreibers zu leisten. [Dabei sollen] kommunalkreditähnliche[...] Konditionen [erzielt werden. Bei Projektfinanzierung] „ist die Zahlungspflicht des Auftraggebers an die Leistungserfüllung bzw. an die Erlöse des Betreibers gekoppelt.“ (vgl. Leidinger et al. 2010).

Bei der Unterteilung von PPP in verschiedene Modelle gibt es ähnlich wie bei der Definition von PPP eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze. Eine sehr häufig verwendete übergeordnete Kategorisierung von PPP-Formen ist die Einteilung in Organisationsmodell und Vertragsmodell (vgl. (Cruz und Marquez 2013)). Bei Organisationsmodellen sind je mindestens eine private und eine öffentliche Instanz Shareholder eines zumeist neu gegründeten eigenen Rechtskörpers (wie z. B. einer GmbH), wobei verschiedenste Eigentümeranteile vorstellbar sind. Beim Vertragsmodell hingegen sind die beiden Instanzen über Verträge miteinander verbunden. Diese Verträge regeln Verantwortlichkeiten, Rechte und Pflichten der Vertragsparteien (vgl. Cruz und Marquez 2013).

Bezüglich einer HO-Infrastruktur werden hier nur die zum weiteren Verständnis relevant und sinnvoll erscheinenden Modelle vorgestellt. Eine breitere Auseinandersetzung bietet PPC et al. 2003.

Beim Erwerbmodell werden Finanzierung, Bau und Betrieb an eine private Instanz übertragen. Das Betriebsrisiko liegt während der Vertragslaufzeit beim privaten, das Nutzungsrecht beim öffentlichen Partner. Der Öffentliche zahlt während der Nutzungszeit eine regelmäßige Gebühr an den Privaten, der über die gesamte Vertragslaufzeit Eigentümer des Wirtschaftsgutes ist. Nach Ablauf der Vertragslaufzeit geht das Eigentumsrecht auf den öffentlichen Partner über. Das Erwerbmodell wird häufig auch als sog. BOT-Modell bezeichnet (Build-Operate-Transfer) (Prokop und Borde 2010).

Beim Inhaber- oder Betreibermodell werden ebenfalls die Aufgaben von der Finanzierung bis zum Betrieb an einen privaten Anbieter übertragen. Dabei wird der öffentliche Partner durch das Betreibermodell „langfristig von allen anfallenden Aufgaben befreit“ (Prokop und Borde 2010). Lediglich die Kontroll- und Haftungspflicht obliegt ihm weiterhin. Im Vergleich zum Erwerbmodell liegt also auch das Nutzungsrecht beim Privaten. Dies erlaubt ihm beispielsweise, über Nutzungsgebühren seine Investition zu refinanzieren. Nach Vertragsende gehen die Nutzungsrechte auf die öffentliche Instanz über.

Das Konzessionsmodell weist eine inhaltliche Überschneidung mit dem Betreibermodell auf. Hier verpflichtet sich der private Partner, das Wirtschaftsgut zu planen, errichten und zu betreiben (Baukonzession) und eine Dienstleistung gegenüber dem Nutzer zu erbringen (Dienstleistungskonzession) (vgl. VBD-Beratung 2016). Für die erbrachte Dienstleistung nimmt der Betreiber eine Nutzungsgebühr ein, mittels derer er seine Investition refinanziert.

Im Bereich des Fernstraßenbaus verwendet das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi) eigene Begrifflichkeiten, um verschiedenen PPP-Modelle voneinander abzugrenzen:

- Das *A-Modell* (= Ausbaumodell) ist eine Mischung aus Konzessions- und Betreibermodell, bei dem der private Partner eine Konzession erhält, eine bestehende Autobahn auszubauen und zu betreiben. Dafür erhält er die auf dem Streckenabschnitt anfallen-

den Lkw-Mauteinnahmen. Außerdem kommt es ggf. zu einer Anschubfinanzierung. Die Vertragslaufzeit beträgt i.d.R. 30 Jahre.

- Beim *V-Modell* (= Verfügbarkeitsmodell) handelt es sich um ein Erwerbermodell, bei dem der private Anbieter ein festgelegtes „Verfügbarkeitsentgelt“ vom öffentlichen Partner bekommt (Verfügbarkeit bezieht sich dabei auf die Verfügbarkeit der Straße für den Verkehr).
- Das *F-Modell* (= Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetz-Modell) ist ein Konzessionsmodell. Die Refinanzierung der privaten Investition erfolgt über eine eigene Maut, deren Höhe allerdings die öffentliche Hand bestimmt. Inwieweit beispielsweise eine e-Lkw-Maut für die Nutzung der Oberleitungen rechtlich zulässig wäre, kann hier nicht beurteilt werden.

Für einen Einblick in Kilometeranzahl, Finanzierungs- und Konzessionsvolumen, Kapitalherkunft und Laufzeiten von ausgewählten PPP-Projekten im Straßenbau, die nach dem A-Modell ausgeführt wurden siehe (Bernecker und Fichert 2013).

Es liegt nahe, sich an denen im Bereich Straße etablierten PPP-Modellen zu orientieren; zum einen weil den zuständigen Behörden die Begrifflichkeiten geläufig sind, zum anderen könnten möglicherweise wertvolle Erfahrungen und Erkenntnisse für ein HOI-PPP-Projekt gewonnen werden.

In den meisten PPP-Modellen übernimmt also der private Partner auch die (Vor-)Finanzierung, die anschließend über Nutzerentgelte oder in Raten vom Staat zurückgezahlt werden. Dies führt dazu, dass die Investition mit höheren Zinskosten belastet wird, als wenn der Staat als Finanzier eintritt, da sowohl bei Haushaltsmitteln (Zinssatz 0 %, allerdings Opportunitätskosten) als auch bei vom Staat aufgenommenen Krediten die Zinssätze niedriger liegen als bei privater Finanzierung.

Für die (Vor-)Finanzierung der Investition durch den privaten Partner stehen alle Möglichkeiten der Eigen- und Fremdfinanzierung offen. Zusätzlich kann sich der Staat an einer Vorfinanzierung mittels einer Anschubfinanzierung von bis zu 50 % der Baukosten (vgl. BMVi 2016) beteiligen. Es wurden aber auch schon PPP-Projekte ohne Anschubfinanzierung durchgeführt, z. B. der Ausbau der A5 zwischen Malsch und Offenburg (Konzessionsvolumen: 1 Mrd. Euro). Eine solche Anschubfinanzierung könnte aus Haushaltsmitteln finanziert werden (z. B. über Steuererhöhungen oder eine Ausweitung der Lkw-Maut). Ob und in welcher Höhe sich der Staat an einer Vorfinanzierung beteiligt, hängt auch von der politischen Priorisierung eines HO-Infrastrukturprojekts ab.

Ein weiteres Instrument, das in Bezug auf eine Vorfinanzierung genannt werden sollte, sind Fördermittel. Fördermittel können in Form von verlorenen Zuschüssen (direkte Auszahlung von Geldern), zinsgünstigen Krediten vom Staat aber auch z. B. durch eine Bürgschaft durch den öffentlichen Partner genutzt werden und damit den Privaten unterstützen bzw. entlasten. Es gibt sowohl Fördermittel von Bund und Ländern, als auch von der EU. Außerdem hat die EU mit dem Europäischen Fonds für strategische Investitionen (EFSI,

oder Juncker-Plan) ein neues Instrument geschaffen mit dem flexibler als bisher zukunftsfähige Investitionen angestoßen werden können, auch und insbesondere in Infrastrukturen. Die Europäische Investitionsbank und die deutsche KfW unterstützen die Finanzierung solcher Investitionen. Damit erscheint der EFSI ebenfalls als ein Instrument, um eine HO-Infrastruktur zumindest kofinanzieren.

Um eine konkretere Ausprägung eines HOI-PPP-Projektes festzulegen, ist es wichtig, mögliche Akteure zu identifizieren, zu analysieren und zu verstehen, um daraufhin ein Modell zu wählen bzw. anzupassen, das eine Ausgewogenheit der Interessen widerspiegelt. Dabei ist zu betrachten, wer genau der öffentliche Partner ist, wer der Private und über welches Rahmenwerk sie in Verbindung zueinander stehen sollen. Besonders die Risikoverteilung und in diesem Zusammenhang die Vertragsgestaltung zwischen den einzelnen Partnern sind von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche PPP. Risiken in einem solchen Projekt ergeben sich u. a. bei den Baukosten oder der Marktentwicklung, die auf Grund der Projektgröße und des langen Planungshorizontes nur wenig exakt prognostiziert werden können. Häufig übernimmt der öffentliche Partner derart ausschlaggebende Risiken, da es bei der Übernahme durch den privaten zu deutlich höheren Kosten für die Risikoübernahme kommt. Generell sollte jeder Partner die Risiken tragen, die er am besten beherrschen kann. Zusätzlich müssen Akteure bzw. Rahmenbedingungen identifiziert und analysiert werden, die nicht direkt mit der PPP in Verbindung stehen, aber trotzdem großen Einfluss auf die Partnerschaft haben können.

Das folgende Schaubild stellt beispielhaft Akteure und Einflüsse/Rahmenbedingungen dar, die je nach Ausgestaltung des PPP von Bedeutung sein könnten und die es weiter zu analysieren gilt.

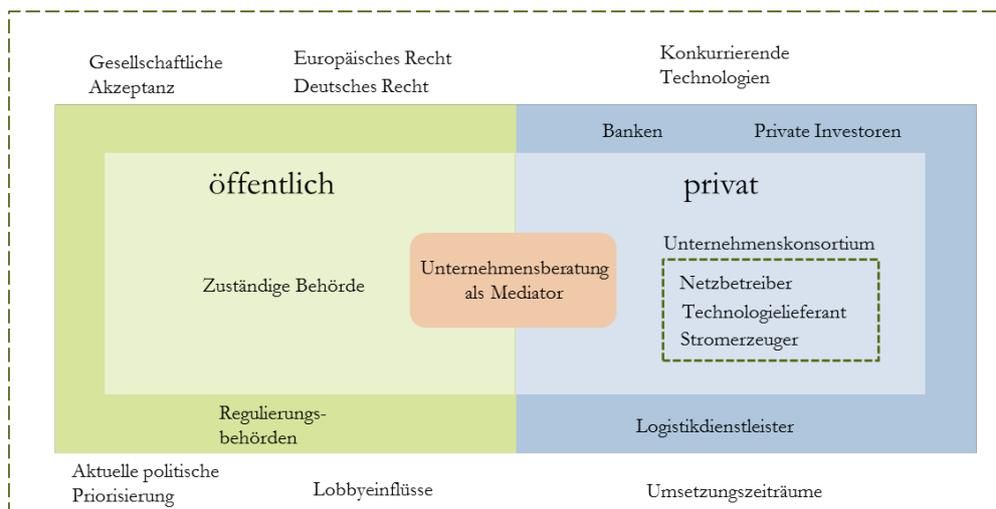


Abbildung 89: Beispielhafte Ausprägung einer möglichen PPP (eigene Darstellung)

9.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Art der Finanzierung einer HO-Infrastruktur vor allem von der politischen Priorisierung abhängig ist. Unabhängig davon allerdings, ob der Staat langfristig seinen Haushalt für ein solches Projekt (direkt) belasten will oder nicht, ist die Einbindung privaten Kapitals zur (Vor-)Finanzierung einer HO-Infrastruktur durchaus als realistisch einzustufen. Diesbezüglich stellt der Bundesverband deutscher Banken e.V. fest, dass „in Deutschland ausreichend Liquidität zur Verfügung“ steht (vgl. Bankenverband 2014) und neben Kreditinstituten auch Versicherungen und Fonds zunehmend nach langfristigen Anlagemöglichkeiten suchen. Außerdem würden private Banken „mehr großvolumige [PPP-]Projekte“ begrüßen (vgl. Bankenverband 2014).

10 Die europäische Dimension

Hauptbearbeiter/innen: W. Schade, S. Mader (M-Five)

10.1 Einleitung

Dieses Kapitel diskutiert die EU-Dimension der Einführung von Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw) in Deutschland bzw. auch in den Nachbarländern. Der Fokus liegt dabei auf der politischen Passfähigkeit in die EU-Politik bzw. die Politik der Nachbarstaaten. Dazu werden im folgenden Kapitel die relevanten Politiken der EU diskutiert. Anschließend wird die Förderpolitik der EU und ihre Optionen zur Förderung der Einführung von HO-Lkw beschrieben. Anschließend wird die Entwicklung zweier europäischer Korridore mit mutmaßlichem Potential für HO-Lkw dargestellt. Abschließend werden Schlussfolgerungen zur Passfähigkeit von HO-Lkw mit der EU-Politik gezogen und ein Blick in ausgewählte Nachbarländer geworfen. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung und dem Forschungsbedarf.

10.1.1 Einordnung in die verkehrspolitische Strategie der EU

Den Kern der verkehrspolitischen Strategie der EU bilden (1) das aktuelle Weißbuch der Verkehrspolitik, „*Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*, COM(2011) 144“ (Europäische Kommission 2011a), und (2) die Entwicklung der Trans-Europäischen Verkehrsnetze (TEN-V), „*Leitlinien für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes*, VO 1315/2013“ (EU 2013a) sowie deren Ko-Finanzierung durch die EU, „*Schaffung der Fazilität „Connecting Europe“*, VO 1316/2013“ (EU 2013b). In den folgenden Kapiteln wird diskutiert, wo und wie die Einführung von Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw) konform mit den EU-Zielen und der EU-Politik wäre und wo nicht.

10.1.2 Weißbuch zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum

In einem zweijährigen Beteiligungsprozess hat die EU-Kommission von 2009 bis 2011 die Verkehrsstrategie zum einheitlichen europäischen Verkehrsraum entwickelt. Als Oberziel der Strategie wurde die Reduktion der Treibhausgase aus dem Verkehr bis 2050 um mindestens 60 % gegenüber dem Basisjahr 1990 definiert (Europäische Kommission 2011a). Daneben wurde eine zweite zentrale Zielebene festgelegt, sowie 40 Handlungsfelder mit weit mehr als 100 zu ergreifenden Instrumenten bzw. Aktivitäten. Die Verlagerung des langlaufenden Güterverkehrs auf die Schiene ist bereits auf der zentralen zweiten Zielebene definiert und gehört damit zu den wichtigsten Zielen der Verkehrsstrategie der EU-Kommission. Bis 2050 sollen mindestens 50 % der Güterverkehre über eine Distanz von über 300 km vom Lkw auf die Bahn und das Binnenschiff verlagert werden. Bis 2030 soll

dies bereits für mindestens 30 % der Fall sein. Eine Verlagerung von Verkehren von über 300 km Distanz auf HO-Lkw würde diesem wichtigen EU-Ziel widersprechen.

10.1.3 TEN-V und Kernnetzkorridore (CNC)

Aufbauend auf einem umfassenden Beteiligungsprozess und nach einem längeren Trilog zwischen EU-Kommission, EU-Parlament und EU-Ministerrat verabschiedeten das Parlament und der Rat Ende 2013 die beiden zentralen Verordnungen zum Aufbau des trans-europäischen Verkehrsnetzes (TEN-V): (1) die **Leitlinien** für den Aufbau des Trans-europäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) (EU 2013a) und (2) die Strukturen für die **Ko-Finanzierung der TEN-V mit europäischen Budgetmitteln** durch die Connecting Europe Fazilität (CEF) (EU 2013b).⁶⁵

Die Leitlinien (EU 2013a) definieren das Zwei-Ebenen-Konzept der TEN-V mit der strategischen Ebene des **Kernnetzes**, welches bis 2030 von den Mitgliedsstaaten vollständig zu implementieren ist, und des **Gesamtnetzes**, welches bis 2050 implementiert sein soll. Die TEN-V beinhalten Infrastrukturen für alle Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser, Luft) und für multi-modale Verkehre. Die Leitlinien gehen weit darüber hinaus, nur Netz-Infrastrukturen einzubeziehen, sondern spezifizieren explizit, welche weiteren Infrastrukturen zu den TEN-V gehören sollen, wie z. B. Telematiksysteme, nachhaltige Lösungen im Güterverkehr (wie z. B. leise Güterwagen), Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit sowie alternative Kraftstoffe. Außerdem werden Minimal-Standards für Infrastrukturen definiert, wie z. B. für den Schienengüterverkehr eine realisierbare Mindestgeschwindigkeit von 100 km/h, Ausweich- und Aufstellgleise mit einer Länge von mindestens 740 m etc.

Hinsichtlich spezieller Anforderungen für die Straßenverkehrsinfrastruktur legt Artikel 39, Absatz (2), Satz c mit Bezug zum Ausbau der TEN-V als Autobahn oder zumindest als Schnellstraße fest:

- Etwa alle 100 km Rastplätze für Lkw mit einem ausreichenden Sicherheitsniveau (z. B. für Schlafpausen) anzubieten.
- alternative umweltfreundliche Kraftstoffe verfügbar zu machen.

Als alternative Kraftstoffe werden solche beschrieben, die die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen verringern und zur Dekarbonisierung beitragen (Artikel 3, Satz w). Dazu gehört auch explizit Strom.

Die Lage des Kernnetzes wird analytisch definiert anhand von (1) Knoten, d. h. den wichtigsten Städten der EU-Mitgliedsstaaten, (2) den wichtigsten Umschlagknoten für Verkeh-

⁶⁵ Die beiden Verordnungen sind im Literaturverzeichnis vollständig referenziert unter EU 2013a und EU 2013b.

re, d. h. Flughäfen, Seehäfen, Binnenhäfen, Straße-Schiene-Umschlag-Terminals, und (3) den Grenzübergängen zu Nicht-EU-Mitgliedsstaaten. Diese sind explizit in Anhang II der Leitlinien aufgeführt. Für die Umschlagknoten sind ebenfalls die Knoten des Gesamtnetzes im gleichen Anhang aufgelistet.

Die Verordnung zur Finanzierung der TEN-V und zur Etablierung der CEF (EU 2013b) legt die verfügbaren Mittel zur Ko-Finanzierung der TEN-V durch den CEF fest. Nachdem bei der Gründung des sogenannten Juncker Fonds (EFSI = European Fund for Strategic Investments) 2,2 Milliarden Euro aus CEF-Mitteln in den EFSI transferiert wurden, belaufen sich die TEN-V-Mittel der CEF auf 24,05 Milliarden Euro.

In seinen Vorbemerkungen referenziert die CEF-Verordnung (EU 2013b) explizit auf die Ziele des Weißbuches und stellt klar, dass die TEN-V-Leitlinien (EU 2013a) insbesondere die Verlagerungsziele auf die Bahn erfüllen sollen (Absatz 11 und 14), und die CEF-Verordnung regelt die Ko-Finanzierung der Implementierung ebendieser TEN-V. Damit würde der Aufbau einer Infrastruktur für HO-Lkw, insofern dieser die Verlagerung auf die Bahn untergräbt, auch der CEF-Verordnung zuwiderlaufen.

Neben dem Budgetrahmen legt die CEF-Verordnung als zweites wichtiges Element den Verlauf der neun Kernnetzkorridore (CNC) fest, sowie eine Liste jener vorermittelten Projekte, deren Implementierung bevorzugt mit CEF-Mitteln bezuschusst werden soll. Die Korridore beginnen und enden alle in See- und/oder Binnenhäfen. Abbildung 90 stellt den Verlauf der neun Kernnetzkorridore dar. Sechs Kernnetzkorridore verlaufen durch Deutschland bzw. beginnen oder enden dort. Dies sind:

- Rheingebiet-Alpen-Korridor (orange)
- Nordsee-Ostsee-Korridor (rot)
- Skandinavien-Mittelmeer-Korridor (rosa)
- Orient/Östliches-Mittelmeer-Korridor (braun)
- Rhein-Donau-Korridor (hellblau)
- Atlantik-Korridor (gelb).

Die CEF-Verordnung fördert vorwiegend Schieneninfrastrukturprojekte inklusive der Ausstattung mit interoperablen Telematiksystemen (ERTMS = European Rail Traffic Management System). Eine Förderung einer vor allem mit Bahnverkehren im Wettbewerb stehenden HO-Lkw Infrastruktur würde also auch der grundlegenden Ausrichtung der CEF-Verordnung entgegenlaufen.

Andererseits verfügt die EU mit den Strukturfonds (Kohäsionsfonds und Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) über weitere Quellen zur Ko-Finanzierung von Verkehrsinfrastruktur in den Mitgliedsstaaten. Und diese waren, zumindest in den bisherigen Finanzierungsperioden, nicht auf die Schiene, sondern auf die Straße fokussiert.

Zur Einordnung des Aufbaus möglicher HO-Lkw-Infrastrukturen ist punktuell auch die Historie der Entwicklung einzelner europäischer Projekte zu beachten. Dazu gehören die

holländische BETUWE-Linie sowie die Schweizer NEAT-Tunnel. Die BETUWE-Linie bindet die niederländischen Seehäfen mit einer zweigleisigen, elektrifizierten und nur für den Güterverkehr neu gebauten Strecke an Deutschland an. Seit 2008 ist die Linie in den Niederlanden in Betrieb. Deutschland hatte zugesichert, auch die Anschlüsse auf deutscher Seite zu diesem Zeitpunkt zu ertüchtigen, um den zusätzlichen Schienenverkehr auf der Strecke Emmerich-Oberhausen und dann weiter ins Ruhrgebiet und andere deutsche Regionen ohne Engpässe abzuwickeln. Tatsächlich sind die Planungen für den Bau erst 2015 substantziell vorangekommen. Die Fertigstellung eines dritten oder teilweise vierten Gleises für den Güterverkehr auf der Strecke ist für 2022 anvisiert, gut 15 Jahre nachdem die Niederlande ihren Teil der Vereinbarung erfüllt haben. Damit wird beim Ausbau des HO-Lkw in diesem Teil des Ruhrgebietes sicher genau geprüft werden, ob nicht wieder die Planungen für den Ausbau der Schienenanbindung der BETUWE-Linie gefährdet werden. Hinzu kommt, dass auch Belgien über eine reine Schienengüterstrecke von seinen Häfen bis nach Deutschland nachdenkt, und auch dieses sogenannte Iron-Rhine-Projekt auf europäischer Ebene starke Fürsprecher hat.

