Technologieoptionen für den klimaneutralen Straßengüterverkehr: Gesamtwirtschaftliche Rationalität, Kombinationsoptionen und kurzfristige Handlungsempfehlungen aus entscheidungstheoretischer Sicht

Carolin Grüter[1, 3]

Thorsten Beckers[1]

Michael Lehmann[2]

Klaus Jäkel[1, 4]

Nils Bieschke[1]

Hauke Pfaff[1]

1) Bauhaus-Universität Weimar, Professur Infrastrukturwirtschaft und -management (BUW-IWM)
2) Fachhochschule Erfurt, Institut Verkehr und Raum, Professur Eisenbahnwesen im internationalen Kontext (FHE-E)
3) Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (TU-WIP)
4) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrsforschung (DLR)

Erstellt im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) / Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderten Projektes „Elektrischer Straßengüterverkehr mit Oberleitungen und Batterien: Rationalität, Kombinationen und Institutionendesign“ (ESOB-RKI)

August 2025

Verzeichnisse

Inhaltsübersicht

Verzeichnisse ii
Vorbemerkungen x
1 Einleitung 1
2 Grundlagen und Vorgehensweise 5
3 *E- vs. K-Frage:* Relative Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen 40
4 *E-Frage:* Ausgestaltung des Bereichs der E-Lkw-Systeme 44
5 *K-Frage:* Ausgestaltung des Bereichs der K-Lkw-Systeme 92
6 Fazit und Handlungsempfehlungen 100
Literatur 103
Anhang A) Daten zu den Kostenkalkulationen 115

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse ... ii
Inhaltsübersicht ... ii
Inhaltsverzeichnis ... iii
Abbildungsverzeichnis ... vi
Tabellenverzeichnis ... vii
Kastenverzeichnis ... vii
Abkürzungsverzeichnis ... viii
Vorbemerkungen ... x
1 Einleitung ... 1
2 Grundlagen und Vorgehensweise ... 5
2.1 Technisch-systemische Ausgestaltung von Lkw-Systemen ... 5
2.1.1 Anforderungen der Nachfrage und Implikationen für die Ausgestaltung sämtlicher Lkw-Systeme ... 5
2.1.2 Charakteristika technischer Komponenten sowie Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung ... 6
2.1.2.1 E-Lkw-Systeme ... 6
2.1.2.1.1 B-Lkw-System ... 7
2.1.2.1.1.1 Komponenten und Charakteristika ... 7
2.1.2.1.1.2 Zusammenspiel von den Anforderungen der Nachfrage und den Charakteristika der technischen Komponenten ... 9
2.1.2.1.2 OB-Lkw-System ... 13
2.1.2.1.2.1 Komponenten und Charakteristika ... 14
2.1.2.1.2.2 Zusammenspiel von den Anforderungen der Nachfrage und den Charakteristika der technischen Komponenten ... 14
2.1.2.2 K-Lkw-Systeme ... 16
2.1.2.2.1 H2-Lkw-System ... 17
2.1.2.2.2 SKW-Lkw-Systeme ... 18
2.1.2.2.2.1 F-SKW-Lkw-System ... 18
2.1.2.2.2.2 G-SKW-Lkw-System ... 19
2.1.2.2.3 Zusammenspiel von den Anforderungen der Nachfrage und den Charakteristika der technischen Komponenten sämtlicher K-Lkw-Systemen ... 20
2.2 Zielsystem, methodischer Hintergrund sowie weitere Vorgehensweise ... 20
2.2.1 Zielsystem ... 21
2.2.2 Vorgehensweise in den Untersuchungen und methodischer Hintergrund ... 22
2.2.2.1 Fokus auf Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung ... 22
2.2.2.1.1 Zunächst Endzustands-Betrachtungen … ... 23
2.2.2.1.2 … und anschließend Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der Option sequenziellen Entscheidens bei Unsicherheit ... 24
2.2.2.2 Fokus auf Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung ... 28
2.2.2.2.1 Zunächst Endzustands-Betrachtungen … ... 28
2.2.2.2.2 … und anschließend Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der Option sequenziellen Entscheidens bei Unsicherheit ... 32
2.2.3 Struktur der Untersuchungen ... 33
2.3 Einordnung von vorliegenden (Forschungs-)Erkenntnissen zu Kosten und zum Vergleich von EE-Lkw-Systemen hinsichtlich der Relevanz für die folgenden Untersuchungen ... 34

3 *E- vs. K-Frage:* Relative Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen 40

3.1 Endzustands-Betrachtungen für Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung 40

3.2 Endzustands-Betrachtungen für Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung 42

3.3 Schlussfolgerungen hinsichtlich des Handlungsbedarfs 43

4 *E-Frage:* Ausgestaltung des Bereichs der E-Lkw-Systeme.....44

4.1 Fokus auf Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung 44

4.1.1 Endzustands-Betrachtungen 44

4.1.1.1 „B- vs. OB-Lkw-System“ auf Basis von (vereinfachten) Kostenkalkulationen... 44

4.1.1.1.1 Grundsätzlicher Ansatz und Annahmen 44

4.1.1.1.1.1 In den Kostenkalkulationen betrachtete Positionen und Szenarien..... 45

4.1.1.1.1.1.1 Betrachtete Kostenpositionen und festzulegende Annahmen.....45

4.1.1.1.1.1.2 Fixe und variable Annahmen sowie resultierende Szenarien.....47

4.1.1.1.1.1.2.1 Annahmen zur Fahrleistung sowie zur technisch-systemischen Ausgestaltung 48

4.1.1.1.1.1.2.2 Annahmen zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen 58

4.1.1.1.1.2 Diskussion und Einordnung der Relevanz von nicht oder nicht differenziert in den Kostenkalkulationen betrachteten Positionen 62

4.1.1.1.1.2.1 (Park-)Flächen 62

4.1.1.1.1.2.2 Erhaltung und Betrieb von Ladeinfrastruktur und Fahrzeugen.....63

4.1.1.1.1.2.3 Combined Charging System (CCS) als Substitut für das Megawatt Charging System (MCS) im Bereich der Netz-Ladeinfrastruktur.....64

4.1.1.1.1.2.4 Nutzungsdauer der Lkw- bzw. der Lkw-Komponenten 64

4.1.1.1.1.2.5 Stromnetzanschlüsse und Wirkungen auf das Stromsystem 65

4.1.1.1.2 Lkw-System-unabhängige Kosten zur Einordnung.....68

4.1.1.1.3 Lkw-System-abhängige Kosten und Lkw-System-Vergleich in Szenarien.....68

4.1.1.1.3.1 Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs mit einem Gleichstand zwischen dem B-System und einem OB-Lkw-System mit 2.000 km Oberleitungs-Ladeinfrastruktur 69

4.1.1.1.3.1.1 (Feststehendes) B-Lkw-System 69

4.1.1.1.3.1.2 OB-Lkw-System mit 2.000 km Oberleitungs-Ladeinfrastruktur im Vergleich zum B-Lkw-System 70

4.1.1.1.3.2 Reduktion der Batteriekapazitätseinsparungen bei OB-Lkw in weiteren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km Oberleitungs-Ladeinfrastruktur..... 72

4.1.1.1.3.3 Erweiterung des Umfangs der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur in weiteren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems..... 73

4.1.1.1.3.4 Variation der Batteriekosten in dem B-Lkw-System und den OB-Lkw-Systemen 74

4.1.1.1.3.4.1 Drastische Reduktion der Batteriekosten 74

4.1.1.1.3.4.2 Gesamtkosten der E-Lkw-Systeme in Abhängigkeit der Batteriekosten 75

4.1.1.1.3.5 Adressierung von Unsicherheiten bezüglich weiterer Umweltentwicklungen 79

4.1.1.1.3.5.1 Höherer Bedarf an Ladepunkten in der Nähe der Bundesautobahnen 79

4.1.1.1.3.5.2 Stärkeres Wachstum der kumulierten Fahrleistung 79

4.1.1.1.4 Diskussion und Fazit: Kein klarer Gewinner, aber B-Lkw-System eher im Vorteil ... 80
4.1.1.2 Einbezug weiterer qualitativ betrachteter Aspekte ... 81
4.1.1.2.1 Flächenknappheiten und die Gefahr einer ineffektiven Nutzung von Flächenpotenzialen ... 81
4.1.1.2.2 Qualitätsunterschiede von Punkt-Säulen- und Linien-Oberleitungs-Ladeinfrastruktur ... 81
4.1.1.2.3 Herausforderungen der Etablierung einer geeigneten institutionellen Lösung für Aufbau und Betrieb von Ladeinfrastruktur für B- und OB-Lkw ... 82
4.1.1.3 Übergreifende Diskussion und Fazit: Anstieg der relativen Vorteilhaftigkeit des OB-Lkw-Systems ... 83
4.1.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen ... 84
4.1.2.1 „No regret“-Maßnahmen: Aufbau von Punkt-Säulen-Ladeinfrastruktur und Weiterentwicklung der Stromnetzanbindung ... 84
4.1.2.2 Diskussion zum kurzfristigen Flexibilitätserhalt von B- und OB-Lkw-System und resultierende Handlungsempfehlungen ... 85
4.2 Fokus auf Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung ... 87
4.2.1 Endzustands-Betrachtungen ... 87
4.2.1.1 Flächendeckendes europaweites E-Lkw-System durch Punkt-Säulen-Ladeinfrastruktur ... 88
4.2.1.2 „B- vs. OB-Lkw-System“ in Europa ... 88
4.2.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen ... 90
4.2.2.1 Agieren in Deutschland ... 90
4.2.2.2 Agieren im Kontext europäischer Aktivitäten ... 90
5 *K-Frage:* Ausgestaltung des Bereichs der K-Lkw-Systeme ... 92
5.1 Fokus auf Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung ... 92
5.1.1 Endzustands-Betrachtungen ... 92
5.1.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen ... 95
5.2 Fokus auf Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung ... 96
5.2.1 Endzustands-Betrachtungen ... 96
5.2.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen ... 98
5.2.2.1 Agieren in Deutschland ... 98
5.2.2.2 Agieren im Kontext europäischer Aktivitäten ... 98
6 Fazit und Handlungsempfehlungen ... 100
Literatur ... 103
Anhang A) Daten zu den Kostenkalkulationen ... 115

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systematisierung von Lkw, Lkw-Systemen und dem SGV 2

Abbildung 2: Ladeinfrastruktur-Matrix 7

Abbildung 3: Nutzungskonstellationen für Ladeinfrastruktur in einem B-Lkw-System 11

Abbildung 4: Systematisierung der Ladeinfrastruktur in einem OB-Lkw-System und Hervorhebung der in dieser Studie im Fokus stehenden Ladeinfrastruktur 15

Abbildung 5: Technisch-systemische Ausgestaltungsfragen für E-Lkw-Systeme 16

Abbildung 6: Einordnung von Maßnahmen der in Betracht gezogenen Endzustände für die Entwicklung einer Strategie für den SGV. Eigene vereinfachte Darstellung in Anlehnung an Darstellung aus VORWERK ET AL. (2023) 27

Abbildung 7: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und von drei Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km L-O-LI 72

Abbildung 8: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und verschiedenen Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km, 4.000 km und 6.000 km L-O-LI 73

Abbildung 9: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und den Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems bei Batteriekosten von 50 €/kWh im Vergleich zu 129 €/kWh 77

Abbildung 10: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und den Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems in Abhängigkeit der Batteriekosten 78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Kostenpositionen des Lkw-System-Vergleichs 46

Tabelle 2: Variation von Annahmen und Darstellung der quantitativ und qualitativ betrachteten Szenarien im Rahmen der Kostenkalkulationen 48

Tabelle 3: Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung eines B- und mehrerer Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems 51

Tabelle 4: Annahmen zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen für den Lkw-System-Vergleich 59

Tabelle 5: Lkw-System-unabhängige Kosten über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren 68

Tabelle 6: Lkw-System-abhängigen Kosten des (feststehenden) B-Lkw-Systems bei Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren 69

Tabelle 7: Lkw-System-abhängige Kosten des OB-Lkw-System 2.000-ap bei Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh im Vergleich zu den des (feststehenden) B-Lkw-Systems über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren 71

Kastenverzeichnis

Kasten 1: Einblicke in eine Systementwicklungsstrategie für das Energiesystem auf Basis von VORWERK ET AL. (2023) 26

Kasten 2: Grundzüge des Modellierungsansatzes von PLÖTZ ET AL. (2021) zur Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs und Darstellung der unter Rückgriff auf PLÖTZ ET AL. (2021) festgelegten Annahmen für dem Lkw-System-Vergleich 50

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
BAB	Bundesautobahn
B-Lkw	Batterieelektrische Lkw
BTI	Betankungsinfrastruktur
CCS	Combined Charging System
CNG	Komprimiertes Erdgas (engl. compressed natural gas)
CO2	Kohlenstoffdioxid
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
EE	Erneuerbare Energien
E-Lkw	Lkw, deren Energieversorgung über Strom erfolgt
f-SKW-Lkw	Lkw, deren Energieversorgung über flüssige synthetische Kohlenwasserstoffe erfolgt
g-SKW-Lkw	Lkw, deren Energieversorgung über gasförmige synthetische Kohlenwasserstoffe erfolgt
H2-Lkw	Lkw, deren Energieversorgung über Wasserstoff erfolgt
HL-LI	Hochleistungs-Ladeinfrastruktur mit Ladeleistungen, die ein Laden für eine Fahrzeit von 4,5 h ohne Fahrunterbrechung in 45 Min. ermöglichen
K-Lkw	Lkw, deren Energieversorgung über Kraftstoffe erfolgt
Kf	Konventionelle fossile Kraftstoffe
LCOE	Stromgestehungskosten (engl. levelised cost of electricity)
LI	Ladeinfrastruktur
Lkw	Lastkraftwagen (in dieser Studie ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 t)
L-LI	Linien-Ladeinfrastruktur in Abgrenzung zu P-LI
LNG	Liquid natural gas
L-O-LI	Linien-Oberleitungs-Ladeinfrastruktur
LP	Ladepunkt
MCS	Megawatt Charging System
ML-LI	Mittelleistungs-Ladeinfrastruktur mit Ladeleistungen, die ein Laden für eine Fahrzeit von 4,5 h ohne Fahrunterbrechung in 9 Std. aber nicht in 45 Min. ermöglichen
Netz-LI	Flächendeckende, ein Netzwerk bildende Ladeinfrastruktur in Abgrenzung zur Start-Ziel-LI

NL-LI	Niedrigleistungs-Ladeinfrastruktur mit Ladeleistungen, die ein Laden für eine Fahrzeit von 4,5 h ohne Fahrunterbrechung nur mit einer Ladedauer von über 9 Std. ermöglichen
OB-Lkw	Batterieelektrische Lkw mit Pantographen, die über Oberleitungen Energie beziehen können
O-H-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw, die sowohl über einen Elektro- als auch einen Verbrennungsmotor verfügen, und deren Energieversorgung somit über Strom oder Kraftstoffe erfolgen kann
O-LI	Oberleitungs-Ladeinfrastruktur in Abgrenzung zu S-LI
P-LI	Punkt-Ladeinfrastruktur in Abgrenzung zu L-LI
P-O-LI	Punkt-Oberleitungs-Ladeinfrastruktur
P-S-LI	Punkt-Säulen-Ladeinfrastruktur
SEP	Systementwicklungsplanung
SES	Systementwicklungsstrategie
SGV	Straßengüterverkehr
SKW-Lkw	Lkw, deren Energieversorgung über synthetische Kohlenwasserstoffe erfolgt
S-LI	Ladesäulen-Ladeinfrastruktur in Abgrenzung zu O-LI
SoC	Ladezustand (engl. state of charge)
Start-Ziel-LI	Ladeinfrastruktur an Start- und Zielpunkten in Abgrenzung zur Netz-LI
TCO	Gesamtkosten des Betriebs (engl. total cost of ownership)
TRL	Technologiereifegrad (engl. technology readiness level)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Vorbemerkungen

Diese Studie ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bzw. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderten Projektes „Elektrischer Straßengüterverkehr mit Oberleitungen und Batterien: Rationalität Kombinationen und Institutionendesign“ (ESOB-RKI) entstanden.

Carolin Grüter, Thorsten Beckers, Michael Lehmann, Klaus Jäkel, Nils Bieschke und Hauke Pfaff sind für die Untersuchungen in dieser Studie verantwortlich. Die Studie wurde in den Grundzügen gemeinsam von Carolin Grüter (federführend) und Thorsten Beckers (unterstützend) konzipiert. Michael Lehmann hat insbesondere mit seiner technisch-systemischen Expertise maßgeblich an den Untersuchungen mitgewirkt. Klaus Jäkel, Nils Bieschke und Hauke Pfaff haben die ökonomischen Analysen unterstützt. Die Verschriftlichung erfolgte durch Carolin Grüter. Neben der Autorin und den Autoren haben Matthias Gather, Leon Kiefer und Mats Werchohlad, die im Rahmen ihrer Tätigkeit an dem Institut für Verkehr und Raum der Fachhochschule Erfurt das Projekt ESOB-RKI bearbeiten, an dieser Studie mitgewirkt. Der Austausch war sehr wertvoll und aus den Diskussionen entstandene Erkenntnisse sind in diese Studie eingeflossen.

Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass in Teilen der Untersuchungen auf Modellierungsergebnisse des Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung zurückgegriffen wird. Ein besonderer Dank gilt Daniel Speth, Lena Kappler und Patrick Plötz für die Erläuterungen der Modellierungen, die Zurverfügungstellung von z. T. nicht veröffentlichten Ergebnissen und nicht zuletzt die Diskussionen zur Einordnung der Ergebnisse. Weiterhin konnten die Autorin und die Autoren von den Anmerkungen von Stakeholdern aus Politik, Industrie und Wissenschaft im Rahmen eines Workshops im Januar 2023 profitieren, in dem die (vorläufigen) Erkenntnisse präsentiert und zur Diskussion gestellt worden sind.

Diese Studie wurde im Wesentlichen im September 2024 fertiggestellt und im Anschluss daran inhaltlich nicht aktualisiert, sodass spätere Entwicklungen und Erkenntnisse unberücksichtigt geblieben sind.

1 Einleitung

Der Straßengüterverkehr (SGV) verursacht ca. ein Drittel der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Deutschland.[1] Während der Antriebswechsel im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge hin zu batterieelektrischen Nutzfahrzeugen bereits deutlich fortschreitet, können im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge erste Aktivitäten verzeichnet werden.[2] Dies dürfte nicht zuletzt darauf zurückzuführen sein, dass aktuell noch die Bedeutung verschiedener Technologieoptionen für einen klimaneutralen SGV, die alle auf einer Energieversorgung durch erneuerbare Energien (EE) fußen, zur Diskussion steht.

THEMA, (ERKENNTNIS-)ZIELE UND ZENTRALE FRAGESTELLUNGEN

Ziel dieser Studie ist es, die Bedeutung der unterschiedlichen Technologieoptionen für einen klimaneutralen schweren SGV mit Fokus auf Deutschland und unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung zu untersuchen und darauf basierend (insbesondere kurzfristige) Handlungsempfehlungen für die deutsche Politik, auch im Hinblick auf die Einflussnahme in Europa, abzuleiten. Dazu wird das Spektrum an möglichen Endzuständen nach Abschluss der Transformation, die auch als Zielbilder angesehen werden können, aufgezeigt. Die Endzustände können durch eine Technologieoption oder auch durch eine Kombination aus unterschiedlichen Technologieoptionen gekennzeichnet sein. Im Rahmen von Endzustands-Betrachtungen werden potenziell vorteilhafte Endzustände eingekreist, wobei die Ziele der Effektivität und (Kosten-)Effizienz im Fokus des Vergleichs von Endzuständen und den direkten Pfaden dorthin stehen. Zudem werden aktuelle Wissensdefizite beleuchtet, die sich auf die Eignung und Bedeutung der Technologieoptionen auswirken könnten.

Bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit von Endzuständen, werden für die Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen zu erwartende Wissenszuwächse beleuchtet und die Option sequenziellen Entscheidens einbezogen. Die im Rahmen dieser Studie angewendete Vorgehensweise greift entscheidungstheoretisch fundierte Erkenntnisse[3] auf und spiegelt Überlegungen von VORWERK ET AL. (2023) wider, die aufzeigen, wie eine Systementwicklungsstrategie (SES) für das Gesamtenergiesystem unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten konzipiert werden kann. Auf Grundlage der potenziell vorteilhaften Endzustände sowie der dahinführenden Pfade wird zum einen unter Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen den Endzuständen und deren Pfade die Identifikation von „no regret“-Maßnahmen angestrebt. „No regret“-Maßnahmen sind dadurch gekennzeichnet, dass diese für sämtliche potenziell vorteilhaften Endzustände erforderlich sind. Zum anderen wird für Maßnahmen, die spezifisch für einen oder einige Endzustände sind, diskutiert, ob einerseits eine Verzögerung der Umsetzung von Maßnahmen empfehlenswert sein kann, oder es andererseits (trotz der Inkaufnahme von Kosten durch die

[1] IFEU / FRAUNHOFER IML (2024, S. 33) und SACHVERSTÄNDIGENRAT (2024, S. 83 ff.).

[2] Vgl. dazu IFEU / FRAUNHOFER IML (2024, S. 38 f.).

[3] Insbesondere werden Erkenntnisse des Realoptionsansatzes einbezogen. Der Begriff der „Realoption“ wurde von MYERS (1977) geprägt.

Umsetzung der spezifischen Mannahmen) mit Vorteilen einhergehen kann, Optionen hinsichtlich der noch zu erreichenden Endzustände zu schaffen bzw. (für einen gewissen Zeitraum) offenzuhalten.

UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND DIESBEZÜGLICHE GRENZEN IM RAHMEN DIESER STUDIE

Der Betrachtungsfokus dieser Studie liegt auf dem Antriebswechsel der schweren Lastkraftwagen (Lkw) in Deutschland, die zu einem großen Teil für den Fernverkehr eingesetzt werden.[4] Durch den grenzüberschreitenden Verkehr werden auch Aspekte der europäischen Einbettung berücksichtigt. Es werden Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) ab 12 t betrachtet (folgend als Lkw bezeichnet), wobei Interdependenzen zu Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nur am Rande berücksichtigt bzw. angesprochen werden. Für den Vergleich der Technologieoptionen werden ausgehend von den Anforderungen der Nachfrage die interdependenten Auslegungsfragen von Lkw und Infrastrukturen in den Blick genommen, sodass die Technologieoptionen als Lkw-Systeme[5] aufgefasst werden. Im Folgenden wird die in dieser Studie verwendete Systematisierung von unterschiedlichen Lkw-Systemen dargestellt (vgl. auch Abbildung 1).

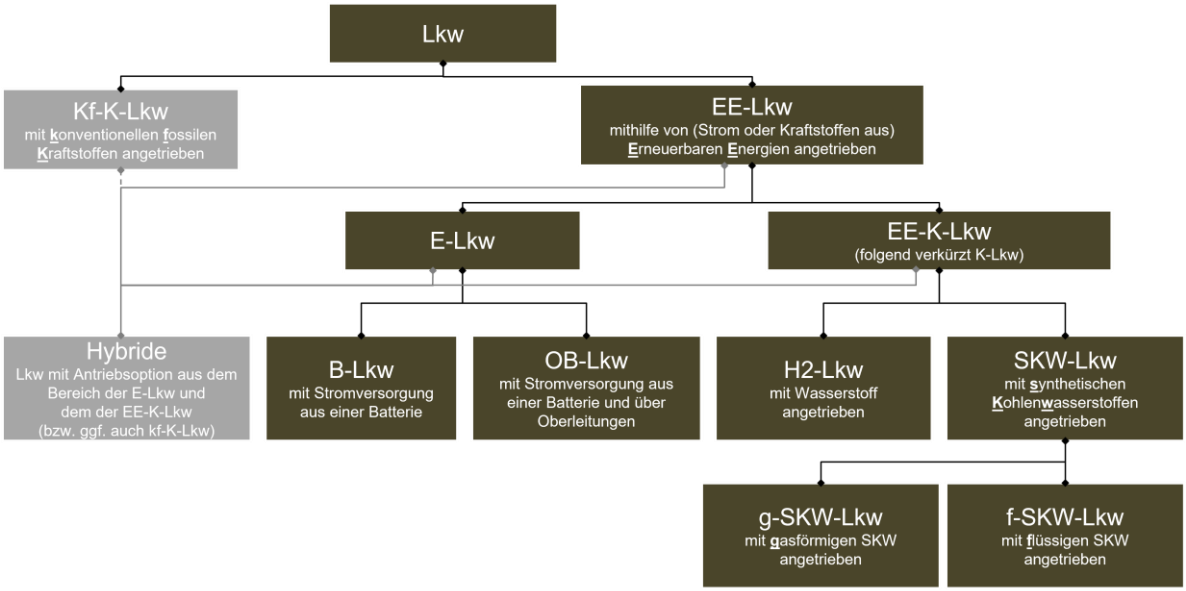


Abbildung 1: Systematisierung von Lkw, Lkw-Systemen und dem SGV

Zum einen kann Strom direkt für die Energieversorgung von Lkw genutzt werden. Folgend werden Lkw, die elektrische Energie laden, als E-Lkw bezeichnet. Zum anderen kann die Energieversorgung der Lkw über strombasierte Kraftstoffe erfolgen, die als K-Lkw bezeichnet werden. Aufgrund der Vorteile der E-

[4] JÖHRENS ET AL. (2022, S. 23 f.) und SACHVERSTÄNDIGENRAT (2024, S. 70 f.).

[5] In dieser Studie wird die Arbeit von GIZZI (2016) aufgegriffen, in der der Begriff des Systemguts geprägt wird. Ein Systemgut zeichnet sich dadurch aus, dass für dessen Angebot die Bereitstellung einer Vielzahl von Leistungen, die vorgelagert produziert oder parallel angeboten werden müssen, erforderlich ist. Lkw-Systeme werden bereits von BECKERS ET AL. (2022) durch die komplementären Teilgüter, Fahrzeuge und Infrastrukturen, als Systemgut eingeordnet. Weiterhin fassen BECKERS / BIESCHKE (2021) auch die Lkw-Ladeinfrastruktur als Systemgut auf.

Lkw im Vergleich zu K-Lkw hinsichtlich der Energieeffizienz stehen die zwei zu unterscheidenden E-Lkw-Systeme[6] im Fokus der Betrachtung.[7]

- Ein E-Lkw-System, in dem nur batterieelektrische Lkw (B-Lkw) genutzt werden, die während der Standzeiten geladen werden, wird im Folgenden als **B-Lkw-System** bezeichnet.
- Ein E-Lkw-System, in dem sowohl B-Lkw als auch batterieelektrische Lkw mit Pantographen (OB-Lkw) genutzt werden, wird als **OB-Lkw-System** bezeichnet. Die Energieversorgung für die Fahrt oder zum Laden der Batterie kann bei OB-Lkw nicht nur während der Standzeiten, sondern auch während der Fahrt erfolgen, wenn Oberleitungs-Ladeinfrastruktur (O-LI) auf den Strecken installiert ist.

Weitere Ausgestaltungsvarianten eines E-Lkw-Systems ergeben sich durch die Integration von Batteriewechselsystemen[8], die allerdings im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden.