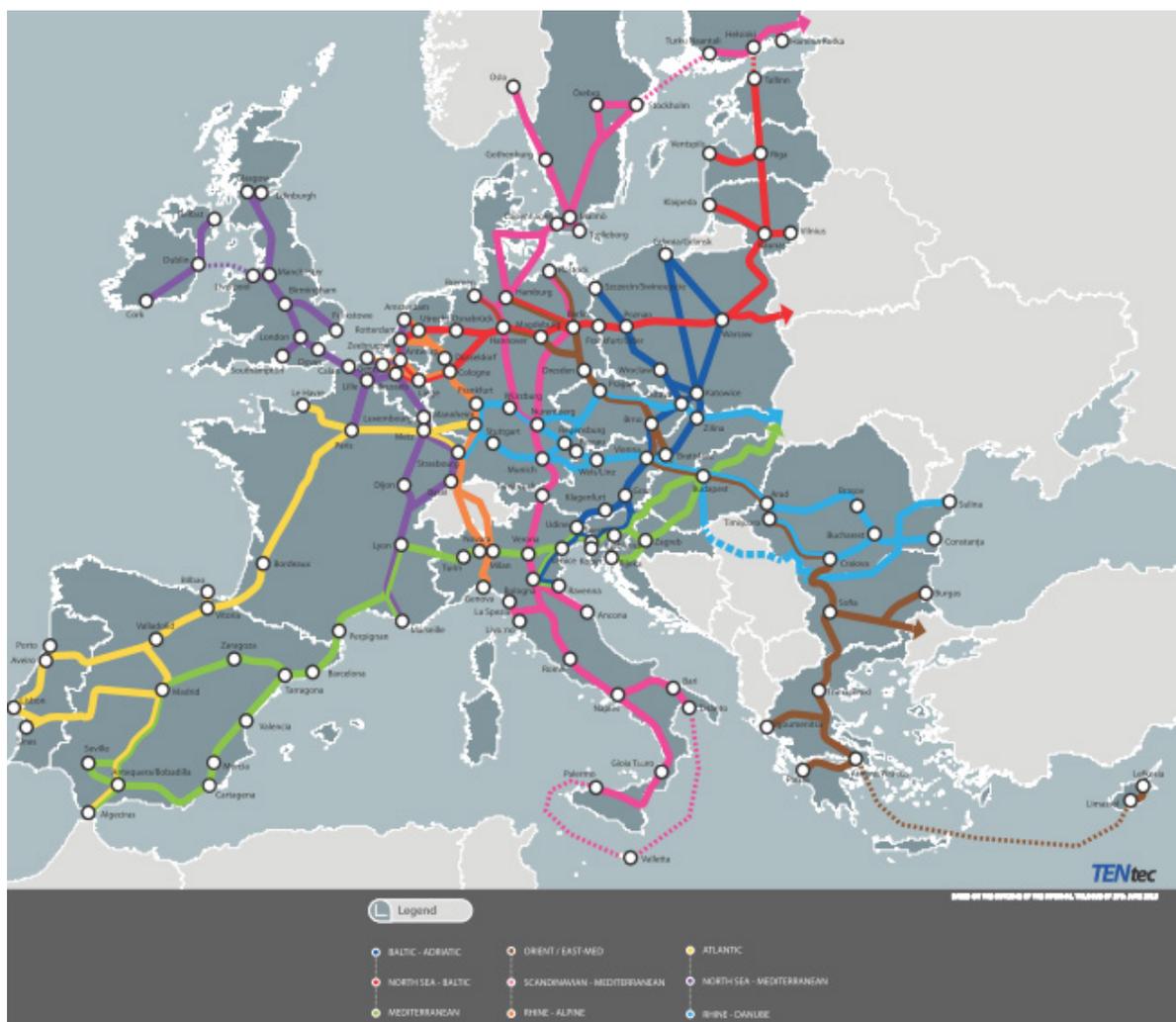


Abbildung 90: Neun Kernnetzkorridore der TEN-V

In Süddeutschland liegt für die Zulaufstrecken im Rheintal zu den NEAT-Bahntunneln (Lötschberg und Gotthard) eine ähnliche Situation vor. Der Lötschberg-Tunnel ist ebenfalls seit 2007 in Betrieb, und der Gotthard-Tunnel wird 2017 in Dienst gehen. Auf deutscher Seite wurde unter Vermittlung des baden-württembergischen Verkehrsministers Herrmann nach langjähriger Blockade des viergleisigen Ausbavorhabens der Rheinschiene in 2014/15 eine Einigung mit den beteiligten Kommunen und Bürgern erzielt. Der Bundesverkehrswegeplan 2016 stellt das Vorhaben in den vordringlichen Bedarf, sodass die Mittel für den (Aus-)Bau verfügbar sein sollten. Allerdings dürfte auch hier der deutsche Anschluss erst mindestens zehn Jahre nach Fertigstellung auf der Schweizer Seite verfügbar sein. Auch hier könnten Planungen für den HO-Lkw kontraproduktiv wirken.

10.2 Güterverkehrspolitik und Rail Freight Corridors (RFC)

Die heutige europäische Eisenbahnpolitik beginnt mit der Richtlinie 1991/440/EWG (Europäische Gemeinschaft 1991), die insbesondere die Trennung von Netz und Betrieb verlangt, um den Wettbewerb auf der Schiene und einen europäischen Bahnsektor zu fördern. In den Jahren 2001 bis 2004 folgten drei weitere sogenannte Eisenbahnpakete jeweils bestehend aus mehreren Richtlinien, mit denen einheitliche Regelungen für die Nutzung der Bahninfrastruktur, die Vergabe und Bepreisung von Trassen geschaffen wurden, sodass nationale Bahngesellschaften auch international ihre Verkehrsdienstleistungen anbieten können (Doll et al. 2015). Außerdem wurde auch kontinuierlich versucht, die Interoperabilität zwischen den nationalen Bahnsystemen zu verbessern.

Trotzdem kam es nur geringfügig zur gewünschten Verlagerung von Verkehr von der Straße auf die Schiene. Dem Beispiel der USA folgend, wo mehr als 40 % der Güterverkehrsleistung auf der Schiene auf Langstrecken abgewickelt werden (Deutschland rund 17 %), zielte die EU mit weiteren Maßnahmen auf eine Verlagerung der langlaufenden Güterverkehre auf die Schiene ab. Insbesondere die Einrichtung sogenannter Bahn-Güterverkehrskorridore (Rail Freight Corridors, RFC) (EU 2010) sollte dazu führen, dass Hindernisse für den langlaufenden grenzüberschreitenden Bahnverkehr abgebaut werden und so die Schiene Marktanteile von der Straße gewinnt. Die RFC liegen ähnlich wie die Kernnetzkorridore (CNC), aber sind nicht identisch mit diesen (siehe Abbildung 91). Die RFC werden über einen Exekutivrat, in dem die Mitgliedsstaaten vertreten sind, und über einen Verwaltungsrat gesteuert. Eine zentrale Aufgabe des Verwaltungsrates ist die Bereitstellung und Zuweisung von grenzüberschreitenden Nutzungsangeboten der Schieneninfrastruktur, sodass zur Organisation langlaufender Verkehre nur ein Ansprechpartner benötigt wird. Nach mehrjährigen Vorbereitungen sind seit 2014 die ersten RFC operational.⁶⁶ Das Instrument der RFC zeigt Wirkung, denn auf den Korridoren steigt die

⁶⁶ Siehe z. B. RFC1: <http://www.corridor-rhine-alpine.eu/downloads.html>,
RFC6: <https://www.railfreightcorridor6.eu/RFC6/web.nsf/OnePager/index.html>.

Nachfrage nach Schienengüterverkehr, meistens auch schneller als auf der Straße, so dass auf den Korridoren die Bahn Modalanteile gewinnt.

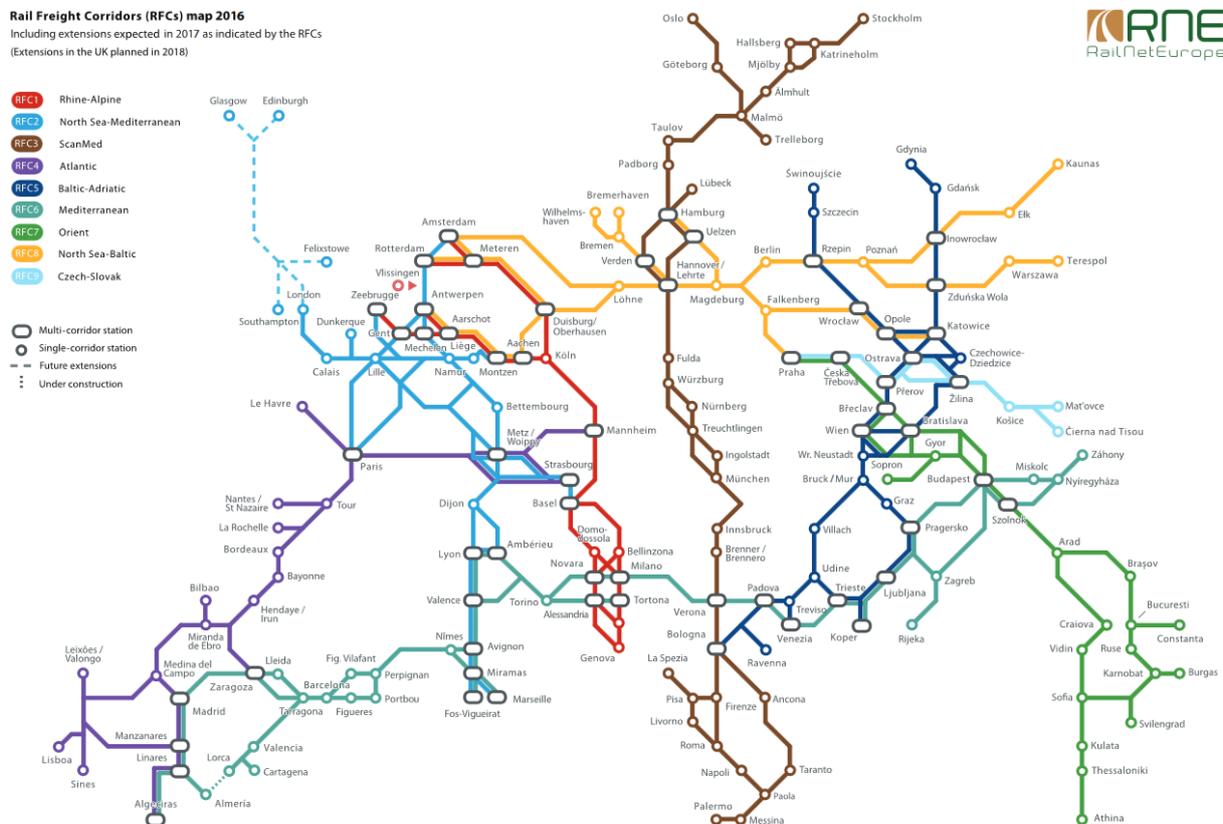


Abbildung 91: Güterverkehrskorridore (RFC)

Die Lage der RFC, wie in Abbildung 91 dargestellt, gibt erste Hinweise, wo die Einrichtung von Infrastrukturen für HO-Lkw zu Konflikten mit der EU-Eisenbahnpolitik führen könnte.

10.2.1 Klimapolitik – Dekarbonisierung des Verkehrs

Das Weißbuch für Verkehr stellt einen Bestandteil der EU-Strategie zur Klimapolitik und zur Dekarbonisierung der Gemeinschaft und der Mitgliedsstaaten dar. Der übergeordnete *Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050* (Europäische Kommission 2011b) zeigt die sektoralen Pfade für alle Sektoren auf, mit denen die EU bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um -80 % gegenüber 1990 erzielen kann. Der Verkehr soll dabei eine Reduktion von bis zu -67 % erzielen. Steigerung der Energieeffizienz und alternative Antriebe spielen eine zentrale Rolle bei der Erreichung der Ziele für den Verkehr.

Ein zentraler Baustein ist die Setzung von CO₂-Emissionsstandards für Straßenfahrzeuge. Diese ist erfolgt für Pkw (EU 2009 und EU 2014b) und leichte Nutzfahrzeuge (EU 2011 und EU 2014c). Für schwere Nutzfahrzeuge arbeitet die EU-Kommission an einer ähnlichen Gesetzgebung. Der Prozess verläuft aber sehr zäh und hat als zählbares Ergebnis

bisher vor allem eine Methode (VECTO) hervorgebracht, mit der Energieverbrauch und CO₂-Emissionen von (zukünftigen) Lkw systematisch simuliert und bewertet werden können. Weitere Schritte, wie der Entwurf einer Regulierung und die Einigung auf Standards für die Regulierung, stehen noch aus und werden mutmaßlich nicht vor 2020 abgeschlossen.

Damit kommt alternativen Ansätzen, die Energieeffizienz von Lkw zu steigern und die CO₂-Emission zu senken, eine große Bedeutung zu. Der HO-Lkw gilt als einer der Ansätze mit den größten Reduktionspotentialen. Aus Sicht der Klimapolitik und der Energieeffizienzpolitik stellen HO-Lkw ein zielführendes Instrument dar.

10.2.2 AFID – Infrastruktur für die Dekarbonisierung

Die *Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe* (AFID) (EU 2014a) gehört zu den Regelungen, die auf den vorgenannten Regelungen (wie Weißbuch, TEN-V-Leitlinien, CEF) aufbauen. Sie verpflichtet die Mitgliedsstaaten, bis 18. November 2016 für die in der Richtlinie genannten alternativen Kraftstoffe einen (oder mehrere) nationalen Strategierahmen der EU-Kommission vorzulegen, der die Entwicklung der verschiedenen alternativen Kraftstoffe bis 2025 aufzeigt. Als wichtige alternative Kraftstoffe werden Elektrizität, Wasserstoff, Biokraftstoffe, Erdgas und Flüssigerdgas aufgelistet. Elektrizität wird insbesondere für den Straßenverkehr als wichtige Alternative betrachtet, um Energieeffizienz zu steigern, CO₂-Emission zu reduzieren, genauso wie Luftschadstoffe und Lärmemissionen. Damit umfasst die AFID-Richtlinie auch die Entwicklung von HO-Lkw und deren Infrastrukturen.

Die AFID Richtlinie spricht allerdings explizit von der Einrichtung von Ladepunkten und Tankstellen mit Ladepunkten (oder von kabellosem induktiven Laden) und nicht von einer linienhaften Ladestation bzw. Stromversorgung, wie sie eine Oberleitung für HO-Lkw darstellt. Dies dürfte der Tatsache geschuldet sein, dass HO-Lkw zum Zeitpunkt der Aufstellung der Richtlinie nur wenigen Experten bekannt waren und sollte nicht als bewusste Ausklammerung der HO-Lkw-Technik interpretiert werden. Aus der Perspektive der AFID sollten HO-Lkw also eine mögliche technische Option für die Elektrifizierung des Straßenverkehrs darstellen.

10.3 Förderung alternativer Antriebstechnologien in den TEN-V

Im Kapitel 10.1.3 wurde die europäische TEN-V-Politik erläutert. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Aufteilung der geplanten EU-Fördermittel auf verschiedene Investitionszwecke, zu denen auch die Investition in Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe gehören kann. Diese wären Bestandteil des Förderzieles 2 des CEF (siehe Tabelle 84). Die Fördermittel im Rahmen des CEF-Transports für den Zeitraum von 2014 bis 2020 verteilen sich zu 80-85 % auf die mehrjährigen Programme und zu 15-20 % auf die jährlichen

Programme. In der ersten Ausschreibungsrunde des CEF-Transport wurde ein Förderbudget von 11 Mrd. Euro ausgeschrieben. Das tatsächlich geförderte Volumen lag über 13 Mrd. Euro.

Tabelle 84: Struktur, Prioritäten und Budget der ersten Ausschreibungsrunde des mehrjährigen Programms zum CEF Transport in der Periode 2014 bis 2020

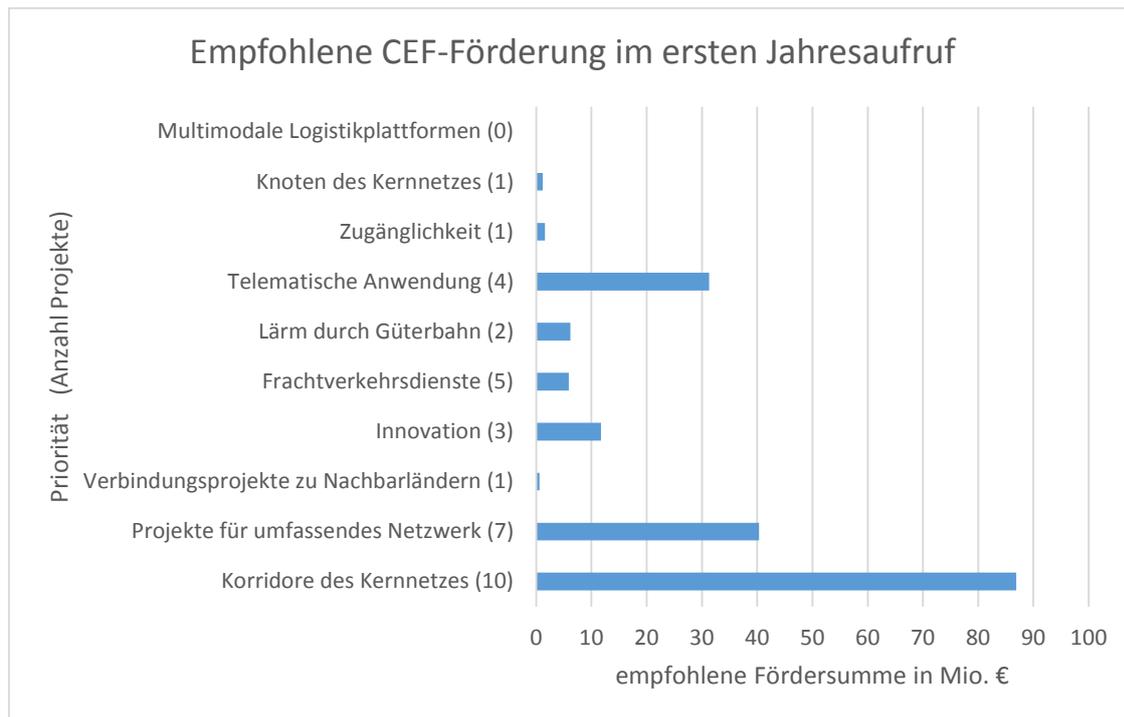
Förderziel	Prioritäten	Maximal verfügbares Budget
Förderziel 1	Korridore des Kernnetzes Andere Abschnitte des Kernnetzes Interoperabilität Schiene ERTMS	6 Mrd. Euro
Förderziel 2	Innovation (z. B. <i>alternative Kraftstoffe</i>) Sichere Infrastruktur	250 Mio. Euro
Förderziel 3	SESAR RIS ITS Strasse See-Schnellstrassen Knoten des Kernnetzes Multimodale Logistikplattformen	750 Mio. Euro
Kohäsionsaufruf: Förderziele 1-3	Korridore des Kernnetzes Andere Abschnitte des Kernnetzes ERTMS Innovation (z. B. <i>alternative Kraftstoffe</i>) Sichere Infrastruktur See-Schnellstrassen	4 Mrd. Euro

Quelle: M-Five basierend auf Auswertungen von Informationen von INEA und EU-Kommission

Von den ursprünglich für das Förderziel 2 *Innovation und sichere Infrastruktur* vorgesehenen 250 Mio. Euro wurden 146 Mio. Euro an Projekte vergeben. Davon entfielen auf die 23 geförderten *Innovations*-Projekte einschließlich alternativer Kraftstoffe 139 Mio. Euro.

In der ersten Ausschreibungsrunde hatte das jährliche CEF-Programm ein geplantes Budget für die Förderziele 1 bis 3 von 930 Mio. Euro. Tatsächlich wurden nur Projekte mit einer Fördersumme von rund 186 Mio. Euro positiv beschieden (siehe Abbildung 92). Im Rahmen des Jahresaufrufs erhielten die drei geförderten Innovationsprojekte mit 11,7 Mio. Euro rund 6 % des für die 34 geförderten Projekte vorgesehenen Budgets.

Im spezifisch auf Kohäsionsländer bezogenen Aufruf wurden rund 4,7 Mrd. Euro EU-Mittel für Projekte bewilligt. Davon entfielen auf die drei bewilligten Innovationsprojekte rund 18,1 Mio. Euro und damit 0,4 % des für die 48 geförderten Projekte verteilten Budgets. Auch wenn die Summe moderat ist, zeigt sie, dass auch in den Ländern mit niedrigerem ökonomischem Ausgangsniveau Anstrengungen zum Aufbau alternativer Kraftstoffe unternommen werden.

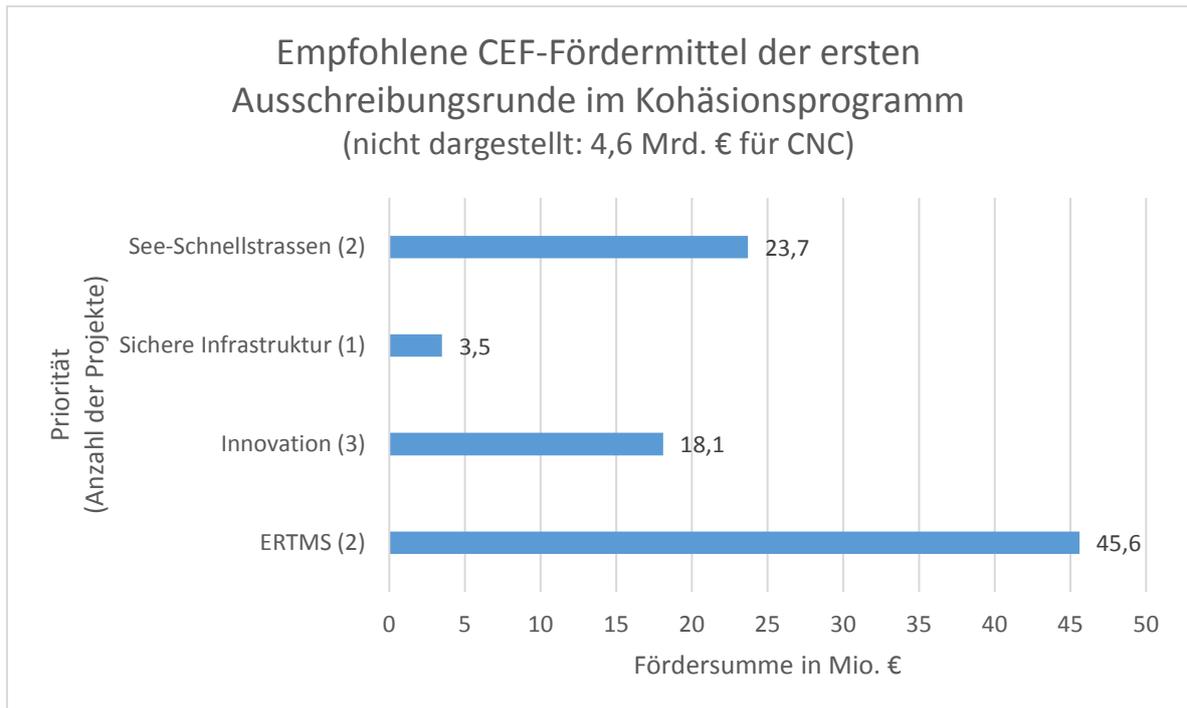


Quelle: M-Five, Auswertung basierend auf INEA-Zahlen

Abbildung 92: Bewilligtes Budget in Millionen Euro und Anzahl der Vorschläge für die Prioritäten des CEF-Jahresaufrufs

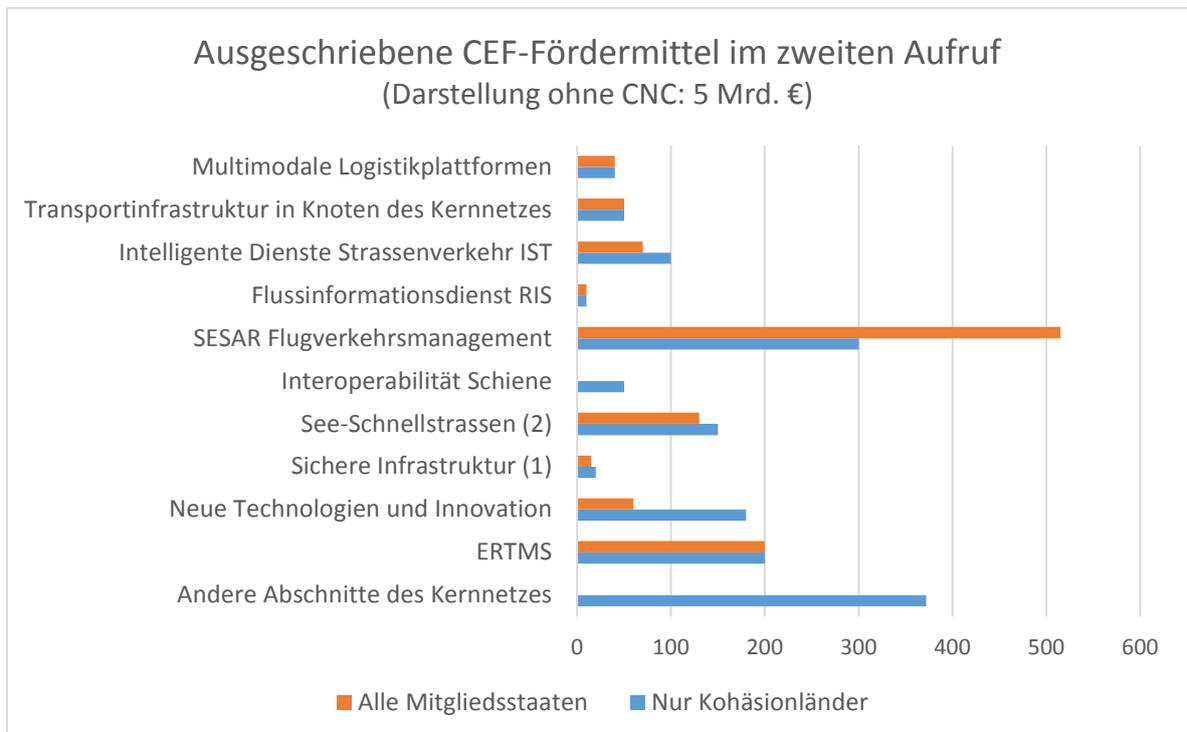
Tabelle 85 listet alle in der ersten CEF-Ausschreibungsrunde **geförderten Projekte** zur Implementierung alternativer Kraftstoffe auf. Gefördert wurde der Einsatz von Druckerddgas (CNG), Wasserstoff (H₂) oder Flüssiggas (LNG). Von diesen 19 Projekten werden die zwei Wasserstoff-Projekte mit insgesamt rund 27,5 Mio. Euro gefördert. Auf das Projekt für Druck- und Flüssiggas und die übrigen 16 Flüssiggas-Projekte entfallen rund 128 Mio. Euro Investitionssumme. Die Mehrzahl dieser Projekte wurde als Studie kategorisiert, wobei vielfach auch Demo-Infrastrukturen zur Betankung aufgebaut werden. Die Wasserstoffprojekte dienen dem Straßenverkehr. Von den zwei Druckerddgas-Projekten betrifft jeweils eins den Schiffs- und eins den Straßenverkehr. Von den Flüssiggas-Projekten beziehen sich etwa zwei Drittel auf den Schiffsverkehr und ein Drittel auf den Straßenverkehr.