Trotz des Vorteils hinsichtlich der Energieeffizienz von E-Lkw könnten K-Lkw für einige Anwendungsfälle ergänzend eingesetzt werden.[9] Neben mit durch Wasserstoff versorgte Lkw (H2-Lkw) umfassen K-Lkw mit gasförmigen oder flüssigen synthetischen Kohlenwasserstoffen betriebene Lkw (g- oder f-SKW-Lkw).[10] Weiterhin sind in der Abbildung 1 mit konventionellen fossilen Kraftstoffen betriebene Lkw (kf-K-Lkw) und Hybride, die z.T. mit Strom oder Kraftstoffen aus EE und z.T. mit konventionellen fossilen Kraftstoffen betrieben werden, enthalten. Diese Lkw werden in dieser Studie nicht berücksichtigt, da zunächst die Nutzung von kf-K-Lkw in der langen Frist dem Ziel der Klimaneutralität entgegensteht. Weiterhin werden auch Hybride, die eine Kombination aus E-Lkw und EE-K-Lkw darstellen, als Option in der langen Frist in dieser Studie ausgeklammert. Ebenso wird die kurz- und mittelfristige Bedeutung von kf-K-Lkw und von Hybriden während der Transformation in dieser Studie nicht betrachtet. Weiterhin werden Optionen zur Reduktion des Güterverkehrs im Allgemeinen und des SGV im Speziellen, unter anderem auch durch die Verlagerung auf die Schiene, im Rahmen dieser Studie nicht beleuchtet. Es werden aber Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Verkehrsleistung des SGV adressiert.[11] Weiterhin werden die Anforderungen der Nachfrage aus

---

[6] Die verwendeten Bezeichnungen werden gleichermaßen für Lkw, Lkw-Systeme und den SGV angewendet. Ein E-Lkw-System bezeichnet somit ein Lkw-System, in dem E-Lkw genutzt werden. Unter E-SGV ist ein mit E-Lkw erfolgender SGV zu verstehen.

[7] Die Energieeffizienz der Lkw-Systeme wird in Abschnitt 3.1 betrachtet.

[8] Die Diskussion um die ergänzende Etablierung von Batteriewechselsystemen für E-Lkw im Fernverkehr hat in den letzten Jahren an Fahrt aufgenommen. Im Rahmen des eHaul-Projekts ist eine Batteriewechselstation in Deutschland aufgebaut und getestet worden sowie Potenziale des Batteriewechselsystems untersucht worden, wobei nicht zuletzt die Interdependenzen zum Stromsystem betrachtet wurden. Vgl. dazu JERRATSCH / MARKER (2023), KILIAN / JERRATSCH / MARKER (2023) und GOBERNATZ / JERRATSCH / MARKER (2023). In China werden Batteriewechselsysteme im Rahmen von Pilotprojekten für den Fernverkehr beleuchtet (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 17)). Insgesamt wird in INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2023, S. 10) auf die Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Bedeutung und auch auf den limitierten Wissensstand zu Batteriewechselsystemen hingewiesen. Daher werden E-Lkw-Systeme mit Batteriewechselsystemen – nicht zuletzt auch im Kontext der hohen Komplexität durch den geringen Wissensstand und dem daraus resultierenden Bedarf an Expertise und Ressourcen – in dieser Studie ausgeklammert.

[9] Vertieftere Betrachtungen dazu enthält Kapitel 3.

[10] Zusätzlich werden auch Biokraftstoffe diskutiert, die aber aufgrund des Fokus auf die Langfristperspektive und der langfristig zu erwartenden Knappheit von Biomasse in dieser Studie nicht betrachtet werden (vgl. dazu auch UNTERLOHNER (2021, S. 39 ff.).

[11] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.3.5.2.

geltenden rechtlichen Vorgaben sowie üblichen Prozessen im Logistiksektor abgeleitet. Von denkbaren grundlegenden diesbezüglichen Veränderungen, wie auch der Einführung von autonomem Fahren, wird im Rahmen dieser Studie abstrahiert.

AUFBAU DER STUDIE

Die Studie ist wie folgt aufgebaut:

- Kapitel 2 stellt Grundlagen für die Untersuchungen dar. Abschnitt 2.1 befasst sich mit der technisch-systemischen[12] Ausgestaltung von Lkw-Systemen für einen klimaneutralen SGV. In Abschnitt 2.2 werden das den Untersuchungen zugrundeliegende Zielsystem, die Vorgehensweise in den Untersuchungen und die Struktur der Untersuchungen in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Schließlich beinhaltet Abschnitt 2.3 eine Einordnung vorliegender (Forschungs-)Erkenntnisse.
- Kapitel 3 thematisiert mit der „*E- vs. K"-Frage* die relative Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen in potenziell vorteilhaften Endzuständen.
- Kapitel 4 stellt den Schwerpunkt dieser Studie dar und thematisiert mit der „*E"-Frage* die Ausgestaltung des Bereichs der E-Lkw-Systeme.[13] Zudem werden Handlungsempfehlungen für den Bereich der E-Lkw-Systeme abgeleitet.
- In Kapitel 5 werden mit der „*K"-Frage* die Bedeutung und Ausgestaltung sämtlicher K-Lkw-Systeme betrachtet sowie resultierende Handlungsempfehlungen aufgezeigt.
- Abschließend werden in Kapitel 6 die wesentlichen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

[12] Lkw-Systeme können aus der technisch-systemischen und der institutionellen Perspektive beleuchtet werden. Regelmäßig wird zur Bezeichnung der Ausrichtung von Studien auch der Begriff „technisch-ökonomisch" verwendet. In dieser Studie wird – wie auch in VORWERK (2024) – der Begriff „technisch-systemisch" verwendet, der verdeutlicht, dass Erkenntnisse bezüglich der technischen Ausgestaltung der Lkw-Systeme für einen klimaneutralen SGV erzielt werden sollen. Dabei sind die Charakteristika und Komplementaritäten der Komponenten der Lkw-Systeme sowie die Anforderungen der Nachfrager zu berücksichtigen. Es gilt aber zu bedenken, dass Interdependenzen zwischen der technisch-systemischen und institutionellen Ausgestaltung bestehen, sodass auch in Untersuchungen zur technisch-systemischen Ausgestaltung, Überlegungen zur institutionellen Ausgestaltung einzubeziehen sind, und somit eine scharfe Abgrenzung von technisch-systemischen und institutionellen Untersuchungen nicht möglich ist. Vgl. dazu auch Abschnitt 2.3 und VORWERK (2024, S. 82 f.).

[13] Ein Teil der in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungen ist bereits in GRÜTER ET AL. (2023) veröffentlicht und auf dem XXVII. World Road Congress in Prag zur Diskussion gestellt worden.

2 Grundlagen und Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen zur technisch-systemischen Ausgestaltung von Lkw-Systemen vorgestellt. Abschnitt 2.1 umfasst eine Darstellung der Anforderungen der Nachfrage sowie der Charakteristika der verschiedenen Technologieoptionen bzw. Lkw-Systeme. Abschnitt 2.2 stellt das Zielsystem und die Vorgehensweise für die Untersuchungen vor. In Abschnitt 2.3 werden vorliegende Erkenntnisse zu Kosten und der relativen Vorteilhaftigkeit verschiedener Endzustände für den SGV systematisiert und hinsichtlich der Relevanz für die folgenden Untersuchungen eingeordnet.

2.1 Technisch-systemische Ausgestaltung von Lkw-Systemen

Als Grundlage für die folgenden Untersuchungen werden in diesem Abschnitt zunächst wesentliche Anforderungen der Nachfrage vorgestellt sowie deren Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung sämtlicher klimaneutraler Lkw-Systeme aufgezeigt. Anschließend werden Charakteristika der technischen Komponenten der einzelnen Lkw-Systeme beschrieben und die sich daraus ergebenden Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung für die jeweiligen Lkw-Systeme diskutiert, wobei die Anforderungen der Nachfrage berücksichtigt werden. Da der Fokus auf den E-Lkw-Systemen liegt, werden diese im Vergleich zu den K-Lkw-Systemen vertieft betrachtet.

2.1.1 Anforderungen der Nachfrage und Implikationen für die Ausgestaltung sämtlicher Lkw-Systeme

Im Folgenden werden grundsätzliche Anforderungen der Nachfrage auf Basis von geltenden rechtlichen Vorgaben sowie üblichen Prozessen vorgestellt. In sehr speziellen Bereichen des SGV, wie z.B. bei Schwerlast- und Sondertransporten, sowie sonstigen Nachfragebereichen kann es weitere Anforderungen geben, die für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichen Lkw-Systeme von Bedeutung sind. Dies wird in Kapitel 3 thematisiert.

Flexibler Einsatz der Lkw im Sinne einer flächendeckenden Mobilitätsoption

Der heutige Fernverkehr ist durch eine hohe Einsatzflexibilität der Lkw geprägt. Die Einsatzflexibilität von Lkw über Strecken, die die Reichweite der Lkw überschreiten, wird durch eine flächendeckende technisch kompatible Betankungsinfrastruktur (BTI) ermöglicht. Für die Transport- und Logistikunternehmen stellt eine flächendeckende Verfügbarkeit von BTI und Ladeinfrastruktur (LI) eine zentrale Voraussetzung für den Umstieg auf klimaneutrale Lkw-Systeme dar.[14] Aufgrund des grenzüberschreitenden SGV sind die Lkw-Systeme ferner länderübergreifend zu betrachten.

Einbettung der Tank- und Ladevorgänge in die Transport- und Logistikprozesse zur Vermeidung von Zeitverlusten und gesamtwirtschaftlichen Ineffizienzen

Zeitverluste gehen mit hohen Kosten für den Logistiksektor und Ineffizienzen einher.[15] Daher sollten möglichst keine zusätzlichen (über die im Rahmen der Transport- und Logistikprozesse hinausgehenden) Standzeiten der Lkw durch die Tank- und Ladevorgänge entstehen.

[14] Göckeler et al. (2022, S. 35).

[15] In Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2 wird die Höhe der Kosten infolge von Zeitverlusten thematisiert.

Zunächst werden Standzeiten der Lkw durch europäische Vorschriften zu den Lenk- und Ruhezeiten determiniert. *„Nach einer Lenkdauer von viereinhalb Stunden hat ein Fahrer eine ununterbrochene Fahrunterbrechung von wenigstens 45 Minuten einzulegen, […]“*.[16] Diese Fahrunterbrechung wird folgend als 45 Min.-Pause bezeichnet. Eine Aufteilung in eine Unterbrechung von mindestens 15 und mindestens 30 Minuten ist möglich. Dies wird im Rahmen dieser Studie jedoch nicht vertieft und dürfte nur geringfügige Auswirkungen auf die Erkenntnisse haben, da eine Standzeit von mindestens 30 Minuten in jedem Fall erforderlich bleibt. Neben den 45 Min.-Pausen sind regelmäßig Ruhezeiten von mindestens 9 Stunden obligatorisch, die vereinfacht folgend als 9 Std.-Ruhezeit bezeichnet wird.[17] Über die 45 Min.-Pause und die 9 Std.-Ruhezeit hinaus ergeben sich für Lkw während der Be- und Entladung der transportierten Güter Standzeiten. Die Häufigkeit und Dauer dieser Standzeiten sind allerdings heterogen. Das gleiche gilt für Standzeiten infolge von Wartezeiten vor der Be- oder Entladung der Lkw. Ebenfalls sind weitere Standzeiten aus unterschiedlichsten Gründen, beispielsweise durch individuelle Präferenzen oder Restriktionen, denkbar.

Für die Einbettung der Tank- und Ladevorgänge in die durch die Transport- und Logistikprozesse vorgegebenen Standzeiten ist ein hohes Verfügbarkeitsniveau[18] der LI oder BTI erforderlich. Weiterhin ist es von hoher Bedeutung, dass die Standzeiten (auch hinsichtlich der Dauer) planbar sind. Daher wird die Einbettung der Lade- und Tankvorgänge in die 45 Min.-Pause und die 9 Std.-Ruhezeit in den Mittelpunkt der Untersuchungen in dieser Studie gestellt.

2.1.2 Charakteristika technischer Komponenten sowie Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung

In diesem Abschnitt werden die Lkw-Systeme, die einen klimaneutralen SGV ermöglichen, vorgestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten sowie die Interdependenzen bei der Ausgestaltung der Komponenten der jeweiligen Lkw-Systeme betrachtet. Weiterhin werden unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.1 dargestellten Anforderungen der Nachfrage die sich ergebenden Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung der verschiedenen Lkw-Systeme aufgezeigt.

2.1.2.1 E-Lkw-Systeme

In diesem Abschnitt werden wesentliche Charakteristika von einem B- und einem OB-Lkw-System sowie die sich ergebenden Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung dargestellt, wobei die im Abschnitt 2.1.1 dargestellten Anforderungen der Nachfrage berücksichtigt werden. B- und OB-Lkw-System zählen zu den E-Lkw-Systemen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass Lkw über eine LI mit Strom versorgt werden. Die Energieversorgung kann auf verschiedene Weisen erfolgen, die sich hinsichtlich der räumlichen Ausprägung sowie der LI-Art unterschieden.

---

[16] Verordnung (EG) Nr. 561/2006 vom 15. März 2006, Artikel 7.

[17] Vgl. Verordnung (EG) Nr. 561/2006 vom 15. März 2006, Artikel 8. Es sei darauf hingewiesen, dass auch regelmäßig längere Ruhezeiten zwingend erforderlich sind, sodass die 9 Std. eine untere Grenze für die Standzeit markieren.

[18] Mit Bezug zur flächendeckenden Pkw-LI thematisieren auch REINKE (2014) und HILDEBRANDT (2016) den Bedarf nach einem hohen lokalen Verfügbarkeitsniveau. Dies kann durch die durchschnittliche oder maximale Wartezeit bei der Nutzung der LI über einen gewissen Zeitraum operationalisiert werden.

In Abbildung 2 ist die sich daraus ergebende LI-Matrix dargestellt. Die erste Dimension der LI-Art unterscheidet zwischen Säulen-Ladeinfrastruktur (S-LI) und O-LI. Die zweite Dimension der räumlichen Ausprägung unterscheidet zwischen Punkt- (P-) und Linien-LI (L-LI). P-LI wird an einem fixen Ort von Lkw genutzt, während L-LI über eine gewisse Fahrstrecke zum Laden von Lkw verwendet wird. S-LI ist stets mit einem fixen Ort verbunden, sodass lediglich eine Punkt-Säulen-LI (P-S-LI) vorliegen kann. O-LI kann dagegen prinzipiell sowohl als P- als auch als L-LI realisiert werden. Wird eine Fahrstrecke mit O-LI ausgestattet, liegt Linien-Oberleitungs-LI (L-O-LI) vor.

Räumliche Ausprägung E-Lade-Infrastruktur (LI)-Arten	Punkt (P)	Linie (L)
Ladesäule (S)	P-S-LI	-
Oberleitung (O)	P-O-LI	L-O-LI

Abbildung 2: Ladeinfrastruktur-Matrix

Werden dagegen Parkplätze mit O-LI ausgestattet, handelt es sich um Punkt-Oberleitungs-LI (P-O-LI), die aber im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet wird. Zudem werden weitere LI-Arten für E-Lkw, die in anderen Ländern erforscht, aber in der nationalen Diskussion von geringer Relevanz zu sein scheinen, ausgeklammert.[19]

2.1.2.1.1 B-Lkw-System

Dieser Abschnitt enthält eine Beschreibung der Komponenten eines B-Lkw-Systems sowie des Zusammenspiels der Komponenten im Kontext eines B-Lkw-Systems, das den Anforderungen der Nachfrage Rechnung trägt.

2.1.2.1.1.1 Komponenten und Charakteristika

Ein B-Lkw-System umfasst zum einen B-Lkw und zum anderen P-S-LI. B-Lkw werden durch einen Elektromotor angetrieben, der während der Fahrt mit Energie aus einem elektrochemischen Speicher (Batterie) versorgt wird. Die Batterie wird grundsätzlich an der P-S-LI geladen. Zudem kann die Batterie durch Rekuperation von Bewegungsenergie beim Bremsen geladen werden.[20]

---

[19] Neben P-S-LI und O-LI werden auch induktive Ladetechnologien und Stromschienen als LI-Arten in Betracht gezogen. Alle drei Technologien werden in Europa im Rahmen von Feldversuchen oder Pilotprojekten getestet (vgl. HACKER ET AL. (2023)), wobei induktive und schienenbasiere L-LI den geringsten Entwicklungsstand aufweisen, der durch den Technologiereifegrad (engl. technology readiness level (TRL)) operationalisiert werden kann. Vgl. INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2023, S. 19) und WIDEGREN ET AL. (2022). In dieser Studie wird ausschließlich die O-LI als L-LI betrachtet, da diese am vielversprechendsten erscheint. Vgl. dazu HARTWIG / BUßMANN-WELSCH / LEHMANN (2020), WIETSCHEL ET AL. (2017), TRAFFIX VERKEHRSPLANUNG GMBH / UMWELTBUNDESAMT GMBH / E7 ENERGY INNOVATION & ENGINEERING (2023).

[20] GÖCKELER ET AL. (2022, S. 39).

Um das Laden an der P-S-LI zu ermöglichen, ist die Bereitstellung der folgenden vier Teilgüter erforderlich:[21]

- **Ladesäule (P-S-LI) mit Ladepunkt:** Eine Ladesäule stellt die Schnittstelle zwischen B-Lkw und Stromnetz dar. An einer Ladesäule befindet sich mindestens ein Ladepunkt (LP), an dem zur selben Zeit nur ein B-Lkw geladen werden kann.[22,23] In dieser Studie werden unter den Begriffen des LP und der P-S-LI alle für die Energieübertragung erforderlichen hardware- und softwareseitig Komponenten verstanden.
- **(Park-)fläche:** Während des Ladevorgangs muss der B-Lkw an der P-S-LI geparkt werden. Dadurch ist die Bereitstellung einer Fläche für die P-S-LI inkl. der Anlagen zur Verknüpfung mit dem Stromnetz sowie einer Parkfläche erforderlich. Im Rahmen dieser Studie wird grundsätzlich von einer eindeutigen Zuordnung von LP und Parkfläche ausgegangen, sodass der Ladevorgang eines weiteren B-Lkw erst dann starten kann, wenn der vorher geladene B-Lkw die Parkfläche verlassen hat.
- **Stromnetzanschluss und -kapazität:** Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass die betrachtete P-S-LI stets mit dem öffentlichen Stromnetz verbunden ist und nicht über autarke Stromsysteme versorgt wird. Daher sind für die Bereitstellung der P-S-LI einerseits die Errichtung eines Stromnetzanschlusses und andererseits die Verfügbarkeit von der für das Laden benötigten Stromnetzkapazität während der Ladevorgänge erforderlich.
- **Strom:** Während des Ladens sind die entsprechenden Strommengen zur Verfügung zu stellen.

Im Hinblick auf die Ausgestaltung der P-S-LI kann auf die im Folgenden dargestellten verschiedene Technologien zurückgegriffen werden:

- **Gleichstrom-Laden (DC-Laden):** DC-Laden ermöglicht das Laden mit hohen Leistungen, sodass in kurzen Zeiträumen hohe Energiemengen aufgenommen werden können. Dies ist für den schweren SGV aufgrund des hohen Energiebedarfs sowie der hohen Zeitkosten in vielen Fällen von Bedeutung. Es können zwei Technologien im Bereich des DC-Ladens unterschieden werden.
    - **Combined Charging System (CCS):** Der bereits entwickelte und etablierte CCS-Standard ermöglicht Ladeleistungen bis zu 500 kW. Im Pkw-Bereich wird CCS-Laden bereits mit bis zu 350 kW eingesetzt.[24]

[21] Vgl. BECKERS / BIESCHKE (2021, S. 2).

[22] Diese Definition entspricht der grundsätzlichen Definition aus der „Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (AFIR) und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU, Artikel 2, Nr. 48.

[23] Neben der technischen Umsetzung von LP als „übliche Ladesäule“, bei der die Energieübertragung über meist seitlich oder von vorne mit dem Elektrofahrzeug verbundene Kabel erfolgt, werden für Busse und Lkw weitere platzsparende Ladelösungen entwickelt. Ein Beispiel dafür stellt das Dachladen dar, bei dem die Busse oder B-Lkw unter Verwendung von Pantographen oder Stromschienen über Ladegeräte, die an Brücken über den Parkflächen installiert sind, geladen werden. In dieser Studie werden die verschiedenen Ladelösungen nicht vertieft betrachtet, sodass der Begriff der P-S-LI in dieser Studie grundsätzlich im weiten Sinne ausgelegt werden und auch andere Ladelösungen umfassen kann, die einen oder mehrere LP beinhalten können.

[24] NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT (2021, S. 12).

- **Megawatt Charging System (MCS):** Der MCS-Standard ermöglicht Ladeleistungen von bis zu 4,5 MW[25], wobei aktuelle Prognosen Ladeleistungen bis 3,75 MW angeben.[26] Bei der Einführung des Standards werden zunächst Ladeleistungen von ca. 0,75 – 1,2 MW[27] erwartet.

- **Wechselstrom-Laden (AC-Laden):** Beim AC-Laden sind maximal Ladeleistungen von 43 kW möglich. Es sei hier bereits darauf hingewiesen, dass über 9 Std.-Ruhezeit hinausgehende Zeiträume für Ladevorgänge von Lkw-Batterien benötigt werden, um eine zusätzliche Fahrzeit von 4,5 Stunden zu garantieren.[28]

Mit der Auswahl der Ladetechnologien ergeben sich folgende Interdependenzen zu den weiteren Komponenten eines B-Lkw-Systems. Zunächst bedarf es der jeweiligen Schnittstellen an den E-Lkw, um die verschiedenen Technologien zu nutzen. Weiterhin kann die Technologiewahl Auswirkungen auf das Standort-Layout und die benötigten (Park-)flächen haben.[29] Nicht zuletzt könnte die Wahl der Ladetechnologie sowie der -leistung Einfluss auf die Nutzungsdauer von den Batterien haben[30], was allerdings im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet wird.

2.1.2.1.1.2 Zusammenspiel von den Anforderungen der Nachfrage und den Charakteristika der technischen Komponenten

Bei der technisch-systemischen Ausgestaltung eines B-Lkw-Systems sind sowohl die Anforderungen der Nachfrage als auch die Charakteristika der komplementären Komponenten, also der B-Lkw sowie der verschiedenen Technologien von P-S-LI, zu berücksichtigen. Die minimale Batteriekapazität der B-Lkw ergibt sich aufgrund der durch die Anforderungen der Nachfrage vorgegebenen Vermeidung von zusätzlichen Standzeiten aus der zwischen den obligatorischen Fahrunterbrechungen möglichen Fahrzeit von 4,5 Stunden (vgl. Abschnitt 2.1.1). Damit ein B-Lkw 4,5 Stunden fahren kann, bedarf es einer nutzbaren Batteriekapazität von mindestens 468 kWh, wenn eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 80 km/h und in der langen Frist ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 1,3 kWh/km angenommen werden.[31] Im Folgenden wird die notwendige nutzbare Batteriekapazität mit 500 kWh abgeschätzt.[32] Dadurch, dass die nutzbare Batteriekapazität betrachtet wird, ist der minimal einzuhaltende Ladezustand (engl. state of charge (SoC)) der Batterie, der für eine schonende Nutzung

[25] Ebd.

[26] PLÖTZ ET AL. (2024, S. 19).

[27] NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT (2021), NOW (2023).

[28] Vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1.2.

[29] Beispielsweise beeinflusst die Höhe der Ladeleistung die Auslegungsentscheidungen zur Distanz von LP und Lkw.

[30] Vgl. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 49).

[31] Die Annahme zum Energieverbrauch wird in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2 erläutert.

[32] Untermauert werden die Einschätzungen zur Dimensionierung der Batteriekapazität in Anlehnung an die 4,5 Stunden Fahrzeit von BECKERS / BIESCHKE (2021, S. 15), GÖCKELER ET AL. (2023, S. 40 ff.), RAGON ET AL. (2022, S. 7) , JÖHRENS ET AL. (2022, S. 38), MENTER ET AL. (2023, S. 7) und SPETH ET AL. (2022) . Es sind aber auch größere Batteriekapazitäten in der Diskussion, was sich teils dadurch erklären lässt, dass Laden während der täglichen Fahrt oder Ladeleistungen über 350 kW– insbesondere im Rahmen von kurzfristigen Betrachtungen – nicht berücksichtigt oder verhältnismäßig sehr hohe Preise dafür angenommen werden, und ein Angebot von Modellen mit größeren Batteriekapazitäten erwartet wird. Vgl. dazu BASMA / RODRÍGUEZ (2023a, S. 11), BASMA / SABOORI / RODRÍGUEZ (2021, S. 6 ff.), NOW (2023, S. 22) und NOLL ET AL. (2022).

der Batterien erforderlich ist, nicht weiter zu berücksichtigen.[33] Eine detaillierte Betrachtung zur Dimensionierung der nutzbaren Batteriekapazität – beispielsweise unter Berücksichtigung der Änderungen des Energieverbrauchs durch Temperaturschwankungen und topologische Besonderheiten, die Ladeleistung sowie weitere Einflussgrößen, die nicht zuletzt auch die Alterung der Batterien betreffen, erfolgt im Rahmen dieser Studie nicht.[34]

Unter der Voraussetzung einer nutzbaren Batteriekapazität von 500 kWh für B-Lkw, werden Lademöglichkeiten während der 45 Min.-Pause sowie der 9 Std.-Ruhezeit benötigt. Weiterhin können Standzeiten im Kontext von Be- und Entladevorgängen mit den zu transportierenden Gütern genutzt werden. Die Ladevorgänge können grundsätzlich an Start- und Zielpunkten einer Tour eines B-Lkw oder während der Tour auf der Strecke stattfinden. Um die verschiedenen Ladebedürfnisse bei der Auslegung der P-S-LI zu berücksichtigen, werden die in Abbildung 3 dargestellten Nutzungskonstellationen für die P-S-LI unterschieden. Die sich aus den Rahmenbedingungen für die Logistikprozesse ergebenden Ladebedürfnisse sind in den Zeilen der Matrix der Nutzungskonstellationen in Abbildung 3 dargestellt. Die Ladebedürfnisse unterscheiden sich hinsichtlich der zeitlichen Restriktionen und somit durch die ohne Zusatzkosten, die sich infolge von Zeitverlusten ergeben können, zur Verfügung stehende Ladezeit. Während in den Nutzungskonstellationen der ersten Zeile – A) ausschließlich ladebedingter Halt – die Ladezeit so weit wie möglich verringert werden sollte, steht in den Nutzungskonstellationen der folgenden Zeilen – B.1 bis B.3 – stets die Standzeit des B-Lkw als Ladezeit zur Verfügung.

In den Spalten der Matrix der Nutzungskonstellationen werden Differenzierungen hinsichtlich der Standorte vorgenommen. Jede Zelle der Matrix ist durch einen spezifischen Ladebedarf gekennzeichnet, der durch eine bestimmte LI gedeckt werden kann. In der ersten Spalte der Matrix wird die flächendeckende, als Netzwerk errichtete LI (Netz-LI) adressiert. Die zweite Spalte umfasst die LI an Start- und Zielpunkten der Touren (Start-Ziel-LI). Durch die Netz-LI wird eine Einsatzflexibilität der B-Lkw ermöglicht, indem Ladestandorte entlang der Fernverkehrsachsen (I.a), in Ballungsräumen (I.b), aber auch in der restlichen Region (I.c) errichtet werden. Die Netz-LI ist besonders für das Laden während der 45 Min.-Pause und der 9 Std.-Ruhezeit von Bedeutung. Da sich die Touren der B-Lkw überschneiden, können viele verschiedene B-Lkw auf die Netz-LI zurückgreifen, sodass diese öffentlich zugänglich sein sollte. Da Be- und Entladevorgänge an Start- und Zielpunkten einer Tour stattfinden, wird in den Nutzungskonstellationen in der Zeile B.2.1 nicht auf die Netz-LI zurückgegriffen, sodass die entsprechenden Zellen in der Matrix der Nutzungskonstellationen in Abbildung 3 keine Relevanz haben. Es sei angemerkt, dass insgesamt gilt, dass sich die in Abbildung 3 dargestellten Nutzungskonstellationen hinsichtlich ihrer Relevanz deutlich voneinander unterscheiden.

[33] INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 42) addieren 20 % zur sich aus den Reichweitenanforderungen ergebenden Batteriekapazität, während GÖCKELER ET AL. (2023, S. 41) eine Restladung von 15 % als Kapazitätspuffer vorsehen.

[34] Die Einflussfaktoren auf die Batteriealterung und -dimensionierung werden beispielsweise detaillierter von TOL ET AL. (2022) und MAULER ET AL. (2022) aufgezeigt.

	I) Flächendeckung im Straßennetz (Netz-LI)				II) Start- und Zielpunkte (Start-Ziel-LI)			
	I.a) Fernverkehrsachsen		I.b) Ballungs-räume	I.c) Restliche Regionen	II.a) Nicht „zuhause“			II.b) „Zuhause“
					II.a.1) „Vor der Rampe“		II.a.2) „An der Rampe“	Depot, …
	I.a.1) Bundes-autobahnen	I.a.2) Bundes-straßen (und Landstraßen)			II.a.1.1) Vor dem privaten Grundstück	II.a.1.2) Auf dem privaten Grundstück		
A) Ausschließlich ladebedingter Halt								
B.1) Halt aufgrund von Verordnungen über Lenk- und Ruhezeiten								
B.1.1) 45 Min								
B.1.2) 9/11 Std								
B.2) Halt durch Logistikprozesse								
B.2.1) Be-/ Entladung								
B.2.2) Wartezeiten (unbestimmt)								
B.2.3) Wartezeiten (8 h +)								
B.3) Halt aus weiteren Gründen								
B.3.1) Präferenzen d. Fahrenden								
B.3.2) …			Hinweis: Jede Zelle der Matrix stellt eine Nutzungskonstellation dar.					

Abbildung 3: Nutzungskonstellationen für Ladeinfrastruktur in einem B-Lkw-System

Die Start-Ziel-LI dürfte besonders im Kontext der Stopps durch Logistikprozesse (B.2) von Bedeutung sein. Zudem ist denkbar, dass die obligatorischen 9 Std.-Ruhezeiten (B.1.2) regelmäßig an Start- und Zielpunkten stattfinden. Eine Nutzung der Start-Ziel-LI während der 45 Min.-Pause (B.1.1) ist dagegen seltener zu erwarten. Insgesamt erfolgt die Nutzung von Start-Ziel-LI an jedem Standort durch einen abgrenzbaren Kreis von Nachfragern, für die ein bestimmter Standort einen Start- oder Zielpunkt einer Tour darstellt.

Auf Grundlage der vorstehenden Überlegungen, die eine nutzbare Batteriekapazität der B-Lkw von 500 kWh voraussetzen, lassen sich erste Rückschlüsse auf die technische Auslegung der P-S-LI für die unterschiedlichen Nutzungskonstellationen ziehen.

- Damit die Netz-LI die Einsatzflexibilität der B-Lkw ermöglicht, müssen die Batterien z. T. innerhalb von 45 Min. und z. T. innerhalb von 9 Stunden vollständig geladen werden, sodass der B-Lkw die nächsten 4,5 Stunden ohne Unterbrechung eingesetzt werden kann.[35]
  - Für die 45 Min.-Pause muss die Ladeleistung der P-S-LI durchschnittlich mindestens 670 kW betragen. Daraus folgt, dass das Ladebedürfnis nur durch MCS-Laden (Ladeleistung ab 2024 vrs. < 1,2 MW)[36] zuverlässig gedeckt werden kann. Mit CCS-Laden (Ladeleistung < 500 kW) könnte zwar eine gewisse Reichweite des B-Lkw geschaffen werden, aber nicht gewährleistet werden, dass der B-Lkw in den nächsten 4,5 Stunden ohne Unterbrechung fahren kann. LI, die das Laden von einer Reichweite von 360 km innerhalb der 45 Min.-Pause ermöglicht, wird als Hochleistungs-Ladeinfrastruktur (HL-LI) eingeordnet.
  - Für die 9 Std.-Ruhezeit muss die Ladeleistung der P-S-LI durchschnittlich mindestens 60 kW betragen. Daraus folgt, dass das Ladebedürfnis nicht zuverlässig durch AC-

[35] Die folgenden Berechnungen zur erforderlichen Ladeleistung der P-S-LI in den Nutzungskonstellationen berücksichtigen die vom Zustand der Batterie, dem SoC, abhängigen Ladegeschwindigkeiten nicht, sondern geben nur Durchschnittswerte an.

[36] Vgl. ELECTRIVE (2024).

Laden (Ladeleistung < 44 kW) gedeckt werden kann.[37] CCS-Laden ist allerdings ausreichend und damit auch MCS-Laden. LI, die das Laden von einer Reichweite von 4,5 Std. Fahrzeit ohne Fahrunterbrechung innerhalb von 9 Std., aber nicht innerhalb von 45 Min. ermöglicht, wird als Mittelleistungs-Ladeinfrastruktur (ML-LI) bezeichnet. LI mit Ladeleistungen, die das Laden von einer Reichweite von 4,5 Std. Fahrzeit ohne Fahrunterbrechung nur mit einer Ladedauer von über 9 Std. ermöglichen, wird als Niedrigleistungs-Ladeinfrastruktur (NL-LI) bezeichnet. Unter den gesetzten Annahmen zählt AC-LI zur NL-LI. Große Abweichungen von den Annahmen zu den Leistungsgrenzen der Technologien, zur Fahrleistung in 4,5 Stunden und zum durchschnittlichen Energieverbrauch werden im Rahmen dieser Studie nicht weiter betrachtet und somit die Zuordnung der Technologien zu den typischen Lkw-Standzeiten von 45 Min. und 9 Std. fixiert. D.h. MCS- stellt HL-LI, CCS- ML-LI und AC-NL-LI dar. Somit kann auf die Verwendung der Begriffe der HL-, ML- und NL-LI verzichtet werden, sodass im Kontext der in Kapitel 4 diskutierten Ausgestaltungsfragen mit Bezug zu E-Lkw-Systemen auf die Technologien – MCS, CCS und AC – verwiesen wird.

- Für die Nutzungskonstellationen, die ausschließlich durch die Notwendigkeit der Energieaufnahme begründet sind (Zeile A in Abbildung 3), könnte die Stand- und Ladezeit durch eine Maximierung der Ladeleistung minimiert werden. Dafür würde sich MCS-Laden mit bis zu 4,5 MW eignen. Die Nutzungskonstellationen werden allerdings im Folgenden nur implizit betrachtet. Zunächst wird grundsätzlich angenommen, dass E-Lkw-Systeme so ausgelegt werden, dass weitere Standzeiten vermieden werden. Weiterhin könnte ein in Ausnahmefällen entstehendes Ladebedürfnis dieser Nutzungskonstellationen auch in einem gewissen Umfang durch für andere Nutzungskonstellationen errichtete Netz-LI befriedigt werden. Besonders geeignet dürfte aufgrund der höheren Ladeleistung die für die 45 Min.-Pause (Zeile B.1.1.) errichtete MCS-LI sein.

- Weiterhin sei angemerkt, dass auch weitere Ladebedarfe in verschiedenen Nutzungskonstellationen durch dieselbe LI adressiert werden können. Daher sind bei der technisch-systemischen Ausgestaltung von Ladestandorten auch die Interdependenzen der zur Befriedigung der einzelnen Ladebedürfnisse benötigten P-S-LI zu berücksichtigen. Ein MCS-LP im urbanen Raum könnte beispielsweise tagsüber zur Befriedigung der Ladebedürfnisse in der 45 Min.-Pause (Reihe B.1.1 und Spalte I.b in Abbildung 3) und nachts zur Deckung der Ladebedürfnisse in der 9 Std.-Pause (Reihe B.1.2 und Spalte I.b in Abbildung 3) genutzt werden. Die Anzahl der errichteten MCS-LP könnte somit Interdependenzen zum Bedarf an CCS-LP aufweisen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass mit der Berücksichtigung

[37] Die Planbarkeit der Ladevorgänge ist für den Transport- und Logistiksektor von hoher Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.1.1). Daher wird im Rahmen dieser Studie angenommen, dass die Ladevorgänge bei den Touren – insbesondere in der 45 Min.-Pause und der 9 Std.-Ruhezeit – stattfinden, sodass AC-Laden keine Option darstellt.

unterschiedlicher Ladebedürfnisse an einem LP eine zunehmende Komplexität hinsichtlich der institutionellen Ausgestaltung der Kapazitätsallokation einhergehen dürfte.

- Die Start-Ziel-LI kann durch sehr unterschiedliche Standzeiten geprägt sein. Es ist denkbar, dass sich sehr unterschiedliche Ladestrategien an verschiedenen Standorten entwickeln und somit auch die technische Auslegung der P-S-LI inklusive der Entscheidung zwischen den Technologien – MCS, CCS und AC – sehr heterogen sein könnte. Für die technische Auslegung der Start-Ziel-LI ist dezentrales Wissen über die Ladebedarfe der Transport- und Logistikunternehmen relevant. Die Start-Ziel-LI wird im Rahmen dieser Studie nur in sehr vereinfachter Weise betrachtet.[38] Daher wird AC-Laden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt, obwohl grundsätzlich ein Potential für AC-LI im Bereich der Start-Ziel-LI bestehen dürfte.[39]

Insgesamt ist aufgrund von Interdependenzen und Substitutionsbeziehungen die technisch-systemische Auslegung der P-S-LI – und somit die Wahl der Standorte, Kapazitäten und Ladeleistungen für die Netz- und Start-Ziel-LI – zur Befriedigung der Ladebedarfe in den Nutzungskonstellationen integriert zu betrachten. Weiterhin bestehen Interdependenzen zwischen den Batteriekapazitäten der Lkw und der technisch-systemischen Auslegung der P-S-LI.[40] Wesentliche Erhöhungen der Batteriekapazität werden im Rahmen dieser Studie allerdings nicht betrachtet, da diese mit Nutzlastverlusten und somit auch mit Einschränkungen der Einsatzflexibilität im Kontext von gewichtslimitierte Fahrten einhergehen dürften. Ferner wird in Abschnitt 4.1.1.1.4 aufgezeigt, dass sich eine wesentliche Erhöhung der Batteriekapazitäten – die Verfügbarkeit von MCS-LI voraussetzend – aus gesamtwirtschaftlicher Sicht kostensteigernd auswirken dürfte.

2.1.2.1.2 OB-Lkw-System

Im Folgenden werden zunächst die Komponenten eines OB-Lkw-Systems, die nicht auch Teil eines B-Lkw-Systems sind beschrieben. In Abschnitt 2.1.2.1.1.1 sind bereits die Charakteristika von B-Lkw und P-S-LI dargestellt, da es sich sowohl um Komponenten eines B- als auch eines OB-Lkw-Systems handelt. Anschließend wird das Zusammenspiel der Komponenten eines OB-Lkw-Systems unter Berücksichtigung der Anforderungen der Nachfrage dargestellt und das im Rahmen dieser Studie betrachtete Spektrum an Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems grob skizziert.

[38] Vgl. dazu Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1, in dem dargestellt wird, warum angenommen werden könnte, dass sich die Start-Ziel-LI in einem B- und in einem OB-Lkw-System nicht maßgeblich unterscheidet. Im Rahmen dieser Studie wird diese Annahme gesetzt, sodass für einen Vergleich der Technologieoptionen – eines B- und eines OB-Lkw-Systems – keine vertiefte Betrachtung der Start-Ziel-LI erforderlich ist.

[39] Vgl. GÖCKELER ET AL. (2020, S. 49) und SPETH / PLÖTZ (2024).

[40] Siehe Abbildung 5.

2.1.2.1.2.1 Komponenten und Charakteristika

In einem OB-Lkw-System steht neben P-S-LI auch L-O-LI zur Verfügung (vgl. Abbildung 2). Somit können neben B-Lkw auch OB-Lkw eingesetzt werden, die für die Fahrt oder das Laden der Batterie über Pantographen auf Strecken mit L-O-LI Energie aufnehmen können. OB-Lkw werden wie B-Lkw durch einen Elektromotor angetrieben. Durch L-O-LI kann in einem OB-Lkw-System entlang von – insbesondere vielbefahrenen – Strecken der Bedarf an P-S-LI im Vergleich zu dem Bedarf in einem B-Lkw-System reduziert werden. Die Bereitstellung von L-O-LI setzt die Bereitstellung mehrerer Teilgüter voraus. Zunächst werden (1) Oberleitungen inkl. der Masten sowie (2) Flächen direkt neben der Fahrbahn zur Errichtung der Masten und der Netzanschlüsse inkl. der Unterwerke benötigt. Wie bei der Bereitstellung von P-S-LI sind zudem die Bereitstellung eines (3) Stromnetzanschlusses und von Stromnetzkapazitäten sowie auch von (4) Strommengen erforderlich. Die L-O-LI kann ausschließlich von OB-Lkw und nicht von B-Lkw genutzt werden. Aktuell werden Leistungen zwischen 200 kW und 800 kW für die Energieübertragung zwischen L-O-LI und OB-Lkw angegeben.[41] Um die Energie für die Fahrt vollständig über die L-O-LI aufzunehmen, bedarf es bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 1,3 kWh/km und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h einer Mindestleistung von knapp über 100 kW.

Durch die Option während der Fahrt Energie aufzunehmen, ist es grundsätzlich denkbar, dass OB-Lkw mit kleineren Batterien als B-Lkw ausgestattet werden können, ohne dass damit zusätzliche Standzeiten oder eine Reduktion der Einsatzflexibilität einhergehen. Dafür sind die Gesamtlänge und Verortung der L-O-LI und weiterer LI entscheidend. Im Kontext der Verortung stellt sich neben der generellen Auswahl der Strecken für L-O-LI auch die Frage, ob die L-O-LI kontinuierlich und somit nahezu unterbrechungsfrei oder in einzelnen Abschnitten mit Lücken errichtet werden sollte. Es sei darauf hingewiesen, dass kleinere Lücken der L-O-LI aufgrund von lokalen Gegebenheiten – wie Brücken und Tunnel – stets zu erwarten sind.

Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass OB-Lkw wie B-Lkw P-S-LI nutzen können, sodass die Batterien der OB-Lkw während Standzeiten, beispielsweise im Depot oder während der 45 Min.-Pause oder der 9 Std.-Ruhezeiten, auch geladen werden können.

2.1.2.1.2.2 Zusammenspiel von den Anforderungen der Nachfrage und den Charakteristika der technischen Komponenten

Grundsätzlich sind die in Abschnitt 2.1.2.1.1.2 dargestellten Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung eines B-Lkw-Systems zu einem großen Teil auf ein OB-Lkw-System übertragbar. Die in Abbildung 3 visualisierten Nutzungskonstellationen für P-S-LI sind auch für B- und OB-Lkw in einem OB-Lkw-System anwendbar. Allerdings besteht für OB-Lkw keine so starke Abhängigkeit von P-S-LI, da diese auch über L-O-LI Energie aufnehmen können. P-S-LI kann somit in einem OB-Lkw-System teilweise durch L-O-LI ersetzt werden. Die Substituierbarkeit der P-S-LI aus Gesamtsicht ist allerdings begrenzt, da eine flächendeckende Bereitstellung von P-S-LI für die Netz-LI auch in einem OB-Lkw-

[41] ROGSTADIUS (2022, S. 10).

System für die Einsatzflexibilität von B- und ggf. auch von OB-Lkw erforderlich bleibt. Zudem wird angenommen, dass es sowohl in einem B- als auch einem OB-Lkw-System P-S-LI im Bereich der Start-Ziel-LI geben wird.[42] Abbildung 4 bietet einen Überblick über die LI eines OB-Lkw-Systems und hebt die im Mittelpunkt der Untersuchungen in dieser Studie stehende Netz-LI hervor. Hintergrund dafür ist, die Annahme, dass sich die Start-Ziel-LI in einem B- und OB-Lkw-System nicht signifikant voneinander unterscheidet, sodass sich diese nur in geringerem Maß auf die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System auswirkt.

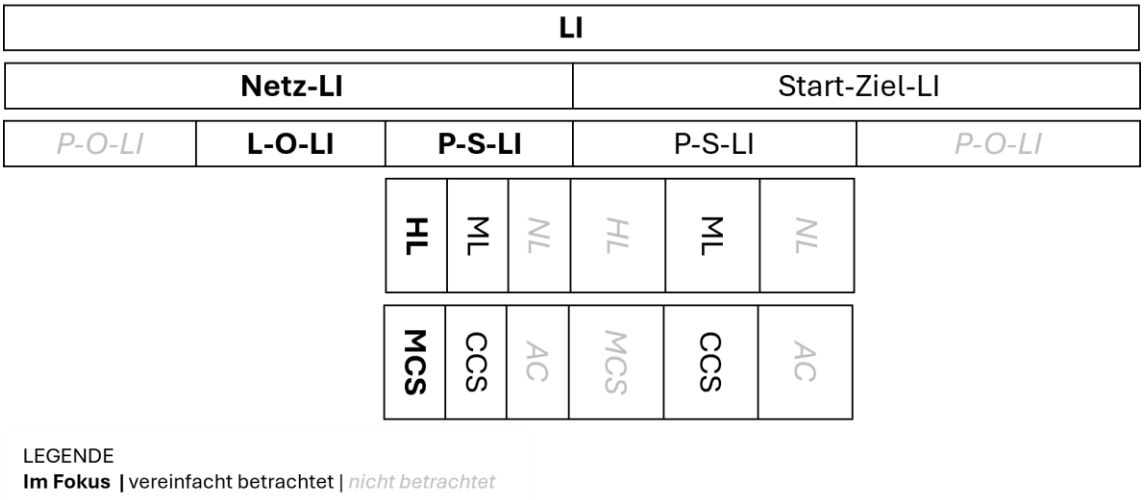


Abbildung 4: Systematisierung der Ladeinfrastruktur in einem OB-Lkw-System und Hervorhebung der in dieser Studie im Fokus stehenden Ladeinfrastruktur[43]

Die wesentlichen interdependenten infrastruktur- und fahrzeugseitigen Ausgestaltungsparameter eines OB- und auch eines B-Lkw-Systems sind in Abbildung 5 dargestellt. Ein OB-Lkw-System ist im Vergleich zum B-Lkw-System durch die Gestaltung der L-O-LI und der Anzahl von OB-Lkw, sowie deren Batteriekapazitäten, gekennzeichnet. Je größer die Flächenabdeckung der mit L-O-LI ausgestatteten Fahrstrecken ist, desto eher ist zu erwarten, dass eine Reduktion der Batteriekapazitäten von OB-Lkw im Vergleich zu B-Lkw ohne relevante Einbußen hinsichtlich der Einsatzflexibilität möglich ist.[44] Eine hohe Flächenabdeckung kann einerseits durch einen kontinuierlichen (nahezu unterbrechungsfreien) und andererseits durch einen abschnittsweisen Aufbau der L-O-LI erfolgen. Bei der Entscheidung bestehen Interdependenzen zwischen der Ladeleistung und der Länge der L-O-LI-Abschnitte sowie der Batteriekapazitäten der OB-Lkw. Die Ladeleistung sollte grundsätzlich 100 kW nicht unterschreiten, damit die Energieversorgung für die Fahrt auf mit L-O-LI ausgestatteten Fahrstrecken vollständig über die L-O-LI erfolgen kann.[45] Durch höhere Ladeleistungen wird während der Fahrt zusätzlich das Laden der Batterie ermöglicht. Bisherigen Erkenntnissen zufolge kann ein OB-Lkw während einer 35 km-

[42] Vgl. dazu Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1.

[43] Die Darstellung basiert auf den Erläuterungen in diesem Abschnitt und in Abschnitt 2.1.2.1.1.2.

[44] Ausgestaltungsfragen des L-O-LI-Netzes werden vertieft in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1 beleuchtet.

[45] Vgl. Abschnitt 2.1.2.1.2.1.

langen Fahrt an einer L-O-LI-Strecke bei 80 km/h eine zusätzliche Reichweite von 75 km gewinnen.[46] Die Energieaufnahme über 1 km an der L-O-LI ermöglicht somit ca. 2 km ohne L-O-LI zu fahren. Unter Berücksichtigung von sinkenden Energieverbräuchen dürfte das Verhältnis von gewonnener Reichweite zu Länge des L-O-LI-Abschnitts weiter steigen. Fragen zur Verortung der L-O-LI werden im Rahmen dieser Studie nur sehr vereinfacht betrachtet.

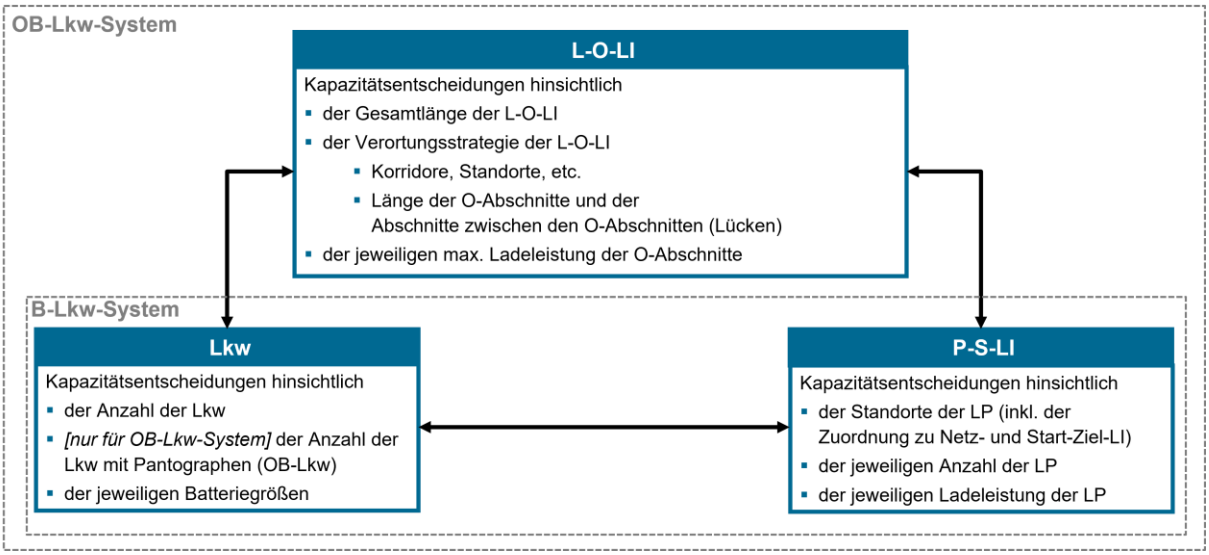


Abbildung 5: Technisch-systemische Ausgestaltungsfragen für E-Lkw-Systeme

Mit Blick auf die Gestaltung des L-O-LI-Netzes ist allerdings anzumerken, dass ein gewisser Umfang an L-O-LI erforderlich sein dürfte, damit OB-Lkw eingesetzt werden. Denn, obwohl auch bei einem sehr kleinen L-O-LI-Netz eine Einsatzflexibilität für OB-Lkw durch P-S-LI gewährleistet werden kann, ist es nicht zuletzt aufgrund der Zusatzkosten für den Pantographen eher unplausibel, dass OB-Lkw im Vergleich zu B-Lkw mit Vorteilen einhergehen, wenn diese in weiten Teilen wie auch B-Lkw mit P-S-LI geladen werden würden. Eine Ausnahme könnte der Einsatz von OB-Lkw im Pendelverkehr bilden. Dies wird im Rahmen dieser Studie nicht untersucht, da die Einsatzflexibilität der Lkw als Nebenbedingung in den Untersuchungen festgelegt wird.[47]

2.1.2.2 K-Lkw-Systeme

In diesem Abschnitt werden zunächst technische Komponenten der verschiedenen K-Lkw-Systeme kurz vorgestellt und anschließend die grundsätzlichen Implikationen für die technisch-systemische Ausgestaltung sämtlicher K-Lkw-Systeme diskutiert. Dabei werden sowohl die in Abschnitt 2.1.1 dargestellten Anforderungen der Nachfrage als auch die technisch-systemischen Charakteristika der K-Lkw-Systeme berücksichtigt. Eine detaillierte und differenzierte Thematisierung der technisch-systemischen Ausgestaltungsvarianten der unterschiedlichen K-Lkw-Systeme erfolgt im Rahmen dieser Studie nicht.

[46] Siemens AG / Technische Universität Dresden / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2016, S. 86 f.).

[47] Vgl. Abschnitt 2.1.1.

2.1.2.2.1 H2-Lkw-System

Ein H2-Lkw-System umfasst sowohl H2-Lkw als auch die entsprechende BTI, für die eine Bereitstellung von Wasserstoff an der BTI zu gewährleisten ist.

H2-LKW

H2-Lkw werden wie auch E-Lkw mit einem Elektromotor angetrieben.[48] Die Stromversorgung des Elektromotors erfolgt über eine Brennstoffzelle, in der die chemische Energie von Wasserstoff und Sauerstoff in elektrische Energie umgewandelt wird. Ergänzend kann eine kleine Batterie in H2-Lkw eingesetzt werden, um große zeitliche Schwankungen des durch die Brennstoffzelle bereitgestellten Stroms zu vermeiden.[49] Zudem ermöglicht die Batterie in H2-Lkw auch die Rekuperation von Bremsenergie.

Grundsätzlich kann der für die Versorgung der Brennstoffzelle benötigte Wasserstoff gasförmig oder flüssig in einem Tank im H2-Lkw gespeichert werden.[50] In europäischen Praxistests wird Wasserstoff in Prototypen von H2-Lkw mit 400 km Reichweite mit 350 bar im gasförmigen Zustand gespeichert.[51] Pkw-BTI wird dagegen üblicherweise mit 700 bar realisiert, sodass aktuell das BTI-Netz mit 700 bar umfangreicher ausgebaut ist als das mit 350 bar.[52] Nutzfahrzeughersteller sehen perspektivisch aufgrund der höheren Energiedichte eine Speicherung mit 700 bar oder im flüssigen Zustand für schwere Lkw als vorteilhaft an, um große Reichweiten zu ermöglichen.[53] Studien zum Vergleich von verschiedenen Technologieoptionen für Lkw fokussieren sich auf die Speicherung des Wasserstoffs im gasförmigen Zustand mit 700 bar, da die Speicherung im flüssigen Zustand nach aktuellem Wissensstand mit größeren Energieverlusten sowie höheren Kosten für die Tanks verbunden ist. Weiterhin ist der technologische Reifegrad von H2-Lkw mit gasförmigen im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff höher.[54] Die in den vorliegenden Studien betrachteten H2-Lkw weisen langfristig Reichweiten von bis zu 820 km auf, wobei mit größeren Wasserstofftanks auch Reichweiten über 1.200 km realisiert werden könnten.[55]

BETANKUNGSINFRASTRUKTUR UND BEREITSTELLUNG VON WASSERSTOFF

Für den Einsatz von H2-Lkw ist die entsprechende BTI zu errichten. Diese umfasst neben den Zapfstellen, lokale Speicheranlagen sowie weitere Nebenanlagen zum Betrieb der BTI, wie beispielsweise Kompressoren und Pumpen. Grundsätzlich sind – mit aktuellen Schätzungen von maximal 30 Minuten für eine Reichweitenerhöhung von über 800 km – eher kurze Betankungszeiten im

---

[48] Grundsätzlich kann Wasserstoff auch in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Diese Option wird im Rahmen dieser Studie aufgrund der geringeren Energieeffizienz nicht betrachtet.