In der ersten Ausschreibungsrunde wurden **elf Anträge zur Förderung alternativer Kraftstoffe abgelehnt**. Unter den elf abgelehnten Projekten betrafen zwei Druckerddgas und neun Flüssigerddgas. Über die Hälfte dieser Projekte waren für den Schiffsverkehr geplant. Es wurden keine Wasserstoffprojekte zur Förderung abgelehnt.



Quelle: M-Five, Auswertung basierend auf INEA-Zahlen

Abbildung 93: Empfohlenes Budget in Millionen Euro und Anzahl der Vorschläge für die Förderung in Kohäsionsländern des CEF-Aufrufes von 2014



Quelle: M-Five nach Daten von INEA:

https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/leaflet_cef_transport_calls_superfinal_web.pdf

Abbildung 94: Geplante Budgets für die zweite Ausschreibungsrunde von CEF-Transport (Deadline 02/2016)

Tabelle 85: Geförderte Projekte aus dem Förderziel Innovation zur Förderung des Einsatzes alternativer Kraftstoffe – erste CEF-Ausschreibungsrunde

INEA-Kennung	Titel	Treibstoff	Verkehrsträger	Koordinierender Bewerber	MS	Kategorie	Förderbare Kosten in Euro	Empfohlene Förderung in Euro	Anteil EU-Förderung
2014-EU-TM-0318-S	Verbindung von Wasserstofftankstellen (COHRS)	H2	Straße	H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG	AT, DE	Studien	25.955.574	12.977.787	50 %
2014-EU-TM-0643-S	H2Nodes – Entwicklung eines europ. Netzwerks von Wasserstofftankstellen durch Mobilisierung der lokalen Nachfrage und Wertschöpfung	H2	Straße	Municipal limited liability company Rigas Satlksme	EE, LV, NL	Studien	29.006.000	14.503.000	50 %
2014-BE-TM-0170-S	Piloterrichtung eines intelligenten (agrar-) LNG/CNG-Netzwerks in Flandern mit mobiler CNG-Pipeline	LNG/CNG	Binnenschiff	DRIVE SYSTEMS	BE	Studien	2.933.000	1.466.500	50 %
2014-FI-TA-0119-S	Entwicklung eines Netzwerks für LNG/L-CNG in Finnland	LNG/CNG	Straße	Gasum Oy	FI	Studien	5.297.114	2.648.557	50 %
2014-ES-TM-0593-S	LNG-Technologien und Innovation für Seetransport (GAINN 4 Ship Innovation)	LNG	Seeschiff	Fundacion Valenciaport	ES	Studien	15.025.564	7.512.782	50 %
2014-EU-TM-0383-S	Pilot LNG-getriebenes Mehrzweck Ro-Ro-Schiff	LNG	Seeschiff	OBI Borkum B.V.	DE, NL	Studien	7.480.000	3.740.000	50 %
2014-EU-TM-0630-S	Connect2LNG	LNG	Straße	Unilever Poland Services Sp. Z.O.O.	BE, DE, ES, FR, IT, LU, NL	Studien	9.092.500	4.546.250	50 %
2014-EU-TM-0732-S	CORE LNGas hive – Flüssiggas für Korridore des Kernnetzes	LNG	Seeschiff	Enagas Transporte, S.A.U.	ES, PT	Studien	33.295.760	16.647.880	50 %
2014-FR-TM-0031-W	BioMovLNG	LNG	Straße	PROVIRIDIS 5A5	FR	Arbeiten	11.023.771	2.204.754	20 %
2014-NL-TM-0394-S	Durchbruch LNG-Einsatz im inländischen Wassertransport	LNG	Binnenschiff	Stichting Projecten Binnenvaart	DE, NL	Studien	72.223.400	21.048.544	29,14 %
2014-PL-TM-0341-S	Entwicklung der LNG-Infrastruktur in Polen	LNG	Straße	Gaspol Gaspol Spolka Akcyjna	PL	Studien	1.014.500	507.250	50 %
2014-EU-TM-0095-W	ReaLNG: LNG für Seeverkehr in der Nordsee-Baltik-Region	LNG	Seeschiff	Shell Western LNG B.V	DE, NL	Arbeiten	88.129.540	13.082.775	33,51 %

INEA-Kennung	Titel	Treibstoff	Verkehrsträger	Koordinierender Bewerber	MS	Kategorie	Förderbare Kosten in Euro	Empfohlene Förderung in Euro	Anteil EU-Förderung
2014-EU-TM-0120-W	HEKLA – Heisingborg & Klaipeda Bereitstellung von LNG Infrastruktur-Anlagen	LNG	Seeschiff	Heisingborg Hamn AB	LT,SE	Arbeiten	28.711.788	10.195.241	35,51 %
2014-EU-TM-0698-M	Nachhaltiger LNG-Betrieb für Häfen und Schiffe (GAINN4M0S)	LNG	Schiff	Fundacion Valenciaport	ES, FR, HR, IT, PT, SI	gemischt	44.369.934	19.218.567	46,46 %
2014-EU-TMC-0297-S	CORE LNGas hive – CORE LNGas hive – Flüssiggas für Korridore des Kernnetzes	LNG	Binnenschiff	River Administration of the Lower Danube Galati	BG, RO	Studien	6.019.000	5.116.150	85 %
2014-HU-TMC-0629-M	PAN-LNG-Project	LNG	Straße	Magyar Gazuzemu Kozlekedes Klaszter Egyesulet	HU	gemischt	16.983.290	14.435.797	85 %
2014-EU-TMC-0700-S	Nachhaltiger LNG-Betrieb für Häfen und Schiffe (GAINN4M0S)	LNG	Schiff	Fundacion Valenciaport	ES, FR, HR, IT, PT, SI	Studien	1.538.500	1.307.725	85 %
2014-UK-TA-0656-S	Kleine LNG-Verladungsstudie mit integrierter Bereitstellung	LNG	Unklar	National Grid Grain LNG Limited	UK	Studien	20.000.000	5.000.000	25 %

Quelle: M-Five nach Daten von INEA 2015

Die zweite Ausschreibungsrunde des CEF für Verkehr adressiert insbesondere den Infrastrukturausbau in den Kohäsionsländern. Auf diese entfallen 6,5 Mrd. Euro der insgesamt ausgeschriebenen 7,6 Mrd. Euro. Für neue Technologien und Innovationen sind 180 Mio. Euro in Kohäsionsländern (2,4 % des Gesamtbudgets) und 60 Mio. Euro (0,8 %) für alle Mitgliedsstaaten vorgesehen. Das Potential für Förderung alternativer Kraftstoffe entlang der TEN-V war in der zweiten Ausschreibungsrunde damit geringer als in der ersten Runde.

Sollte in der zweiten Ausschreibungsrunde wie geplant 7,6 Mrd. Euro EU-Kofinanzierung bewilligt werden, dann verbleiben für die folgenden Runden bis 2020 nur noch Mittel von etwas über 3 Mrd. Euro.

10.4 In EU-Korridorstudien prognostiziertes Verkehrswachstum

Für alle neun Kernnetzkorridore wurden in 2014 Korridorstudien erstellt. Diese beinhalten auch eine Marktstudie, die die zu erwartende Verkehrsnachfrage bewerten sollte. Diese Marktstudien können Hinweise auf geeignete und weniger geeignete Korridore für HO-Lkw geben. Daher wurden die Marktstudien der Korridorstudien zum Nordsee-Ostsee-Korridor und zum Rheingebiet-Alpen-Korridor ausgewertet. Diese fassen nationale Prognosen bezüglich des Wachstums des Güterverkehrs auf diesen Korridoren zusammen. Für Deutschland wird von 2012 bis 2020 auf dem Nordsee-Ostsee-Korridor ein Wachstum von 19 % auf den inländischen Wasserstraßen, 22 % auf der Schiene und von 38 % auf der Straße ausgewiesen. In der BVWP 2007 wird davon ausgegangen, dass dieses Wachstum insbesondere im Ex- und Import sowie im Transitverkehr stattfinden wird.

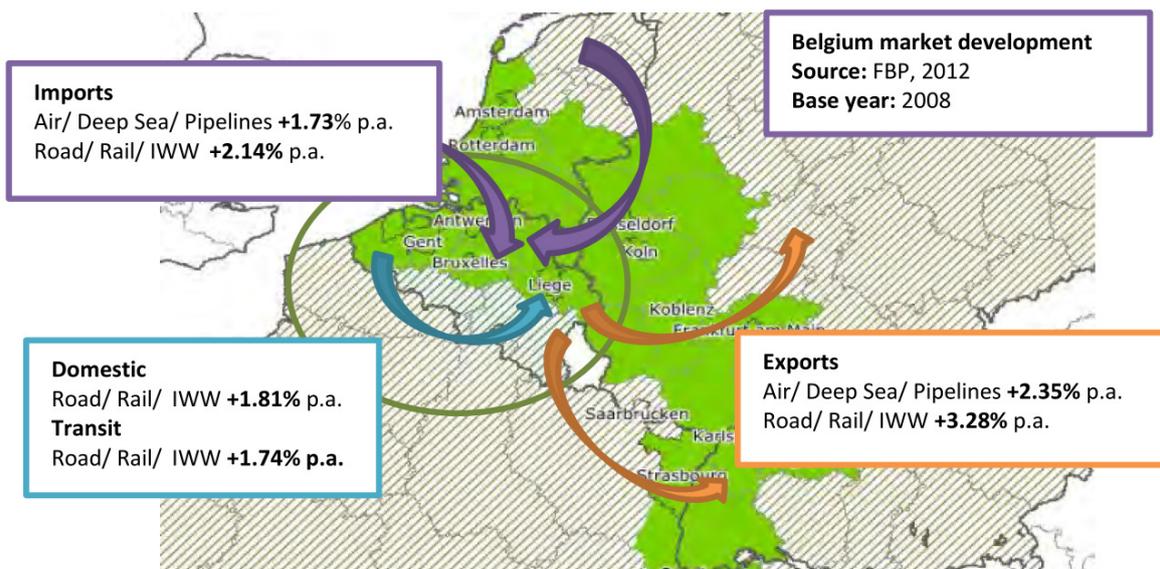
Polen erwartete auf vielen Schienenabschnitten mittlere und in der Nähe Deutschlands nur niedrige Wachstumsraten. Auf der Straße hingegen wird auf den meisten Abschnitten mit hohen Wachstumsraten gerechnet, sodass hier durch zusätzliche HO-Lkw-Engpässe verschärft werden könnten. Entlang des Korridors könnte das Wachstum der Lkw-Nachfrage jedoch ab 2025 durch die bis dahin zu bauende Rail Baltica abgefedert werden, die es ermöglichen wird, durchgehende Bahnverkehre aus den baltischen Staaten über Polen in die übrigen EU-Länder zu führen. Dies ist heute nicht möglich wegen der unterschiedlichen Spurweite im Baltikum und der unzureichenden Trasse im Nordosten Polens sowie in der Nord-Süd-Richtung im Baltikum.

Die Niederlande erwarten ein geringeres Wachstum im Straßengüterverkehr als im östlichen Teil des Nordsee-Ostsee-Korridors. Da die Straßen jedoch bereits intensiv genutzt werden, kann dieses Wachstum bereits Engpässe verursachen. Im Schienengüterverkehr hingegen wird durch die bereits erfolgten Infrastrukturausbauten und aufgrund der wachsenden Seehafenhinterlandverkehre mit größeren Wachstumsraten gerechnet. Zwischen den Niederlanden und Deutschland werden mit Abstand die stärksten Güterverkehrsströme aller Länder-Relationen beobachtet.

Für Belgien sind die Annahmen für das Wachstum im Ex- und Import jeweils stärker im Sektor Straße/Schiene/Binnenschiff als im Sektor Luft/Seeschiff/Pipeline, und es wird mit mehr Zuwachs im Export als im Import gerechnet. Es wird ein massives Wachstum im Schienengüterverkehr erwartet, da bis 2025 eine starke Zunahme der Züge auf der Montzenlinie zwischen Antwerpen und Aachen, d. h. im Seehafenhinterlandverkehr, prognostiziert wird. Abbildung 95 stellt die 2012 vorherberechnete Entwicklung des belgischen Frachtverkehrs bis 2030 dar.

Die Schweiz erwartete 2004 einen durchschnittlichen Anstieg des Güterverkehrs auf der Schiene von 7 % zwischen 2002 und 2030 und eine noch stärkere Verlagerung mit Anwachsen des Modalanteiles der Schiene von 25,7 % auf 38,8 % im Import (Hacon 2014).

Die Erwartungen der Korridorstudien weisen für Verbindungen von Deutschland nach Westen bzw. nach Süden steigende Marktanteile auf der Schiene auf. Hier wird ein Erfolg der Förderung der Bahnen durch die nationale und die EU-Politik erwartet. Maßnahmen, die diesen Erfolg gefährden, dürften zumindest kritisch gesehen werden.



Quelle: Hacon 2014

Abbildung 95: Verkehrsbeziehungen von Belgien im Güterverkehr

10.5 Passfähigkeit von HO-Lkw zur EU-Verkehrspolitik

Die Entwicklung einer Option „Hybrid-Oberleitungs-Lkw“ ist Stand Anfang 2016 in der europäischen Verkehrsstrategie nicht vorgesehen. Tatsächlich stünde diese Option in direktem Widerspruch mit der zentralen Strategiekomponente, für den langlaufenden Güterverkehr die Bahn zu stärken und über 50 % der Verkehre über Distanzen von 300 km und mehr vom Lkw auf die Schiene zu verlagern. Diese Verlagerung soll durch Verbesserung des Angebotes (z. B. Gütergleise, Umschlagterminals, Förderung kombinierter Verkehr

etc.) und durch die Bündelung der Verkehre entlang wichtiger Achsen gelingen. Auf genau diese gebündelten Verkehre zielt auch der HO-Lkw ab (z. B. Hamburg-Ruhrgebiet, Deutschland Nord-Süd von Schleswig-Holstein nach Bayern). Es besteht das große Risiko, dass Investitionen in die Schieneninfrastruktur entlang dieser Korridore entwertet werden und nicht ihren vollen Nutzen entfalten können.

M-Five konnte im Rahmen seiner regelmäßigen Arbeitskontakte mit der EU-Kommission eine erste Sondierung vornehmen, wie der HO-Lkw politisch eingeordnet werden würde. Nach unserer Einschätzung dürften die mit der Umsetzung der EU-Verkehrspolitik betrauten Stellen den HO-Lkw als Fremdkörper und Widerspruch zu den verkehrspolitischen Zielen, insbesondere der Verlagerung des Güterverkehrs auf die Bahn, ansehen. Es muss damit gerechnet werden, dass der HO-Lkw schnell als weiterer deutscher Sonderweg abgestempelt wird. Daher sollte eine Kommunikationsstrategie gegenüber der EU-Kommission unbedingt ein wichtiger Bestandteil von Einführungsmaßnahmen sein.

Auf der anderen Seite hat die EU politische Strategien entwickelt, in die die Option HO-Lkw eingepasst werden kann. Dazu gehören der Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft (Europäische Kommission 2011b), die Ziele zum Ausbau der Erneuerbaren im Stromsektor (Beschluss des Rates von 2014, EU Council 2014) und die AFID (EU 2014a). HO-Lkw tragen zur Dekarbonisierung des schweren Lkw-Verkehrs bei und könnten daher als passfähiges Element einer Dekarbonisierungsstrategie unter Nutzung der erneuerbaren Energien dienen. Sie passen daher auch in die europäische Klimapolitik. Außerdem könnte der Aufbau der notwendigen Infrastruktur als Bestandteil der AFID- und der TEN-V-Regulierung gesehen und durch CEF-Mittel gefördert werden.

Als Fazit bleibt: bzgl. der Nutzung von HO-Lkw kommt die Analyse der EU-Verkehrspolitik und der EU-Klimapolitik zu einem gegenteiligen Schluss: HO-Lkw tragen zu den Zielen der Klimapolitik bei, während sie den Zielen der Verkehrspolitik zuwiderlaufen.

10.6 Situation in ausgewählten EU-Ländern

Dieses Kapitel gibt eine kurze Übersicht über die Situation in den EU-Ländern Frankreich, Niederlande und Spanien. Die Darstellung beruht auf einer Recherche öffentlich zugänglicher Informationen wie Presse- und Unternehmensnachrichten sowie auf direkten Kontakten mit Ministerien und Experten der Länder. Zunächst lässt sich festhalten, dass der HO-Lkw ein neues Thema darstellt, sodass auch in Verkehrsministerien die Kenntnis des Systems nur bei einem sehr kleinen Teil der Akteure gegeben ist, während großen Teilen noch keinerlei Information dazu vorliegt. Ähnlich war das Ergebnis für Verkehrswissenschaftler und -consultants in den Ländern.

In Frankreich findet sich 2013 bereits eine Internetseite zum Thema Klimaschutz, die von mehreren (Umwelt-)Verbänden (Sauvons le Climat 2013) betrieben wird. Dort wird über

die Aktivitäten von Siemens zum Thema HO-Lkw berichtet sowie darauf hingewiesen, dass 2012 erfolglos versucht wurde, im staatlichen französischen Verkehrsforschungsprogramm für eine Machbarkeitsstudie Finanzierungsmittel zu erhalten. Eine grobe Evaluation der möglichen Effekte einer Elektrifizierung von zwei Dritteln des französischen Autobahnnetzes wurde auf der Internetseite abgeschätzt. Die Investitionskosten wurden auf fünf bis zehn Milliarden Euro beziffert. Damit ließen sich mindestens 10 % des französischen Treibstoffverbrauchs einsparen, was bei den genannten Kosten eine sehr effiziente Klimaschutzmaßnahme wäre. Die Autoren der Seite berechneten außerdem, dass durch dieses Projekt ungefähr 100.000 dauerhafte Arbeitsplätze geschaffen werden könnten, wovon 30.000 direkt und 70.000 durch indirekte Effekte entstünden. Die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Lkw mit Verbrennungsmotor wurde für die Strecke Lyon – Paris exemplarisch überschlagen und als positiv bewertet. Außerdem wurde direkt der Vergleich mit großen französischen Bahnprojekten gezogen, deren Investitionen von rund 6 Mrd. Euro für einzelne Projekte in ähnlicher Größenordnung liegt, wie der benötigte Betrag für den Infrastrukturaufbau der HO-Lkw. Die Autoren kündigten an, sich um ein industrielles Konsortium zu bemühen. In der Öffentlichkeit wurde aber nicht über weitere Fortschritte beim Aufbau des Konsortiums und den Planungen zur Implementierung berichtet.

In den folgenden Jahren wurde in Frankreich über die in Schweden erzielten Fortschritte bei HO-Lkw berichtet. Die Technologie wurde jedoch nicht mehr als Alternative für Frankreich in Erwägung gezogen.

2016 veröffentlichte das französische Umwelt- und Energieministerium (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer), welches seit 2014 auch den Klimaschutz und den Verkehr verantwortet, die aktuelle Langfristprognose für den Verkehr (MinEEM 2016). Im Klimaschutzszenario sind die HO-Lkw als eine Maßnahme enthalten, wobei auch eine Variante ohne HO-Lkw abgeschätzt wurde. Dabei werden 2.860 km Autobahnen, auf denen 34 % des schweren Lkw-Verkehrs abgewickelt wird, mit Oberleitungen ausgestattet. Die Kosten des Lkw-Verkehrs sinken dabei substantiell und der Schienengüterverkehr verliert gegenüber dem Trendszenario 2,7 % im Modalanteil bzw. über 22 % an Verkehrsleistung in 2050. Durch die Variantenrechnung des Klimaschutzszenarios mit/ohne HO-Lkw ergibt sich eine direkte Wirkung von 0,9 % im Modalanteil der Schiene und von rund 8 % Verlust der Verkehrsleistung der Bahn. Der Wettbewerb zwischen HO-Lkw und Schienengüterverkehr wird in dieser Studie deutlich.

In Spanien lag bei den befragten Personen aus Ministerien, Wissenschaft und Verkehrsberatung keine Information zum Thema HO-Lkw vor. Allerdings weist die o. g. französische Analyse Strecken auf, die von der Nähe der deutsch-französischen Grenze bis fast an die spanisch-französische Grenze führen, sodass eine Erschließung in Spanien und eine Anbindung an ein zentrales europäisches Netz denkbar wäre.

In den Niederlanden konnten bisher keine Studien der öffentlichen Hand zum Thema HO-Lkw identifiziert werden. Im Bereich der privaten Verkehrsberatung existieren aber erste Überlegungen zu möglichen Routen für den Aufbau einer HO-Lkw-Infrastruktur.

10.7 Zusammenfassung und Forschungsfragen

Die Positionierung des HO-Lkw auf der europäischen Ebene ist zwiespältig. Aus verkehrlicher Sicht läuft der Aufbau einer HO-Lkw-Infrastruktur den Zielen der Verkehrspolitik, langlaufende Güterverkehre auf die Bahn zu verlagern, zuwider. Dementsprechend ist der HO-Lkw auch nicht in den verkehrspolitischen Strategiedokumenten verankert. Dagegen passt der HO-Lkw in die klimapolitische Strategie der EU und in die EU-Strategie zum Aufbau alternativer Kraftstoffe im Verkehr. Vor zwei Jahren wäre allerdings der Zeitpunkt, eine europäische Ko-Finanzierung zum Aufbau solcher Infrastrukturen zu erhalten, günstiger gewesen, da 2014 und 2015 die großen Ausschreibungsrunden des CEF erfolgten. Heute müssten vermutlich andere Finanzierungsquellen herangezogen werden, wie z. B. die Strukturfonds oder der EFSI. Auf Ebene der Nachbarländer wurden zumindest in Frankreich und in den Niederlanden Studien (öffentlich und nicht-öffentlich) zu einer möglichen Einführung von HO-Lkw durchgeführt. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

Politik: Hier wäre eine umfangreichere Analyse der nationalen Planungen und Kenntnisse des HO-Lkw anzustreben, ggf. mit Ausrichtung eines Workshops mit Vertretern der Nachbarländer, um deren Planungen bzw. mögliche gemeinsame Planungen zu diskutieren. Außerdem sollte der politische Prozess in der Verkehrs-, Klima- und Förderpolitik der EU proaktiv begleitet werden, z. B. bei den regelmäßig stattfindenden Aktualisierungen der EU-Energie- und Verkehrsszenarien.

Modellierung: die in Frankreich identifizierte negative Wirkung des HO-Lkw auf die Modalanteile der Bahn sollten durch eine eigene länderübergreifende Modellierung (z. B. mit VALIDATE) verifiziert und überprüft werden.

Finanzierung: die nächste CEF-Finanzierungsrunde schließt Anfang 2017. Das dürfte zu knapp für eine Beantragung der Ko-Finanzierung der HO-Lkw-Infrastruktur sein. Daher sollte untersucht werden, welche anderen Finanzierungsoptionen verfügbar wären (z. B. Strukturfonds, EFSI), und ggf. Geschäftsmodelle unter Berücksichtigung verschiedener Finanzierungsoptionen durchgerechnet werden.

11 Transitionspfade

Hauptbearbeiter/innen: M. Wietschel, P. Plötz, T. Gann (Fraunhofer ISI)

Zum derzeitigen Zeitpunkt befindet man sich noch in einer Marktvorbereitungsphase. Die Technologien fahrzeugseitig wie von Seiten der Stromzufuhr werden entwickelt. Alternative Technologieansätze, z. B. bei den HO-Lkw bezüglich der hybriden Lösung über Verbrennungsmotoren oder Batterien oder stromseitig verschiedene konduktive wie induktive Systeme, stehen zur Diskussion. Die verschiedenen Konzepte für die Hybrid-Oberleitungs-Lkw sind derzeit noch in der Erprobung, beispielsweise in Deutschland, Schweden und den USA (Ackermann 2016, Hey 2016, Torfs 2016). In Deutschland ist hier das ENUBA-Projekt zu nennen (Siemens AG 2012a; Siemens AG 2016), in dessen Rahmen Demonstrationsfahrzeuge gebaut und auf einer Teststecke Erfahrungen gesammelt werden. Die Projekte in Deutschland werden öffentlich gefördert.

Erste, ebenfalls geförderte, öffentliche Autobahnteststrecken in Deutschland aber auch in anderen Ländern wie Schweden, Finnland und den USA sind ebenfalls geplant bzw. im Bau. Damit betritt man bereits die Phase der Pilotvorhaben. Von Seiten der Lkw-Fahrzeughersteller sind nur wenige Aktivitäten zu erkennen (siehe hierzu auch Kapitel 8). Die Fahrzeuge werden für die Demonstrations- bzw. Pilotvorhaben umgerüstet, beispielsweise von der Firma Siemens. Nach Einschätzung von Siemens kann in zwei bis drei Jahren mit einer Kleinserienproduktion gestartet werden.

Mit den Teststrecken auf öffentlichen Autobahnen in Deutschland (aber auch weltweit) werden auch mit dem Genehmigungsverfahren für den Oberleitungsausbau Erfahrungen gesammelt. Nach bisheriger Lesart sind die Oberleitungen (OL) kein Straßenbestandteil, sondern eine Sondernutzung der Straße. Ein Betreiber errichtet und betreibt die Oberleitungen und schließt dafür einen Sondernutzungsvertrag oder eine Konzessionsvertrag ab. Im Genehmigungsprozess liegt der Fokus auf technischen Fragen (Sicht auf Schilder, Schutz der Masten, Stromabschalten bei Unfällen etc.). Es geht dann auch darum, ein Muster für den Genehmigungsprozess zu erstellen, an denen sich dann weitere Genehmigungen orientieren können. Es ist zu eruieren, wie lange sich das Genehmigungsverfahren und der anschließende Bau hinziehen.

Wichtig scheint zu sein, dass im Rahmen der Pilotvorhaben umfangreiche Akzeptanzstudien erstellt werden. In Kapitel 10 wurde ja bereits auf die sozio-politische Akzeptanz und in Kapiteln 8 auf die Akzeptanz seitens der Lkw-Hersteller und Lkw-Nutzer eingegangen und die Herausforderungen dargestellt. In den Pilotvorhaben sollte nun auch auf die Akzeptanz der Lkw-Fahrer, der Autobahnbenutzer und der Anwohner eingegangen werden. Hier erscheint ein großes Wissensdefizit vorzuliegen. Aus Sicht der Anwohner an Autobahnen, die mit OL ausgestattet werden, ist zu klären, ob und in welcher Form Akzeptanzfragen entstehen. Aus Sicht der Autobahnbenutzer ist zu eruieren, ob und welche Beeinträchtigungen durch die OL vorliegen, beispielsweise durch die Sichtbeeinträchtigungen. Die Akzeptanz der Lkw-Fahrer auf die neue Antriebstechnologie, resultierend beispielsweise

aus den geänderten Beschleunigungsverhalten, Lärmemissionen und bei Überholvorgängen, ist zu erheben.

Neben Akzeptanzfragen ist es sinnvoll, weitergehende Systemanalysen durchzuführen, die die energiewirtschaftliche Anbindung der HO-Lkw im Fokus haben. In Kapitel 7 wurde gezeigt, dass derzeit in diesem Themenfeld noch eine Reihe an offenen Fragen bestehen.

Ab 2020 könnte, wenn die entsprechenden Rahmenbedingungen gesetzt werden und die Erfahrungen aus den Pilotvorhaben positiv sind, der Markthochlauf frühestens starten. Ausgehend von Nischenanwendungen, wie den Transport von Häfen zu Umschlagsplätzen, kann der Ausbau der interessantesten Autobahnstrecken in Deutschland starten (siehe zu den interessantesten Strecken und Ausbaurkorridoren Kapitel 4). Da zu Beginn die Oberleitungen noch nicht nutzerfinanziert werden können, ist eine Form der Finanzierung zu entwickeln, an denen sich der Staat in unterschiedlicher Art und Weise sehr wahrscheinlich beteiligen muss, da eine rein privatwirtschaftliche Finanzierung derzeit aufgrund der Höhe des Finanzbedarfes und des Risikos eher ausgeschlossen werden kann. Siehe hierzu und zu den unterschiedlichen Finanzierungsformen das Kapitel 9.

Der Markthochlauf wird eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen, da die Genehmigungszeiten und Bauzeiten bei den OL, die Fahrzeugentwicklung, das zu Beginn beschränkte Fahrzeugangebot, die Austauschzeiten bei der Lkw-Beschaffung, die Umstellung der Logistikprozesse usw. Zeit benötigen werden. Generell zeigen die Erfahrungen mit Marktdiffusionsprozessen von neuen Basistechnologien, dass die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten maximal 30 bis 40 % betragen.

Vor diesem Hintergrund sowie den umfangreichen Berechnungen aus Kapitel 3 scheint ein Bestand an HO-Lkw bis 2030 von 50.000 bis 70.000 Fahrzeugen unter günstigen Bedingungen erreichbar zu sein. Neben der finanziellen Unterstützung zu Beginn der FuE, dann später beim OL-Aufbau, muss die Politik hierfür klare Ziele für die Senkung der Treibhausgasemissionen bei schweren Lkw setzen und regulative Instrumente einführen. Da die Wirtschaftlichkeit sich durch eine europäische Lösung erhöht, empfiehlt sich eine Harmonisierung der europäischen Politik bezüglich des HO-Lkw. Insgesamt ist ein Ausbau der Oberleitungen auf den wichtigsten europäischen Transitstrecken anzustreben, harmonisiert mit den Ausbauvorhaben für den Güterverkehr auf den Bahnstrecken.

In der Phase des Markthochlaufes sind Anpassungen an den Logistikprozessen vorzunehmen und evtl. neue Dienstleistungskonzepte, wie die Traktionsdienstleister, zu erproben und umzusetzen. Siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 8.

Nach 2030 kann die Entwicklung zum Massenmarkt erfolgen. Um ambitionierte Klimaschutzziele erreichen zu können, sind neben einer Erhöhung des elektrischen Fahranteile der HO-Lkw durch den weiteren OL-Ausbau auch alternative Lösungen zum konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieb des HO-Lkw zu entwickeln (größerer Fahrzeugbatterien oder Power-to-Liquid (PtL) oder Power-to-Gas (PtG)-Lösungen).

Abbildung 96 zeigt den entwickelten Transitionspfad in einer Übersicht.

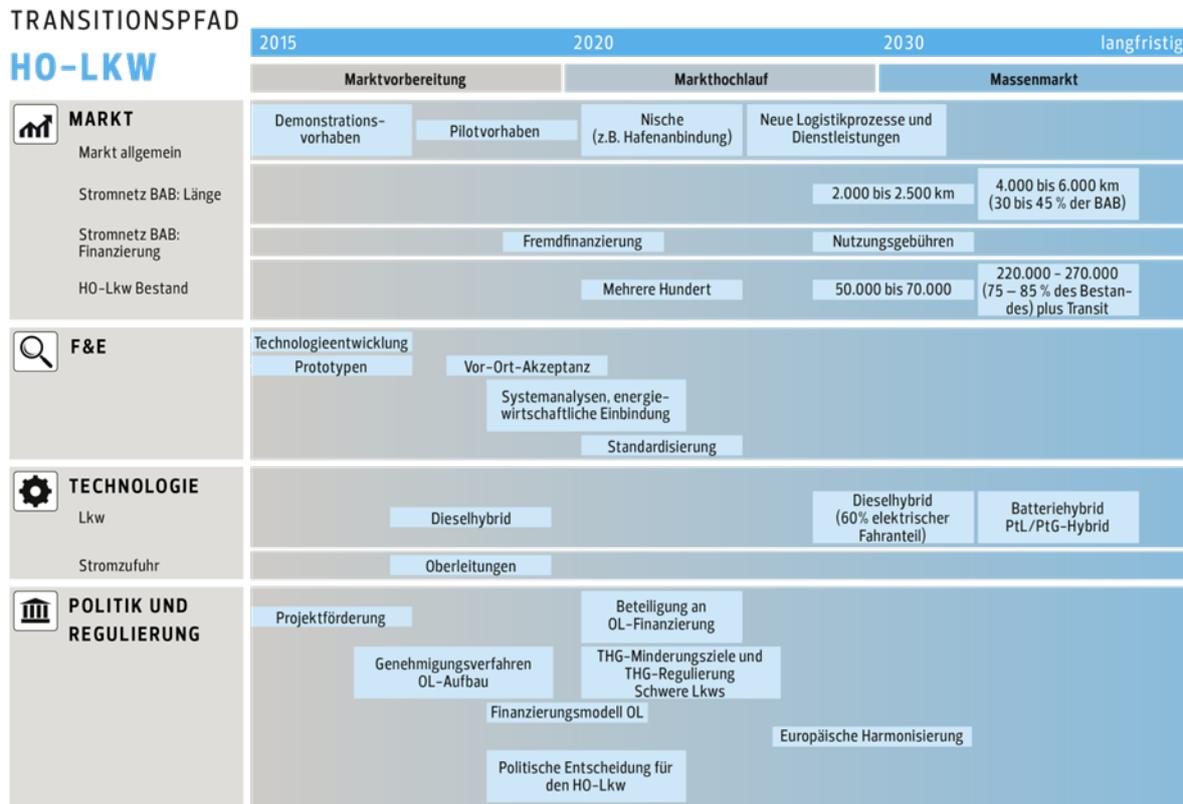


Abbildung 96: Ein Transitionspfad für die Einführung von HO-Lkw in Deutschland

Alternativ ist eine zeitlich nach hinten versetzte Einführungsstrategie denkbar. Wenn allerdings die Ziele für einen treibhausgasfreien Lkw-Verkehr erreicht werden wollen, dessen Notwendigkeit in Kapitel 1 aufgezeigt wurde, ist ein größer zeitlicher Versatz wenig plausibel. Dies liegt daran, dass unter Berücksichtigung der Lkw-Nutzungszeiten nach 2040 keine Lkw mit konventionellen Antrieben und Kraftstoffen mehr verkauft werden dürfen.

In diesem Fall müssten dann eher alternative Lösungen wie erneuerbares strombasiertes Methanol, Methan oder Wasserstoff für den schweren Lkw-Verkehr frühzeitig entwickelt und eingeführt werden. Ob dann der HO-Lkw noch sinnvollerweise später eingeführt werden sollte, ist zu prüfen, wird aber derzeit eher skeptisch bewertet. Somit steht seitens der Politik eine Entscheidung für oder gegen den HO-Lkw in den nächsten Jahren an.

Eine Marktdurchdringung mit geringeren Stückzahlen und über längere Zeiträume hingestreckt erscheint wenig plausibel zu sein, da sich ein nutzerfinanzierter OL-Ausbau erst ab bestimmten Bestandszahlen (> 50.000) rechnet. Große Stückzahlen werden auch für die Lkw-Herstellung benötigt. Dies ist ebenfalls ein Grund, dass eine rein deutsche Insellösung kaum zu realisieren ist.

12 Anhang

12.1 Verlauf von Batterieladezuständen bei unterschiedlichen Randbedingungen

Hauptbearbeiter/innen: W. Balz, H. Frik (PTV TC GmbH)

Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Beispielrechnungen über den Verlauf von Batterieladezuständen unter Zugrundelegung der o. g. Ansätze zusammengestellt.

Aus der nachfolgenden Abbildung ist ersichtlich, dass bei 20 % Abdeckung des Netzes mit einem Akku für 100 km Reichweite und 3 C Ladestrom die Stromversorgung noch nicht ganz ausreicht, um den Ladezustand zu halten.

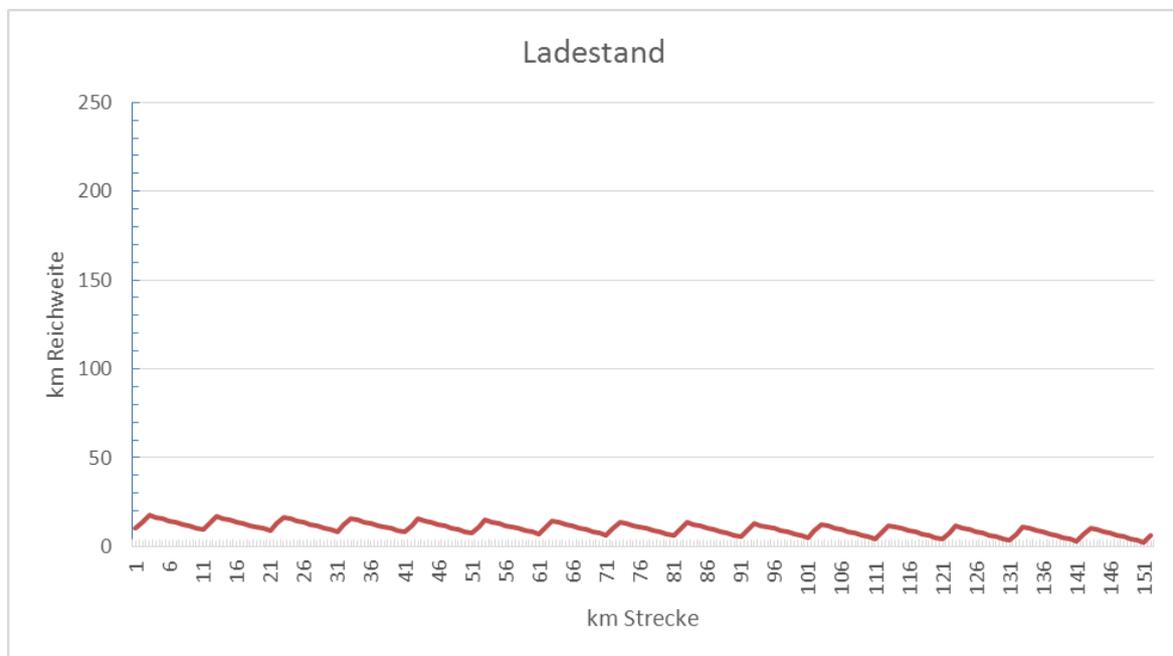


Abbildung 97: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 20 % Netzabdeckung mit Oberleitung, flache Fahrbahn, 3 C Ladestrom, keine Leistungsbegrenzung beim Strombezug

Bei einem HO-Lkw, der eine Energiemenge von 1,5 kWh pro km benötigt, liegt die von der Oberleitung entnommene Leistung im o. g. Beispiel bei 570 kW.

Bei einer Batterieausstattung der HO-Lkw mit einer Reichweite von 200 km ergibt sich bei einer Ausstattung von 20 % der Autobahnlänge der folgende Verlauf des Batterieladezustandes:

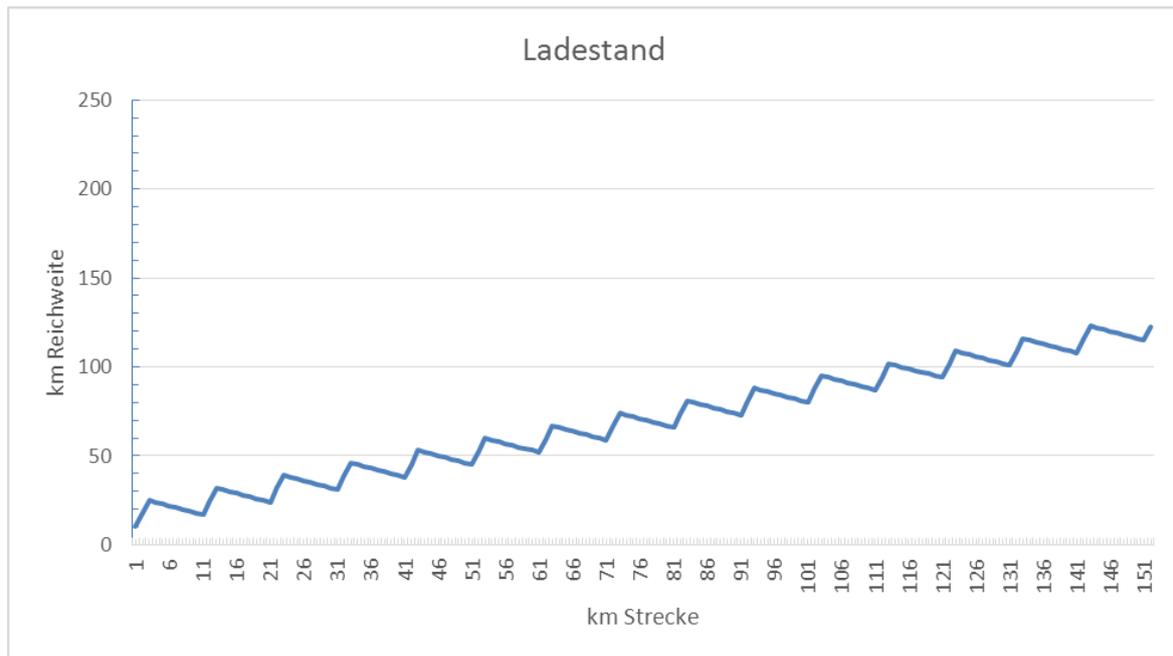


Abbildung 98: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 200 km Reichweite, 20 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung

Bei einem HO-Lkw, der eine Energiemenge von 1,5 kWh pro km benötigt, liegt die von der Oberleitung entnommene Leistung im o. g. Beispiel bei 1.020 kW.

Ein HO-Lkw wäre nach einer Fahrt von ca. 70 km auf der mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Autobahn hinreichend geladen, um im Sekundärnetz eine Strecke von mindestens 50 km ohne Einsatz eines Dieselmotors und ohne weitere Oberleitungsabschnitte oder Ladesteckdosen zu bewältigen. Für ein vollständiges Laden des Akkus wären ca. 280 km Autobahnfahrt mit Oberleitungsinfrastruktur notwendig.

Bei einer auf 25 % der Netzlänge erweiterten Oberleitungsinfrastruktur ist die Dichte der Infrastruktur auch für einen HO-Lkw mit 100 km Batteriereichweite bei einem Ladestrom von 3 C zum Wiederaufladen ausreichend (siehe nachfolgende Abbildung).

Allerdings würde hier der HO-Lkw noch eine Fahrt von ca. 200 km auf der mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Autobahn benötigen, um im Sekundärnetz ohne Einsatz eines Dieselmotors und ohne weitere Oberleitungsabschnitte oder Ladesteckdosen eine Strecke von 50 km bewältigen zu können.

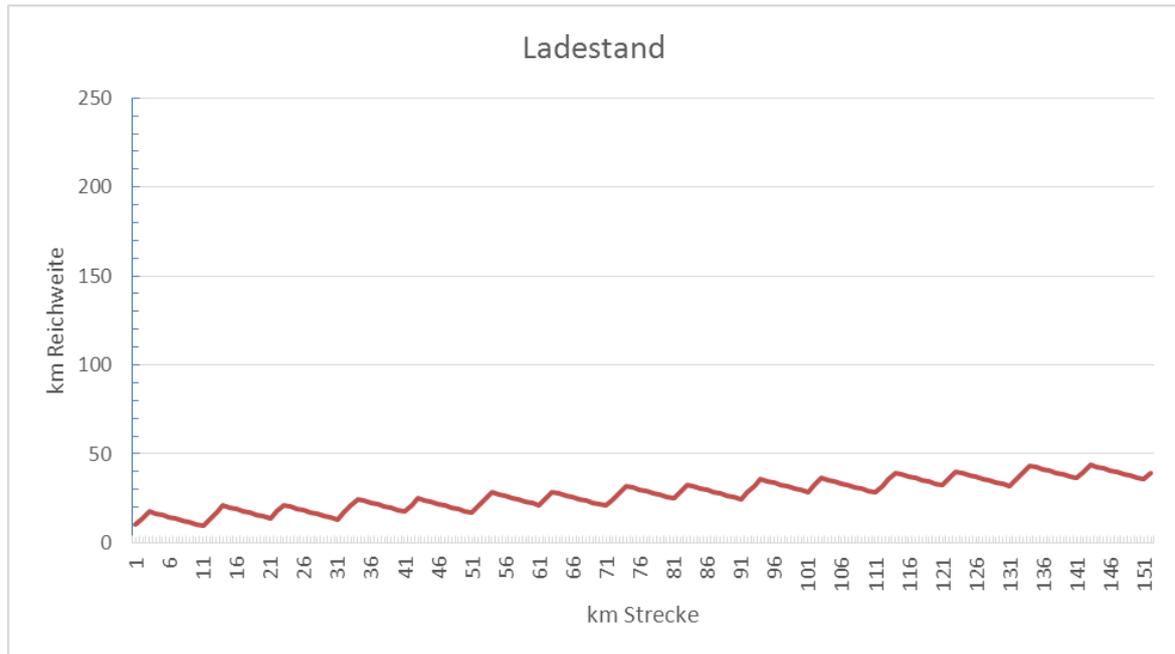


Abbildung 99: Verlauf des Batterieladestandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 25 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung

Bei einer Ausstattung von 30 % des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur ergeben sich für einen HO-Lkw mit 100 km Batteriereichweite die folgenden Ladestände:

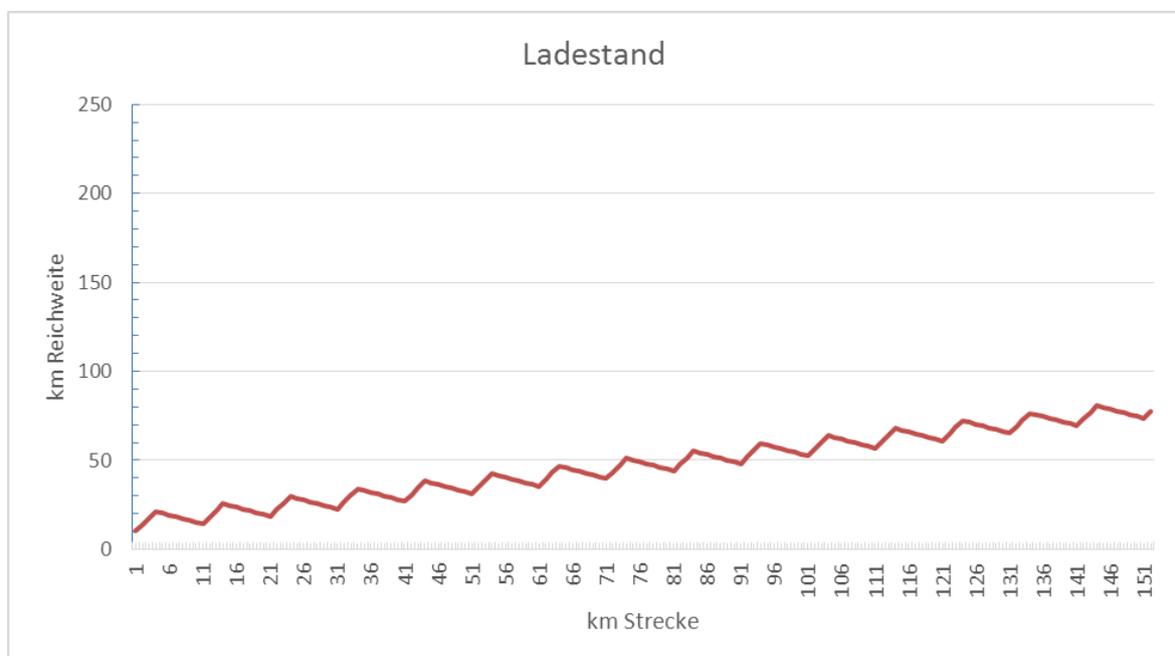


Abbildung 100: Verlauf des Batterieladestandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung

Der notwendige Ladestand, um im Sekundärnetz ohne Einsatz eines Dieselmotors und ohne weitere Oberleitungsabschnitte oder Ladesteckdosen eine Strecke von 50 km bewältigen zu können, ist in diesem Beispiel nach einer Fahrt von ca. 110 km auf der mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Autobahn erreicht.