[49] Vgl. BASMA / RODRÍGUEZ (2023b, S. 10) und GÖCKELER ET AL. (2020, S. 54) .

[50] Vgl. dazu auch aktuelle Modelle der Nutzfahrzeughersteller sowie Konzepte in BASMA / RODRÍGUEZ (2023b, S. 36).

[51] GÖCKELER ET AL. (2020, S. 54).

[52] Vgl. HYEXPERTS (2021) und H2 MOBILITY GMBH (2023).

[53] GÖCKELER ET AL. (2020, S. 54).

[54] Vgl. H2 MOBILITY GMBH (2021, S. 31). Es sei zudem auf die Option von H2-Lkw, die in Tanks kryokomprimierten Wasserstoff speichern, hingewiesen, die sich allerdings noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindet.

[55] Vgl. JÖHRENS ET AL. (2022, S. 26) und UNTERLOHNER (2021, S. 36 und 46).

Verhältnis zu der erlangten Reichweite zu erwarten.[56] Wenn Wasserstoff perspektivisch in einigen H2-Lkw gasförmig und in anderen flüssig gespeichert wird, sind separate Zapfstellen, als Schnittstelle zwischen H2-Lkw und BTI erforderlich. Dadurch könnte sich der Flächenbedarf für ein H2-Lkw-System erhöhen. Insgesamt ist im Kontext des Flächenbedarfs auch die Wasserstoffvorhaltung zu bedenken.[57]

Um eine Bereitstellung von Wasserstoff für einen klimaneutralen SGV mit H2-Lkw zu gewährleisten, muss Wasserstoff zunächst durch Elektrolyse aus Wasser mit Hilfe von Strom aus EE gewonnen werden. Die aktuell übliche Wasserstoffproduktion mittels Dampfreformierung geht auch perspektivisch mit relevanten Treibhausgasemissionen einher, sodass diese nicht für einen klimaneutralen SGV geeignet ist.[58] Die Wasserstoffbereitstellung kann zum einen dezentral mit Elektrolyseuren vor Ort bzw. nahe den H2-Tankstellen erfolgen. Zum anderen ist eine Zulieferung des Wasserstoffs – beispielsweise per Rohrleitungsnetz oder mit Tankfahrzeugen – denkbar. Ferner ist im Fall von importiertem Wasserstoff vorgelagert noch ein Transport nach Deutschland und ggf. auch Europa erforderlich. Schließlich sei auch darauf hingewiesen, dass für die Dekarbonisierung des Industriesektors sowie voraussichtlich in der mittleren Frist für die Deckung der Residuallast im Stromsystem nicht auf Wasserstoff verzichtet werden kann.[59] Dadurch sind bereits signifikante Mengen lokal zu produzieren oder zu importieren, wodurch (insbesondere temporär) hohe Unsicherheiten hinsichtlich der Verfügbarkeit von Wasserstoff bestehen dürften.

2.1.2.2.2 SKW-Lkw-Systeme

Dieser Abschnitt beinhaltet eine Vorstellung von SKW-Lkw-Systemen. SKW werden auch als alternative Kraftstoffe oder E-fuels bezeichnet.

2.1.2.2.2.1 F-SKW-Lkw-System

Folgend werden Komponenten und Charakteristika eines f-SKW-Lkw-System kurz betrachtet sowie diesbezügliche Unsicherheiten aufgezeigt. Ein f-SKW-Lkw-System umfasst die f-SKW-Lkw, die BTI sowie die vorgelagerte Produktion der f-SKW und die Transport- und Verteilinfrastruktur für die f-SKW.

F-SKW-LKW

Für einen SGV mit f-SKW-Lkw kann auf eine bereits ausgereifte und weit entwickelte Fahrzeugtechnologie zurückgegriffen werden, da die sich heute im Einsatz befindenden Lkw zum allergrößten Teil mit Diesel und somit mit flüssigen Kraftstoffen betrieben werden. Die mit flüssigen Kraftstoffen betriebenen Lkw verfügen über einen Verbrennungsmotor und können die heutigen

[56] Für eine Reichweite von bis zu 820 km und somit einer Betankung von bis zu 61 kg Wasserstoff bestimmen UNTERLOHNER (2021, S. 36) eine Betankungsdauer unter 20 Minuten, während JÖHRENS ET AL. (2022, S. 26) von einer Betankungszeit unter 30 Minuten ausgehen. TRAFFIX VERKEHRSPLANUNG GMBH / UMWELTBUNDESAMT GMBH / E7 ENERGY INNOVATION & ENGINEERING (2023) geben an, dass bei 700 bar Betankungsgeschwindigkeiten von bis zu 220 km / min erreicht werden könnten. H2 MOBILITY GMBH (2021) zielen auf Betankungszeiten zwischen 10 und 15 Minuten für 60 kg Wasserstoff ab. Insgesamt werden hier die noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der H2-BTI deutlich (vgl. UNTERLOHNER (2021), H2 MOBILITY GMBH (2021)).

[57] Vgl. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 28).

[58] Vgl. UNTERLOHNER (2021, S. 35).

[59] Vgl. TRAFFIX VERKEHRSPLANUNG GMBH / UMWELTBUNDESAMT GMBH / E7 ENERGY INNOVATION & ENGINEERING (2023, S. 71) aber auch z.B. PROGNOS / ÖKO-INSTITUT / WUPPERTAL-INSTITUT (2021) und FRAUNHOFER ISI ET AL. (2021).

Anforderungen der Nachfrage – insbesondere im Hinblick auf die Betankungsdauer und Reichweite – erfüllen.[60] Im Kontext eines f-SKW-Lkw-Systems für einen klimaneutralen SGV ist zu beachten, dass durch den Ersatz von fossilem Diesel durch f-SKW zwar die Treibhausgasemissionen reduziert, aber andere Emissionen und insbesondere Luftschadstoffemissionen weiterhin entstehen würden.[61]

BETANKUNGSINFRASTRUKTUR UND BEREITSTELLUNG VON FLÜSSIGEN SYNTHETISCHEN KOHLENWASSERSTOFFEN (F-SKW)

Aufgrund des aktuell umfangreichen Einsatzes von Diesel-Lkw existieren bereits in einem großen Umfang Transport-, Verteil- und BT-Infrastrukturen für flüssige Kraftstoffe. Für eine klimaneutrale Produktion von f-SKW ist eine Synthese von auf Basis von EE-Strom produziertem Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid (CO2) notwendig.[62] Um CO2 für die Synthese bereitzustellen, wird zum einen die Abtrennung aus CO2-haltigen Abgasströmen und zum anderen die Abtrennung aus der Umgebungsluft (auch als „Direct Air Capture“ bezeichnet) diskutiert. Obwohl eine CO2-Abtrennung aus CO2-haltigen Abgasströmen mit deutlich geringerem Aufwand und Kosten verbunden ist und noch einen umfangreicherer Entwicklungsbedarf für die Abtrennung aus der Umgebungsluft besteht, stellt langfristig nur die Abtrennung aus der Umgebungsluft eine relevante Option dar. Denn CO2-haltige Abgasströme dürfen im Zuge der Transformation hin zur Klimaneutralität nahezu vollständig entfallen.[63]

Zudem bestehen im Hinblick auf die Verortung der f-SKW-Produktion und somit auch auf die Versorgung der BTI noch Unsicherheiten. Unabhängig von den zukünftigen Entwicklungen hinsichtlich der Verortung der Produktion ist zu erwarten, dass die existierende Transport-, Verteil- und BT-Infrastruktur für f-SKW in einem gewissen Umfang genutzt werden kann. Eine Zulieferung von in Deutschland oder Europa zentral produzierten oder importierten f-SKW zu den Zapfstellen sowie die Speicherung vor Ort erscheint nicht zuletzt aufgrund des bereits bestehenden Wissens bezüglich des Transports und der Speicherung von flüssigen Kraftstoffen wahrscheinlich zu sein. Eine weitergehende Betrachtung erfolgt im Rahmen dieser Studie nicht.

2.1.2.2.2.2 G-SKW-Lkw-System

Folgend werden die Komponenten und Charakteristika eines g-SKW-Lkw-Systems vorgestellt, wobei aufgrund der Gemeinsamkeiten mit f-SKW-Lkw-Systemen häufig auf den vorherigen Abschnitt verwiesen wird.

G-SKW-LKW

Wie auch bei f-SKW-Lkw kann für g-SKW-Lkw auf eine bereits entwickelte Fahrzeugtechnologie zurückgegriffen werden, da heute bereits mit komprimiertem Erdgas (engl. compressed natural gas (CNG)) betriebene CNG-Lkw im Einsatz sind. CNG-Lkw werden wie f-SKW-Lkw ebenfalls mit einem Verbrennungsmotor angetrieben, weisen allerdings aufgrund der geringen Energiedichte von

[60] Bei einem Tankvolumen von 1.000 Liter erreichen Diesel-Lkw Reichweiten über 3.000 km (vgl. BECKER (2020)).
[61] UNTERLOHNER (2021, S. 37).
[62] Die Produktion von Wasserstoff auf Basis von EE-Strom wird in Abschnitt 2.1.2.2.1 erläutert.
[63] Vgl. HEINZMANN ET AL. (2021), UNTERLOHNER (2021) und GÖCKELER ET AL. (2020).

gasförmigen im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen grundsätzlich geringere Reichweiten auf.[64] Dadurch wird im Fernverkehr in Lkw mit einem hohen Energieverbrauch, wie Sattelzügen, heute flüssiges Erdgas (engl. liquid natural gas (LNG)) und nicht CNG eingesetzt.[65]

BETANKUNGSINFRASTRUKTUR UND BEREITSTELLUNG VON GASFÖRMIGEN SYNTHETISCHEN KOHLENWASSERSTOFFEN (G-SKW)

Da aktuell bereits CNG-Lkw in Betrieb sind, könnte somit auch in einem gewissen Umfang eine Transport-, Verteil- und BT-Infrastruktur für ein g-SKW-Lkw-Systems existieren. Der Gesamtumfang der existierenden Infrastrukturen ist allerdings im Vergleich zur Infrastruktur für flüssige Kraftstoffe geringer. In welchem Umfang ein g-SKW-Lkw-System auf den bestehenden Infrastrukturen aufgebaut werden kann, wird im Rahmen dieser Studie nicht untersucht.

Wie auch für die Produktion f-SKW sind für die Produktion von g-SKW Wasserstoff und CO2 erforderlich. Bezüglich der Versorgung der BTI stellen sich weiterhin analoge Fragen wie bei einem f-SKW-Lkw-System.[66] Eine weiterführende Betrachtung der technisch-systemischen Ausgestaltung eines g-SKW-Lkw-Systems erfolgt im Rahmen dieser Studie nicht.

2.1.2.2.3 Zusammenspiel von den Anforderungen der Nachfrage und den Charakteristika der technischen Komponenten sämtlicher K-Lkw-Systemen

Bei der technisch-systemischen Ausgestaltung der K-Lkw-Systeme sind sowohl die Anforderungen der Nachfrage als auch die Charakteristika der komplementären Komponenten – also der K-Lkw, der BTI und Transport- und Verteilinfrastrukturen sowie der Produktionsanlagen – zu berücksichtigen. Wie auch bei den E-Lkw-Systemen ist unter Berücksichtigung der Anforderungen der Nachfrage eine flächendeckende BTI, die ein hohes lokales Verfügbarkeitsniveau aufweist, entscheidend. Für die Ausgestaltung der BTI und insbesondere für Entscheidungen über die zu errichtenden Kapazitäten sind verschiedene Standorte differenziert zu betrachten. Dies könnte analog zum E-Lkw-System auf Basis der Systematisierung der Standorte, die in Abbildung 3 dargestellt ist, erfolgen.

Es erscheint plausibel, dass die Tankbedürfnisse im Vergleich zu den Ladebedürfnissen in geringem Ausmaß durch die Logistikprozesse determiniert werden. Das liegt zum einen an den potenziell größeren Reichweiten der K-Lkw, sodass eine tägliche Betankung der K-Lkw in den allermeisten Fällen ausreichend sein dürfte und zum anderen an den geringeren Betankungsdauern, die eine Integration der Tankvorgänge in die Logistikprozesse bei Vermeidung von zusätzlichen Standzeiten vereinfachen dürften.

2.2 Zielsystem, methodischer Hintergrund sowie weitere Vorgehensweise

Zunächst werden in Abschnitt 2.2.1 die den Untersuchungen zugrundeliegenden Ziele vorgestellt und somit die im Rahmen dieser Studie betrachteten Fragestellungen konkretisiert. In Abschnitt 2.2.2

[64] GÖCKELER ET AL. (2022, S. 27).
[65] UNTERLOHNER (2021, S. 41).
[66] Vgl. Abschnitt 2.1.2.2.2.1.

werden der methodische Hintergrund und die Vorgehensweise der folgenden Untersuchungen dargestellt. Zuletzt wird in diesem Abschnitt die Struktur der weiteren Untersuchungen aufgezeigt. In der Struktur der Kapitel 3, 4, und 5 spiegeln sich sowohl die in dem Abschnitt 2.2.2 vorgestellte Vorgehensweise als auch die Systematisierung der Technologieoptionen in Abschnitt 2.1 wider.

2.2.1 Zielsystem

Im Kern werden die Ziele der Effektivität und (Kosten-)Effizienz für die Ableitung von Handlungsempfehlungen und somit auch für die relative Bewertung von Lkw-Systemen und Kombinationen dieser im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen zugrunde gelegt. Es werden nur Lkw-Systeme betrachtet, durch die bis zum Jahr 2045[67] eine effektive Transformation des nationalen und grenzüberschreitenden SGV hin zur Klimaneutralität grundsätzlich möglich ist.[68] Dadurch wird das Ziel der Effektivität – sofern im Einzelfall nicht anderes angegeben – zur Nebenbedingung. Im Hinblick auf das Ziel der (Kosten-)Effizienz steht die gesamtwirtschaftliche Perspektive im Fokus. Stellenweise wird darauf hingewiesen, dass sich aus gesamtwirtschaftlicher und somit wohlfahrtsökonomischer Perspektive Bewertungen hinsichtlich der (Kosten-)Effizienz ergeben können, die gravierend von bei Einnahme der Perspektive der Nachfrager und somit der Transport- und Logistikbranche entstehenden Bewertungen abweichen können. Somit werden zum Teil Verteilungsfragen zwischen verschiedenen Akteuren aufgezeigt.[69]

Ferner stellt sich im Rahmen der Bewertung auch die Frage der Berücksichtigung von Transaktionskosten[70], deren Höhe von der Eignung der institutionellen Ausgestaltung abhängt. Die Ansprüche hinsichtlich der institutionellen Ausgestaltung können sich für verschiedene Lkw-Systeme und Kombinationen dieser unterscheiden, z.B. weil ein mehr oder weniger hoher Koordinationsbedarf

---

[67] Gemäß § 3 Abs. 2 KSG ist festgelegt, dass Deutschland bis zum Jahr 2045 klimaneutral im Sinne einer Netto-Treibhausgasneutralität werden muss. Politisch gesetzte Zwischenziele werden im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt. Grundsätzlich ist eine Differenzierung von Zwischenzielen in (1) Ziele, die auf einem effizienten Pfad zum finalen Ziel liegen, und (2) weitreichendere Zwischenziele, welche u.U. auch Abweichungen vom effizienten Pfad zum finalen Ziel der Klimaneutralität zufolge haben können, möglich. Im Allgemeinen erscheint im Hinblick auf den Pfad ein Monitoring sinnvoll, das prüft, ob die Transformation auf einem ausgewählten Pfad voranschreitet. Weitreichendere Zwischenziele sind dagegen kritisch und gerade auch stets im Hinblick auf die Erreichung des Ziels der Klimaneutralität hin zu betrachten.

[68] Wenn sich in den nächsten Jahren für E- oder K-Lkw-Systeme spezifische Herausforderungen zeigen, die dazu führen, dass die Lkw-Systeme nicht oder nur zu prohibitiv hohen Kosten etabliert werden können, sind die Überlegungen und darauf basierenden Handlungsempfehlungen dieser Studie zu prüfen. Auf bereits in der Diskussion stehende Herausforderungen wird im Rahmen dieser Studie hingewiesen und es werden Vorschläge zum Umgang mit diesen erarbeitet.

[69] Auf Verteilungsfragen wird insbesondere im Kontext von möglichen (temporären) Flächenknappheiten bei der Bereitstellung von Netz-LI an hochfrequentierten Bundesautobahnen (BAB) hingewiesen. Aufgrund von potenziellen Koordinations- und Machtproblemen werden in Abschnitt 4.1.1.2.1 letztlich nicht nur die in Abschnitt 4.1.1.1.1.2.1 thematisierten gesamtwirtschaftlichen Kosten, sondern auch mögliche Wirkungen auf die Kosten des Transports für Speditions- und Transportunternehmen, die schließlich auch Rückwirkungen auf die Endverbraucherpreise haben, in den Blick genommen.

[70] Transaktionskosten stehen mit der Durchführung von Transaktionen im Zusammenhang, sind aber nicht einheitlich definiert (vgl. RICHTER / FURUBOTN (2010, S. 55–57). Grundsätzlich werden im Rahmen dieser Studie unter Transaktionskosten die Kosten verstanden, die im Zusammenhang mit der Festlegung, Übertragung und Durchsetzung von Verfügungsrechten entstehen (vgl. GÖBEL (2002, S. 129 ff.)). Vor allem werden Transaktionskosten infolge von oder im Zuge der Reduzierung von Koordinations- und Machtproblemen einbezogen.

besteht.[71] Dadurch können Transaktionskosten infolge von oder im Zuge der Reduzierung von Koordinations- und Machtproblemen nicht nur in Abhängigkeit der Auswahl der institutionellen Ausgestaltung anfallen, sondern auch per se durch die Charakteristika der Lkw-Systeme und Kombinationen dieser auf unterschiedlich hohem Niveau bestehen. Eine umfassende Betrachtung der institutionellen Ausgestaltung erfolgt im Rahmen dieser Studie nicht. Es wird aber selektiv auf institutionelle Aspekte eingegangen, wenn die damit verbundenen Transaktionskosten potenziell zu einer Verschiebung der relativen Bewertung hinsichtlich der (Kosten-)Effizienz von Lkw-Systemen und Kombinationen dieser führen könnten.

Weiterhin werden im Rahmen des Vergleichs Qualitätsdifferenzen und damit einhergehende Unterschiede des Nutzens von verschiedenen Lkw-Systemen und Kombinationen aufgezeigt und hinsichtlich der Wirkungen auf die relative Bewertung diskutiert. Zudem werden entstehende Abhängigkeiten von Energieimporten sowie industriepolitische Aspekte thematisiert. Schließlich tragen sowohl quantitative als auch qualitative Betrachtungen dazu bei, Handlungsempfehlungen für eine aus gesamtwirtschaftlicher Sicht effektive und effiziente Transformation des SGV abzuleiten.

2.2.2 Vorgehensweise in den Untersuchungen und methodischer Hintergrund

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise der folgenden Untersuchungen erläutert und der methodische Hintergrund dargestellt. Zugunsten der Nachvollziehbarkeit wird der Untersuchungsgegenstand schrittweise im Hinblick auf zwei Dimensionen erweitert. Zum einen werden Aspekte der europäischen Einbettung in Abschnitt 2.2.2.1 zunächst vernachlässigt und anschließend in Abschnitt 2.2.2.2 berücksichtigt. Zum anderen umfasst die zweite Dimension einerseits eine ausschließlich direkte einstufige Entscheidungsmöglichkeit auf Basis von Endzustands-Betrachtungen (siehe Abschnitt 2.2.2.1.1 und 2.2.2.2.1) und andererseits die Option sequenziellen Entscheidens zur Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit der Endzustände. In diesem Rahmen werden ergänzend zu den Endzustands-Betrachtungen Interdependenzen – Gemeinsamkeiten und Unterschiede – zwischen den Endzuständen sowie den Pfaden zu den Endzuständen betrachtet, um schließlich zu beurteilen, welche Endzustände weiter offengehalten und somit auch welche Maßnahmen (kurzfristig) umgesetzt und für welche Maßnahmen Umsetzungsentscheidungen verschoben werden sollten (siehe Abschnitte 2.2.2.1.2 und 2.2.2.2.2).

2.2.2.1 Fokus auf Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung

Dieser Abschnitt erläutert die grundlegende Vorgehensweise für die Untersuchungen, wobei Aspekte der europäischen Einbettung vernachlässigt werden. Zunächst wird in Abschnitt 2.2.2.1.1 die Rationalität für einen Vergleich von Lkw-Systemen und Kombinationen mit Fokus auf den Endzustand als Grundlage für die Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen aufgezeigt. Zudem wird die grundlegende Vorgehensweise bei den Endzustands-Betrachtungen dargestellt. Abschnitt 2.2.2.1.2 beinhaltet eine Darstellung der Vorgehensweise für die Ableitung von (kurzfristigen)

[71] Vgl. VORWERK ET AL. (2023, S. 7 f.).

Handlungsempfehlungen für den SGV, die die Option sequenziellen Entscheidens berücksichtigt. Die im Rahmen der Untersuchungen dieser Studie für die Transformation des SGV erarbeitete Vorgehensweise basiert auf entscheidungstheoretischen Erkenntnissen und bezieht auch Überlegungen zur Anwendung dieser von VORWERK ET AL. (2023) ein, die eine Systementwicklungsplanung (SEP) als Planungsregime für das Energiesystem entwickeln. Kasten 1 beinhaltet eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte der Ausgestaltung der SEP für das Energiesystem.

2.2.2.1.1 Zunächst Endzustands-Betrachtungen …

Ausgangspunkt für die Ableitung von Handlungsempfehlungen stellt ein Vergleich der alternativen Lkw-Systeme sowie möglicher Kombinationen dieser dar. Ziel des Vergleichs von Lkw-Systemen sowie möglicher Kombinationen unter Berücksichtigung des in Abschnitt 2.2.1 definierten Zielsystems ist eine relative Bewertung dieser, die grundsätzlich als Basis für die Entscheidung hinsichtlich des zu verfolgenden Endzustands dienen kann. Durch die Endzustands-Betrachtungen wird ein eingeschwungener Zustand nach Ende der Transformation in den Fokus der Betrachtung gerückt, der auf längere Sicht grundsätzlich erhalten bleibt. Zudem werden bei den Endzustands-Betrachtungen für die Bewertung wesentliche Aspekte auf einem direkten Weg hin zu einem Endzustand berücksichtigt. Im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen wird somit implizit davon ausgegangen, dass eine Auswahlentscheidung hinsichtlich des anzustrebenden Endzustands ansteht. Es wird für jeden Endzustand der direkte Weg zu diesem Endzustand hin betrachtet, während Interdependenzen zwischen den Wegen zu verschiedenen Endzuständen nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen sind Annahmen zu treffen, um die verschiedenen Lkw-Systeme und Kombinationen hinsichtlich des in Abschnitt 2.2.1 dargestellten Zielsystems zu bewerten. Dies betrifft einerseits Annahmen hinsichtlich der technisch-systemischen Ausgestaltung von Lkw-Systemen und somit des Bedarfs an technischen Komponenten. Andererseits sind Annahmen hinsichtlich zukünftiger (Umwelt-)Entwicklungen, wie beispielsweise der Wasserstoff- oder Batteriepreisentwicklung, zu fällen. Dabei ist zu beachten, dass Interdependenzen zwischen (Umwelt-)Entwicklungen, wie der Verkehrsnachfrage und Kosten einzelner Komponenten und Energieträger sowie der technisch-systemischen Ausgestaltung der Lkw-Systeme und somit dem Bedarf an technischen Komponenten bestehen. Diese Interdependenzen können im Rahmen von technisch-systemische Analysen adressiert werden.[72]

Ferner sind im Rahmen der Festlegung von Annahmen Netzwerkeffekte zu beachten, die sich insbesondere vorteilhaft auf Endzustände mit nur einem Lkw-System oder wenigen Lkw-Systemen auswirken dürften. Netzwerkeffekte liegen vor, wenn der Nutzen eines Nutzers von der Anzahl der Nutzer insgesamt abhängt. Es können direkte und indirekte Netzwerkeffekte unterschieden werden.[73] Im Fall von direkten Netzwerkeffekten verändert sich der Nutzen eines Nutzers direkt dadurch, dass ein Nutzer dazukommt. Im Fall von indirekten Netzwerkeffekten, kann einerseits durch einen zusätzlichen

[72] Vertiefte Betrachtung zu vorliegenden technisch-systemischen Analysen sind in Abschnitt 2.3.

[73] Vgl. KATZ / SHAPIRO (1985, S. 424–440).

Nutzer eines kompatiblen Produkts das Angebot insgesamt vergrößert werden und andererseits können die Kosten im Zuge von Skaleneffekten insgesamt geringer werden. Es ist plausibel, dass mit einer zunehmenden Anzahl von Lkw eines bestimmten Lkw-Systems das Angebot an Infrastruktur für das bestimmte Lkw-System wächst und weiterhin im Zuge von indirekten Netzwerkeffekten die spezifischen Kosten von Infrastrukturen durch Synergieeffekte reduziert werden können. Grundsätzlich sind Synergieeffekte auch bei der Produktion von Lkw und Infrastrukturkomponenten denkbar. Es erscheint plausibel, dass sich die Produktionskosten verschiedener Hochlaufpfade in der kurzen und mittleren Frist unterscheiden. Es wird im Rahmen dieser Studie allerdings angenommen, dass sich in der langen Frist – unabhängig von der Größe des Lkw-Systems – keine signifikanten Produktionskostenunterschiede ergeben.