Für einen HO-Lkw mit 200 km Batteriereichweite und einem Ladestrom von 3C ergibt bei einer Netzabdeckung von 30 % folgender Verlauf der Ladung:

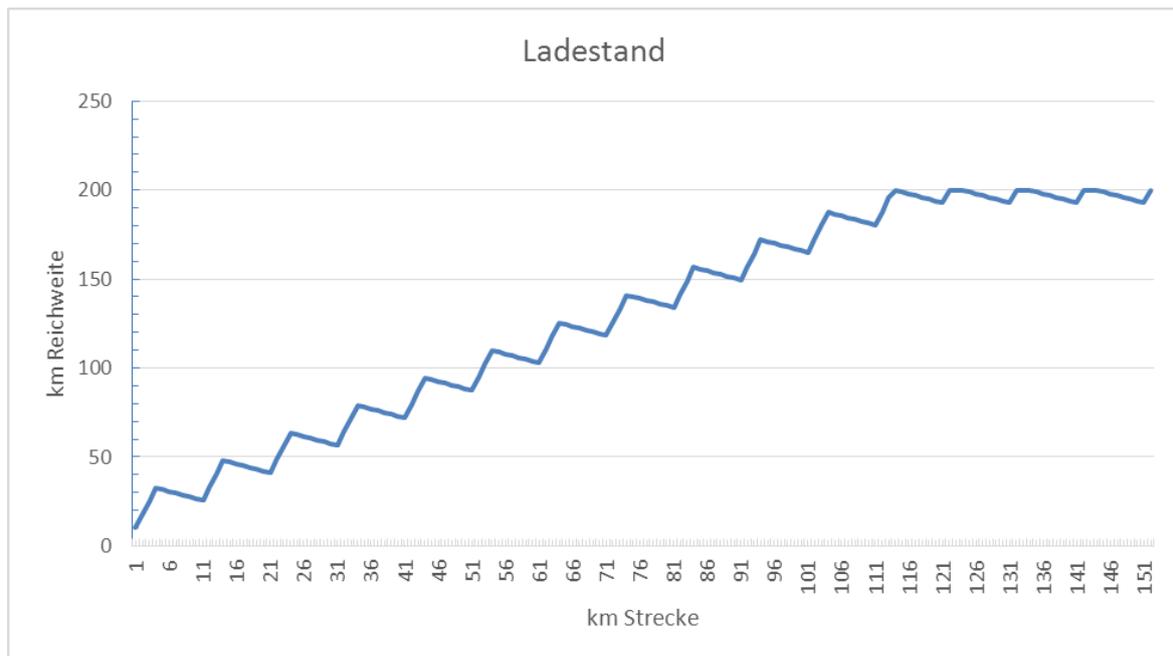


Abbildung 101: Verlauf des Batterieladestandes bei einem Lkw mit Akku für 200 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung

Eine Fahrt im Sekundärnetz ohne Einsatz eines Dieselmotors und ohne weitere Oberleitungsabschnitte oder Ladesteckdosen über 50 km wäre in diesem Beispiel bereits nach ca. 25 km Fahrt auf der mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Autobahn möglich, nach ca. 120 km Fahrt auf der mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Autobahn ist eine vollständige Ladung der Akkumulatoren erreicht.

Falls in Zukunft ein Ladestrom von 6 C technisch realisierbar wäre, würde sich bei einem HO-Lkw mit 100 km Batteriereichweite und einer Netzabdeckung von 30 % folgender Verlauf des Batterieladestandes ergeben:

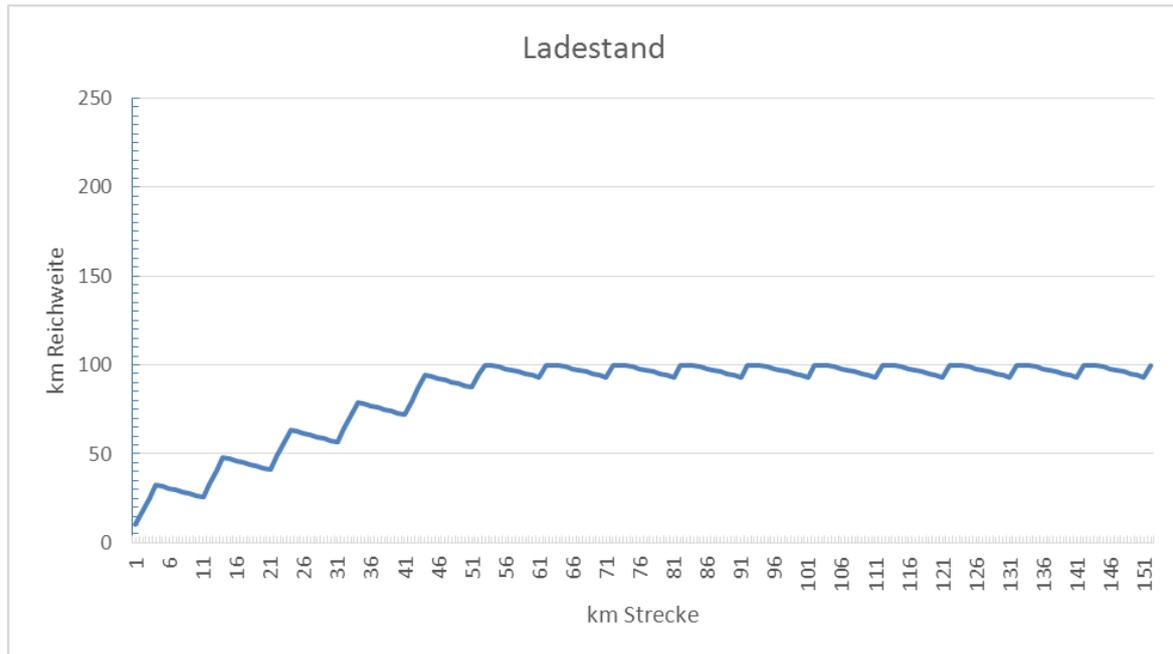


Abbildung 102: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 6 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung

Dieses Beispiel zeigt, dass für die Fahrt im Sekundärnetz ohne Einsatz eines Dieselmotors und ohne weitere Oberleitungsabschnitte oder Ladesteckdosen nicht die Batteriekapazität an sich, sondern der maximal mögliche Ladestrom entscheidend ist.

Nachfolgende Abbildung gibt den Verlauf des Batterieladezustandes für einen HO-Lkw mit 100 km Batteriereichweite und einer 30 %-igen Abdeckung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur für folgenden Fahrzyklus wieder:

- Start mit vollgeladenen Batterien an einer Be-/Entladestation im Sekundärnetz
- Fahrt von 50 km im Sekundärnetz ohne Oberleitungsinfrastruktur
- Fahrt von 50 km auf der Autobahn mit Oberleitungsinfrastruktur (ohne Steigungsstrecken)
- Fahrt von 50 km im Sekundärnetz ohne Oberleitungsinfrastruktur zu einer Be-/Entladestation mit Ladeinfrastruktur.

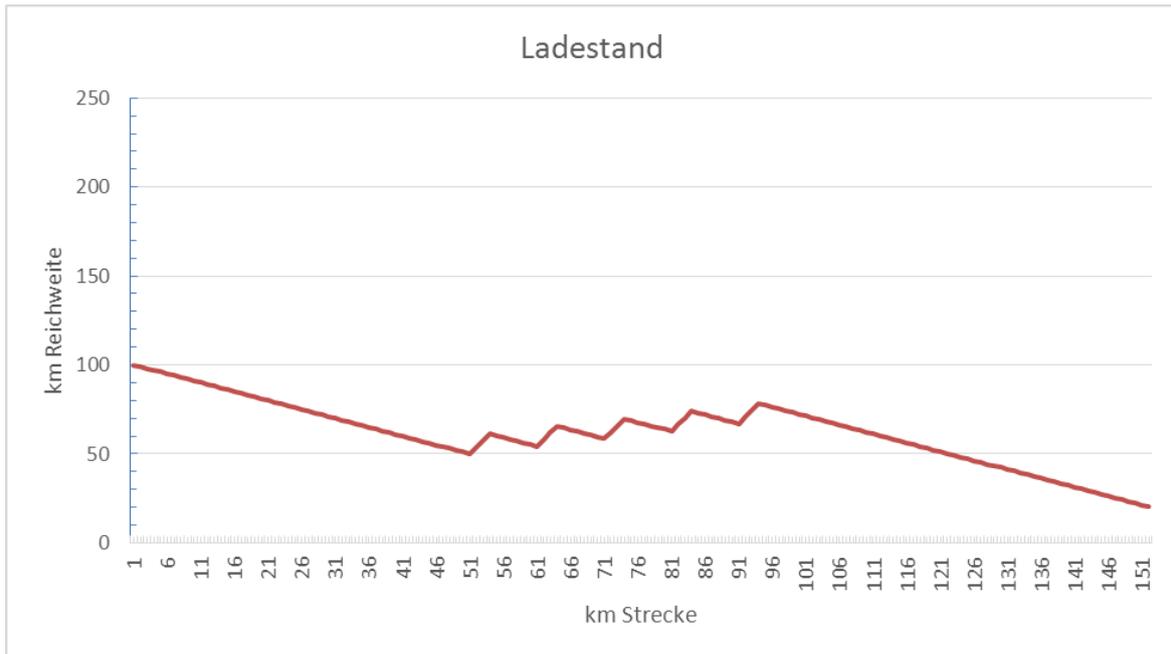


Abbildung 103: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Fahrtzyklus: 50 km Sekundärnetz / 50 km Autobahn ohne Steigungsstrecken / 50 km Sekundärnetz

Die nachfolgende Abbildung macht deutlich, dass Steigungsstrecken einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf des Batterieladezustandes haben. Nimmt man an, dass der HO-Lkw während seiner 50 km langen Fahrt auf der mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestatteten Autobahn insgesamt 500 Höhenmeter auf Steigungsstrecken von 10 km Länge zu überwinden hat, so ergibt sich folgender Ladezustandsverlauf:

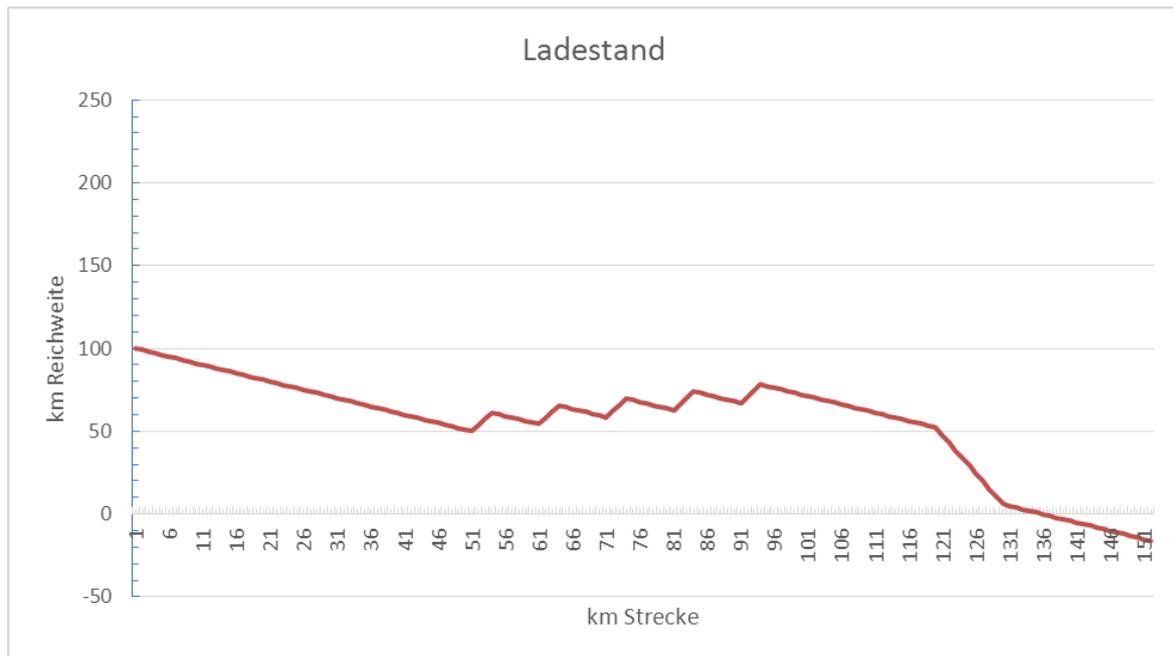


Abbildung 104: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Fahrtzyklus: 50 km Sekundärnetz / 50 km Autobahn mit Steigungsstrecken / 50 km Sekundärnetz

In diesem Fall wäre demnach die Batteriekapazität bereits vor Erreichen des Zielortes im Sekundärnetz erschöpft. Im o. g. Beispiel wurde jedoch davon ausgegangen, dass der HO-Lkw die gesamte Autobahnstrecke, d. h. auch die Steigungsstrecken mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h durchfährt. Nimmt man an, dass die Geschwindigkeit auf den Steigungsstrecken auf 60 km/h zurückgeht, so ergibt sich (unter sonst gegenüber dem vorangegangenen Beispiel gleichbleibenden Randbedingungen) folgendes Bild:

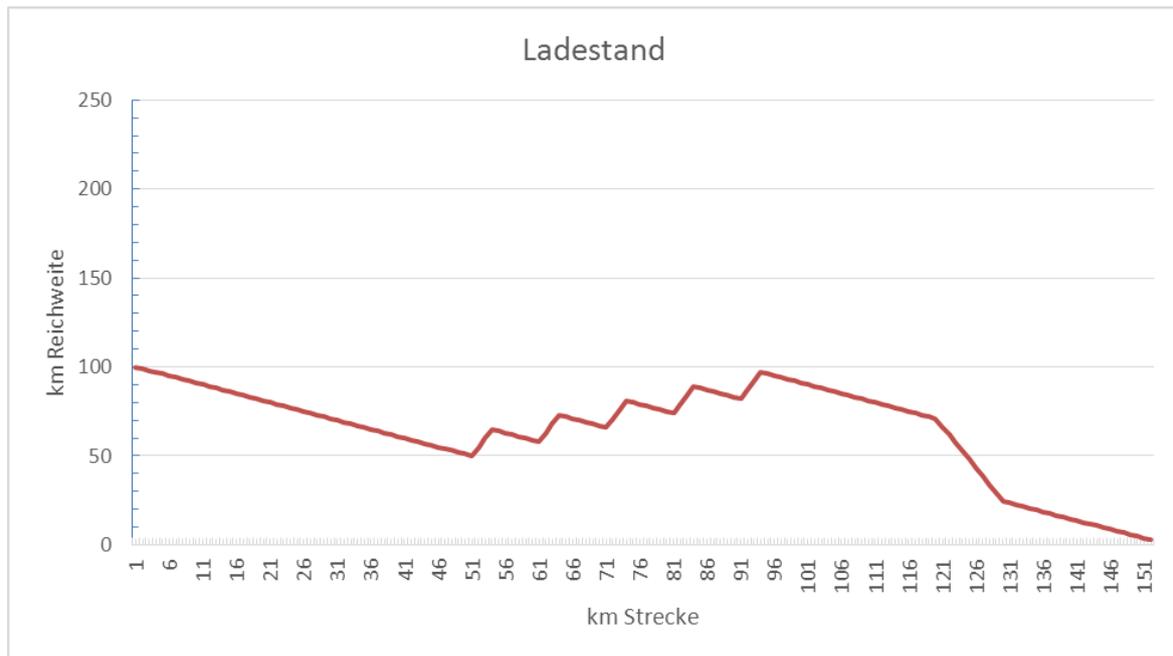


Abbildung 105: Verlauf des Batterieladestandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Fahrtzyklus: 50 km Sekundärnetz / 50 km Autobahn mit Steigungsstrecken (60km/h) / 50 km Sekundärnetz

Bei starkem Verkehrsaufkommen von HO-Lkw und relativ geringer Abdeckung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur kann es dazu kommen, dass die Umspannstationen die Bezugsleistung der einzelnen Fahrzeuge begrenzen muss, um keine Abschaltung wegen Überlast zu riskieren. In der nachfolgenden Abbildung ist der Verlauf des Batterieladestandes unter der Annahme wiedergegeben, dass die Leistungsabgabe der Umspannstationen über einen Streckenabschnitt von 30 km auf 200 kW je HO-Lkw reduziert werden muss.

Es ist zu erkennen, dass die Ladeleistung nicht ausreicht, um den Batterieladestand zu halten. In diesem Fall wäre ein Kommunikationssystem zwischen den Umspannstationen und den HO-Lkw hilfreich, mit dessen Hilfe die aktuellen Ladezustände der HO-Lkw sowie die geplante Fahrtroute bei der Zuteilung der Ladeleistung berücksichtigt werden könnten. So kann z. B. ein HO-Lkw, der noch über ausreichende Batteriekapazitäten für seine geplante Fahrtroute verfügt, kurzfristig mit weniger Ladeleistung auskommen, als ein HO-Lkw mit fast leerer Batterie, der noch eine längere Fahrt ohne Lademöglichkeit im Sekundärnetz vor sich hat.

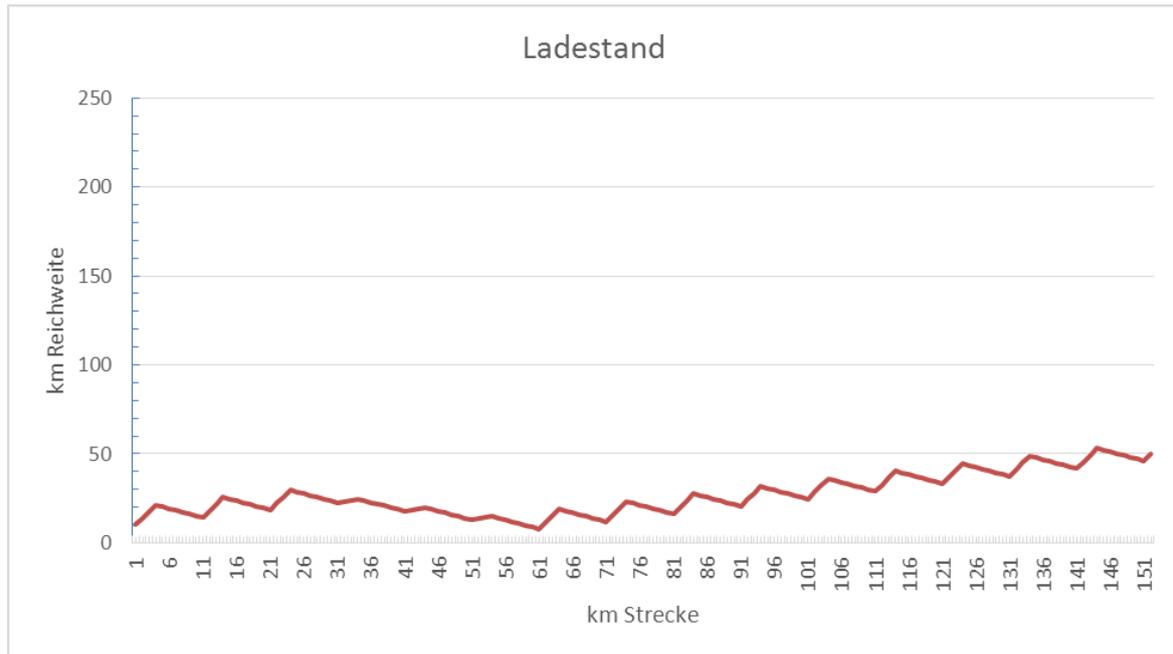


Abbildung 106: Verlauf des Batterieladestandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, Begrenzung der aufgenommenen Leistung auf 200 kW je HO-Lkw

12.2 Antriebsleistung

Die Antriebsleistung, die für die Berechnung der Investitionen von BEV und PHEV herangezogen wird, basiert auf der durchschnittlichen Leistung der Beispielfahrzeuge aus (last-auto omnibus 2014), welche marktgängige Fahrzeugkonfigurationen mit Dieselantrieb abbilden. Da dort jedoch nur eine begrenzte Anzahl an Fahrzeugen aufgeführt ist, wurden leichte Anpassungen unter Berücksichtigung von Dörr et al. (2014), Hülsmann et al. (2014) und Kloess et al. (2011) vorgenommen. Die Antriebsleistung von auf dem Markt verfügbaren BEV ist über alle Gewichtsklassen hinweg mit der Leistung konventioneller Antriebssysteme vergleichbar (Raiber et al. 2014). Daher wird auch im Folgenden von einer identischen Antriebsleistung ausgegangen. Bei PHEV kann neben ausschließlichem Antrieb durch den Verbrennungsmotor auch rein elektrisches Fahren erforderlich sein. Deshalb wird in Anlehnung an Hülsmann et al. (2014) und Kloess et al. (2011) davon ausgegangen, dass sowohl das konventionelle als auch das elektrische Antriebssystem über die volle Leistung verfügen. Es ergibt sich daher für konventionell angetriebene Lkw, PHEV und BEV dieselbe Antriebsleistung, wie in Tabelle 86 dargestellt ist.

Tabelle 86: Angenommene Antriebsleistung für BEV und PHEV je Gewichtsklasse

Gewichtsklasse	Leistung [kW]
0-3,5 t	100
3,5-7,5 t	120
7,5-12 t	150
> 12 t	250
SZM	300

Quellen: in Anlehnung an Dörr et al. 2014, Hülsmann et al. 2014, Kloess et al. 2011, lastauto omnibus 2014.

12.3 Komponentenkosten für BEV- und PHEV-Antriebsstrang

Die Komponentenkosten für den BEV- und PHEV-Antriebsstrang wurden von Hülsmann et al. (2014) übernommen und auf das Jahr 2015 hochgerechnet. Sie umfassen Kosten für Elektromotor, Steuerung und Leistungselektronik sowie sonstige Kosten für Hilfsmotoren für Nebenaggregate oder Klimatechnik. Bei Elektromotoren wird von einer linearen Kostendegression basierend auf den Werten von Hülsmann et al. (2014) ausgegangen. Weiter nehmen Hülsmann et al. (2014) bei den spezifischen Kosten für Steuerung und Leistungselektronik sowie sonstigen Kosten bis zum Jahr 2030 eine Kostendegression von 10 % pro Dekade an. Die spezifischen Kosten für die einzelnen Komponenten sind in Tabelle 87 dargestellt.