Zusammenfassend wird im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen die Frage adressiert, welches Lkw-System oder welche Kombination aus Lkw-Systemen aus heutiger Perspektive in der langen Frist vorteilhaft ist. Ergibt sich ein eindeutiges Ergebnis hinsichtlich des anzustrebenden Endzustands, können eine Auswahlentscheidung bezüglich des anzustrebenden Endzustands getroffen und die Maßnahmen für die Transformation hin zu diesem Endzustand angestoßen werden. Ein mögliches Ergebnis der Endzustands-Betrachtungen ist aber auch, dass die Frage der relativen Vorteilhaftigkeit nicht eindeutig beantwortet werden kann. Die relative Bewertung der Lkw-Systeme und Kombinationen kann sich durch die Variation von Annahmen und Sensitivitätsbetrachtungen in Abhängigkeit der Annahmen verschieben. Ferner können auch eine unterschiedliche Gewichtung der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Ziele und unterschiedliche Risikoeinstellungen zu Verschiebungen bei der relativen Bewertung führen. Schließlich könnten auch Verbesserungen der technisch-systemischen Analysen dazu führen, dass sich die Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Bewertung reduzieren lassen. Wenn letztlich eine Verschiebung der relativen Bewertung, bzw. der Reihenfolge der anzustrebenden Endzustände möglich ist, können – ausschließlich auf Basis des Vergleichs im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen – keine klaren Empfehlungen hinsichtlich der Auswahl des zu verfolgenden Endzustands und somit zu den durchzuführenden Maßnahmen abgeleitet werden. Wie mit Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit im Kontext der Ableitung von Handlungsempfehlungen umgegangen werden kann, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

2.2.2.1.2 … und anschließend Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der Option sequenziellen Entscheidens bei Unsicherheit

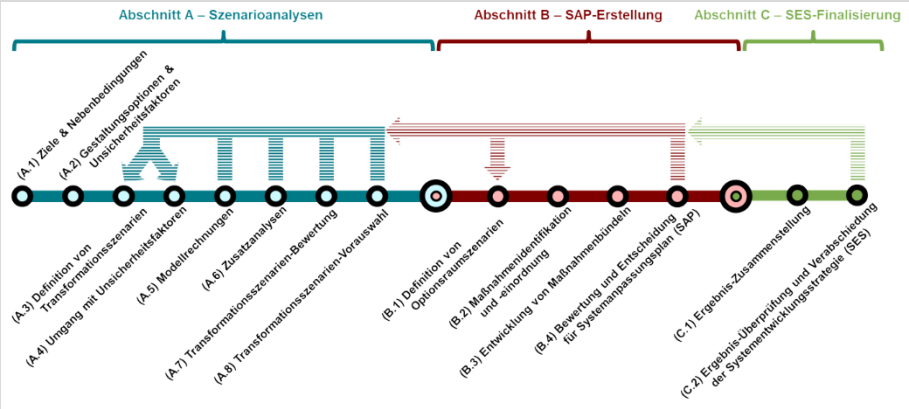
Im Folgenden wird die Vorgehensweise für die Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen für die Transformation des SGV vorgestellt, wenn sich aus den Endzustands-Betrachtungen keine eindeutigen Erkenntnisse hinsichtlich einer vorteilhaften Auswahl bezüglich des anzustrebenden Endzustands ergeben. Dabei werden analoge Überlegungen von VORWERK ET AL. (2023) zu einer SEP für das Gesamtenergiesystem einbezogen, die in Kasten 1 kurz zusammengefasst sind.

Im Folgenden werden die wesentlichen Grundgedanken von VORWERK ET AL. (2023) zu Planungsregimen für das Energiesystem im Allgemeinen und für die Energieinfrastrukturen im Speziellen zusammengefasst, die eine methodische Grundlage für die Untersuchungen zum SGV in dieser Studie darstellen. Vorgelagert sei darauf hingewiesen, dass VORWERK ET AL. (2023) vor dem

Hintergrund der aktuellen und möglichen zukünftigen Wissensstände von zentralen, öffentlichen einerseits und dezentralen, privaten Akteuren andererseits aufzeigen, dass ein öffentliches Planungsregime für das Energiesystem zielführend ist. Denn es ermöglicht eine integrierte Konzeption und Entscheidungsfällung bezüglich der grundsätzlichen Gestaltungsfragen des zukünftigen Energiesystems, die die Komplementarität der einzelnen Komponenten eines Energiesystems berücksichtigt. Dass eine Koordination der privaten Akteure und der dafür entsprechend notwendige Wissensaustausch bezüglich sehr grundlegender Fragen im Hinblick auf die Transformation des Energiesystems ausschließlich über Märkte in einer effektiven und effizienten Weise erfolgt, erscheint dagegen nicht realistisch zu sein.

Die entwickelte SEP stellt ein öffentliches Planungsregime für das Energiesystem dar. Die Basis für die im Rahmen einer SEP öffentlich zu fällenden Entscheidungen bezüglich der Transformation des Energiesystems sind technisch-systemische Analysen zu alternativen Transformations-Szenarien, in denen nicht nur mögliche Endzustände, sondern auch die Transformations-Pfade zu den Endzuständen berücksichtigt werden. Im Fokus der SEP stehen Fragestellungen zur grundsätzlichen technischen Ausgestaltung und Entwicklung des Energiesystems, sodass auch Investitions- und Desinvestitionsmaßnahmen zu (Infrastruktur-)Anlagen des Energiesystems adressiert werden. Ferner umfasst die Planungsreichweite einer SEP auch die Energienachfrage und die entsprechenden Anlagen, wobei diese teils auch aggregiert betrachtet werden.

Aus den noch bestehenden Unsicherheiten – sowohl hinsichtlich zukünftiger (Umwelt-) Entwicklungen als auch mit Bezug zur Güte aktueller Analyseergebnisse hinsichtlich der relativen Bewertung der potenziellen Transformations-Szenarien – schlussfolgern VORWERK ET AL. (2023), dass es rational sein könnte, eine SEP nicht einmalig, sondern regelmäßig durchzuführen, um durch eine Verzögerung einiger Entscheidungen zukünftige Wissenszuwächse berücksichtigen zu können.



Quelle: Vorwerk (2024, S. 94).

Die vorstehende Abbildung zeigt auf, wie eine SEP ablaufen könnte. Ausgangspunkt sind die bereits erwähnten Szenarioanalysen. Das Ergebnis eines Prozesses einer SEP stellt eine SES dar. In einer SES sind (1) die noch weiter in Betracht gezogenen Transformations-Szenarien, (2) die in einem Systemanpassungsplan (SAP) zusammengefassten (kurzfristig) durchzuführenden Maßnahmen für die weiter in Betracht gezogenen Transformations-Szenarien sowie (3) weitere für die Vorbereitung zukünftiger Entscheidungen relevante Maßnahmen und Aspekte aufzuzeigen. Dazu können

beispielsweise Hinweise auf Forschungs- und Entwicklungsbedarf oder die Bedeutung von Import-Strategien für bestimmte Energieträger zählen.

		Szenariospezifität von Maßnahmen			
		Nicht gegeben („No-regret-Maßnahmen")	**Niedrig** („Low-regret-Maßnahmen")	**Mittel**	**Hoch**
Zeitkritisch (zumindest in einem Szenario)	**Nein**	„can do"	...	...	„wait and see"
	Ja	„must do"	Schaffung von Optionen wohl oftmals sinnvoll	...	„Kritische Zelle" → ggf. weitere Analysen geboten

Quelle: Vorwerk (2024, S. 98).

Für die Erstellung eines SAP und damit auch für die Vorbereitung der Entscheidung, welche Transformations-Szenarien offengehalten bzw. weiterverfolgt werden sollten, werden die für die Transformations-Szenarien notwendigen Maßnahmen zunächst hinsichtlich ihrer Zeitkritikalität und Spezifität mit Bezug zu verschiedenen Optionsraum-Szenarien eingeordnet. Ein Optionsraum-Szenario ist durch die weiter in Betracht gezogenen Transformations-Szenarien gekennzeichnet und spannt somit einen gewissen „Optionsraum" auf. Durch die Einordnung der Maßnahmen können „no regret"-Maßnahmen, die kurzfristig umgesetzt werden sollten oder können, sowie „wait and see"-Maßnahmen, deren Umsetzung aktuell noch verzögert werden sollte, identifiziert werden (vgl. zweite Abbildung im Kasten). Zudem empfehlen VORWERK ET AL. (2023) für zeitkritische und spezifische Maßnahmen, weitere Untersuchungen und Überlegungen unter Berücksichtigung der Kostenfunktionen durchzuführen. Ziel ist es, festzustellen, welche Kosten durch das Schaffen bzw. Offenhalten von Optionen entstehen. Schließlich sind zur Vorbereitung der Auswahl-Entscheidung hinsichtlich den weiter in Betracht zu ziehenden Transformations-Szenarien die verschiedenen Optionsraum-Szenarien gegenüberzustellen. Dabei sind die Kosten durch das Schaffen bzw. die Offenhaltung von Transformations-Szenarien als auch der damit verbundene Wert zu berücksichtigen.

Kasten 1: Einblicke in eine Systementwicklungsstrategie für das Energiesystem auf Basis von VORWERK ET AL. (2023)

Die Grundgedanken von VORWERK ET AL. (2023) zu einer SES für das Energiesystem aufgreifend beinhaltet eine Strategie für den SGV (1) die noch weiter in Betracht gezogenen Endzustände, (2) die (kurzfristig) durchzuführenden Maßnahmen für die weiter in Betracht gezogenen Endzustände sowie (3) weitere Maßnahmen, die zum Teil für die Vorbereitung zukünftiger Entscheidungen und zum Teil für generelle Kostensenkungen von Relevanz sein können.[74]

Zunächst sind für die Entwicklung der Strategie bzw. die Ableitung von Handlungsempfehlungen die Maßnahmen zu identifizieren, die erforderlich sind, um die auf Basis der Erkenntnisse aus den Endzustands-Betrachtungen möglicherweise vorteilhaften Endzustände zu erreichen. Die identifizierten Maßnahmen sind hinsichtlich der Zeitkritikalität mit Bezug zu den betrachteten Endzuständen sowie

[74] Vgl. VORWERK ET AL. (2023, S. 57 f.).

hinsichtlich ihrer Spezifität einzuordnen. Zeitkritisch ist eine Maßnahme dann, wenn die Unterlassung einer (zeitnahen) Umsetzung damit einhergeht, dass einer der möglicherweise vorteilhaften Endzustände nicht mehr erreicht werden kann. Daher sind die Realisierungsdauern der Komponenten der Lkw-Systeme von entscheidender Bedeutung, um kritische Pfade zu erkennen. Spezifität liegt vor, wenn bestimmte Maßnahmen nur für den Aufbau von Lkw-Systemen erforderlich sind, die nicht in allen betrachteten Endzuständen eingesetzt werden. Zudem kann eine Maßnahme für einen Endzustand oder mehrere Endzustände spezifisch sein, wenn die Größe der Bereiche, die mit den unterschiedlichen Lkw-Systemen abgedeckt werden, sich in den Endzuständen unterscheidet.

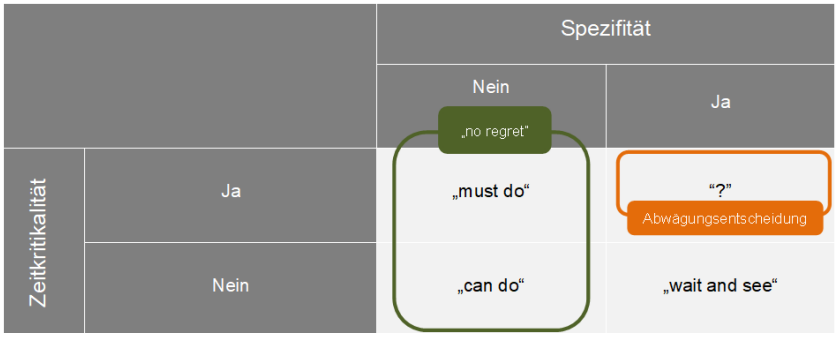


Abbildung 6: Einordnung von Maßnahmen der in Betracht gezogenen Endzustände für die Entwicklung einer Strategie für den SGV. Eigene vereinfachte Darstellung[75] in Anlehnung an Darstellung aus VORWERK ET AL. (2023)

Für die Abwägungsfrage, in welchem Umfang potenziell vorteilhafte Endzustände schließlich weiter offengehalten werden sollten, sind die Kosten und der Wert des Flexibilitätserhalts unter Berücksichtigung der zu erwartenden Wissenszuwächse abzuwägen. Der Wert des Flexibilitätserhalts hängt unter anderem mit den noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit der Endzustände zusammen und kann auch als eine Reduktion der Gefahren von „verpassten Chancen" interpretiert werden. Die Kosten des Flexibilitätserhalts sind insbesondere durch die (realisierten) spezifischen (Investitions-)Maßnahmen bedingt. Daher ist es empfehlenswert, im Rahmen von weiteren Untersuchungen und Überlegungen zu diesen (Investitions-)Maßnahmen und den jeweiligen Kostenfunktionen die Höhe der Kosten sowie die damit verbundenen Gefahren von „stranded assets", die mit dem Erhalt mehrerer Optionen bzw. mehrerer Endzustände einhergehen könnten, abzuschätzen. Denn für bestimmte Pfade spezifische Investitionen können im Kontext von Wissenszuwächsen und als Folge zukünftiger Entscheidungen für alternative Pfade signifikant an Wert verlieren oder vollständig entwertet werden. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Abwägungsentscheidung hinsichtlich eines temporären Flexibilitätserhalts (zukünftige) Entscheidungskosten nicht vollständig unbedacht bleiben sollten.[76] Insgesamt ist für die

[75] Da im Rahmen der Untersuchungen zum SGV der Untersuchungsgegenstand in kleinere Bereiche zerlegt wird und insgesamt nur eine geringere Anzahl an möglichen Endzuständen möglich ist, ist keine weitere Differenzierung hinsichtlich der Spezifität – wie bei der Einordnung der Maßnahmen für die Transformation des Energiesystems – erforderlich. Daher kann die Einordnung der Maßnahmen hier vereinfacht werden (vgl. zweite Abbildung in Kasten 1 für die Einordnung der Maßnahmen der Transformations-Szenarien für das gesamte Energiesystem).

[76] Die Offenhaltung mehrerer Optionen dürfte regelmäßig mit zu einem späteren Zeitpunkt anfallenden (Transaktions-)Kosten der Entscheidungsfällung und -durchsetzung einhergehen. Diese können insbesondere im

Abwägungsfrage im aktuellen Zeitpunkt auch der nächste Zeitpunkt, in dem eine Entscheidungsfällung bezüglich der weiter in Betracht zu ziehenden Endzustände erwartet wird, von Bedeutung. Es sei darauf hingewiesen, dass die Abwägungsfrage, ob zum aktuellen Zeitpunkt noch mehrere Endzustände – auch unter Inkaufnahme von Kosten und der Gefahr von „stranded assets“ – offengehalten werden sollten, aufgrund der hohen Komplexität im Rahmen der folgenden Untersuchungen qualitativ diskutiert wird.

Neben der Festlegung der weiter zu verfolgenden Endzustände, sowie den daraus resultierenden kurzfristig umzusetzenden Maßnahmen werden Maßnahmen, die für generelle Kostensenkungen und für die Vorbereitung von zukünftig anstehenden Entscheidungen von Relevanz sein können, betrachtet. Untersuchungen zu risikobehafteten Größen, die u. U. beeinflusst werden können, können dazu beitragen, die Eignung bestimmter Endzustände zu erhöhen und damit die Kosten der Transformation insgesamt zu senken.[77] Ferner ist der Frage nachzugehen, wie Wissenszuwächse generiert werden können, um zukünftig in einer verbesserten Weise die relative Vorteilhaftigkeit der weiter in Betracht gezogenen Endzustände bewerten zu können.

2.2.2.2 Fokus auf Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung

In dem vorherigen Abschnitt wurde grundsätzlich aufgezeigt, auf welche Weise Handlungsempfehlungen für den SGV in Deutschland abgeleitet werden können. Dabei wurden mögliche Implikationen von Entscheidungen anderer Länder oder der Europäischen Union (EU) auf die relative Bewertung der Lkw-Systeme sowie der Kombinationen in Deutschland vernachlässigt. In Abschnitt 2.2.2.2.1 wird nun die Rationalität für und die Vorgehensweise zur Berücksichtigung der europäischen Einbettung im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen beschrieben. Abschnitt 2.2.2.2.2 zeigt anschließend auf, welche grundsätzlichen (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen auf europäischer Ebene sowie auf nationaler Ebene auf Basis der Erkenntnisse aus den die europäische Einbettung berücksichtigenden Endzustands-Betrachtungen abgeleitet werden können.

2.2.2.2.1 Zunächst Endzustands-Betrachtungen …

Zunächst werden in diesem Abschnitt mögliche Hintergründe für unterschiedliche – in verschiedene Richtungen weisende – Entscheidungen in einzelnen Ländern aufgezeigt, wenn die Länder isoliert betrachtet werden und keinerlei Koordination erfolgt. Weiterhin werden grundsätzlich potenzielle Vorteile von koordinierten – in eine Richtung weisenden – Entscheidungen dargestellt. Abschließend wird in diesem Abschnitt erläutert, welche Implikationen sich aus potenziellen Vorteilen von koordinierten Entscheidungen auf das Agieren von Deutschland ergeben könnten.

POTENZIALE FÜR UNTERSCHIEDE IN DER RELATIVEN BEWERTUNG MÖGLICHER ENDZUSTÄNDE IN EINZELNEN EUROPÄISCHEN LÄNDERN BEI ABSTRAKTION DER EUROPÄISCHEN EINBETTUNG

Kontext von aus spezifischen langfristigen und kapitalintensiven Investitionen resultierenden Pfadabhängigkeiten von Relevanz sein. Vgl. auch KOTILAINEN ET AL. (2019, S. 576 ff.) und INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2023, S. 22).

[77] Vgl. VORWERK ET AL. (2023, S. 58).

Zunächst wird der Frage nachgegangen, ob grundsätzlich unterschiedliche Entscheidungen der europäischen Länder zu erwarten sind, wenn diese für die einzelnen Länder bei Abstraktion der europäischen Einbettung und somit bei isolierter Betrachtung der Länder getroffen werden.

Zur Beantwortung der Frage können die folgenden Aspekte von Bedeutung sein. Erstens können unterschiedliche relative Bewertungen auf eine Heterogenität der Länder zurückzuführen sein. Für die relative Bewertung von Lkw-Systemen und Kombinationen könnten beispielsweise ausschlaggebende Unterschiede hinsichtlich der Verkehrsleistung, der Charakteristika der nationalen Energiesysteme und auch der Temperaturen bestehen. Zweitens können sich auch industriepolitische Interessen der Länder auf die relative Bewertung der Lkw-Systeme und Kombinationen dieser auswirken. Im Rahmen der Untersuchungen in den Kapiteln 3 bis 5 werden daher potenzielle Einflussfaktoren für die Entscheidungen in den einzelnen Ländern beleuchtet, die zu in unterschiedliche Richtungen weisenden Entscheidungen führen könnten. Darauf basierend werden erste Prognosen zu möglichen Entscheidungen anderer Länder abgeleitet. Eine detaillierte Betrachtung anderer Länder geht über den Rahmen dieser Studie hinaus.

Bedarf und Vorteile einer Koordination der Entscheidungen und potenzielle Implikationen für die relative Bewertung möglicher Endzustände in einzelnen europäischen Ländern

Mit der Koordination von Entscheidungen, die in eine Richtung weisen, können Vorteile einhergehen und grundlegende Anforderungen der Nachfrage erfüllt werden. Erstens können im Zuge der Festlegung von technischen Standards eine technische Kompatibilität der Lkw-Systeme gewährleistet und Kostensenkungen ermöglicht werden.[78] Zweitens bedarf es neben der technischen Kompatibilität aufgrund der Anforderungen der Nachfrage nach einem grenzüberschreitenden Verkehr einer flächendeckenden Infrastruktur, die grundsätzlich eine Einsatzflexibilität der Lkw ermöglicht.[79] Im Rahmen dieser Studie wird eine länderübergreifende Einsatzflexibilität als Nutzungskompatibilität bezeichnet. Es ist allerdings zu beachten, dass bei der Betrachtung einer Kombination aus mehreren Lkw-Systemen die Nutzungskompatibilität nur für einzelne oder für alle Lkw-Systeme vorliegen kann.

Drittens können durch die Fokussierung auf weniger oder zumindest nicht alle Lkw-Systeme, die bei isolierter Betrachtung der Länder zu einem aus nationaler Sicht vorteilhaften Endzustand zählen würden, möglicherweise Kostensenkungspotenziale entstehen, die allerdings potenziellen Koordinationskosten gegenüberstehen. Die Kostensenkungspotenziale begründen sich durch Effekte auf Seiten der Infrastruktur und der Lkw. Mit Bezug zur Infrastruktur kann der Bedarf an flächendeckend zu errichtender Infrastruktur durch die Fokussierung auf weniger Lkw-Systeme sinken. Ebenso sind weitere Synergiepotenziale bei der Produktion der Infrastruktur und auch der Lkw denkbar.[80]

Es zeigt sich, dass im Fall von möglicherweise unterschiedlichen relativen Bewertungen der Lkw-Systeme und der Kombinationen bei isolierter Betrachtung in den einzelnen Ländern eine Koordination zum einen erforderlich ist, um der Anforderung der Nachfrage nach einer Einsatzflexibilität für den

[78] Vgl. hierzu Reinke (2014, S. 117 ff.).
[79] Vgl. Abschnitt 2.1.1.
[80] Vgl. Abschnitt 2.2.2.1.1.

grenzüberschreitenden Verkehr und somit nach einer Nutzungskompatibilität gerecht zu werden, und zum anderen mit weiteren gesamtwirtschaftlichen Vorteilen einhergehen kann. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Koordination der Entscheidungen mit Transaktionskosten verbunden ist und ferner auch Verteilungsfragen aufwerfen könnte.

NATIONALES ZIELSYSTEM IM KONTEXT DES EUROPÄISCHEN ZIELSYSTEMS SOWIE EUROPÄISCHE VERTEILUNGSFRAGEN

Die relative Bewertung von Lkw-Systemen und Kombinationen ist aus zwei Perspektiven möglich. Auf der einen Seite kann die europäische Gesamtsicht und auf der anderen Seite die nationale Sicht eingenommen werden. Die Betrachtung aus nationaler Sicht kann im Zuge der Berücksichtigung der Koordinationsvorteile allerdings von der in Abschnitt 2.2.2.1.1 dargestellten isolierten Betrachtung abweichen. Die gesamtwirtschaftlichen Koordinationsvorteile können sich unterschiedlich stark in den einzelnen Ländern oder teils sogar negativ ausprägen. Eine negative Ausprägung ist beispielsweise denkbar, wenn für die Erreichung der Nutzungskompatibilität die Infrastruktur eines weiteren Lkw-Systems in einem Land zu errichten wäre.

Grundsätzlich geht das europäische Gesamtoptimum, das sich auch unter Berücksichtigung der Kosten der Koordination ergibt, mit den größten Vorteilen einher. Im Rahmen dieser Studie wird angenommen, dass die Zuordnung der Koordinationsvorteile, ggf. auch durch ex post Kompensationen, so erfolgt, dass der aus europäischer Sicht beste Endzustand auch dem aus den unterschiedlichen nationalen Perspektiven bestem erreichbarem Endzustand entspricht.

ERREICHUNG DES VORZUGSWÜRDIGEN ENDZUSTANDS INFOLGE VON ZENTRALEN ODER TEILS AUCH DEZENTRALEN ENTSCHEIDUNGEN

Im Anschluss an die Überlegungen zu der Frage, welcher Endzustand sich aus gesamteuropäischer Sicht als vorzugswürdig erweist, stellt sich die Frage, wie der entsprechende Endzustand erreicht werden kann. Grundsätzlich können sowohl zentrale Entscheidungen als auch dezentrale Entscheidungen zur Erreichung des vorzugswürdigen Endzustands führen. Durch zentrale Entscheidungen kann ein Endzustand zielgerichtet angestrebt werden. Zentrale Entscheidungen können einerseits infolge von europäischer Kompetenz und andererseits auf Basis von Verhandlungslösungen einzelner oder aller Länder getroffen werden. Es sei hier angemerkt, dass es unklar ist, ob die Zuordnung der Vorteile der Koordination dabei so erfolgen würde, dass die (zentral getroffenen) Entscheidungen auch aus Sicht aller Länder die vorteilhaftesten Entscheidungen sind.[81]

Ferner könnten auch dezentrale Entscheidungen einzelner Länder dazu führen, dass der aus gesamteuropäischer Sicht vorzugswürdige Endzustand erreicht wird. Zunächst können die Koordinationsvorteile gehoben werden, wenn die Entscheidungen der Länder ohnehin, auch bei

[81] In diesem Kontext sei erwähnt, dass die Ermittlung der europäischen Verteilungseffekte stets mit einer hohen Komplexität einhergehen dürfte. Weiterhin ist unklar, in welchem Umfang Verteilungsfragen im Rahmen von Festlegungen infolge von europäischer Kompetenz Berücksichtigung finden. Im Rahmen von Verhandlungslösungen ist zu erwarten, dass Verteilungsfragen grundsätzlich adressiert werden. Weitere Untersuchungen dazu sind für die Umsetzung der in dieser Studie abgeleiteten Handlungsempfehlungen erforderlich. In dieser Studie erfolgen aufgrund von begrenzten Ressourcen grundsätzlich nur abstrakte Überlegungen, die keinen konkreten Bezug zum Unionsrecht aufweisen.

Abstraktion der europäischen Einbettung, in eine Richtung weisen würden, da im Rahmen der relativen Bewertungen der Lkw-Systeme und Kombinationen der Länder sich ein übereinstimmender Endzustand als vorteilhaft erweist. Ferner könnten die Koordinationsvorteile einen so geringen Umfang aufweisen, dass die rationalen Entscheidungen der Länder bei Abstraktion der europäischen Einbettung mit der rationalen Entscheidung aus gesamteuropäischer Sicht bei Berücksichtigung der Koordinationsvorteile übereinstimmen. Schließlich ist es auch denkbar, dass der vorteilhafte Endzustand durch dezentrale Entscheidungen erreicht wird, wenn ein Land vorangeht und von der Entscheidung des Landes eine Signalwirkung auf die anderen Länder ausgeht. In diesem Fall muss aber stets gegeben sein, dass die Länder, die nachziehen, auch ohne Berücksichtigung möglicher ex post Zuordnungen der Koordinationsvorteile bzw. Kompensationsleistungen von der Entscheidung für den aus gesamteuropäischer Sicht vorzugswürdigen Endzustand profitieren.

Für die Prognose von dezentralen Entscheidungen und deren Wirkungen kann auf Erkenntnisse der nicht-kooperativen Spieltheorie zurückgegriffen werden.[82] Dafür ist aber eine formalisierte Darstellung der Entscheidungsoptionen der Länder erforderlich, die mit einer hohen Komplexität und Unsicherheit verbunden sein dürfte. Zunächst sind durch den Einbezug risikobehafteter Größen in die Modellierung auch die Ergebnisse stets mit Unsicherheit behaftet. Ferner können die den Modellen zugrundeliegenden Annahmen die Realität nicht vollumfänglich umfassen, sodass die Aussagekraft stets begrenzt sein dürfte. Daher bietet es sich an, auch wenn laut Prognosen hinsichtlich des dezentralen Handelns der aus europäischer Perspektive vorzugswürdige Endzustand erreicht werden dürfte, sich nicht auf die dezentralen Aktivitäten zu verlassen, sondern durch zentrale Entscheidungen den Endzustand zielgerichtet anzustreben. Es sei auch darauf hingewiesen, dass zentrale Entscheidungen, die mit den Interessen der Länder korrespondieren, grundsätzlich – und auch regelmäßig zu relativ geringen Transaktionskosten im Rahmen der Koordination – umsetzbar sein dürften. Ferner sei angemerkt, dass für die Erreichung einer technischen Kompatibilität der Lkw-Systeme stets zentrale Entscheidungen von hoher Bedeutung sein dürften, sodass eine länderübergreifende Koordination in einem gewissen Ausmaß immer sinnvoll sein dürfte.

Zusammenfassend wird in diesem Abschnitt dargestellt, mit welchen Implikationen die Berücksichtigung von Aspekten der europäischen Einbettung auf nationale Endzustands-Betrachtungen einhergehen kann und welche Empfehlungen sich daraus im Hinblick auf die Erreichung eines vorteilhaften Endzustands ergeben. Ausgehend von den in Abschnitt 2.2.2.1.1 thematisierten möglichen Unsicherheiten hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit von Endzuständen bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung können auch im Rahmen von Endzustands-Betrachtungen unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung Ergebnisse entstehen, die keine eindeutigen Rückschlüsse ermöglichen, welches Lkw-System oder welche Kombination aus Lkw-Systemen aus heutiger Perspektive in der langen Frist aus europäischer Sicht vorteilhaft ist. Im folgenden Abschnitt werden grundsätzliche Empfehlungen hinsichtlich der Vorgehensweise zum Umgang mit diesen

[82] Eine umfassende Darstellung der Grundlagen zur Spieltheorie bieten HOLLER / ILLING / NAPEL (2019).

Unsicherheiten im europäischen Kontext erläutert, wobei die Option sequenziellen Entscheidens berücksichtigt wird.

2.2.2.2.2 … und anschließend Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der Option sequenziellen Entscheidens bei Unsicherheit

Analog zu den dargestellten Überlegungen in Abschnitt 2.2.2.1.2 kann es rational sein, vorläufig Flexibilität hinsichtlich der weiterhin in Betracht gezogenen Endzustände zu erhalten, um durch sequenzielle Entscheidungen zu erwartende Wissenszuwächse in die Auswahl des Endzustands bzw. der Endzustände einzubeziehen. In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, welche grundsätzlichen (kurzfristigen) Empfehlungen auf europäischer Ebene sowie auf nationaler Ebene unter Einbezug der Option sequenziellen Entscheidens auf Basis der Erkenntnisse aus den europäischen Endzustands-Betrachtungen abgeleitet werden können.

VORAB: EMPFEHLUNGEN MIT BEZUG ZU ZENTRALEN VORGABEN

Zentrale, länderübergreifende Entscheidungen setzen grundsätzlich eine Entscheidungskompetenz auf zentraler Ebene oder Verhandlungen zwischen den Ländern voraus.[83] Wenn auf zentraler Ebene Vorgaben festgelegt oder ausgehandelt werden können, ergeben sich unter Einbezug der in Abschnitt 2.2.2.1.2 dargestellten Grundgedanken zur Option sequenziellen Entscheidens grundsätzlich folgende Empfehlungen für die jeweiligen Konstellationen:

- Für Lkw-Systeme, die auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Endzustands-Betrachtungen für potenziell vorteilhafte Endzustände stets europaweit von Bedeutung sein werden und deren Hochlauf im Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele als zeitkritisch angesehen werden dürfte, sollten Vorgaben zu einem flächendeckenden Aufbau der Infrastruktur erarbeitet werden. Die Etablierung von Vorgaben kann als „must do“-Maßnahme[84] eingeordnet werden.
- Wenn dagegen der Hochlauf eines eindeutig europaweit aufzubauenden Lkw-Systems nicht zeitnah erforderlich sein dürfte, kann die Etablierung von Vorgaben für einen flächendeckenden Aufbau der Infrastruktur als nicht zeitkritisch und somit als „can-do“-Maßnahme[85] eingeordnet werden.
- Falls ein europaweiter Aufbau von Lkw-Systemen spezifisch für einige möglicherweise vorteilhafte Endzustände ist, aber der Hochlauf noch nicht sofort zur Erreichung des Effektivitäts-Ziels, eines klimaneutralen SGV, erforderlich ist, gibt es gewichtige Argumente, noch keine Vorgaben zu etablieren, sondern zunächst Wissenszuwächse abzuwarten. Die Etablierung von Vorgaben zu einer flächendeckenden Infrastruktur kann als „wait and see“-Maßnahme[86] eingeordnet werden.
- Wenn der Hochlauf dagegen zeitnah erfolgen müsste, um einen von mehreren möglicherweise vorteilhaften Endzuständen erreichen zu können, stellt sich die Frage, ob auch unter

[83] Vgl. Abschnitt 2.2.2.2.1.
[84] Vgl. Abbildung 6.
[85] Vgl. Abbildung 6.
[86] Vgl. Abbildung 6.

Inkaufnahme von Kosten temporär die Option der Erreichung mehrerer Endzustände offengehalten werden sollte. Wenn der Wert des Flexibilitätserhalts die Kosten grundsätzlich übersteigen dürfte, sollte dies erfolgen. In diesem Zusammenhang ist dann auch die Gefahr von „stranded assets“ in Kauf zu nehmen, wobei zu prüfen ist, wie diese so weit wie möglich begrenzt werden kann.

Grundsätzlich erscheint es im Fall von Unsicherheiten hinsichtlich der Bedeutung eines Lkw-Systems stets empfehlenswert zu sein, die Erarbeitung und Festlegung von technischen Standards auf zentraler Ebene voranzutreiben. Auch wenn die Gefahr besteht, dass die Standards unter Umständen nicht eingesetzt werden, fördert die gemeinsame Erarbeitung und Festlegung die Weiterentwicklung der Lkw-Systeme und den Wissensaustausch zwischen den Ländern. Zudem werden dadurch potenzielle Koordinationsvorteile zu geringen Kosten ermöglicht.

NATIONALES AGIEREN IM KONTEXT EUROPÄISCHER AKTIVITÄTEN

Im Rahmen dieser Studie stehen Handlungsempfehlungen für die deutsche Politik im Fokus. Da grundsätzlich angenommen wird, dass die Zuordnung der Koordinationsvorteile so erfolgt, dass aus europäischer Sicht vorteilhafte Endzustände auch aus nationaler Sicht vorteilhafte Endzustände sind, profitiert Deutschland davon, aus europäischer Sicht vorteilhafte Endzustände anzustreben. Daher sollte die deutsche Politik grundsätzlich entsprechend den oben dargestellten Empfehlungen hinsichtlich zentraler Vorgaben Einfluss auf europäische Aktivitäten nehmen. Dies kann im Rahmen von bi- und multilateralen Verhandlungen oder durch die Einflussnahme auf die zentralen Vorgaben in der EU erfolgen.

NATIONALES AGIEREN IN DEUTSCHLAND

Die Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Transformation des SGV für Deutschland basieren auf den Endzustands-Betrachtungen unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung, wobei grundsätzlich aus gesamteuropäischer Sicht vorteilhafte Endzustände angestrebt werden.[87] Es sei angemerkt, dass sich die weiter in Betracht zu ziehenden Endzustände von denen, die sich bei einer isolierten Betrachtung Deutschlands als vorteilhaft erweisen, unterscheiden können. Die Ableitung der (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen für das nationale Agieren in Deutschland erfolgt analog zu der in Abschnitt 2.2.2.1.2 dargestellten Vorgehensweise.

2.2.3 Struktur der Untersuchungen

Die Kapitel 3, 4 und 5 bilden den Kern der Untersuchungen in dieser Studie. Zum einen unterscheiden sich die Kapitel hinsichtlich der betrachteten klimaneutralen Lkw-Systeme, die in Abschnitt 2.1 vorgestellt worden sind, sowie der Tiefe der Betrachtung. Zum anderen wird in den Abschnitten der folgenden Kapitel – und dabei insbesondere in den Abschnitten der Kapitel 4 und 5 – die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Vorgehensweise reflektiert.

- In Kapitel 3 wird zunächst übergreifend die Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen diskutiert, wobei nicht auf die unterschiedlichen E- und K-Lkw-Systeme eingegangen wird. Die

[87] Vgl. Abschnitt 2.2.2.2.1.

Endzustands-Betrachtungen erfolgen für Deutschland in Abschnitt 3.1 bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung, während in Abschnitt 3.2 die europäische Einbettung Berücksichtigung findet. Abschnitt 3.3 stellt dar, welche Schlussfolgerungen hinsichtlich des Handlungsbedarfs auf Basis der Untersuchungen zur Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen abgeleitet werden können.

- Kapitel 4 stellt den Schwerpunkt der Untersuchungen dar und befasst sich mit der Ausgestaltung des Bereichs des SGV, der zukünftig durch E-Lkw-Systeme erfolgt. In Abschnitt 4.1 finden Untersuchungen bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung statt. Diese gliedern sich in Endzustands-Betrachtungen in Abschnitt 4.1.1 und die Entwicklung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen im Kontext der Berücksichtigung von Unsicherheiten und zu erwartenden Wissenszuwächsen in Abschnitt 4.1.2. Abschnitt 4.2 zeigt die Implikationen der Berücksichtigung der europäischen Einbettung auf die Endzustands-Betrachtungen in Abschnitt 4.2.1 sowie die (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Agierens in Deutschland sowie im europäischen Kontext in Abschnitt 4.2.2 auf.
- In Kapitel 5 werden K-Lkw-Systeme betrachtet. Das Kapitel ist grundsätzlich analog zu Kapitel4 aufgebaut. Der Umfang und die Tiefe der Untersuchungen fallen im Vergleich zu den Untersuchungen der E-Lkw-Systeme in Kapitel 4 allerdings deutlich geringer aus. Abschnitt 5.1.1 beinhaltet Endzustands-Betrachtungen bei Abstraktion der europäischen Einbettung, um die Basis für die in Abschnitt 5.1.2 dargestellten (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen unter Einbezug der Option sequenziellen Entscheidens zu entwickeln. In Abschnitt 5.2 werden Aspekte der europäischen Einbettung berücksichtigt.
- Kapitel 6 fasst die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie sowie die abgeleiteten (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen zusammen. Es werden die weiter zu verfolgenden Endzustände sowie die kurzfristig umzusetzenden Maßnahmen zur Erreichung der Endzustände sowie zur Weiterentwicklung der Optionen und zur Vorbereitung zukünftiger Auswahlentscheidungen dargestellt.

2.3 Einordnung von vorliegenden (Forschungs-)Erkenntnissen zu Kosten und zum Vergleich von EE-Lkw-Systemen hinsichtlich der Relevanz für die folgenden Untersuchungen

In den folgenden Untersuchungen sind (Forschungs-)Erkenntnisse im Rahmen der Entwicklung und Bewertung denkbarer Endzustände sowie der Systematisierung der für die Erreichung potenziell vorteilhafter Endzustände erforderlichen Maßnahmen hinsichtlich der Spezifität und Zeitkritikalität einzubeziehen. In diesem Abschnitt werden vorliegende (Forschungs-)Erkenntnisse hinsichtlich der Relevanz für die Untersuchungen eingeordnet. Es wird einerseits aufgezeigt, auf welcher Basis die folgenden Untersuchungen aufbauen. Andererseits werden Grenzen des aktuellen Wissenstands skizziert, die zum Teil durch weitere Analysen verschoben werden könnten und im Rahmen der folgenden Untersuchungen eigene Plausibilitätsüberlegungen und die Variation von Annahmen erforderlich machen.

Für die in Kapitel 3 betrachtete „E vs. K“-Frage und die in Kapitel 5 beleuchtete „K“-Frage werden im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen wesentliche Einflussfaktoren identifiziert und deren

Implikationen für die Gegenüberstellung der Endzustände diskutiert. Auf detaillierte Betrachtungen wird in diesen Kapiteln verzichtet, da nicht zu erwarten ist, dass eine höhere Detailtiefe sich (wesentlich) auf die kurzfristigen Handlungsempfehlungen auswirken würde. Deutlich detaillierte Betrachtungen beinhaltet Kapitel 4 mit Bezug zur „E"-Frage, was auf die große zukünftige Bedeutung des Bereichs der E-Lkw-Systeme zurückzuführen ist.[88] Im Zuge der detaillierten Betrachtungen steigt auch der Wissensbedarf, sodass folgend vorwiegend Untersuchungen und (Forschungs-)Erkenntnisse zu E-Lkw-Systemen hinsichtlich der Relevanz eingeordnet werden.

Für die Einordnung werden fünf Aspekte, durch die sich die vorliegenden Untersuchungen unterscheiden und die für die Relevanz der (Forschungs-)Erkenntnisse für die folgenden Untersuchungen entscheidend sind, beleuchtet. Es sei angemerkt, dass zwischen den Aspekten Interdependenzen bestehen können. Weiterhin hat die Einordnung keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern dient zum einen dazu, besonders relevante vorliegende Untersuchungen hervorzuheben. Zum anderen werden exemplarisch die Grenzen von vorliegenden Untersuchungen zur Transformation des SGV aufgezeigt und daraus folgend der aktuelle Wissensstand den Wissensbedarfen für die folgenden Untersuchungen gegenübergestellt.

ZEITHORIZONT

In den Endzustands-Betrachtungen, die einen Teil der folgenden Untersuchungen darstellen, steht der Zeitpunkt nach Abschluss der Transformation – und damit ein klimaneutraler SGV – im Mittelpunkt. Daher sind vorliegende (Forschungs-)Erkenntnisse, die eine aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive vorteilhafte Gestaltung des klimaneutralen SGV beleuchten, grundsätzlich von hoher Relevanz für die folgenden Untersuchungen.[89] Allerdings können auch Untersuchungen zur potenziellen Entwicklung des schweren SGV in der kurzen und mittleren Frist einbezogen werden. Denn auf dieser Basis dürften beispielsweise Trends der Kosten- und Umweltentwicklungen zu erkennen sein. Da die Unsicherheiten der Prognosen mit zunehmender Zeitspanne wachsen, erscheint es durchaus plausibel, auch Prognosen für die mittlere Frist einzubeziehen und potenzielle Entwicklungen im über den Prognosezeitraum hinausgehenden Zeitverlauf zu diskutieren. Dagegen besteht hinsichtlich der Relevanz der (Forschungs-)Erkenntnisse zur technisch-systemischen Ausgestaltung der Lkw-Systeme oder der Kombinationen von Lkw-Systemen, die im Rahmen von Untersuchungen mit Fokus auf die kurze und mittlere Frist erlangt worden sind, Unklarheit. Denn es ist infolge von Umwelt- und insbesondere Technologie- und Kostenentwicklungen plausibel, dass in der kurzen und mittleren Frist vorteilhafte technisch-systemische Ausgestaltungsvarianten in der langen Frist z. T. nicht mehr mit den größten Vorteilen einhergehen können. Exemplarisch sei darauf hingewiesen, dass in den die kurze

[88] In Kapitel 3 wird erläutert, warum ein Großteil des SGV vor dem Hintergrund des den folgenden Untersuchungen zugrundeliegenden Zielsystems zukünftig durch E-Lkw-Systeme abgedeckt werden sollte.

[89] Vgl. dazu u. a. UNTERLOHNER (2021), PROGNOS / ÖKO-INSTITUT / WUPPERTAL-INSTITUT (2021), BOSTON CONSULTING GROUP / PROGNOS (2018) und BOSTON CONSULTING GROUP (2021) zur Entwicklung des SGV im Allgemeinen sowie PLÖTZ ET AL. (2021) und SHOMAN ET AL. (2023) zum LI-Bedarf bei vollständiger Elektrifizierung.

und mittlere Frist adressierenden Untersuchungen aufgrund der noch nicht in Serienfertigung verfügbaren MCS-LI verhältnismäßig niedrige Ladeleistung der P-S-LI angenommen werden.[90]

FAHRZEUGKLASSEN, EINSATZPROFILE UND ANFORDERUNGEN DER EINSATZFLEXIBILITÄT

Die vorliegenden Untersuchungen zum schweren SGV umfassen unterschiedliche Fahrzeugklassen, und weisen Annahmen und Erkenntnisse teils aggregiert aus.[91] Dadurch sind Gegenüberstellungen unterschiedlicher Untersuchungen nur begrenzt möglich. Zudem basieren die Erkenntnisse zur technisch-systemischen Ausgestaltung der Lkw-Systeme nicht zuletzt auf den jeweiligen Annahmen zu den Einsatzprofilen der Lkw. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie sind unter den folgenden zwei Prämissen erlangte (Forschungs-)Erkenntnisse von Relevanz: Erstens ist für alle Lkw eine Einsatzflexibilität gewährleistet und die Lkw werden nicht für spezifische Touren ausgelegt. Zweitens wird Laden und Tanken in der 45 Min.-Pause ermöglicht und das Spektrum an möglichen Ausgestaltungsvarianten nicht dahingehend eingeschränkt.[92]

UMFANG UND DETAILGRAD DER (INTEGRIERTEN) TECHNISCH-SYSTEMISCHEN ANALYSEN FÜR DEUTSCHLAND

Für die Entwicklung und Bewertung denkbarer Endzustände, die durch ein Lkw-System oder einer Kombination aus Lkw-Systemen gekennzeichnet sein können, sind zahlreiche Interdependenzen zu berücksichtigen. Diese umfassen zum einen mit Bezug zu einzelnen Lkw-Systemen die Interdependenzen zwischen den technischen Komponenten und den unterliegenden Teilgütern. Weiterhin wird die technisch-systemische Ausgestaltung auch von der Größe des Lkw-Systems beeinflusst, die wiederrum Wirkungen auf die Kostenentwicklungen haben kann, die sich letztlich auch auf die Vorteilhaftigkeit von technisch-systemischen Ausgestaltungsvarianten niederschlagen kann. Daher sind auch Interdependenzen zwischen der technisch-systemischen Ausgestaltung des Lkw-Systems und den Umwelt- und insbesondere Kostenentwicklungen zu berücksichtigen. Für Endzustände, die durch eine Kombination aus mehreren Lkw-Systemen charakterisiert sind, sind weiterhin die Interdependenzen zwischen den Lkw-Systemen zu betrachten.

Die vorliegenden Untersuchungen unterscheiden sich hinsichtlich des Umfangs und des Detailgrads, sodass vorgenannte Interdependenzen teils nicht vollständig berücksichtigt werden. Technisch-systemische Analysen, die die vorgenannten Interdependenzen umfassend adressieren, und auf dessen Basis vorteilhafte Endzustände (direkt) identifiziert und bewertet werden können, sind nicht bekannt. Allerdings bieten vorliegende (Forschungs-)Erkenntnisse aus Untersuchungen, die Teilaspekte berücksichtigen, Anhaltspunkte für die folgenden Untersuchungen.

Gesamtenergiesystemstudien bieten erste Anhaltspunkte zu möglicherweise vorteilhaften Endzuständen und möglichen Kosten- und Umweltentwicklungen. Der Detailgrad reicht aber nicht aus,

---

[90] Vgl. z.B. AGORA VERKEHRSWENDE IN KOOPERATION MIT TRANSPORT AND ENVIRONMENT (2022), die aufgrund des Fokus auf das Markthochlaufpotenzial in der kurzen Frist nur Ladeleistungen bis 500 kW berücksichtigen.

[91] Beispielsweise wird der LI-Bedarf in GÖCKELER ET AL. (2023) für alle Lkw mit einem zGG ab 3,5 t ausgewiesen. Der Anteil der LI für Lkw mit einem zGG von mehr als 12 t kann auf dieser Basis nur abgeschätzt werden.

[92] Beispielsweise werden in UNTERLOHNER (2021) die Batteriekapazitäten der B-Lkw so ausgelegt, dass Einzelfahrstrecken ohne Laden möglich sind. Welche Implikationen geringere Batteriekapazitäten und die Errichtung von Netz-LI haben, kann daraus nicht erschlossen werden.

um wesentliche Einflussgrößen zu identifizieren und potenziell vorteilhafte Endzustände zu entwickeln.[93] Im Gegensatz dazu wird in UNTERLOHNER (2021) ein Vergleich möglicher Technologieoptionen auf Basis von Systemkosten vorgestellt. Die technisch-systemische Ausgestaltung und somit die Auslegung der Komponenten der betrachteten Lkw-Systeme wird aufgezeigt. Das Spektrum an berücksichtigten Ausgestaltungsoptionen ist allerdings begrenzt und Kombinationen von mehreren Lkw-Systemen im Endzustand werden nicht berücksichtigt. Ferner liegen einige Untersuchungen zur Entwicklung des SGV auf Basis von Betrachtungen der Gesamtnutzungskosten (engl. total cost of ownership (TCO)) von Lkw für Transportunternehmen vor, denen allerdings unterschiedliche Kostenpositionen zugrunde liegen.[94] Im Rahmen der TCO-Betrachtungen werden Infrastrukturkosten teils vernachlässigt[95] und teils auf die Energiekosten aufgeschlagen.[96] sodass Netzwerkeffekte nicht berücksichtigt werden oder eine Abschätzung zur Größe des Lkw-Systems vorab zu den Analysen zu treffen ist. In TCO-Betrachtungen, die auch OB-Lkw umfassen, werden auch die L-O-LI-Strecken vorab festgelegt, sodass sich aus diesen Untersuchungen keine Erkenntnisse hinsichtlich vorteilhafter Ausgestaltungsoptionen der L-O-LI ableiten lassen.[97] Weiterhin werden im Rahmen von TCO-Betrachtungen z. T. umfangreich Annahmen zum institutionellen Rahmen, wie beispielsweise zur CO2-Bepreisung sowie zur Anlastung der Infrastrukturkosten, einbezogen. Letztlich steht in TCO-Betrachtungen nicht die aus gesamtwirtschaftlicher Sicht vorteilhafte Ausgestaltung, sondern die (rationale) Entscheidungsfällung von Lkw-Betreibern unter bestimmten Rahmenbedingungen im Fokus. Trotz der differierenden Erkenntnisziele bieten TCO-Betrachtungen – insbesondere im Kontext von zukünftigen Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen – Anhaltspunkte für die folgenden Untersuchungen.

Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Ausgestaltung der LI[98] und insbesondere der Ausgestaltung der Netz-LI[99], wobei sich der Umfang des Einsatzes von B-Lkw unterscheidet. Von besonderer Bedeutung für die folgenden Untersuchungen sind die technisch-systemischen Analysen zur LI von PLÖTZ ET AL. (2021), die potenzielle Einsparungen von P-S-LI durch L-O-LI im Bereich der Netz-LI aufzeigen, wenn der SGV ausschließlich durch E-Lkw erfolgt. Technisch-systemische Betrachtungen zur H2-BTI liegen aktuell nur in sehr geringem Umfang vor.[100] Schließlich liegen auch (Forschungs-)Erkenntnisse aus stark abgegrenzten Untersuchungen zu Kostenentwicklung von wesentlichen Komponenten der B- und H2-Lkw[101], zur Dimensionierung von Stromnetzanschlüssen der

[93] Vgl. dazu PROGNOS / ÖKO-INSTITUT / WUPPERTAL-INSTITUT (2021), BOSTON CONSULTING GROUP / PROGNOS (2018) und BOSTON CONSULTING GROUP (2021).

[94] Vgl. dazu AGORA VERKEHRSWENDE IN KOOPERATION MIT TRANSPORT AND ENVIRONMENT (2022), TOL ET AL. (2022).

[95] Vgl. HACKER ET AL. (2020, S. 164).

[96] Vgl. z.B. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 62 ff.) und JÖHRENS ET AL. (2022, S. 33).

[97] Vgl. dazu JÖHRENS ET AL. (2022), WIETSCHEL ET AL. (2017), HACKER ET AL. (2020) und JÖHRENS ET AL. (2020). Weiterhin sei in diesem Kontext angemerkt, dass Erkenntnisse zur Ausgestaltung des L-O-LI-Netzes z. T. unter der Annahme eines Einsatzes von Hybrid-Lkw, die auch mit einem Pantographen ausgestattet sind, erfolgt ist. Daher können daraus nicht direkte Schlussfolgerungen für ein OB-Lkw-System gezogen werden.

[98] Vgl. z.B. SPETH / PLÖTZ (2024), SUZAN / MATHIEU (2021), SPETH ET AL. (2022), MENTER ET AL. (2023), PLÖTZ / SPETH / ROSE (2020), KASTEN ET AL. (2022).

[99] Vgl. insbesondere SHOMAN ET AL. (2023) und PLÖTZ ET AL. (2021).

[100] BASMA / ZHOU / RODRÍGUEZ (2022) bieten einen ersten Überblick zum Bedarf an H2-BTI.

[101] Vgl. dazu LINK ET AL. (2024).

Ladestandorte im Bereich der Netz-LI[102] und zu Wirkungen von Lkw-Systemen auf den Stromsektor[103] vor, die in die folgenden Untersuchungen einbezogen werden.

INTERESSEN ANDERE LÄNDER UND VORTEILE DURCH LÄNDERÜBERGREIFENDE ODER EUROPÄISCHE KOORDINATION

Analog zu Untersuchungen für Deutschland können auch für weitere europäische Länder Untersuchungen zum zukünftigen SGV, die größtenteils TCO-Betrachtungen darstellen,[104] sowie Untersuchungen zum LI-Bedarf[105] in die folgenden Untersuchungen einbezogen werden. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass andere Länder nicht so detailliert im Rahmen dieser Studie betrachtet werden. Umfassende Untersuchungen zu den Interdependenzen der Ausgestaltung der Endzustände in Europa und möglichen Koordinationsvorteilen sind nicht bekannt.[106]

ZIRKELSCHLUSSPROBLEME

Die Untersuchungen in dieser Studie dienen dazu, politische Handlungsempfehlungen abzuleiten und stellen somit die Basis für die Ausgestaltung von Institutionen und politisches Vorgehen dar. Daher sind zwei mögliche Zirkelschlussprobleme zu beachten. Da technisch-systemische Analysen die Basis für die Ausgestaltung der Institutionen darstellen, sind institutionelle Aspekte im Rahmen der Analysen so weit wie möglich auszuklammern. Dies ist allerdings nicht vollumfänglich möglich, da Kostenschätzungen in die technisch-systemischen Analysen einfließen, die auch von der Gestaltung der Institutionen beeinflusst werden. In diesem Kontext sei exemplarisch darauf hingewiesen, dass die Nutzungsdauer von Komponenten auch durch die Amortisationszeit beeinflusst werden könnte, die wiederrum von institutionellen Aspekten abhängig ist. Somit kann das Zirkelschlussproblem nicht vollständig aufgelöst werden. Das zweite Zirkelschlussproblem ergibt sich, wenn im Rahmen der Untersuchungen, die auf die Ableitung von Handlungsempfehlungen zum politischen Vorgehen abzielen, Prognosen einbezogen werden, die auf Annahmen zum politischen Vorgehen basieren. Dies dürfte bei Prognosen von Marktakteuren regelmäßig der Fall sein. Daher erscheint es plausibel zu sein, Erkenntnisse aus Untersuchungen zum SGV, die umfangreich auf Annahmen von Marktakteuren basieren, letztlich nur am Rande im Kontext der Frage einer vorteilhaften technisch-systemischen Ausgestaltung von Lkw-Systemen oder Kombinationen dieser einzubeziehen.

FAZIT

Insgesamt liegen einige (Forschungs-)Erkenntnisse zur Transformation des schweren SGV hin zur Klimaneutralität vor. Integrierte Untersuchungen zur potenziell vorteilhaften Ausgestaltung des SGV in der langen Frist, die eine direkte Ausgangsbasis für die Endzustands-Betrachtungen darstellen können,

---

[102] Vgl. dazu BURGES / KIPPELT (2021) und KIPPELT ET AL. (2022).

[103] Vgl. z.B. GAETE-MORALES ET AL. (2024).

[104] Beispielsweise sind SUZAN / MATHIEU (2021) , INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022), BASMA / ZHOU / RODRÍGUEZ (2022), BASMA / SABOORI / RODRÍGUEZ (2021), BASMA / RODRÍGUEZ (2023a) und NOLL ET AL. (2022) zu erwähnen.

[105] Z.B. SUZAN / MATHIEU (2021), SHOMAN ET AL. (2023), TRAFFIX VERKEHRSPLANUNG GMBH / UMWELTBUNDESAMT GMBH / E7 ENERGY INNOVATION & ENGINEERING (2023).