Tabelle 87: Spezifische Investitionskosten für einzelne Komponenten des Antriebsstrangs

Jahr	2015	2030
Elektromotor [Euro/kW]	23,5	22
Steuerung und Leistungselektronik [Euro/kW]	25	21
Sonstige Kosten [Euro]	3.146	2.727

Quelle: in Anlehnung an (Hülsmann et al. 2014).

12.4 Nutzlastverlust bei BEV und PHEV

Eine Veränderung der Nutzlast ergibt sich bei BEV und PHEV durch eine Gewichtsveränderung beim Antriebsstrang und vor allem beim Energiespeicher, der Batterie. Batterien besitzen auf Systemebene mit ca. 0,115 kWh/kg in 2015 (Thielmann et al. 2015) eine deutlich geringere Energiedichte als beispielsweise Diesel mit 12,22 kWh/kg (Kreyenberg et al. 2015). Zwar wird bis 2030 eine Verdoppelung der Energiedichte auf ca. 0,215 kWh/kg erwartet (Thielmann et al. 2015), trotzdem verursachen die Batterien immer noch ein erhebliches Zusatzgewicht. Unter Verwendung der in Tabelle 44ff. festgelegten Batteriegrößen wurde das Batteriegewicht berechnet (vgl. Tabelle 88). Dünnebeil et al. (2015) geben für einen batterieelektrischen Antriebsstrang mit einer Leistung von 120 kW eine

Reduktion des Fahrzeugleergewichts gegenüber einem konventionellen Diesel-Lkw von 860 kg an. Unberücksichtigt ist hier jedoch die Batterie. Der ergänzende elektrische Antriebsstrang bei PHEV führt zu einem Mehrgewicht von ca. 100 kg bei einer Leistung von ebenfalls 120 kW (Dünnebeil et al. 2015). Auch hier ist die Batterie nicht eingerechnet. Das jeweilige Gewichts-Leistungs-Verhältnis der beiden alternativen Antriebsstränge wird auf die im vorigen Kapitel 12.2 zugrunde gelegte Antriebsleistung angewendet. Damit können das durch den PHEV-Antriebsstrang verursachte Zusatzgewicht sowie die Gewichtsreduktion durch den BEV-Antriebsstrang berechnet werden (vgl. Tabelle 88).

Tabelle 88: Nutzlastverlust und Nutzlasteinsparungen bei BEV und PHEV

2015		0 – 3,5 t	3,5 – 7,5 t	7,5 – 12 t	> 12 t	SZM
Nutzlast Diesel	kg	1.450	3.400	6.350	13.200	27.000
zusätzliches Gewicht BEV-Batterie	kg	522	957	1.304	1.652	2.087
Gewichtsreduktion Antriebsstrang	kg	400	860	1.075	1.792	2.150
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	kg	122	97	229	-139	-63
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	%	8 %	3 %	4 %	-1 %	0 %
zusätzliches Gewicht PHEV-Batterie	kg	348	609	870	1.130	1.391
Zusatzgewicht	kg	83	100	125	208	250
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	kg	264	509	745	922	1.141
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	%	18 %	15 %	12 %	7 %	4 %
2030		0 – 3,5 t	3,5 – 7,5 t	7,5 – 12 t	> 12 t	SZM
Nutzlast Diesel	kg	1.450	3.400	6.350	13.200	27.000
zusätzliches Gewicht BEV-Batterie	kg	279	512	698	884	1.116
Gewichtsreduktion Antriebsstrang	kg	400	860	1.075	1.792	2.150
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	kg	-121	-348	-377	-908	-1.034
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	%	-8 %	-10 %	-6 %	-7 %	-4 %
zusätzliches Gewicht PHEV-Batterie	kg	233	372	512	651	837
Zusatzgewicht	kg	83	100	125	208	250
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	kg	149	272	387	443	587
Nutzlastverlust ggü. Verbrenner	%	10 %	8 %	6 %	3 %	2 %

In GK1 wird bei BEV eine geringere Gewichtsreduktion angenommen, da in dieser Gewichtsklasse typischerweise Pkw-Antriebsstränge eingesetzt werden, die deutlich leichter sind als Lkw-Antriebsstränge. Eine zukünftige Veränderung des Gewichts der Antriebsstränge wird nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die Entwicklung im Leichtbau bei allen Antriebsarten ähnlich ausfällt. Der gesamte Nutzlastverlust, bzw. Nutzlasteinsparungen für alle Gewichtsklassen sind für die Jahre 2015 und 2030 in Tabelle 88 dargestellt.

12.5 Berechnung der Wartungskosten für Lkw mit alternativen Antrieben

Über die Wartungs- und Instandhaltungskosten von Lkw mit alternativen Antrieben gibt es derzeit keine verlässlichen Quellen, die auch zukünftig zutreffen sein könnten. Deshalb wurde sich der Methode von (Propfe et al. 2012) aus dem Pkw-Bereich bedient, welche die Wartungskosten in ihre Bestandteile zerlegen und diese für die alternativen Antriebsarten entsprechend anpassen. Als Basis dienen die Wartungs- und Instandhaltungskosten von Diesel-Lkw aus (lastauto omnibus 2015). Diese setzen sich für alle Lkw aus Reifenkosten sowie Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten zusammen. Bei den alternativen Antrieben kommen zudem die Kosten für die Abnutzung der Batterie oder der Brennstoffzellensysteme hinzu. Sämtliche so berechneten Werte finden sich in den Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.3.

Beispielhaft sei diese Rechnung für die Größenklasse der Sattelzugmaschinen dargestellt. Die Reifenkosten werden für alle Antriebsarten als gleich angenommen (0,0246 Euro/km). Für die Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten werden (analog zu Propfe et al. 2012) bei alternativen Antrieben ohne Verbrennungsmotor 15 % der Kosten des Dieselantriebs (0,1101 Euro/km) und für Gasfahrzeuge 120 % des Verbrenners angenommen. Die Kosten der Batterie in Abhängigkeit der Fahrleistung kann über die Investition für die Batterie dividiert durch die Batteriereichweite und die möglichen Vollzyklen errechnet werden; gleiches gilt für die Brennstoffzelle. Das heißt, bei einer Batteriekapazität von 200 kWh für die Batterievariante des HO-Lkw und einem Batteriepreises von 186 Euro/kWh (im Jahr 2030) sind für die Batterie 37.200 Euro zu investieren. Bei einer Reichweite von 100 km und einer Lebensdauer von 5.000 Vollzyklen im Jahr 2030 können 500.000 km mit dieser Batterie zurückgelegt werden, bevor sie ersetzt werden muss. Die Batterieinvestition in Abhängigkeit ihrer Laufleistung beträgt demnach 0,0785 Euro/km.

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fahrzeugbestand, Fahrleistung und CO ₂ -Emissionen im Güterverkehr in Deutschland im Jahr 2015 differenziert nach Gewichtsklassen (Fzg = Fahrzeug)	1
Abbildung 2:	Belastung der Bundesautobahnen durch innerdeutschen Verkehr von Sattelzugmaschinen (grün) und Ausbaurkorridor für die ersten 1.000 km Oberleitung (rot)	4
Abbildung 3:	Ein Transitionsfad für die Einführung von HO-Lkw in Deutschland (OL: Oberleitungen; PtL: Power to Liquid; PtG: Power to Gas)	7
Abbildung 4:	Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland – Stand und Prognose (Quelle: UBA 2013, BAU-Szenario)	12
Abbildung 5:	Grundmaße für den Verkehrsraum und den lichten Raum (Quelle: FGSV 2008)	20
Abbildung 6:	Elektrische Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur	22
Abbildung 7:	Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Straßenquerschnitt (Variante 1)	26
Abbildung 8:	Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Straßenquerschnitt (Variante 2)	27
Abbildung 9:	Ausbildung der Masten in Form von Gabelständern	27
Abbildung 10:	Prinzip der konduktiven Ladung mittels Stromschienen (Bildquelle: http://news.volvogroup.com)	46
Abbildung 11:	Aufbau der straßenseitigen Infrastruktur für das konduktive Laden über Stromschienen	48
Abbildung 12:	Anordnung der konduktiven Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen im Straßenquerschnitt	48
Abbildung 13:	Prinzip der induktiven Ladung – Induktionsschleifen (Quelle: EU o.J.)	61
Abbildung 14:	Prinzip der induktiven Ladung – Stromabnehmer am Fahrzeug (Quelle: EU o.J.)	62
Abbildung 15:	Aufbau der straßenseitigen Infrastruktur für das induktive Laden	63
Abbildung 16:	Anordnung der induktiven Ladeinfrastruktur im Straßenquerschnitt	63
Abbildung 17:	Aufteilung des Bestandes 2013 nach Gewichtsklassen und Aufbauarten (KBA 2014a)	74
Abbildung 18:	Systemvariationen HO-Lkw (eigene Darstellung)	82
Abbildung 19:	Flachschiensystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Olsson et al. 2012)	87
Abbildung 20:	Querschnitt: abgesenktes Flachschiensystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Olsson et al. 2012)	87
Abbildung 21:	Querschnitt: Einschiensystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Olsson et al. 2012)	88
Abbildung 22:	Stromschiene und Stromschienen-Tram (Jahn 2015b, c)	89
Abbildung 23:	Scania-Lkw mit Induktionstechnologie (Scania 2016)	90
Abbildung 24:	Kumulierte Dichteverteilung der Jahresfahrleistung auf Basis der Erhebung Kraftverkehr in Deutschland (KiD) 2010 (WVI et al. 2010)	104
Abbildung 25:	Mehrkosten der HO-Lkw pro Fahrzeugkilometer durch reduzierte Ladekapazität im Jahr 2015 (eigene Darstellung)	107
Abbildung 26:	Mehr-/Minderkosten bei BEV pro Fahrzeugkilometer durch veränderte Ladekapazität im Jahr 2015 und 2030) (eigene Darstellung)	108

Abbildung 27:	Mehrkosten bei PHEV pro Fahrzeugkilometer durch veränderte Ladekapazität im Jahr 2015 und 2030	109
Abbildung 28:	Validate – Ergebnisdarstellung Belastungen Pkw/Lkw	114
Abbildung 29:	Lkw-Fahrten in den Distanzklassen mit und ohne BAB-Anteil.....	117
Abbildung 30:	Summenlinie der Distanzklassenanteile mit und ohne BAB-Anteil.....	118
Abbildung 31:	Belastungszahlen aller Lkw auf bundesdeutschen Fernstraßen, abgebildet im Validate-Modell (eigene Darstellung)	119
Abbildung 32:	Belastungszahlen für Sattelzüge (eigene Darstellung PTV).....	120
Abbildung 33:	Belastungszahlen für Sattelzüge im innerdeutschen Verkehr (eigene Darstellung PTV).....	121
Abbildung 34:	Anteile an den reduzierten Potentialen am Lkw-Verkehr (eigene Darstellung PTV).....	122
Abbildung 35:	Streckenwahl Gruppe 1 (eigene Darstellung PTV).....	123
Abbildung 36:	Streckenauswahl bis 4.000 km (eigene Darstellung PTV).....	124
Abbildung 37:	Anforderungen an das Modell	127
Abbildung 38:	Übersicht zur Vorgehensweise im Modell.....	128
Abbildung 39:	Anzahl der Fahrten pro Tag nach Tagesfahrleistung.....	130
Abbildung 40:	Mittlerer BAB-Anteil als Funktion der Tagesfahrleistung	131
Abbildung 41:	Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs bei Elektrifizierung der BAB.....	132
Abbildung 42:	Verteilung der mittleren Einsatzgebiete von Lkw (für bessere Vergleichbarkeit wurden die Verteilungsfunktionen normiert)	134
Abbildung 43:	Mittleres Einsatzgebiet von Lkw in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung	134
Abbildung 44:	Anzahl der Fahrtage pro Jahr als Quotient von Jahres- und Tagesfahrleistung.....	136
Abbildung 45:	Anteil verschiedener Marken an den Neuzulassungen von SZM	139
Abbildung 46:	Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 1 (bis 3,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse).....	145
Abbildung 47:	Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 2 (3,5 t bis 7,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse).....	145
Abbildung 48:	Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 3 (7,5 t bis 12 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse).....	146
Abbildung 49:	Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 4 (12 t bis 26 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse).....	147
Abbildung 50:	Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Sattelzugmaschinen (mehr als 40 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse).....	147
Abbildung 51:	Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Diesel- und Gaspreisvariation.....	151
Abbildung 52:	Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Zinssatz- und BEV-Batteriekapazitätsvariation.....	152
Abbildung 53:	Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Batteriekosten und -lebensdauern.....	153
Abbildung 54:	Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für verschiedene BZ-Parameter	154
Abbildung 55:	Vergleich der Rechnungen mit und ohne Energiesteuern für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030.....	155

Abbildung 56:	Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungsgrundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030.....	157
Abbildung 57:	Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungsgrundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 unter Einbezug von synthetisch erstelltem Methanol.....	158
Abbildung 58:	Vergleich der jährlichen TCO der Antriebsarten Diesel und HO-Diesel-Lkw mit unterschiedlichen Streckenanteil an der HO-Infrastruktur für Sattelzugmaschinen mit unterschiedlichen Jahresfahrleistungen im Jahr 2030.....	160
Abbildung 59:	Anteil der Strecke, die an der HO-Infrastruktur zurückgelegt wird bei unterschiedlichem HO-Infrastrukturausbau (links) und daraus resultierende elektrische Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung.....	161
Abbildung 60:	Verteilung der Jahresfahrleistungen von Sattelzugmaschinen auf Basis von (WVI et al. 2010).....	162
Abbildung 61:	Vergleich der jährlichen TCO der Antriebsarten Diesel und HO-Batterie-Lkw mit unterschiedlichen Streckenanteil an der HO-Infrastruktur für Sattelzugmaschinen mit unterschiedlichen Jahresfahrleistungen im Jahr 2030 (links) und tägliche Strecke, die nicht an der HO-Infrastruktur stattfindet bei unterschiedlichem HO-Infrastrukturausbau in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung.....	162
Abbildung 62:	Bestand an HO-Lkw 2030 (alles HO-Diesel) in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer 2030.....	164
Abbildung 63:	Kosten für Infrastrukturaufbau und Ersparnis des Fahrzeugbestands in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer im Jahr 2030.....	165
Abbildung 64:	CO ₂ -Emissionsreduktion durch HO-Lkw im Jahr 2030 in Abhängigkeit des Infrastrukturausbaus im Jahr 2030.....	166
Abbildung 65:	Vergleich der Kosten für Umspannen, Fahrzeugmehrinvestitionen und laufender Kostenersparnis im Traktionsdienstleistermodell.....	169
Abbildung 66:	Kosten für Infrastrukturaufbau und Ersparnis des Fahrzeugbestands in Abhängigkeit der elektrifizierten Autobahnkilometer auf lange Sicht.....	171
Abbildung 67:	Anteile der verschiedenen alternativen Antriebsarten am alternativen Fahrzeugbestand im Jahr 2030 im Basisszenario unterteilt nach Größenklassen.....	172
Abbildung 68:	Vorgehensmodell einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040/44).....	178
Abbildung 69:	Systemgrenzen der THG-Emissions-Untersuchungen.....	181
Abbildung 70:	Beispielhafte Darstellung der Mastkonstruktion (Europoles 2014).....	184
Abbildung 71:	THG-Emissionen der HO-Infrastruktur.....	196
Abbildung 72:	THG-Emissionen der HO-Infrastruktur (Masten und Oberleitung).....	197
Abbildung 73:	THG-Emissionen der HO-Infrastruktur (Unterwerke und Stromzufuhr).....	197
Abbildung 74:	Vermiedene THG-Emissionen durch das HO-Lkw-System in 2030.....	199
Abbildung 75:	THG-Relevanz der Infrastruktur- und Fahrzeugkomponenten.....	199
Abbildung 76:	Parametervariation – Batterie-Hybride statt Diesel-Hybride.....	200
Abbildung 77:	Parametervariation – THG-Emissionen der Stromproduktion.....	202
Abbildung 78:	Stromnachfrage durch HO-Lkw in Abhängigkeit vom Ausbau der Oberleitungen bzw. der Verbreitung von HO-Lkw.....	207

Abbildung 79:	Stündliche Verteilung der Fahrleistung von SZM in Deutschland (nur innerdeutsche Verkehre) an einem Werktag	208
Abbildung 80:	Illustration der Dekompositionsmethodik zur Analyse der Lastgänge	209
Abbildung 81:	Lastprofil von SZM in Deutschland (nur innerdeutsche Verkehre) an einem Werktag für drei Stromnachfragenszenarien	210
Abbildung 82:	Veränderung der Last über alle Prozesse (Differenzbetrachtung 2030 vs. 2010) in Deutschland	210
Abbildung 83:	Energiewirtschaftliche Auswirkungen HO-Lkw	212
Abbildung 84:	Angenommener Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur (grüne Punkte) entlang deutscher BAB (alle Punkte). Links: Ausbau der ersten 1.000 km; Rechts: Ausbau der ersten 4.000 km	213
Abbildung 85:	Relative Änderung der lokalen Stromnachfrage gegenüber der Referenzentwicklung 2030	214
Abbildung 86:	Relative Änderung der lokalen Stromnachfrage gegenüber der Referenzentwicklung bei sehr starker Nutzung	215
Abbildung 87:	Lkw-Mieten und -Leasing (eigene Darstellung basierend auf Gnamm et al. 2010, S. 7)	224
Abbildung 88:	Marktanteile Lkw und Sattelzugmaschinen in Deutschland im Jahr 2015 (eigene Darstellung basierend auf Wildhage 2016)	225
Abbildung 89:	Beispielhafte Ausprägung einer möglichen PPP (eigene Darstellung)	244
Abbildung 90:	Neun Kernnetzkorridore der TEN-V	250
Abbildung 91:	Güterverkehrskorridore (RFC)	252
Abbildung 92:	Bewilligtes Budget in Millionen Euro und Anzahl der Vorschläge für die Prioritäten des CEF-Jahresaufrufs	255
Abbildung 93:	Empfohlenes Budget in Millionen Euro und Anzahl der Vorschläge für die Förderung in Kohäsionsländern des CEF-Aufrufes von 2014	256
Abbildung 94:	Geplante Budgets für die zweite Ausschreibungsrunde von CEF-Transport (Deadline 02/2016)	256
Abbildung 95:	Verkehrsbeziehungen von Belgien im Güterverkehr	260
Abbildung 96:	Ein Transitions Pfad für die Einführung von HO-Lkw in Deutschland	267
Abbildung 97:	Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 20 % Netzabdeckung mit Oberleitung, flache Fahrbahn, 3 C Ladestrom, keine Leistungsbegrenzung beim Strombezug	269
Abbildung 98:	Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 200 km Reichweite, 20 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung	270
Abbildung 99:	Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 25 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung	271
Abbildung 100:	Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung	271
Abbildung 101:	Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 200 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung	272

Abbildung 102: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 6 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung.....	273
Abbildung 103: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Fahrtzyklus: 50 km Sekundärnetz / 50 km Autobahn ohne Steigungsstrecken / 50 km Sekundärnetz	274
Abbildung 104: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Fahrtzyklus: 50 km Sekundärnetz / 50 km Autobahn mit Steigungsstrecken / 50 km Sekundärnetz	275
Abbildung 105: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Fahrtzyklus: 50 km Sekundärnetz / 50 km Autobahn mit Steigungsstrecken (60km/h) / 50 km Sekundärnetz.....	276
Abbildung 106: Verlauf des Batterieladezustandes bei einem Lkw mit Akku für 100 km Reichweite, 30 % Netzabdeckung, 3 C Ladestrom, Begrenzung der aufgenommenen Leistung auf 200 kW je HO-Lkw	277

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennzahlen für Lkw und potentielle strombasierte Antriebstechnologien unterschieden nach Gewichtsklassen.....	13
Tabelle 2:	Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur und deren Merkmale.....	30
Tabelle 3:	Besondere Aspekte der Oberleitungsinfrastruktur.....	30
Tabelle 4:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1A (HO-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung).....	33
Tabelle 5:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1A (HO-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung).....	34
Tabelle 6:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1B (HO-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung).....	35
Tabelle 7:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 1B (HO-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Worst-Case-Betrachtung).....	36
Tabelle 8:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2A (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung).....	37
Tabelle 9:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2A (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung).....	38
Tabelle 10:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2B (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung).....	39
Tabelle 11:	Kostenschätzung für die Oberleitungsinfrastruktur in der Variante 2B (HO-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau, Worst-Case-Betrachtung).....	40
Tabelle 12:	Zusammenstellung der Gesamtkosten (Mittelwert zwischen Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung, gerundet) in den unterschiedlichen Varianten.....	40
Tabelle 13:	Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit Oberleitungsinfrastruktur.....	45
Tabelle 14:	Jährliche Instandhaltungskosten in den unterschiedlichen Varianten.....	46
Tabelle 15:	Komponenten der konduktiven Ladeinfrastruktur und deren Merkmale.....	51
Tabelle 16:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1A (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung).....	53
Tabelle 17:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1A (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung).....	54
Tabelle 18:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1B (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung).....	55
Tabelle 19:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 1B (Hybrid-Lkw mit Dieselmotor, Endausbau, Best-Case-Betrachtung).....	56
Tabelle 20:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2A (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Best-Case-Betrachtung).....	57
Tabelle 21:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2A (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Startphase, Worst-Case-Betrachtung).....	58

Tabelle 22:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2B (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau (Best-Case-Betrachtung)	59
Tabelle 23:	Kostenschätzung für die konduktive Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen in der Variante 2B (Hybrid-Lkw ohne Dieselmotor, Endausbau (Worst-Case-Betrachtung)	60
Tabelle 24:	Zusammenstellung der Gesamtkosten der konduktiven Ladeinfrastruktur mittels Stromschienen (Mittelwert zwischen Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung) in den unterschiedlichen Varianten	61
Tabelle 25:	Komponenten der induktiven Ladeinfrastruktur und deren Merkmale	65
Tabelle 26:	Kostenschätzung für die induktive Ladeinfrastruktur (Best-Case-Betrachtung)	67
Tabelle 27:	Kostenschätzung für die induktive Ladeinfrastruktur (Worst-Case-Betrachtung)	68
Tabelle 28:	Investitionsbedarf für die Ausstattung des Autobahnnetzes mit elektrischer Ladeinfrastruktur	69
Tabelle 29:	Nutzungsdauern und Ersetzungsraten bei Nutzfahrzeugen	75
Tabelle 30:	Entwicklung der Inländerfahrleistung nach Fahrzeugarten (Intraplan et al. 2014, S. 334)	76
Tabelle 31:	Gerundete Neuzulassungen in den Jahren 2015 und 2030 (eigene Berechnungen basierend auf (KBA 2015c) und (Intraplan et al. 2014, S. 334)	77
Tabelle 32:	Parameter für Dieselfahrzeuge 2015	79
Tabelle 33:	Parameter für Dieselfahrzeuge 2030	81
Tabelle 34:	Prognostizierte Wirtschaftlichkeitsdetails der Oberleitungs-Lkw laut Literatur	84
Tabelle 35:	Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2015	85
Tabelle 36:	Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2030	85
Tabelle 37:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2015	86
Tabelle 38:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2030	86
Tabelle 39:	Komponentenpreise für Induktionssystem (den Boer et al. 2013)	91
Tabelle 40:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2015	91
Tabelle 41:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2030	92
Tabelle 42:	Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2015	93
Tabelle 43:	Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2030	94
Tabelle 44:	Parameter für BEV-Fahrzeuge 2015	96
Tabelle 45:	Parameter für BEV-Fahrzeuge 2030	97
Tabelle 46:	Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2015	99
Tabelle 47:	Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2030	100
Tabelle 48:	Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2015	101
Tabelle 49:	Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2030	102
Tabelle 50:	Statistische Kennzahlen der Jahresfahrleistungsverteilungen (WVI et al. 2010, Truckscout24 2016)	104
Tabelle 51:	Transeuropäische Netze – Sattelzug – Fahrleistungsanteil Transit	116

Tabelle 52:	Zusammenfassung der verkehrlichen Kennwerte.....	125
Tabelle 53:	Anteil von Lkw-Strecken auf Autobahnen	129
Tabelle 54:	Beispiele elektrisches Potential (gesamt 13.000 BAB-km).....	133
Tabelle 55:	Ergebnisse linearer Regression des Anteils der Fahrten in Deutschland in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung	135
Tabelle 56:	Mittlere Jahresfahrleistungen von Lkw in Deutschland	135
Tabelle 57:	CO ₂ -Emissionen (WtW) für betrachtete Antriebsarten 2030.....	140
Tabelle 58:	Preisannahmen für Energieträger und Batterien, Batterielebensdauer und CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	141
Tabelle 59:	Lkw-Bestand (auf Tausender gerundet), EEV-Einsparung, CO ₂ - Emissionsminderung im Basisszenario im Jahr 2030, unterschieden nach Größenklassen und Antriebsarten	149
Tabelle 60:	Berechnungen zum Traktionsdienstleistermodell	169
Tabelle 61:	Annahmen über Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung im deutschen Netz für 2030 (vgl. Kapitel 7.2 sowie BMUB 2015)	180
Tabelle 62:	Angaben zum Gesamtsystem der Oberleitungsinfrastruktur und ihrer Nutzung	181
Tabelle 63:	Unterstellte Lebensdauern der verschiedenen Materialien bzw. Komponenten	182
Tabelle 64:	Bewertungselemente und -materialien bei Masten und Leitungen	184
Tabelle 65:	Annahmen und Quellen für die Berechnung des Materialverbrauchs der einzelnen Unterwerkskomponenten	186
Tabelle 66:	Übersicht über die in die Bewertung einbezogenen Materialmengen der einzelnen Komponenten eines Unterwerkes	187
Tabelle 67:	Berechnung der Batteriegewichte inkl. Gehäuse.....	188
Tabelle 68:	Materialliste für zusätzliche Komponenten für einen Oberleitung-Lkw ohne Batterie (Catenary lorry nach Björkman 2013, A.1, S. 76).....	189
Tabelle 69:	Gewicht der zusätzlichen Komponenten der verschiedenen Lkw-Varianten und Zeithorizonte (Hybrid-Antriebsstrang nach Björkman 2013, S. 76 für Oberleitung-Lkw ohne Batterie)	190
Tabelle 70:	Vergleich verschiedener Angaben zu THG-Emissionen für Herstellung von Speicherbatterien pro kWh.....	190
Tabelle 71:	Berechnung der THG-Emissionen durch die Herstellung unterschiedlicher Speicherbatterien	190
Tabelle 72:	Berechnete THG-Emissionen je Fahrzeug für die verschiedenen Lkw- Varianten und Betrachtungszeitpunkte	191
Tabelle 73:	Verwendete Ecoinvent-Module für die Bewertung der Oberleitungsinfrastruktur (entnommen aus Weidema et al. 2013)	192
Tabelle 74:	Übersicht über die Zusammensetzung der halogenfreien Polymermischung nach (Schöb 2014) sowie deren Emissionsfaktoren je kg (Weidema et al. 2013)	192
Tabelle 75:	Zusammensetzung von Isolationsmaterialien für Transformatoren für die Berechnung eines durchschnittlichen Emissionsfaktors (je kg Material)	193
Tabelle 76:	Parameter der Infrastruktur-Konfiguration im Basisszenario	194
Tabelle 77:	Parameter der Verkehrsszenario-Konfiguration im Basisszenario	195
Tabelle 78:	Parameter der Energieszenario-Konfiguration im Basisszenario	195

Tabelle 79:	Verhältnis der THG-Faktoren von Diesel- und Batterie-Hybridfahrzeugen.....	198
Tabelle 80:	Betriebe nach Leistungsbereich (Auszug; Mehrfachnennungen möglich) (DLSV 2015, S. 9)	222
Tabelle 81:	Betriebsgröße nach Zahl der Beschäftigten (DSLVL 2015, S. 23)	222
Tabelle 82:	Strategische Ausrichtung von Anbietern schwerer Lkw (eigene Darstellung)	229
Tabelle 83:	Einnahmepotentiale der Lkw-Maut.....	240
Tabelle 84:	Struktur, Prioritäten und Budget der ersten Ausschreibungsrunde des mehrwährigen Programms zum CEF Transport in der Periode 2014 bis 2020.....	254
Tabelle 85:	Geförderte Projekte aus dem Förderziel Innovation zur Förderung des Einsatzes alternativer Kraftstoffe – erste CEF-Ausschreibungsrunde	257
Tabelle 86:	Angenommene Antriebsleistung für BEV und PHEV je Gewichtsklasse	278
Tabelle 87:	Spezifische Investitionskosten für einzelne Komponenten des Antriebsstrangs	278
Tabelle 88:	Nutzlastverlust und Nutzlasteinsparungen bei BEV und PHEV	279

15 Literaturverzeichnis

- ABB (2003): Environmental Product Declaration. Large Distribution Transformer 16/20 MVA (ONAN/ONAF). ABB T&D S.p.A. Unità operativa Trasformatori di Distribuzione. Monselice (Padova), Italy: ABB. Online verfügbar unter <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=IT-16-20%20MVA&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Ackerman, P. (2016): eHighway – Electrified heavy-duty road transport. Vortragsfolien der Veranstaltung im Nov. 2016 von P. Ackermann (Siemens): Truck CO₂ – time to turn up the voltage? Potential and challenges for electric road freight.
- Albrecht, U.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Wurster, R.; Zittel, W. (2013): Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Eine Expertise für die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV). Frankfurt: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
- Altra (2016): Company History. Online verfügbar unter <http://www.iveco.com/altra-en/pages/iveco-altra-history.aspx>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- AQMD (2016): State to Award \$23.6 Million for Zero-Emission Trucks at Seaports. Online verfügbar unter <http://www.aqmd.gov/home/library/public-information/2016-news-archives/drayage-trucks>, zuletzt geprüft am 09.02.2017
- Auf der Maur, A.; Rommerskirchen, S.; Strassburg, S. (2015): Aktualisierung des Referenzszenarios für die Einsparpotentiale der Treibhausgas-Emissionen und des Endenergieverbrauchs im Verkehr für die Zeithorizonte 2020 und 2050 – VERTRAULICH. Aktualisierung der Prognoseergebnisse sowie Abschätzung und Bewertung politischer Maßnahmen. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Basel: Prognos AG
- Bankenverband (2014): Positionierung des Bankenverbands zur Finanzierung von Infrastruktur. Berlin: Bankenverband
- BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2010): Manuelle Straßenverkehrszählung 2010 – Ergebnisse auf Bundesautobahnen. Online verfügbar unter http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html, zuletzt geprüft am 21.02.2017
- BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012). Anhang 3 (Induktivschleifen, Kabel und Induktivschleifendetektoren). Bergisch Gladbach: BAST
- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg.) (2012): Analysen Bau.Stadt.Raum. Band 9, Bonn
- Behrens-Wöhlk (2015): Plattenwerkstoffe – Lagerprogramm. Bautzen: Behrens-Wöhlk-Gruppe
- Bernecker, T.; Fichert, F. (2013): Optionen zur Finanzierung der Bundesfernstraßen. Schlussbericht im Auftrag des Baden-Württembergischen Industrie- und Handelskammertages. Stuttgart: BWIHK
- Björkman, A. (2013): Comparative LCA of Electrification Alternatives for Long Haul Trucks. The Case of Iron Ore Powder Transportation from the Pajala Mine. Gothenburg: Chalmers University of Technology
- 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.; Schломann, B. et al. Berlin, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI
- BMVI (2010): Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Teil B II: Einheitspreisliste, Ausgabe 2010. Berlin: BMVI

- BMVI (2016): Wesentliche Regulierungsinhalte von ÖPP-Verträgen, <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/oeppe-geschaeftsmodelle-vertragsklauseln.html>, zuletzt geprüft am 23.11.2016
- BMW (Auftraggeber) (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, durchgeführt von Prognos, EWI und GWS: Basel/Köln/Osnabrück: Prognos/EWI/GWS
- Böninghausen, D. (2017): E-Lkw: MAN gibt Details seiner E-Roadmap bekannt. Online verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2017/02/21/e-lkw-man-gibt-details-seiner-e-roadmap-bekannt>, zuletzt geprüft am 28.02.2017
- Bohm, E.; Jehicka, E.; Willmerding, G. (1994): Research of a modern freight traffic system by using computer simulation (Engineering for the customers. Technical papers from 25th FISITA congress held Beijing 17-21 October 1994), S. 37-43
- Boßmann, T. (2015): The contribution of electricity consumers to peak shaving and the integration of renewable energy sources by means of demand response. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015, XIV, 256 S.
- Brugg Cables (2009): Technische Informationen MS/NS-Kabel. Brugg Kabel AG. Online verfügbar unter [http://www.bruggcables.com/domains/bruggcables.com/data/free_docs/Technische %20Infos.pdf](http://www.bruggcables.com/domains/bruggcables.com/data/free_docs/Technische%20Infos.pdf), zuletzt geprüft am 23.11.2016
- Brüggmann, A. B. (2016): Scania: KS-Energie- und Umweltpreis für Hybrid-Lkw. Online verfügbar unter <http://www.transport-online.de/Transport-News/Wirtschaft-Politik/15892/Scania-KS-Energie-und-Umweltpreis-fuer-Hybrid-Lkw>, zuletzt geprüft am 10.02.2017
- Bucherer, E. (2010): Business model innovation: Guidelines for a structured approach. Dissertationen / Universität St. Gallen: Vol. 3813. Aachen: Shaker Verlag
- Bundesregierung (2007): Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung – Herausforderung und energie- und klimapolitische Zielsetzungen. Online verfügbar unter <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Archiv16/Artikel/2007/12/Anlagen/2007-12-05-zusammenfassung-energiepaket.pdf?blob=publicationFile>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- CDU, CSU, SPD (2013): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. Online verfügbar unter <https://www.cdu.de/sites/default/files/media/dokumente/koalitionsvertrag.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Choi, S.; Huh, J.; Lee, W.Y.; Lee, S.W.; Rim, C.T. (2013): New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles. In: IEEE Transactions on Power Electronics PE; 28, 12, ISSN: 5832-5841
- Convenient (2016): Convenient Project Objectives Online verfügbar unter <http://www.convenient-project.eu/fe/Site/t01/Project/2>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Cruz, C.O.; Marques, R.C. (2013): Infrastructure Public-Private Partnerships - Decision, Management and Development. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 171 S.
- Daehre, K.-H. et al. (2012): Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung. Bericht der Kommission (von der Verkehrsministerkonferenz einberufene Kommission zur Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung). Nach ihrem Vorsitzenden Karl-Heinz Daehre benannt
- DAF (2010): Umweltfreundliche Belieferung. In: DAF in Action, September 2010, S. 10-11
- Daimler AG (2016a): Lkw Komplettlösungen. Online verfügbar unter <https://bb-portal.mercedes-benz.com/bic/index.php?id=index>, zuletzt geprüft am 06.04.2016
- Daimler AG (2016b): Vernetzte Lkw – Mithilfe des Internets zum Warentransport der Zukunft. Online verfügbar unter <https://www.daimler.com/innovation/vernetzung/vernetzte-lkw.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- den Boer, E.; Aarnink, S.; Kleiner, F.; Pagenkopf, J. (2013): Zero emissions trucks - An overview of state-of-the-art technologies and their potential. Delft: CE Delft

- DIN CEN ISO/TS 14067: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung und Kommunikation. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 12767: Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung - Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 16258: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr). Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 50119: Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 50122-1: Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung - Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 50149: Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrischer Zugbetrieb - Rillenfahrdrähte aus Kupfer und Kupferlegierung. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 50153: Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Gefahren. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 50502: Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Elektrische Ausrüstung in O-Bussen - Sicherheitsanforderungen und Stromabnehmersysteme. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN ISO 14040/44: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag
- DLSV (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Berlin: Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.
- Doll C.; Rothengatter W.; Schade W. (2015): Results and efficiency of railway infrastructure financing. Studie im Auftrag des EU-Parlamentes. Karlsruhe: Fraunhofer ISI/M-Five
- 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). Online verfügbar unter <http://www.bmvit.gv.at/innovation/publikationen/verkehrstechnologie/downloads/eflog.pdf>, zuletzt geprüft am 22.02.2017
- DSLVL (2015): Zahlen-Daten-Fakten aus Spedition und Logistik 2014/2015. Bonn: Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.
- Dünnebeil, F.; Reinhard, C.; Lambrecht, U.; Kies, A.; Hausberger, S.; Rexeis, M. (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasreduzierung 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
- E-FORCE ONE (2016): E-FORCE Broschüre 2016. Online verfügbar unter http://eforce.ch/wp/wp-content/uploads/2013/06/Handout_2016_1.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Eikelau, M. (1998): Branchenübergreifende Logistikdienstleistungen. In: Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.: Handbuch der Verkehrslogistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 49-82
- Eisland, R. (2016): Long-term Energy Demand in the German Residential Sector – Development of an Integrated Modeling Concept to Capture Technological Myopia. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie. Baden-Baden: NOMOS-Verlag

- Emoss (2016a): CM18 series | 18 tonne electric truck – Technical specifications. Online verfügbar unter <http://www.emoss.biz/electric-truck/18-tonne-electric-truck/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Emoss (2016b): Emoss CM 12 series | 12 tonne electric truck. Online verfügbar unter <http://www.emoss.biz/electric-truck/12-tonne-electric-truck/>, zuletzt geprüft am 14.02.2017
- EnStG (2016): Energiesteuergesetz. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/_2.html, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- erdgas mobil GmbH (2015): Kraftstoff ERDGAS – die Fakten. Online verfügbar unter <https://www.erdgas-mobil.de/faq/>, zuletzt aktualisiert am 06.04.2016, zuletzt geprüft am 06.04.2016
- Eriksson, C. (2012): Environmental vehicle strategy Biofuels in commercial vehicles. Online verfügbar unter http://www.care-north.eu/sites/default/files/Christina%20Eriksson%20Volvo_0.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Esch, T.; Dahlhaus, U. (2013): Motor. In: Appel, W., Brähler, H., Breuer, S., Dahlhaus, U., Esch, T., Hoepke, E. et al. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 375-513
- EU (2004): Grünbuch zu öffentlich privaten Partnerschaften und den gemeinschaftlichen Rechtsvorschriften für öffentliche Aufträge und Konzessionen. Brüssel: EU
- EU (2009): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Brüssel: EU
- EU (2010): Verordnung (EU) Nr. 913/2010 des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2010 zur Schaffung eines europäischen Schienennetzes für einen wettbewerbsfähigen Güterverkehr. Brüssel: EU
- EU (2011): Verordnung (EU) Nr. 510/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2011 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Brüssel: EU
- EU (2013a): Verordnung (EU) Nr. 1315/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 über Leitlinien der Union für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes und zur Aufhebung des Beschlusses Nr. 661/2010/EU. Brüssel: EU
- EU (2013b): Verordnung (EU) Nr. 1316/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 zur Schaffung der Fazilität „Connecting Europe“, Brüssel: EU
- EU (2014a): Richtlinie 2014/94/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID). Brüssel: EU
- EU (2014b): Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen. Brüssel: EU
- EU (2014c): Verordnung (EU) Nr. 253/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 510/2011 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer leichter Nutzfahrzeuge. Brüssel
- EU (2015): Richtlinie 2015/719/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. Brüssel: EU

- EU (o.J.): Ergebnisse des EU-Projekts FABRIC – Feasibility analysis and development of on-road charging solutions für future electric vehicles. Veröffentlicht unter <http://www.fabric-project.eu/>, zuletzt geprüft am 21.02.2017
- Europäische Gemeinschaft (1991): Richtlinie 91/440/EWG des Rates vom 29. Juli 1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft. Brüssel: EU
- Europäische Gemeinschaft (1999): RICHTLINIE 1999/62/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Juni 1999 über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge. Brüssel: EU
- Europäische Kommission (2011a): Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Weißbuch der Europäischen Kommission. COM(2011) 144, Brüssel: EU
- Europäische Kommission (2011b): Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050. COM(2011) 112, Brüssel: EU
- Europoles (2014): Trägersysteme für den Nah- und Fernverkehr. Mobilität/Oberleitungen. Europoles GmbH & Co. KG. Neumarkt. Online verfügbar unter <http://www.europoles.de/mobilitaet/schiene/oberleitungsmasten-fernverkehr/>, zuletzt geprüft am 20.01.2017
- Eurostat (2016): Eurostat: Gas prices for industrial consumers. Bi-annual data (from 2007 onwards). Online verfügbar unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_202&lang=en, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Faber Kabel (2016): Mittelspannungskabel N2XS2Y nach VDE 0276-620. Saarbrücken: Klaus Faber AG
- Fascella, C.; Dinkelmeyer, C.; Niederwieser, J. (2012): Flammbeständige halogenfreie Polymermischung. Angemeldet durch Nexans, 75008 Paris (FR) am 08.02.2012. Anmeldenr: 12290044.2. Veröffentlichungsnr: EP 2 626 382 A1
- Fendrich, L.; Fengler, W. (Hrsg.) (2013): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. 2. völlig überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 1105 S.
- FGSV / Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (Hrsg.) (2008): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) – 202. Köln: FGSV e.V.
- Fritsche, U.; Greß, H.W. (2015): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2014 sowie Ausblicke auf 2015 und 2020. Bericht für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Kurzstudie, Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien, Darmstadt.
- Furmans, K. (Hrsg); Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1137 S.
- FVV (2013): Kraftstoffstudie – Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Abschlussbericht, Heft 1031-2013. FVV: Frankfurt am Main
- 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
- Globisch, J.; Schneider, U.; Dütschke, E. (2013): Acceptance of electric vehicles by commercial users in the electric mobility pilot regions in Germany. In Proceedings of the 2013 ECEEE summer study. Toulon, France: ECEEE
- Gnam, J.; Stricker, K.; Bendig, O. (2010): Zukunftsmarkt LKW-Vermietung. Deutschland/Schweiz: BAIN & Company

- Gnann, T. (2015): Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 187 S. Online verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-364342-15.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Gnann, T.; Wietschel, M.; Kühn, A.; Thielmann, A.; Sauer, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D. (2017): Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Greene, D. L. (1996): Survey evidence on the importance of fuel availability to the choice of alternative fuels and vehicles. *Energy studies review* 8, p. 215-231
- Greenhalgh, S.; Acharya, M.; Broekhoff, D.; Corbier, L.; Daviet, F.; Oren, K.; Ranganathan, J.; Sundin, H. (2004): The Greenhouse Gas Protocol for Project Accounting. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Geneva; World Resource Institute (WRI), Washington
- Grontmij, 2010: Elektriska vägar – elektrifiering av tunga vägtransporter. Förstudie, Grontmij: Stockholm
- Grube, M. (2004). Tankstellengeschichte in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.geschichtsspuren.de/artikel/verkehrsgeschichte/138-tankstellengeschichte.html>, zuletzt geprüft am 14.02.2017
- Grübler, A. (1990). The rise and fall of infrastructures: dynamics of evolution and technological change in transport. Heidelberg: Physica Verlag
- Grünig, G.; Voigt, S. (2016): Ich weiß, wie die Welt tickt – Interview, *Verkehrsrundschau* 37/2016, S. 90-93-
- Guinée, J. B. (2002): Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer (Eco-efficiency in industry and science)
- h2-mobility (2016): Wasserstoff tanken. Online verfügbar unter <http://h2-mobility.de/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- 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.
- Hacker, F.; von Waldenfels, R.; Mottschall, M. (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potentialen und möglicher CO₂-Minderung im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Forschungsschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Abschlussbericht. Aktualisierte Fassung April 2015. Berlin: Öko-Institut e.V.
- HaCon (2014): Rhine-Alpine Core Network Corridor Study. Hannover: HaCon
- Handelsblatt (2016): Der Truck für die Steckdose. Online verfügbar unter <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/e-antrieb-fuer-lastwagen-der-truck-fuer-die-steckdose/13447068.html>, zuletzt geprüft am 10.02.2017
- Harder, J. (2014): Analyse und Bewertung von Energiebedarfsprofilen im elektrischen Straßengüterverkehr zur Versorgung durch Erneuerbare Energien. Masterarbeit an der Technischen Universität Berlin, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme
- Hartmann, C. (2016): Elektromobilität: Scantias Oberleitungs-Lkw. Online verfügbar unter <http://www.transport-online.de/Transport-News/Fahrzeug-Technik/15982/Elektromobilitaet-Scantias-Oberleitungs-Lkw>, zuletzt geprüft 13.02.2017

- Hausmann, F. (2016): Kampf an allen Fronten. Online verfügbar unter <http://www.zf-zukunftsstudie.de/kampf-an-allen-fronten/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- HBEFA (2014): Handbook Emission Factors for Road Transport Version 3.1. Zürich: INFRAS
- Helmers, E.; Marx, P. (2012): Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. In: Environmental Science Europe 24 (14), S. 1-15. Online verfügbar unter <http://www.enveurope.com/content/24/1/14>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Hermann, H.; Emele, L.; Loreck, Ch. (2014): Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. Öko-Institut: Berlin
- Hey, C. (2016): Postfossil FreightTransport – Assessment of strategic approaches. Vortragsfolien auf der Veranstaltung von Ch. Hey (German Advisory Council on the Environment (SRU): Truck CO₂ – time to turn up the voltage? Potential and challenges for electric road freight. February 16th, 2016, European Parliament
- Holzhey M. (2014): Schienennetz 2025/2030: Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland. UBA Texte 42/2010. Dessau: UBA
- 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.
- Hütter, A. (2016): Güterverkehr in Deutschland 2014: WISTA Wirtschaft und Statistik 1/2016, S. 47-62
- INEA (2015): Proposal for the selection of projects. Published by the Innovation and Networks Executive Agency, Brüssel
- inforoad GmbH (2016): Aktuelle AdBlue Preise – die günstigste Tankstelle in Ihrer Stadt. Online verfügbar unter <http://www.clever-tanken.de/spritpreise/adblue-preise>, zuletzt geprüft am 06.04.2016
- INTIS (2014): Erprobungsmöglichkeiten für induktive Energieübertragungssysteme der Elektromobilität. Berlin: Forum ElektroMobilität e.V.
- Intraplan, BVU, Ingenieurgruppe IVV und Planco (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. München: Intraplan
- Ioan, F.; Istvan, C.; Emil, D.; Florin, D. (2010): Assessment of Energy Efficiency for urban electric transport systems. In: Journal of Sustainable Energy 1, No. 3, September, 2010
- ISOVOLTA (2012): High Voltage. Leistungsstärke unter Hochspannung. ISOVOLTA AG. Wiener Neudorf, Österreich. Online verfügbar unter http://www.isovolta.com/high_voltage.php, zuletzt geprüft am 21.09.2016
- Iveco (2016): Antriebstechnologie. Online verfügbar unter <http://www.iveco.com/germany/unternehmen/pages/antriebstechnologie.aspx>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- IWR (2016): Erste Flüssigerdgas-Tankstelle für Lkw eröffnet. Online verfügbar unter <http://www.iwr.de/news.php?id=31559>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Jahn, H. A. (2015a): Straßenbahn in Frankreich – Bordeaux. Online verfügbar unter <http://www.tramway.at/bordeaux/bordeaux.html>, zuletzt geprüft am 13.05.2016
- Jahn, H. A. (2015b): Straßenbahn in Frankreich – Bordeaux. Online verfügbar unter http://www.viennaslide.com/p/0520-france/Bordeaux/2013-06-16_A,B_Hotel_de_Ville.html, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Jahn, H. A. (2015c): Straßenbahn in Frankreich – Bordeaux. Online verfügbar unter http://www.viennaslide.com/p/0520-france/Bordeaux/2013-06-16_A_Sainte-Catherine_02.htm, zuletzt geprüft am 23.11.2016