[106] Es sei aber erwähnt, dass in BÖRJESSON / PROOST (2024) mögliche Koordinationsvorteile mit Bezug zum Aufbau von L-O-LI in einer abstrakten Weise betrachtet werden.

sind nicht bekannt. Nichtsdestotrotz bieten vorliegende Untersuchungen und (Forschungs-)Erkenntnisse Anhaltspunkte für die Endzustands-Betrachtungen und insbesondere einen umfangreichen Input bezüglich der Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen, aber umfassen nicht die Breite bzw. adressieren nicht in vollem Umfang die Fragestellung der für die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Vorgehensweise erforderlichen Untersuchungen. Daher werden im Rahmen der folgenden Untersuchungen (Forschungs-)Erkenntnisse, die im Hinblick auf die folgenden Untersuchungen von Relevanz sind, auch wenn (nur) einzelne (Teil-)aspekte adressiert werden, zusammengetragen, eingeordnet und durch eigene Plausibilitätsüberlegungen ergänzt.

3 *E- vs. K-Frage:* Relative Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen

In diesem Kapitel wird auf Basis von Endzustands-Betrachtungen die Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen in Deutschland – zunächst in Abschnitt 3.1 unter Abstraktion und im Anschluss in Abschnitt 3.2 unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung – untersucht. Abschnitt 3.3 beinhaltet die daraus resultierenden grundsätzlichen Schlussfolgerungen für Handlungsempfehlungen, wobei hier zunächst die Option sequenziellen Entscheidens keine Berücksichtigung findet. Weiterführende Untersuchungen erfolgen zu E-Lkw-Systemen in Kapitel 4 und zu K-Lkw-Systemen in Kapitel 5.

3.1 Endzustands-Betrachtungen für Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung

In der ersten Gegenüberstellung von E- und K-Lkw-Systemen in Deutschland wird zunächst die Energieeffizienz als Kriterium für die Entscheidung zwischen den Lkw-Systemen in den Fokus der Betrachtung gerückt. Im Anschluss wird die Rationalität von einer Kombinationslösung aus E- und K-Lkw-Systemen im Endzustand erörtert.

GEGENÜBERSTELLUNG VON E- UND K-LKW-SYSTEMEN MIT FOKUS AUF DIE ENERGIEEFFIZIENZ

Der Fokus wird auf die Energieeffizienz gelegt, da diese sich wesentlich auf den Vergleich der Gesamtkosten unterschiedlicher Lkw-Systeme in der langen Frist auswirken dürfte. Zum einen sinkt mit einer höheren Energieeffizienz der Energiebedarf und somit auch die Energiekosten. Zum anderen nimmt mit einer Reduktion des Energiebedarfs auch die Gefahr der Abhängigkeit von Ressourcenimporten ab, was wiederrum mit tendenziell geringeren Kosten im Kontext des Umgangs mit Risiken einhergehen dürfte.

Grundsätzlich weisen E-Lkw-Systeme eine deutlich höhere Energieeffizienz als K-Lkw-Systeme auf. Der Gesamtwirkungsgrad, der das Verhältnis von Antriebsenergie zur elektrischen Energie angibt, beträgt bei einem E-Lkw ca. 73 bis 77 % und könnte im Jahr 2050 bei 81 % liegen, während der Gesamtwirkungsgrad von H2-Lkw aktuell 31 bis 33 % beträgt und perspektivisch in Höhe von ca. 42 % erwartet wird. Der im Vergleich zu E-Lkw geringere Gesamtwirkungsgrad von H2-Lkw ist auf die Energieumwandlungsverluste bei der Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse und bei der Strombereitstellung in der Brennstoffzelle sowie weiterhin auf die Verluste beim Transport und der Verteilung des Wasserstoffs zurückzuführen. Der Gesamtwirkungsgrad eines f- (und g-)SKW-Lkw liegt aktuell zwischen 21 und 23 % (und 21 und 22 %) und könnte sich in der langen Frist laut aktueller Prognosen auf 29 % (und 28 %) erhöhen. Eine Ursache für den verhältnismäßig geringen Wirkungsgrad ist, dass E- und H2-Lkw-Systeme mit einem Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von 95 % angetrieben werden, während der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors nur 42 % entspricht.[107] Die Unterschiede zwischen g- und f-SKW-Lkw-System sind dadurch begründet, dass der Transport und die Verteilung von g-SKW mit höheren Verlusten einhergehen, die durch die geringeren Verluste bei der

[107] Die Angaben zum Gesamtwirkungsgrad sind aus GÖCKELER ET AL. (2020, S. 44) und UNTERLOHNER (2021, S. 43) entnommen.

Produktion von g-SKW im Vergleich zu f-SKW nicht ausgeglichen werden.[108] Es sei darauf hingewiesen, dass die Angaben zum Gesamtwirkungsgrad durch die bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der technisch-systemischen Ausgestaltung der Lkw-Systemen als erste Abschätzung einzuordnen sind.

Weitere bedeutende Kostenpositionen der Lkw-Systeme insgesamt dürften neben den Energiekosten insbesondere die Investitionskosten für Lkw und Infrastrukturen sein. Diese dürften allerdings im Kontext des Vergleichs von E- und K-Lkw-Systemen von geringerer Relevanz sein, da auf die lange Sicht geringere Kostenunterschiede zu erwarten und nach einer ersten Abschätzung auch im Vergleich zum effizienteren H2-Lkw-System Kostenvorteile für E-Lkw-Systeme denkbar sind.[109] Schließlich ist es aufgrund der eindeutigen Vorteile von E-Lkw-Systemen im Hinblick auf die Energieeffizienz grundsätzlich zu empfehlen, den Großteil des SGV durch E-Lkw-Systeme abzudecken. Dadurch sollte ein E-Lkw-System in jedem Fall in dem anzustrebenden Endzustand oder den anzustrebenden Endzuständen inbegriffen sein.

Rationalität für eine Kombination aus E- und K-Lkw-Systemen im Endzustand

Trotz der grundsätzlich zu erwartenden Vorteile von E- gegenüber K-Lkw-Systemen hinsichtlich der Energie- und der Kosteneffizienz gibt es Gründe, die auch für die Etablierung von K-Lkw-Systemen in dem anzustrebenden Endzustand oder den Endzuständen sprechen. Diese ergeben sich einerseits aus Anforderungen von sehr speziellen Bereichen des SGV, wie z.B. aus den Bereichen der Schwerlast- und Sondertransporte, und außerdem von sonstigen Nachfragebereichen, wie dem Bauwesen und Militär.[110] Denn es ist denkbar, dass nicht alle speziellen Anforderungen durch E-Lkw-Systeme abgedeckt werden können. Andererseits können K-Lkw-Systeme im Hinblick auf ein Risiko-Management von Bedeutung sein, um eine grundlegende Versorgung, wie die Lebensmittelversorgung, durch ein zweites Lkw-System im Fall von (drohenden) Störungen oder gar Ausfällen des E-Lkw-Systems temporär gewährleisten zu können. Dafür wäre ein flächendeckender Aufbau von (mindestens) einem K-Lkw-System erforderlich. Es ist aktuell denkbar, dass die Etablierung eines flächendeckenden K-Lkw-Systems auch schon zur Abdeckung der speziellen Anforderungen, die nicht durch E-Lkw-Systeme bedient werden können, notwendig ist, oder, dass die zusätzlichen Kosten für den flächendeckenden Aufbau geringer sind als die Kosten für die Etablierung von in analoger Weise

---

[108] Vgl. Unterlohner (2021, S. 43).

[109] Im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs sind bei der Betrachtung der Investitionskosten auch die Nutzungsdauern der Komponenten einzubeziehen. Bei sehr langen Nutzungsdauern fallen Investitionskostenunterschiede weniger stark ins Gewicht. Insbesondere die Infrastrukturen sind durch lange Nutzungsdauern geprägt, wobei hinsichtlich der Kostenunterschiede Unsicherheiten bestehen. Mit Bezug zu den Investitionskosten für Lkw werden auch langfristig geringere Investitionskosten für f-SKW-Lkw als für E-Lkw erwartet, während die Investitionskosten für H2-Lkw die für E-Lkw allerdings überschreiten könnten. Vgl. dazu Unterlohner (2021, S. 90). In Basma / Rodríguez (2023a, S. 15) wird auch aufgezeigt, dass die Herstellungskosten für B-Lkw die von H2-Lkw für die meisten Fahrzeugtypen unterschreiten. Für den Bereich des schweren SGV mit täglichen Fahrten von über 500 km liegen die Herstellungskosten der B- und H2-Lkw mit einer Differenz von +/- 5 % sehr nah beieinander, sodass diese sich nicht signifikant auf die Technologiewahl auswirken dürften. Es ist allerdings zu bedenken, dass die Reichweiten von B-Lkw und H2-Lkw in Basma / Rodríguez (2023a, S. 11) so ausgelegt werden, dass Tanken und Laden während der täglichen Fahrten nicht erforderlich ist. Mit der Annahme, dass Lade- und Tankoptionen während der täglichen Fahrten zur Verfügung stehen, sind die B-Lkw den H2-Lkw im Hinblick auf die Herstellungskosten – analog zu den betrachteten Fahrzeugtypen mit einer Reichweite bis zu 500 km – überlegen.

[110] Vgl. dazu International Transport Forum (ITF) (2023, S. 15).

wirkenden Instrumenten zur Absicherung des E-Lkw-Systems. Wenn aus den vorgenannten Gründen (mindestens) ein K-Lkw-System flächendeckend aufgebaut werden sollte, ergibt sich die institutionelle Designaufgabe, zu verhindern, dass K-Lkw-Systeme in einem Maße genutzt werden, das aus gesamtwirtschaftlicher Sicht – gerade auch mit Blick auf Ressourcenabhängigkeiten – nicht vorteilhaft ist.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass eine Kombination von E- und K-Lkw-Systemen errichtet werden sollte, wobei der Bereich des E-Lkw-Systems oder der E-Lkw-Systeme signifikant größer sein sollte als der des K-Lkw-Systems oder der K-Lkw-Systeme. Eine vertiefte Betrachtung der Ausgestaltung des Bereichs der K-Lkw-Systeme erfolgt in Kapitel 5 im Nachgang zu den Untersuchungen zur Ausgestaltung des Bereichs für E-Lkw-Systeme in Kapitel 4.

3.2 Endzustands-Betrachtungen für Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung

Folgend wird untersucht, ob sich die relative Bewertung potenzieller Endzustände des SGV aus der deutschen Perspektive durch die Berücksichtigung der europäischen Einbettung ändern könnte. Dafür werden zunächst die Potenziale für unterschiedliche Einschätzungen hinsichtlich der relativen Eignung von Lkw-Systemen und Kombinationen dieser in europäischen Ländern diskutiert und anschließend mögliche Implikationen für die Endzustands-Betrachtungen aus der deutschen Perspektive aufgezeigt.

POTENZIALE FÜR UNTERSCHIEDE IN DER RELATIVEN BEWERTUNG MÖGLICHER ENDZUSTÄNDE IN EINZELNEN EUROPÄISCHEN LÄNDERN BEI ABSTRAKTION DER EUROPÄISCHEN EINBETTUNG

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Bewertungen zur relativen Vorteilhaftigkeit von E- und K-Lkw-Systemen für viele andere europäische Länder ähnlich zu der Bewertung für Deutschland ausfallen. Daher ist es wahrscheinlich, dass auch in vielen anderen Ländern größtenteils auf E-Lkw-Systeme zurückgegriffen werden sollte und eine Kombination aus E- und K-Lkw-Systemen rational sein könnte. Es könnte allerdings auch Länder geben, für die nicht so eindeutig empfohlen werden kann, dass mit E-Lkw-Systeme der allergrößte Teil des SGV abgedeckt werden sollte. Beispielsweise könnte die Eignung eines E-Lkw-Systems in Ländern, die durch niedrigere Temperaturen gekennzeichnet sind, geringer sein.[111] Weiterhin könnten auch Aspekte, wie die Verkehrsleistung, Ressourcenverfügbarkeiten, geringere Siedlungsdichten sowie die Dichte und Leistungsfähigkeit des Stromnetzes oder auch der Infrastrukturen für Kraftstoffe, die zu empfehlenden Größen der Bereiche der E- und K-Lkw-Systeme beeinflussen. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass aufgrund der eindeutigen Vorteile der E-Lkw-Systeme hinsichtlich der Energieeffizienz aus europäischer Perspektive eindeutig zu empfehlen ist, dass in den meisten Ländern für den allergrößten Teil des SGV auf E-Lkw-Systeme zurückgegriffen wird.

[111] Bei niedrigen Temperaturen ist der Energieverbrauch von E-Lkw durch eine geringere Effizienz der Batteriesysteme erhöht (vgl. TOL ET AL. (2022, S. 22)). Dies könnte zu einer Reduktion der relativen Vorteilhaftigkeit von E- im Vergleich zu K-Lkw-Systemen führen. Es sei aber erwähnt, dass die Temperaturen sich auch noch durch weitere Effekte auf den Energieverbrauch von E- und K-Lkw auswirken. Der Energieverbrauch nimmt bei niedrigen Temperaturen zudem durch eine Erhöhung des Luftwiderstands zu. Ferner beeinflusst die Nutzung von Heizungs- und Klimaanlagen den Energieverbrauch (vgl. TOL ET AL. (2022, S. 22 f.)).

IMPLIKATIONEN DER EUROPÄISCHEN EINBETTUNG FÜR ENDZUSTANDS-BETRACHTUNGEN AUS DER DEUTSCHEN PERSPEKTIVE

Grundsätzlich stimmen die aus europäischer Perspektive zu empfehlenden Endzustände von Kombinationen aus E- und K-Lkw-System mit den aus nationaler Perspektive anzustrebenden Endzuständen überein. Für die Abwicklung des grenzüberschreitenden Verkehrs sind durch die Bereitstellung von einer flächendeckenden LI in Europa, die mit den nationalen E-Lkw-Systemen technisch kompatibel ist, signifikante Koordinationsvorteile zu erwarten.[112] Es stellt sich allerdings die Frage, ob für den Bereich der K-Lkw-Systeme eine Nutzungskompatibilität angestrebt werden sollte, welche eine technische Kompatibilität und flächendeckende BTI für die in den einzelnen Ländern errichteten K-Lkw-Systeme voraussetzt. Im Hinblick auf das Risiko-Management spricht einiges dafür, in Europa eine flächendeckende BTI für mindestens ein K-Lkw-System zu errichten, um eine grundlegende Versorgung in jedem Fall abzusichern. In Abschnitt 5.2 wird die Frage vertieft beleuchtet.

3.3 Schlussfolgerungen hinsichtlich des Handlungsbedarfs

Auf Grundlage der vorherigen Endzustands-Betrachtungen können folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Im Zuge der erheblichen Vorteile von E-Lkw-Systemen sind zunächst die technische Kompatibilität sowie die Nutzungskompatibilität, die durch die Bereitstellung einer europaweit flächendeckenden LI erreicht werden kann, von hoher Bedeutung. Vertieftere Untersuchungen zur Ausgestaltung von E-Lkw-Systemen umfasst das folgende Kapitel. Abschnitt 4.2.2 beinhaltet die diesbezüglichen differenzierten Handlungsempfehlungen. Mit Bezug zu K-Lkw-Systemen gibt es Argumente dafür, für mindestens ein K-Lkw-System eine europaweit flächendeckende BTI zu etablieren, was eine europaweite technische Kompatibilität bzw. Standardisierung voraussetzt und eine Abstimmung bezüglich der Wahl des K-Lkw-Systems oder der -Systeme erforderlich machen kann. In Abschnitt 5.2.2 werden differenziertere Handlungsempfehlungen zu K-Lkw-Systemen unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung erarbeitet.

[112] In Abschnitt 4.2 werden die Koordinationsvorteile eines europaweiten E-Lkw-Systems sowie die Voraussetzungen dafür erläutert.

4 *E-Frage:* Ausgestaltung des Bereichs der E-Lkw-Systeme

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Bereich der E-Lkw-Systeme und steht aufgrund der großen Bedeutung dieser im Mittelpunkt der Untersuchungen. Der Aufbau folgt der in Abschnitt 2.2.2 dargestellten Vorgehensweise. In Abschnitt 4.1 wird im Rahmen der Untersuchungen von der europäischen Einbettung abstrahiert, während Implikationen des Einbezugs von Aspekten der europäischen Einbettung in Abschnitt 4.2 thematisiert werden.

4.1 Fokus auf Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung

Dieser Abschnitt umfasst einerseits den Vergleich eines B- und OB-Lkw-Systems vor dem Hintergrund des in Abschnitt 2.2.1 dargestellten Zielsystems im Rahmen von Endzustands-Betrachtungen und andererseits die Ableitung (kurzfristiger) Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der aus den Endzustands-Betrachtungen resultierenden Unsicherheiten.

4.1.1 Endzustands-Betrachtungen

Der in Abschnitt 4.1.1.1 dargestellte (größtenteils quantitative) Vergleich eines B- und eines OB-Lkw-Systems auf Grundlage wesentlicher Kostenpositionen stellt für den Bereich der E-Lkw-Systeme den Schwerpunkt der Endzustands-Betrachtungen dar. Der Vergleich wird in Abschnitt 4.1.1.2 um weitere qualitativ betrachtete Aspekte ergänzt, sodass auch die Möglichkeit von (temporären) Flächenknappheiten, potenzielle Qualitätsunterschiede der LI sowie Herausforderungen für die Gestaltung einer institutionellen Lösung und damit verbundene Transaktionskosten im Rahmen des Vergleichs von B- und OB-Lkw-System einbezogen werden.

4.1.1.1 „B- vs. OB-Lkw-System“ auf Basis von (vereinfachten) Kostenkalkulationen

Dieser Abschnitt beginnt mit einer Erläuterung des Ansatzes für den Lkw-System-Vergleich auf Basis von Kostenkalkulationen, wobei zwischen Lkw-System-abhängigen und somit für den Vergleich relevante Kostenpositionen und Lkw-System-unabhängigen Kostenpositionen, die lediglich der Einordnung der Ergebnisse dienen, differenziert wird. Weiterhin werden in Abschnitt 4.1.1.1.1 die Annahmen für die Kostenkalkulationen vorgestellt und die berücksichtigten Unsicherheiten hinsichtlich der technisch-systemischen Ausgestaltung eines OB-Lkw-Systems sowie zukünftiger Kosten- und Umweltentwicklungen aufgezeigt. Im Anschluss folgt die Präsentation der Ergebnisse. Abschnitt 4.1.1.1.2 beinhaltet grobe Abschätzungen der Lkw-System-unabhängigen Kostenpositionen, während in Abschnitt 4.1.1.1.3 B- und OB-Lkw-System – in Abhängigkeit der Ausprägung von den in den Kostenkalkulationen variierten Annahmen – gegenübergestellt werden. Dieser Abschnitt schließt mit einem Fazit für den Lkw-System-Vergleich auf Basis der quantitativen Kostenkalkulationen.

4.1.1.1.1 Grundsätzlicher Ansatz und Annahmen

Folgend werden in Abschnitt 4.1.1.1.1.1 die betrachteten Kostenpositionen sowie die Szenarien, die zur Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich der für die Kostenkalkulationen benötigten Annahmen

entwickelt und untersucht werden, dargestellt. In Abschnitt 4.1.1.1.1.2 wird die Relevanz von Kostenpositionen thematisiert, die nicht weiter oder nicht differenziert im Rahmen der Kostenkalkulationen betrachtet werden.

4.1.1.1.1.1 In den Kostenkalkulationen betrachtete Positionen und Szenarien

Im Folgenden werden zunächst in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.1 die betrachteten Kostenpositionen dargestellt und die für die Ermittlung der Kostenpositionen festzulegenden Annahmen erläutert. Im Anschluss werden in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2 die zur Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich der Annahmen entwickelten Szenarien dargelegt.

4.1.1.1.1.1.1 Betrachtete Kostenpositionen und festzulegende Annahmen

Im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs werden die zu erwartenden Gesamtkosten von B- und OB-Lkw-Systemen im Endzustand in erster Näherung abgeschätzt. Da keine signifikanten für die Pfade spezifischen Differenzen hinsichtlich der betrachteten Kostenpositionen erwartet werden, liegt der Betrachtungszeitraum der Kostenkalkulationen nach dem Abschluss der Transformation. Die Gesamtkosten werden über einen Betrachtungszeitraum gegenüberstellt, der der maximalen Nutzungsdauer der betrachteten Komponenten entspricht. Es sei darauf hingewiesen, dass nur wesentliche Kostenpositionen betrachtet werden und somit die ausgewiesenen Gesamtkosten die tatsächlichen Gesamtkosten der Lkw-Systeme unterschreiten. Folgend werden nichtsdestotrotz, wenn nicht anders erwähnt, die Kosten, die sich aus der Summe der betrachteten Kostenpositionen ergeben, als Gesamtkosten bezeichnet. Weiterhin werden bei der Festlegung der Annahmen hinsichtlich zukünftiger Kosten möglichst aktuelle Preis- und Kostenprognosen zugrunde gelegt. Die angegebenen Preise und Kosten liegen ungefähr auf dem heutigen Preisniveau, wobei durch den Einbezug von Kostenannahmen in KÜHNEL / HACKER / GÖRZ (2018) die Zeitspanne bis in das Jahr 2015 reicht. Aufgrund der hohen Kostenunsicherheiten insgesamt wird trotz der 9 Jahre umfassenden Zeitspanne von einer zeitlichen Homogenisierung durch eine entsprechende Diskontierung abgesehen. Insgesamt werden die Gesamtkosten somit auf dem heutigen Preisniveau angegeben.

LKW-SYSTEM-ABHÄNGIGE KOSTEN FÜR DEN VERGLEICH UND LKW-SYSTEM-UNABHÄNGIGE KOSTEN ZUR EINORDNUNG

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt darauf, die Gesamtkosten von B- und OB-Lkw-System gegenüberzustellen, um auf dieser Grundlage die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System bewerten zu können. Daher wird zwischen Lkw-System-abhängigen und -unabhängigen Kosten unterschieden, wobei die -unabhängigen Kosten der Einordnung der Kostendifferenzen zwischen den Lkw-Systemen dienen. Einen Überblick über die im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs betrachteten Kostenpositionen bietet Tabelle 1. Zu den betrachteten Lkw-System-abhängigen Kostenpositionen zählen die Infrastruktur, für ein B- oder OB-Lkw-System spezifische Fahrzeugkomponenten sowie sich im Zuge der Ladevorgänge ergebende Zeitverluste. Zu den Lkw-System-unabhängige Kostenpositionen gehören die Start-Ziel-LI, unspezifische Fahrzeugkomponenten sowie die Energieversorgung. In Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2 wird die Einordnung hinsichtlich Lkw-System-abhängiger und -unabhängiger Kosten näher erläutert.

A) Lkw-System-abhängige Kostenpositionen
A.1) Infrastruktur: Flächendeckung in BAB-Nähe[113]
A.1.1) P-S-LI
A.1.2) L-O-LI
A.2) Fahrzeuge
A.2.1) Batterien
A.2.2) Pantographen
A.3) Zeitverlust durch Ladevorgänge an P-S-LI
B) Lkw-System-unabhängige Kostenpositionen
B.1) Infrastruktur an Start- und Zielpunkten
B.2) Fahrzeuge
B.3) Energieversorgung

Tabelle 1: Übersicht über die Kostenpositionen des Lkw-System-Vergleichs

ZUR BESTIMMUNG DER KOSTEN FESTZULEGENDE ANNAHMEN UND DIESBEZÜGLICHE INTERDEPENDENZEN

Zur Ermittlung der Kosten von E-Lkw-Systemen sind grundsätzlich Annahmen hinsichtlich der Mengen und mengenspezifischen Kosten zu treffen. Die Kosten der LI und Fahrzeuge ergeben sich aus den erforderlichen Kapazitäten und den mengenspezifischen Kosten. Die Kosten für die Zeitverluste basieren auf dem kumulierten Zeitverlust im Rahmen aller notwendigen Ladevorgänge an der P-S-LI und den Zeitkosten des Transportsektors. Für die Ermittlung der Kosten der Energieversorgung sind der kumulierte Energieverbrauch sowie die Stromkosten zugrunde zu legen. Im Folgenden werden die für die Kostenermittlung festzulegenden Annahmen weiter erörtert, wobei auf Interdependenzen zwischen den Annahmen hingewiesen wird.

Zunächst sind Annahmen zu den Nutzungsdauern der Komponenten erforderlich, um die Kosten für einen einheitlichen Betrachtungszeitraum zu ermitteln. Weiterhin ist der Bedarf an technischen Komponenten bzw. der erforderlichen Kapazitäten festzulegen, wobei die in dem Abschnitt 2.1.2.1.1.2 bzw. Abschnitt 2.1.2.1.2.2 dargestellten interdependenten Ausgestaltungsfragen eines B- bzw. eines OB-Lkw-Systems zu berücksichtigen sind. Es sind letztlich Annahmen zu der Anzahl der B- und ggf. der OB-Lkw sowie der jeweiligen Batteriegrößen, den genutzten Technologien der P-S-LI – somit der Wahl zwischen MCS- und CCS – und der Anzahl der jeweiligen LP sowie der Gesamtlänge der L-O-LI erforderlich. Die in Abschnitt 2.1.2.1 thematisierten Interdependenzen zwischen den Komponenten führen zu einer Vielzahl von Ausgestaltungsoptionen von B- und OB-Lkw-Systemen. Abschnitt 2.3 zeigt auf, dass aktuell keine umfassenden Untersuchungen zur vorteilhaften technisch-systemischen Ausgestaltung von Lkw-Systemen bzw. Kombinationen von Lkw-Systemen bekannt sind, aber vorliegende Untersuchungen und insbesondere die Modellierungen in PLÖTZ ET AL. (2021) Anhaltspunkte zum Bedarf an Netz-LI bieten. Die in den folgenden Kostenkalkulationen betrachteten technisch-systemischen Ausgestaltungsvarianten werden in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1 erläutert. Da die Größe des Lkw-Systems für die technisch-systemische Ausgestaltung von hoher Relevanz ist, enthält der Abschnitt ferner die Erläuterung zur angenommenen Fahrleistung.

[113] Bundesautobahnen (BAB).

Die in den folgenden Kostenkalkulationen verwendeten Annahmen bezüglich der Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen werden in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2 dargestellt. Die Kostenannahmen werden nicht in Abhängigkeit der technisch-systemischen Ausgestaltung variiert. Von potenziellen Kostenunterschieden infolge von Synergieeffekten wird abstrahiert.[114] Für die Strom- bzw. Zeitkosten werden – unabhängig von der technisch-systemischen Ausgestaltung – prognostizierte Durchschnittswerte angenommen.[115]

4.1.1.1.1.1.2 Fixe und variable Annahmen sowie resultierende Szenarien

In diesem Abschnitt werden die Annahmen für die Kostenkalkulationen festgelegt. Zur Berücksichtigung von signifikanten Unsicherheiten hinsichtlich einiger festzulegender Annahmen werden diese variiert und somit verschiedene Szenarien entwickelt, wobei Interdependenzen zwischen den Annahmen berücksichtigt werden. Während in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1 die Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung und zur Fahrleistung, die grundsätzlich als Umweltentwicklung einzuordnen ist, dargestellt werden, werden in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2 die Annahmen zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen erörtert.

Eine Übersicht, über die Szenarien bietet Tabelle 2. In dem Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs werden ein B- und ein OB-Lkw-System gegenübergestellt. Die Annahmen zum LI-Bedarf und weiteren interdependenten Annahmen basieren auf PLÖTZ ET AL. (2021)[116] und werden durch weitere Annahmen auf Grundlage eigener Plausibilitätsüberlegungen ergänzt. Eine detaillierte Darstellung enthält Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1.