- Jess, A., Kaiser, P., Kern, C., Unde, R. B., & von Olshausen, C. (2011): Considerations concerning the energy demand and energy mix for global welfare and stable ecosystems. *Chemie Ingenieur Technik*, 83(11), 1777-1791
- Jesgulke, O. (2016): Lkw-Mietmarkt für Berufskraftfahrer boomt in Deutschland. Online verfügbar unter <http://www.toll-collect-blog.de/lkw-mietmarkt-fuer-berufskraftfahrer-...2>, zuletzt geprüft: 27.10.2016
- Jorge, R. S.; Hawkins, T. R.; Hertwich, E. (2012): Life cycle assessment of electricity transmission and distribution – part 2: transformers and substation equipment. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2), p. 184-191
- KBA (2012): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2012. Online verfügbar unter http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2012/fz13_2012_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 13.02.2017. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)
- KBA (2013): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2013 (FZ 13). Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), online verfügbar unter http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz13_2013_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- KBA (2014a): Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kfz-Anhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) (FZ 25), Stichtag: 1. Januar 2014. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)
- KBA (2014b): Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) (FZ26). Stichtag: 1. Januar 2014. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)
- KBA (2014c): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2014 (FZ 13). Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2014/fz13_2014_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- KBA (2015a): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Inlandsverkehr Jahr 2014 VD3. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)
- KBA (2015b): Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), Jahr 2014, FZ26. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)
- KBA (2015c): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), 1. Januar 2015, FZ25. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)
- KBA (2016): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2016 (FZ 13). Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), online verfügbar unter http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2016/fz13_2016_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Kempkens, W. (2015): Briten testen induktive Ladetechnik für Autobahnen. Online verfügbar unter <http://www.ingenieur.de/Themen/Elektromobilitaet/Briten-testen-induktive-Ladetechnik-fuer-Autobahnen>, zuletzt geprüft am 18.05.2016
- Kloess, M.; Prenninger, P.; Huss, A.; Könighofer, K.; Canella, L.; Haas, R. (2011): Potentiale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg. und Auftraggeber)
- Knop, C. (2016): Mercedes-Benz: Erster vollelektrischer Lkw für den schweren Verteilerverkehr. Online verfügbar unter <http://www.industrial-internet.de/mercedes-benz-ersten-vollelektrischer-lkw-fuer-den-schweren-verteilerverkehr/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017

- Knörr, W.; Heidt, C.; Schacht, A. (2012): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOM) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: IFEU- Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH
- Köhn, R.; Ruhkamp, C. (2012): Neues Verkehrskonzept – Lastwagen an der Oberleitung. Online verfügbar unter <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/neues-verkehrskonzept-lastwagen-an-der-oberleitung-11802767.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Kohler, H. (2010): Herausforderungen im Bereich Fahrzeugkonzepte und Elektrische Antriebssysteme. In: Hüttl, R.; Pischetsrieder, B.; Spath, D (Hrsg.): Elektromobilität. Potentiale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. S. 75-84. Berlin/Heidelberg: Springer
- Kranke, A.; Schmied, M.; Schön, A. D. (2011): CO₂-Berechnung in der Logistik: Datenquellen, Formeln, Standards. München: Verlag Heinrich Vogel, 336 S.
- Kreyenberg, D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Dünnebeil, F.; Heidt, 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
- Lampersbach, A. (2014): Fernverkehr der Zukunft: IAA-Premiere des Concept MAN TGX Hybrid, Pressemeldung. Online verfügbar unter http://www.truck.man.eu/de/de/man-welt/man-in-deutschland/presse-und-medien/Fernverkehr-der-Zukunft_-IAA-Premiere-des-Concept-MAN-TGX-Hybrid-163584.html, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- lastauto omnibus (2013): lastauto omnibus-Katalog 2014. 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch, 388 S.
- lastauto omnibus (2014): lastauto omnibus-Katalog 2015. 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch, 388 S.
- lastauto omnibus (2015): lastauto omnibus-Katalog 2016. 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch, 388 S.
- Leidinger, E.; Prien, H. (2010): Überlegungen zu innovativen Modell- und Verfahrensansätzen für ÖPP. Öffentlich-Private Partnerschaften. PPP-Task Force NRW in Zusammenarbeit mit der NRW.BANK und der Investitionsbank Schleswig-Holstein sowie der PartnerRegio. Düsseldorf: NRW.BANK
- Lenz, B.; Lischke, A.; Knitschky, G.; Adolf, J.; Ceng, F. B.; Stöver, J. et al. (2010): Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Shell Deutschland Oil GmbH (Hamburg); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Stuttgart); Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (Hamburg). DLR: Hamburg/Berlin
- Lubrano, M. (2013): The econometrics of inequality and poverty. Lecture 4: Lorenz curves, the Gini Coefficient and parametric distributions. Manuscript available online at <http://www.vcharite.univ-mrs.fr/PP/lubrano/poverty.htm>, last checked on 13.02.2017
- MAN (2010a): MAN Nutzfahrzeuge auf der 63. IAA Nutzfahrzeuge 2010, Pressemeldung. Online verfügbar unter <http://www.truck.man.eu/de/de/man-welt/man-in-deutschland/presse-und-medien/MAN-Nutzfahrzeuge-auf-der-63.-IAA-Nutzfahrzeuge-2010-69764.html>, zuletzt geprüft am 10.02.2017
- MAN (2014): Geschäftsbericht MAN SE 2014. Online verfügbar unter http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2015/03/Annual_Report_MAN_SE.bin.html/binarystorageitem/file/15_03_11_geschaeftsbericht_2014.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017

- Matthes, F.; Busche, J.; Döring, U.; Emele, L.; Gores, S.; Harthan, R. O.; Hermann, H.; Jörß, W.; Loreck, C.; Scheffler, M.; Hansen, P.; Diekmann, J.; Horn, M.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Schade, W.; Schломann, B.; Sensfuß, F.; Ziesing, H.-J. (2013): Politikszenerarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Dessau: Umweltbundesamt
- MAUT (2016): Mauttabelle 2016. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Straßenwesen. Online verfügbar unter http://www.mauttabelle.de/maut_162.html, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- McKinsey & Company; BMW AG; Daimler AG; Ford; General Motors LLC; Honda R&D; Hyundai Motor Company; Kia Motors Coperation; Nissan, Renault, Toyota Motor Corporation; Volkswagen; ENI Refining and Marketing; Galp Energia; OMV Refining and Marketing GmbH; Shell Downstream Services International B.V.; Total Raffinage Marketing; EnBW Baden-Wuerttemberg AG; Vattenfall; Air Liquide; Air Products; The Linde Group; Intelligent Energy Holdings plc; Powertech; Nordex; ELT Elektrolyse Technik; Hydrogenics; Hydrogen Technologies; Proton Energy Systems; European Climate Foundation; European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking; NOW GmbH (2010): A Portfolio of Power-Trains for Europe: A Fact-Based Analysis. Brussels: FCH Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
- Melzer, K.-M. (1998): Kombiniertes Verkehr Straße/Schiene. In: Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.: Handbuch der Verkehrslogistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 128-139
- Mersiowsky, I. (2003): SF6- GIS-Technology for Power Distribution - Medium Voltage - Summary. ABB; EnBW Regional, AREVA T&D; e.on Hanse, RWE, Siemens; SOLVAY Flour and Derivate. Hannover: SOLVAY GmbH
- Michaelis, J.; Helms, H.; Noeren, D.; Dallmer-Zerbe, K.; Gnann, T.; Haendel, M.; Reinhard, C.; Marwitz, S. (2015): Energie und Umwelt – Elektromobilität in Baden-Württemberg im Jahr 2030. Projektübergreifende Forschung im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg. Abschlussbericht. Freiburg/Brsg.: Fraunhofer ISE
- MinEEM – Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2016): Projections de la demande de transport sur le long terme. Available at http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Projections_demande_transport.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2016
- Mineralöl Forum (2000): Kraftstoffe der Zukunft. Mineralölwirtschaftsverband e.V.: Hamburg und Marschall-Forum
- Müller-Syring, G.; Henel, M.; Köppel, W.; Mlaker, H.; Sterner, M.; Höcher, Thomas (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Bonn: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- MWV (2016): Statistiken – Preise. Online verfügbar unter <http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise>, zuletzt geprüft am 02.05.2016. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV)
- Nadelhofer, D. (2012): MAN erhält eCarTec Award 2012 für besonders emissionsarmen Lkw. Pressemitteilung, online verfügbar unter <http://www.truck.man.eu/de/de/man-welt/man-in-deutschland/presse-und-medien/MAN-erhaelt-eCarTec-Award-2012-fuer-besonders-emissionsarmen-Lkw-32256.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Neumann, R.: LPG & CNG Tankstellenverzeichnis. Online verfügbar unter <http://www.gas-tankstellen.de/menu.php>, zuletzt geprüft am 02.05.2016
- NGV Journal (2015): Online verfügbar unter <http://www.ngvjournal.com/>, zuletzt geprüft 14.02.2017
- NPE (2014): Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) – Bilanz der Marktvorbereitung. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/files/NPE_Fortschrittsbericht_2014_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2017. Berlin: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE)
- Nykvist, B.; Nilsson, M. (2015): Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. In: Nature Climate Change, 5(4), S. 329-332

- Olsson, O.; Pettersson, S.; Sebestyen, R. (2012): Poly Segment Monorail, a conductive method as an alternative for highway electrification. In: 26th International Electric Vehicle Symposium (EVS26) in Los Angeles, California, May 6 - 9, 2012. Online verfügbar unter <https://www.viktoria.se/publications/poly-segment-monorail-a-conductive-method-as-an-alternative-for-highway-electrificati-1>, zuletzt geprüft am 21.02.2017
- Ostertag, K.; Jochem, E.; Schleich, J.; Walz, R.; Kohlhass, M.; Diekmann, J.; Ziesung, H.-J. (2000): Energiesparen – Klimaschutz, der sich rechnet – Ökonomische Argumente in der Klimapolitik; Heidelberg: Physica-Verl.
- Osterwalder, A.; Pigneur, Y.; Tucci, C. L. (2005): Clarifying Business Models: Origins, Present, and Future of the Concept. In: Communications of the Association for Information Systems 16(1)
- Pelletier, S.; Jabali, O.; Laporte, G. (2014): Battery Electric Vehicles for Goods Distribution: A Survey of Vehicle Technology, Market Penetration, Incentives and Practices. Interuniversity Research Centre of Enterprise Networks, Logistics and Transportation (Montreal, Quebec). Online verfügbar unter <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2014-43.pdf>, zuletzt geprüft am 27.07.2016
- Pfeiffer (2016): Telefonische Auskunft der Firma Pfeiffer Stahlrohrmaste GmbH, 25. April 2016
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 211 S.
- PPP-Projektdatenbank (2016): Öffentlich Private Partnerschaften. PPP Projektdatenbank, <https://www.ppp-projektdatenbank.de/index.php?id=31>, zuletzt geprüft am 23.11.2016
- Prokop, J.; Borde, K. (2010): Kommunales Finanzmanagement: Möglichkeiten und Grenzen moderner Finanzinstrumente. (Kommunale Verwaltungssteuerung, Band 4). Taschenbuch. Berlin: ESV-Verlag, 179 S.
- Propfe, B.; Redelbach, M.; Santini, D. J.; Friedrich, H. (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, California, May 6-9, 2012. Online verfügbar unter http://elib.dlr.de/75697/1/EVS26_Propfe_final.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2017
- Raiber, S.; Spindler, H.; Feldwieser, M. (2014): Elektrischer Schwerlastverkehr im urbanen Raum. Abschlussbericht. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO (Stuttgart). Online verfügbar unter <http://www.muse.iao.fraunhofer.de/content/dam/iao/muse/de/documents/Verbundprojekte/Elektrischer%20Schwerlastverkehr%20Abschlussbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 27.07.2016
- Rathmann, M. (2014): Oberleitungs-Lkw doppelt so effizient. Online verfügbar unter <http://www.eurotransport.de/news/oberleitungs-lkw-doppelt-so-effizient-6571922.html>, zuletzt geprüft am 14.02.2017
- Räuchle, K.; Plass, L.; Wernicke, H. J.; Bertau, M. (2016): Methanol for Renewable Energy Storage and Utilization. In Energy Technology. Internet download <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.201500322/full>, zuletzt geprüft am 23.11.2016
- Reh, S. (2014): Siemens testet eHighway-System in Kalifornien. Pressemitteilung. Online abrufbar unter [http://www.siemens.com/press/de/feature/2015/mobility/2015-06-ehighway.php?content\[\]=MO](http://www.siemens.com/press/de/feature/2015/mobility/2015-06-ehighway.php?content[]=MO), zuletzt geprüft am 14.02.2017
- Ruzic, L. (2015): VW entdeckt den Elektromotor neu. Online abrufbar unter <http://www.haz.de/Nachrichten/Wirtschaft/Deutschland-Welt/VW-entdeckt-den-Elektromotor-neu>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Sattler, H. (2010): VDE-Studie Elektrofahrzeuge. Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Batteriesysteme. Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V. (VDE). Frankfurt. Online verfügbar unter <https://shop.vde.com/de/vde-studie-elektrofahrzeuge-6>, zuletzt geprüft am 21.02.2017

- Sauvons le Climat (2013): L'autoroute électrique – Les avantages d'une alternative au pétrole pour les poids-lourds et les autocars sur autoroute. Online verfügbar unter <http://www.sauvonsleclimat.org/vudailleurshtml/solutions-pour-demainhtml/autoroute-electrique/35-fparticles/1512-lautoroute-electrique.html>, zuletzt geprüft am 26.09.2016
- Scania (2016): Danielsson, H.-Å.; Vågstedt, N.-G.: World's first electric road opens in Sweden (Pressemeldung). Available at <https://www.scania.com/group/en/worlds-first-electric-road-opens-in-sweden/>, last checked on 13.02.2017
- Schade, W.; Wietschel, M. (2016): Energiepreise für ein Referenzszenario der MKS. Unveröffentlichtes Arbeitspapier zum Projekt Unterstützung des BMVI bei der Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Schieck, A. (2008): Internationale Logistik: Objekte, Prozesse und Infrastrukturen grenzüberschreitender Güterströme. Oldenbourg: De Gruyter, 495 S.
- Schmied, M.; Mottschall, M.; Löchter, A. (2013): Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V.
- Schneider, S. (2014): Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens von Feldschlösschen Getränke AG. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- Schöb, M. (2014): Kabel – halogenfrei oder PVC? In: Elektrotechnik 10, S. 24-27, online verfügbar unter https://www.elektrotechnik.ch/fileadmin/megatech_migration/RTE/KabeltextSchoeb2.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Schubert, L. (2013): Preisbildung im Lkw-Ladungsverkehr. Anwendung situativer Ansätze im Spannungsfeld zwischen Kosten- und Marktorientierung. Hamburg: DVV Media Group, 436 S.
- Schulz, M. (2014): Die Automobilindustrie im Jahre 2025 aus Sicht der Logistik. In: Schulz, M. (Hrsg.): Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie. Eine Betrachtung aus Sicht der Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 9-25
- Schulze, M. (2012): Elektro-Lkw: Bundesumweltministerium startet Großversuch. Online verfügbar unter <http://www.ingenieur.de/Branchen/Fahrzeugbau/Elektro-Lkw-Bundesumweltministerium-startet-Grossversuch>, zuletzt geprüft am 12.02.2007
- Schumacher, K. (2014): Die Lkw-Flotte von morgen. In: Forum Nachhaltig Wirtschaften 02/2014. Online verfügbar unter <http://www.forum-csr.net/News/9093/DieLkwFlottevonmorgen.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Schweikl, T. (2016): Scania: Oberleitungs-Hybrid-Lkw vorgestellt. Online verfügbar unter <http://www.profi-werkstatt.net/Meldungen/News/912/Elektromobilitaet-Scania-Oberleitungs-Hybrid-Lkw-vorgestellt>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Shell (2016): Shell Nutzfahrzeug-Studie, Diesel oder alternative Antriebe – Womit fahren Lkw und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040, Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH. Online verfügbar unter <http://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-nutzfahrzeug-studie.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Siemens AG (2007): GEAFOL Cast-Resin Transformers 100 to 16000 kVA. Cast-Resin Transformers Catalog TV1. München: Siemens AG
- Siemens AG (2012a): ENUBA – Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Abschlussbericht. München: Siemens AG
- Siemens AG (2012b): Produktkatalog 2012. Fahrleitungsmaterial für den Nah- und Fernverkehr. München: Siemens AG. Online verfügbar unter www.downloads.siemens.com/download-center/. zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Siemens AG (2012c): Sitras CSG – Kompakte Gleichspannungs-Schaltanlage mit integriertem Gleichrichter. Erlangen: Siemens AG. Online verfügbar unter <https://www.downloads.siemens.com/download-center/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017

- Siemens AG (2016): ENUBA 2 – Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Abschlussbericht. München: Siemens AG
- Smith (2011): Smith Newton Brochure. Online verfügbar unter: https://www.smithelectric.com/wp-content/uploads/2016/02/Newton_Brochure_2011_German.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2016
- Smolinka, T.; Günther, M.; Garche, J. (2011): Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Kurzfassung des Abschlussberichts. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
- Sperling, D.; Kurani, K. S. (1987): Refueling and the vehicle purchase decision: The diesel car case. Technical rep., Transportation Research Group, Departments of Environmental Studies and Civil Engineering. Davis: University of California
- SRU (2012): Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin: Erich Schmidt Verlag
- Statistisches Bundesamt (2008): NST-2007 – Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik. Wiesbaden: Destatis
- Statistisches Bundesamt (2015): Anzahl der Tankstellen in Deutschland. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Steinecker (2012): Technische Beschreibung für Bürocontainer mit PU-Paneelen. Hanau: Steinecker Containerhandel
- Stemmann (2012): Bahntechnik-Systeme – Gesamtübersicht. Produktkatalog. Schüttdorf: Stemmann-Technik GmbH
- Stock, W.; Bernecker, T. (2014): Verkehrsökonomie – Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag
- StVO (2013): Gesetze im Internet. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- StVZO (2012): Gesetze im Internet. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Sun, F.-c.; Liu, B.; Wang, Z.-p. (2014): Analysis of Energy Consumption Characteristics of Dual-source Trolleybus. Beijing: School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology
- Systra (2012): Feasibility of Alternative Power Supply Systems for the LUAS BXD. Online verfügbar unter: <http://www.pleanala.ie/news/NA0004/NA0004SystraReport.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2016
- TAB (2012): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt, Innovationsreport. Berlin: TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
- Taefi, T.; Kreuzfeldt, J.; Held, T.; Konings, R.; Kotter, R.; Lilley, S.; Baster, H.; Green, N.; Laugesen, M. S.; Jacobsson, S.; Borgqvist, M.; Nyquist, C. (2014): Comparative Analysis of European examples of Freight Electric Vehicles Schemes - A systematic case study approach with examples from Denmark, Germany, The Netherlands, Sweden and the UK. Working Paper. Online available at https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23512-7_48, last checked on 22.02.2017
- Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Toller, S. (2013): Product Category Rules for the assessment of the environmental performance of UN CPC 53212 (Railways) and the declaration of this performance by an EPD. PCR Railways. International EPD System. Online verfügbar unter <http://www.environdec.com/en/PCR/Detail/pcr2013-19>, zuletzt geprüft am 21.09.2016

- Torfs, D. (2016): electric Trucking – Dream or reality. Vortragsfolien auf der Veranstaltung von D. Torfs (CEO Flanders Make): Truck CO₂ – time to turn up the voltage? Potential and challenges for electric road freight, February 16th, 2016, European Parliament
- Tóth, I.T. (2012): Trolley sustainable mobility. Vorlesung zur Summer University Leipzig
- Truckscout24 (2016): Verkaufsportale für gebrauchte Nutzfahrzeuge. Online unter <http://www.truckscout24.de>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- 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 (2013b): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau: Umweltbundesamt: Dessau
- 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, Ch. 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
- UN (2015): Übereinkommen von Paris. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- UNFCCC (1997): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/1997/L.7/Add.1, 10 December, Conference of the Parties 3, Kyoto
- VARIEL (2016): Technische Container. VARIEL, a. s. Zruč nad Sázavou. Online verfügbar unter <http://de.variel.cz/produkte/technische-container-gsm/>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- VBD-Beratung (2016): Glossar. Online unter <http://www.vbd-beratung.de/wDeutsch/glossar/jl/Konzessionsmodell.php?navanchor=1050000>, zuletzt geprüft am 01.02.2017
- VDL Groep (2016e): VDL Groep entwickelt Elektro-Lkw, Pressemitteilung. Online verfügbar unter <http://www.vdlgroep.com/?news/2639592/VDL+Groep+entwickelt+Elektro-Lkw.aspx>, zuletzt geprüft am 31.08.2016
- VOKA (2016): Kabellösungen für PV-Anlagen. Vogtländer Kabelwerke GmbH (VOKA), Plauen. Online verfügbar unter http://www.voka.de/cms/upload/3_produktkatalog/15_Solarkabel/PB%E2%80%A6/15_Solarkabel.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Volvo (2014): Volvo Sustainability Report 2014. Autor: Lindebäck Brandt, E. Online verfügbar unter <http://www.volvogroup.com/en-en/investors/reports-and-presentations/sustainability-reports.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017
- Volvo (2016): Volvo Annual and Volvo Sustainability Report 2015. Autoren: Ripa, M., Lindebäck Brandt, E. Online verfügbar unter <http://www.volvogroup.com/en-en/investors/reports-and-presentations/sustainability-reports.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2017

- Von Roll (2016): Insulating Materials for Transformers and Inductive Appliances. Von Roll Schweiz AG, Breitenbach. Online verfügbar unter <http://www.vonroll.com/en/market-detail/transmission-grid/>, zuletzt geprüft am 14.02.2017
- Weidema, B.P.; Hischier, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G. (2013): The ecoinvent database: Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Online verfügbar unter <http://www.ecoinvent.org/database/methodology-of-ecoinvent-3/methodology-of-ecoinvent-3.html>, zuletzt geprüft am 14.02.2017
- Weiner, N.; Renner, T.; Kett, H. (2010): Geschäftsmodelle im „Internet der Dienste“: Aktueller Stand in Forschung und Praxis. THESEUS. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag
- Wietschel, M.; Ullrich, S.; Markewitz, P.; Schulte, F.; Genoese, F. (Hrsg.) (2015): Energietechnologien für die Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH
- Wietschel, M.; Kühn, A.; Gnann, T.; Speth, D.; Balz, W.; Frik, H.; Stütz, S.; Scheller, M. (2016a): Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs. Fachworkshop 1. März 2016, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Workshop im Rahmen der Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Studiennehmer: Fraunhofer ISI (Koordination), Fraunhofer IML, PTV Group, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), M-FIVE. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Wietschel, M.; Plötz, P.; Gnann, T. (2016b): Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs. Fachworkshop 4. Mai 2016, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Workshop im Rahmen der Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Studiennehmer: Fraunhofer ISI (Koordination), Fraunhofer IML, PTV Group, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), M-FIVE. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Thielmann, A. (2016c): Stand der Forschung, Marktpotenziale und Forschungsbedarf für Brennstoffzellen Lkw. Fachworkshop 30. Mai 2016, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Workshop im Rahmen der Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Studiennehmer: Fraunhofer ISI (Koordination), Fraunhofer IML, PTV Group, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), M-FIVE. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Wildhage, H.-J. (2016): Lkw-Absatz 2015 – Es geht aufwärts. In: lastauto omnibus 03
- Wittenbrink, P. (2011): Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen – Optimierungspotentiale – Green Logistic. Wiesbaden: Gabler Verl.
- Wöhe, G.; Döring, U.; Kaiser, H. (2002): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Auflage. München: Vahlen Franz GmbH
- Wolf, A. (2013): Hoffen auf die neuen Märkte. Online verfügbar unter <http://www.eurotransport.de/news/vw-nutzfahrzeuge-hoffen-auf-die-neuen-maerkte-6471238.html>, zuletzt geprüft am 14.02.2017
- WVI, IVT, DLR und KBA (2010): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD2010). WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, Braunschweig, IVT Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V., Heilbronn, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Verkehrsforschung, Berlin, KBA Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg
- Yeh, S. (2007): An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. In: Energy Policy 35(11), p. 5865-5875
- Zeitzen, F. (2014): Immer abwärts. In: lastauto omnibus 91, Nr. 4, S. 10-12