Für die Entwicklung der weiteren Szenarien werden Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung sowie zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen schrittweise zur Berücksichtigung von Unsicherheiten verändert. Es werden die Batteriekapazität der OB-Lkw (siehe Tabelle 2 a) sowie die Gesamtlänge der L-O-LI und den damit interdependenten Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung (siehe Tabelle 2 b) variiert. Es entstehen somit mehrere OB-Lkw-Systeme, während das B-Lkw-System unverändert bleibt. Zudem werden Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung von Batteriekosten (siehe Tabelle 2 c) betrachtet. Im Rahmen einer Sensitivitäts-Betrachtung, die letztlich auch als eine Vielzahl von Szenarien aufgefasst werden kann, werden die Gesamtkosten des B- und der OB-Lkw-Systeme in Abhängigkeit der Batteriekosten dargestellt. Der Lkw-System-Vergleich für die bisher skizzierten Szenarien (siehe Tabelle 2 a-c) erfolgt auf Grundlage quantitativer Kostenkalkulationen. Darüber hinaus werden weitere Unsicherheiten im Rahmen von qualitativen

---

[114] Vgl. Abschnitt 2.2.2.1.1.

[115] Zwar ergeben sich in einem von EE-Anlagen geprägten Stromsystem vom Zeitpunkt abhängige Stromkosten, aber eine detaillierte quantitative Betrachtung der Zeitpunkte der Ladevorgänge in Abhängigkeit von der technisch-systemischen Ausgestaltung geht über den Rahmen dieser Studie hinaus. Eine vertiefte Betrachtung von potenziellen Unterschieden der Zeitkosten (€/Std.) im Logistiksektor in Abhängigkeit der technisch-systemischen Ausgestaltung erfolgt ebenfalls nicht.

[116] In PLÖTZ ET AL. (2021) werden B- und OB-Lkw-System modelliert und damit der Bedarf an MCS-LP in Abhängigkeit der L-O-LI-Strecke bestimmt. Im Rahmen der folgenden Untersuchungen werden auch Ergebnisse der dem Diskussionspapier zugrundeliegenden Modellierungen des Fraunhofer ISI aufgegriffen, die nicht publiziert sind. Wir danken Patrick Plötz, Daniel Speth und Lena Kappler für die Erläuterung der Modellierungen, die zur Verfügungstellung der Ergebnisse hinsichtlich des Bedarfs an MCS-LP in einem B-Lkw-System und einem OB-Lkw-System mit 2.000 km L-O-LI-Länge sowie für die weiterführenden Diskussionen.

Diskussionen einbezogen. Erstens wird diskutiert, welche Implikationen ein erhöhter Bedarf an P-S-LI entlang der Bundesautobahnen (BAB) (siehe Tabelle 2 d) hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit des B- und OB-Lkw-Systems haben könnte und zweitens werden Implikationen einer Steigerung der Fahrleistung der E-Lkw (siehe Tabelle 2 e) erörtert.

Annahmen zu …	… Kosten- und weitere Umweltentwicklungen fixiert	… Kosten- und weitere Umweltentwicklungen variiert	… Kosten- und weitere Umweltentwicklungen adressiert
…technisch-systemischen Ausgestaltung fixiert	Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs (Abschnitt 4.1.1.1.3.1) *B-Lkw-System vs. OB-Lkw-System 2.000-ap*	Lkw-System-Vergleich bei (c) Variation der Batteriekosten (Abschnitt 4.1.1.1.3.4) *B-Lkw-System vs. OB-Lkw-System 2.000-ap & -m & OB-Lkw-System 4.000 & OB-Lkw-System 6.000*	Lkw-System-Vergleich bei (d) Erhöhung der Anzahl der LP an den BAB (Abschnitt 4.1.1.1.3.5.1) (e) Steigerung der kumulierten Fahrleistung aller E-Lkw (Abschnitt 4.1.1.1.3.5.2) .. sowie der interdependenten Annahmen
… technisch-systemischen Ausgestaltung des OB-Lkw-Systems variiert	Lkw-System-Vergleich bei (a) Variation der Batteriekapazität der OB-Lkw (Abschnitt 4.1.1.1.3.2) *B-Lkw-System vs. OB-Lkw-System 2.000-k & -m* (b) Variation der L-O-LI-Länge und interdependenter Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung (Abschnitt 4.1.1.1.3.3) *B-Lkw-System vs. OB-Lkw-System 4.000 & 6.000*		

Hinweise: Die Zellen in der Tabelle bilden die Szenarien ab, wobei die, für die der Lkw-System-Vergleich quantitativ betrachtet wird, grün hinterlegt sind. Szenarien, für die die Wirkungen auf den Lkw-System-Vergleich qualitativ diskutiert werden, sind in blau hinterlegt. In grauer und kursiver Schrift sind die im Folgenden genutzten Bezeichnungen für die betrachteten Lkw-Systeme, die durch eine bestimmte technisch-systemische Ausgestaltung charakterisiert sind, geschrieben.

Tabelle 2: Variation von Annahmen und Darstellung der quantitativ und qualitativ betrachteten Szenarien im Rahmen der Kostenkalkulationen

4.1.1.1.1.1.2.1 Annahmen zur Fahrleistung sowie zur technisch-systemischen Ausgestaltung

In diesem Abschnitt werden zunächst die Annahmen zur Fahrleistung sowie zur technisch-systemischen Ausgestaltung der E-Lkw-Systeme erörtert. Aufgrund der aus Kapitel 3 resultierenden hohen Bedeutung des E-Lkw-Systems wird eine zunächst eine vollständige Abdeckung des SGV durch E-Lkw-Systeme im Endzustand betrachtet. Im Rahmen dieser Studie werden keine eigenen Modellierungen zur Bestimmung des LI-Bedarfs durchgeführt. Stattdessen wird auf den dem Diskussionspapier „*Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr. Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich*“ von PLÖTZ ET AL. (2021) zugrundeliegenden Modellierungsansatz zurückgegriffen. Unter Verwendung der Modellierungen sind die Bedarfe der P-S-LI in der Nähe der

BAB für ein B- und ein OB-Lkw-System mit einer Gesamtlänge von 2.000 km L-O-LI ermittelt worden. Aufgrund der Interdependenzen im Kontext der technisch-systemischen Ausgestaltung werden die der Ermittlung des LI-Bedarfs zugrundeliegenden Annahmen, die auch für die Kostenkalkulationen erforderlich sind, im Folgenden zunächst übernommen und anschließend diskutiert. Kasten 2 stellt den von PLÖTZ ET AL. (2021) verwendeten Ansatz zur Ermittlung des LI-Bedarfs sowie die im Rahmen der folgenden Kostenkalkulationen aufgegriffenen Ergebnisse und die zugrundeliegenden Annahmen dar.

Die unter Verwendung des von Plötz et al. (2021) *beschriebenen Modellierungsansatzes ermittelten Ergebnisse zum LI-Bedarf in der Nähe der BAB für ein B- und ein OB-Lkw-System mit 2.000 km L-O-LI (OB-Lkw-System 2.000) werden für den Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs auf Basis von Kostenkalkulationen genutzt. Der Modellierungsansatz wurde auch von* Plötz / Speth / Rose (2020), Speth et al. (2022), Speth / Sauter / Plötz (2022) *und* Speth (2024) *zur Ermittlung des deutschland- oder europaweiten Bedarfs an P-S-LI auf den BAB verwendet, wobei die Option von L-O-LI als ergänzende LI in den vorgenannten Untersuchungen nicht berücksichtigt wird. Im Folgenden werden einerseits die Grundzüge des Modellierungsansatzes erläutert und andererseits die im Rahmen dieser Studie aufgegriffenen Ergebnisse und zugrundeliegenden Annahmen dargestellt.*

Grundzüge des Modellierungsansatzes

Die Modellierung dient dazu, den Bedarf an öffentlich zugänglicher LI für den E-SGV abzuschätzen. Dafür werden zum einen die Anzahl an benötigten LP an den BAB – teils unter der Annahme von Streckenabschnitten mit L-O-LI – und zum anderen die Verteilung der LP entlang der BAB bestimmt. Im Rahmen der Modellierungen werden ausschließlich MCS-LP betrachtet. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass lokale Bedingungen nicht berücksichtigt werden, sodass nicht die genauen Positionen der Ladestandorte angegeben werden.[117]

Für die grundsätzliche Verteilung der Ladestandorte wird der Ansatz einer heuristischen geographische Mindestabdeckung gewählt.[118] *In festgelegten Abständen werden Ladestandorte entlang der BAB angenommen. Zur Ermittlung der Anzahl der benötigten MCS-LP an den jeweiligen Ladestandorten wird auf die Warteschlangentheorie zurückgegriffen, wobei die Anzahl der benötigten MCS-LP durch die Festlegung einer maximalen mittleren Wartezeit pro Ladevorgang determiniert wird.*[119] *Für die Verwendung der Warteschlangentheorie sind eine Beschreibung der Ankünfte der Lkw an den jeweiligen Ladestandorten (und damit auch der Ankunftsrate) sowie eine Beschreibung der benötigten Ladezeit (und damit auch der Bedienrate) maßgeblich. Detaillierte Beschreibungen der Grundzüge des*

[117] Vgl. PLÖTZ ET AL. (2021, S. 27).

[118] Vgl. PLÖTZ / SPETH / ROSE (2020, S. 14).

[119] Durch den Ansatz kann die Erreichung des Abdeckungsziels sowie eines lokalen Verfügbarkeitsniveaus, was beispielsweise über die durchschnittliche oder maximale Wartezeit der Nutzer definiert werden kann, sichergestellt werden. REINKE (2014) und HILDEBRANDT (2016) definieren analog dazu Kapazitätsziele für die Pkw-LI. Auch für Lkw sind diese Ziele im Kontext der in Abschnitt 2.1.1 dargestellten Anforderungen der Nachfrage von hoher Bedeutung. In KIPPELT ET AL. (2022) wird die Anzahl der benötigten LP so bestimmt, dass für 99 % der Kunden im Jahr die Wartezeit 15 Minuten nicht überschreitet, anstatt wie in PLÖTZ ET AL. (2021) ein Ziel im Hinblick auf die mittlere Wartezeit festzulegen.

Modellierungsansatzes enthält Speth et al. (2022)*. Eine umfassende Gegenüberstellung von mehreren Ansätzen zur Ermittlung des LI-Bedarfs bietet* Speth (2024)*.*

Im Rahmen dieser Studie verwendete Ergebnisse und zugrundeliegende Annahmen

Im Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs wird auf Ergebnisse der Modellierungen für den Bedarf an MCS-LP an den BAB zurückgegriffen. Für das B-Lkw-System werden 5.941 MCS- LP und für das OB-Lkw-System 2.000 5.203 MCS-LP ermittelt.[120] *In dem OB-Lkw-System 2.000 sind folgende Strecken mit L-O-LI ausgestattet: Hamburg - Dortmund (A 1), Hamburg - Karlsruhe (A 7, A 5), Dortmund - München (A 3, A 9), Bad Hersfeld - Würzburg (A 7), Duisburg - Berlin (A 2).*[121]

Folgende weitere Annahmen liegen den Ergebnissen zugrunde:

- *Eine mittlere Wartezeit von 5 Minuten soll für die Ladevorgänge während der Peakbelastung an allen Ladestandorten, die folgend noch näher beschrieben wird, eingehalten werden.*
- *Die Bedienrate der Lkw an den MCS-LP basiert auf der Annahme einer mittleren Ladezeit von 30 Minuten. Zudem wird für die Ladezeit eine Normalverteilung angenommen.*
- *Der Abstand zwischen den Ladestandorten beträgt 25 km.*
- *Zur Bestimmung der Ankunftsraten der zu ladenden Lkw an den jeweiligen Ladestandorten werden folgenden Annahmen getroffen:*
  - *(a) Die gesamte Fahrleistung i. H. v. 30,5 Mrd. Fahrzeug-km an den BAB erfolgt durch E-Lkw.*
  - *(b) Die Hälfte der Ladevorgänge für die Fahrten auf der BAB findet an der BAB statt. Denn es wird zum einen davon ausgegangen, dass die Batteriekapazität der Lkw für das Fahren von 4,5 Std. ausgelegt wird, und zum anderen, dass die Batterien regelmäßig an Depots und weiteren Standorten geladen werden.*
  - *(c) Die Basis für die Ankunftsrate der zu ladenden Lkw an den jeweiligen Ladestandorten stellt die Verkehrsbelastung in der Peakstunde (mit 6 % der Tagesbelastung) dar. Die gesamte Fahrleistung wird nur auf die Fahrtage (Sonntage ausgenommen) verteilt. Grundlage für die räumliche und zeitliche Verteilung sind Daten aus der manuellen und automatischen Verkehrszählung.*
  - *(d) Auf mit L-O-LI ausgestatteten Abschnitten reduziert sich die Ankunftsrate der Lkw an den Ladestandorten, da dort 50 % der Lkw Energie über die L-O-LI aufnehmen.*
  - *(e) Für die Ankünfte der zu ladenden Lkw an den Ladestandorten wird eine Poisson-Verteilung angenommen.*

Kasten 2: Grundzüge des Modellierungsansatzes von PLÖTZ ET AL. (2021) zur Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs und Darstellung der unter Rückgriff auf PLÖTZ ET AL. (2021) festgelegten Annahmen für dem Lkw-System-Vergleich

[120] Die Ergebnisse sind nicht publiziert. PLÖTZ ET AL. (2021, S. 38) weisen bei vollständiger Elektrifizierung einen Bedarf von 4.733 MCS-LP für ein OB-Lkw-System mit 2.000 km L-O-LI aus, wenn der Abstand der Ladestandorte 50 km beträgt. An dem im Zuge der hohen Frequentierung größten Ladestandort werden 41 MCS-LP errichtet. Im Rahmen dieser Studie wird von einer Verdichtung der Ladestandorte ausgegangen und der Abstand der Ladestandorte auf 25 km verringert, um sehr große Ladestandorte zu vermeiden. In diesem Kontext wäre eine Berücksichtigung von lokalen Bedingungen und insbesondere eine Betrachtung der jeweiligen Flächenverfügbarkeiten wertvoll, die aber über den Umfang dieser Studie hinausgeht.

[121] Vgl. PLÖTZ ET AL. (2021, S. 35).

	B-Lkw-System	OB-Lkw-System 2000-ap	OB-Lkw-System 2000-k	OB-Lkw-System 2000-m	OB-Lkw-System 4000	OB-Lkw-System 6000
A.1) Infrastruktur Flächendeckung in BAB-Nähe						
Anzahl der MCS-LP (P-S-LI)	5.941	5.203	5.203	5.203	4.834	2.500
Gesamtlänge der Oberleitung (L-O-LI)	-	2.000	2.000	2.000	4.000	6.000
B.1) Infrastruktur an Start- und Zielpunkten						
Anzahl der CCS-LP (P-S-LI)	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000
A.2) Fahrzeuge						
Anzahl der B-Lkw	300.000	150.000	150.000	150.000	105.000	50.000
Anzahl der OB-Lkw	-	150.000	150.000	150.000	195.000	250.000
Batteriekapazität der B-Lkw (kWh)	500	500	500	500	500	500
Ø Batteriekapazität der OB-Lkw (kWh)	-	350	500	425	300	250
**Ø Energieverbrauch von B- und OB-Lkw (kWh / km)*	*1,3*	*1,3*	*1,3*	*1,3*	*1,3*	*1,3*
Reichweite der B-Lkw (km)	380	380	380	380	380	380
Ø Reichweite der OB-Lkw (km)	-	270	380	325	230	190

Hinweise:

- Im Vergleich zum vorherigen Lkw-System nicht veränderte Annahmen werden in grau dargestellt
- Hier wird die nutzbare Batteriekapazität angegeben.
- Die angegebene Reichweite ist aus informatorischen Gründen angegeben und ergibt sich aus der jeweiligen Batteriekapazität und einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 1,3 kWh/km, der als Umweltentwicklung einzuordnen ist und im folgenden Abschnitt erläutert wird.

Tabelle 3: Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung eines B- und mehrerer Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems

FAHRLEISTUNG

Die im Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs angenommene Fahrleistung entspricht der für die Ermittlung des Bedarfs an MCS-LP angenommenen Fahrleistung.[122] Es wird eine deutschlandweite Fahrleistung von 40,7 Mrd. Fahrzeug-km der schweren Lkw angenommen, wovon ca. 30,5 Mrd. Fahrzeug-km auf den BAB stattfinden. Die angenommene Fahrleistung basiert auf der Fahrleistung im Jahr 2015 i. H. v. 31,3 Mrd. Fzg-km [123] und den Annahmen, dass die Fahrleistung zwischen 2015 und 2030 um 30 % steigt,[124] ab dem Jahr 2030 auf einem konstanten Niveau bleibt [125] und auch weiterhin drei Viertel der Fahrleistung auf den BAB stattfinden.[126] Die angenommene Fahrleistung scheint eine eher niedrige Abschätzung darzustellen, der Prognosen zur Fahrleistung von Last- und Sattelzügen im Jahr 2050 i. H. v. 55,3 Mrd. Fahrzeug-km[127] sowie die Langfrist-Verkehrsprognose mit einem Wachstum

[122] Vgl. Kasten 2.

[123] WIETSCHEL ET AL. (2017, S. 13).

[124] PLÖTZ / SPETH / ROSE (2020, S. 9) und SPETH ET AL. (2022, S. 3).

[125] Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten übernimmt auch SPETH (2024, S. 48) für die Ermittlung des LI-Bedarfs die prognostizierten Fahrleistungen aus dem Jahr 2030 für das Jahr 2045.

[126] Vgl. PLÖTZ / SPETH / ROSE (2020, S. 9).

[127] Vgl. HACKER ET AL. (2020, S. 153). Ein Teil des im Rahmen dieser Studie betrachteten schweren SGV erfolgt durch Last- und Sattelzüge.

der gesamten Straßengüterverkehrsleistung – nicht nur der Straßengüterverkehrsleistung von schweren Lkw – i. H. v. 54 % zwischen dem Jahr 2019 und dem Jahr 2051 gegenüberstehen.[128] Daher werden in Abschnitt 4.1.1.1.3.5.2 mögliche Implikationen einer höheren Fahrleistung der schweren Lkw thematisiert.

TECHNISCH-SYSTEMISCHE AUSGESTALTUNG IM ÜBERBLICK

Tabelle 3 beinhaltet die wesentlichen Charakteristika der betrachten B- und OB-Lkw-Systeme, die einerseits auf der in Kasten 2 beschriebenen Modellierung zur Ermittlung des Bedarfs an MCS-LP und andererseits auf eigenen Einschätzungen und Plausibilitätsüberlegungen basieren. Im Folgenden werden zuerst die Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung des betrachteten B-Lkw-Systems sowie anschließend der betrachteten Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems erläutert.

TECHNISCH-SYSTEMISCHE AUSGESTALTUNG DES B-LKW-SYSTEMS

Im Folgenden werden die für die Kostenkalkulationen festzulegenden Annahmen bezüglich der technisch-systemischen Ausgestaltung des B-Lkw-System dargestellt, wobei auch auf diesbezügliche Unsicherheiten hingewiesen und der Umgang damit erläutert wird. Einige der Annahmen sind auch für ein OB-Lkw-System gültig. Zunächst werden die Charakteristika der Fahrzeuge betrachtet:

- Im Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs wird angenommen, dass 300.000 schwere Lkw und somit 300.000 B-Lkw im B-Lkw-System im Endzustand in Betrieb sind.[129] Diese Annahme wird im Rahmen der quantitativ betrachteten Szenarien nicht verändert, da eine hohe Einsatzflexibilität für alle Lkw angenommen wird. Bei einer Auslegung einiger Lkw für spezifische Touren wäre es dagegen nicht ausgeschlossen, dass sich die Summe der eingesetzten B- und OB-Lkw wesentlich unterscheiden könnte. In dem in Abschnitt 4.1.1.1.3.5.2 qualitativ betrachteten Szenario wird im Rahmen der Diskussion der Auswirkungen einer erhöhten Fahrleistung auch die Entwicklung der Anzahl der Lkw thematisiert.
- Die nutzbare Batteriekapazität der B-Lkw beträgt 500 kWh. Die Annahme wird im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs nicht variiert.[130]

---

[128] INTRAPLAN CONSULT / TTS TRIMODE TRANSPORT SOLUTIONS (2023).

[129] Die Annahme zur Anzahl der schweren Lkw basiert auf mehreren Quellen. WIETSCHEL ET AL. (2017, S. 148 f.) nehmen im Jahr 2030 eine Anzahl von ca. 301.700 Nutzfahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t exklusive der Baufahrzeuge an. HACKER / JÖHRENS / PLÖTZ (2020, S. 7) gehen von 300.000 Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 26 t aus. JÖHRENS ET AL. (2020, S. 32) weisen ein Wachstum des Bestands von Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 26 t von 288.000 Lkw im Jahr 2020 auf 334.000 Lkw im Jahr 2030 aus. Die in dieser Studie getroffene Annahme von 300.000 Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t stellt somit eine eher konservative Schätzung dar, die aber im Einklang mit dem eher mäßigen Wachstum der angenommenen Fahrleistung ist. Die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Lkw beträgt unter der Annahme einer jährlichen Gesamtfahrleistung von 40,7 Mrd. Fahrzeug-km ca. 136.000 km. Die prognostizierte mittlere Jahresfahrleistung erscheint plausibel zu sein, auch wenn die mittlere Jahresfahrleistung aktuell geringer ist (vgl. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 43 f.) und WIETSCHEL ET AL. (2017, S. 104)). Denn Sattelzugmaschinen weisen heute während der ersten Nutzungsdauer von 5 Jahren Jahresfahrleistungen bis zu durchschnittlich 128.363 BASMA / RODRÍGUEZ (2023a, S. 24) und insgesamt bis zu 200.000 km und mehr auf (NOW (2023, S. 21)). In NOLL ET AL. (2022) wird weiterhin eine Jahresfahrleistung i. H. v. 156.000 km für schwere Lkw angenommen. Aufgrund eines höheren Investitionskostenanteils der E-Lkw im Vergleich zu kf-K-Lkw könnte weiterhin ein Anreiz bestehen, die Jahresfahrleistungen insgesamt zu erhöhen, um die Anzahl der eingesetzten Lkw zu begrenzen.

[130] Vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1.2 sowie Plausibilitätsüberlegungen auf Basis der Ergebnisse der Kostenkalkulationen in Abschnitt 4.1.1.1.4.

Nach der Betrachtung der Charakteristika der Fahrzeuge werden nun Charakteristika der LI erläutert:

- Die Anzahl der benötigten MCS-LP an den BAB wurde unter den in Kasten 2 beschriebenen Modellierungsansatzes sowie unter den dargestellten Annahmen bestimmt und beträgt in dem B-Lkw-System 5.941. Die MCS-LP verteilen sich auf ca. 500 Ladestandorte, die alle 25 km an den BAB verortet sind. Im Durchschnitt sind an jedem Ladestandort somit 11 bis 12 MCS-LP. Die Dimensionierung der Netz-LI an den BAB orientiert sich daran, dass eine mittlere Wartezeit von 5 Minuten in der Peakstunde der örtlichen Verkehrsbelastung eingehalten wird, und basiert auf der Annahme einer mittleren Ladezeit von 30 Minuten. Unter den gesetzten Annahmen ergibt sich eine durchschnittliche Auslastung der MCS-LP von 22,8 Ladevorgängen pro Tag und somit eine durchschnittliche Belegungszeit über 11 Stunden.[131] Insbesondere unter der Annahme, dass ein Verlassen und die Freigabe eines MCS-LP während der gesetzlich vorgeschriebenen Fahrunterbrechung nicht möglich ist, ist die ermittelte Anzahl der benötigten MCS-LP als eher gering einzustufen. Daher werden in Abschnitt 4.1.1.1.3.5.1 Implikationen eines erhöhten Bedarfs an MCS-LP an den BAB erörtert. Zudem findet im Rahmen der Ermittlung des LI-Bedarfs an den BAB keine Differenzierung hinsichtlich des Ladedarfs während der 45 Min.-Pause oder der 9 Std.-Ruhezeit statt. Abschnitt 4.1.1.1.1.2.3 thematisiert die diesbezüglichen Vereinfachungen und diskutiert die Bedeutung der Substitution eines Anteils der MCS- durch CCS-LI.[132]
- Im Hinblick auf die Netz-LI wird von der Berücksichtigung weiterer LP abseits der BAB im Rahmen der Kostenkalkulationen abgesehen. Denn die Entfernung zur BAB sind von (nahezu) allen Standorten in Deutschland relativ gering und somit die Erreichbarkeit der BAB insgesamt hoch. Weiterhin dürfte der Ladebedarf an einzelnen Ladestandorten, die zusätzlich für eine Flächendeckung abseits der BAB – in Abhängigkeit von der Festlegung zur maximal akzeptablen Entfernung zum nächsten Ladestandort – zu errichten wären, aufgrund geringer

[131] Die durchschnittliche Anzahl der täglichen Ladevorgänge ergibt sich aus der täglichen Fahrleistung an der BAB i. H. v. 97,4 Mio. Fahrzeug-km (30,5 Mrd. Fahrzeug-km pro Jahr / 313 Fahrtage ohne Sonntage), einem Anteil der Ladevorgänge an der BAB von 50 %, einem Abstand von 360 km zwischen zwei Ladevorgängen (4,5 Stunden Fahrt bei 80 km/h) und der Anzahl der MCS-LP i. H. v. 5.941. Die durchschnittliche Belegungszeit ergibt sich aus der durchschnittlichen Anzahl der Ladevorgänge und der mittleren Ladezeit von 30 Minuten. Es sei allerdings angemerkt, dass auch in UNTERLOHNER (2021, S. 95) in der langen Frist 20 Ladevorgängen an einem MCS-LP pro Tag und in JÖHRENS ET AL. (2022) eine tägliche Auslastung von 10 Stunden an der öffentlichen LI angenommen werden.

[132] Die auf PLÖTZ ET AL. (2021) basierende Abschätzung des Bedarfs an Netz-LI an den BAB mit 5.941 MCS-LP für den schweren SGV mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 12 t kann unter Einbezug der Abschätzungen des LI-Bedarfs des schweren SGV mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t für das Jahr 2045 in einem Szenario mit nahezu vollständiger Elektrifizierung von GÖCKELER ET AL. (2023) eingeordnet werden. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 90 ff.) ermitteln einen Bedarf von 3.334 MCS-LP. Zudem werden gemäß der Untersuchungen 7.065 CCS-LP mit Leistungen bis zu 350 kW sowie 53.282 CCS-LP zum öffentlichen Laden über Nacht bei mehrtägigen Touren und 120.363 CCS-LP an Depots oder am Betrieb mit Ladeleistungen bis zu 150 kW bestimmt. Ein direkter Vergleich ist nicht möglich, da GÖCKELER ET AL. (2023) auch Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 3,5 und 12 t berücksichtigen. Der Vergleich deutet aber darauf hin, dass ein Teil der MCS-LP durch eine deutlich höhere Anzahl an CCS-LP für Laden über Nacht substituiert werden könnte. Diese Substitutionsbeziehungen zwischen MCS- und CCS-LP im Bereich der Netz-LI und die Implikationen auf den Lkw-System-Vergleich werden in Abschnitt 4.1.1.1.1.2.3 beleuchtet. Bei dem Vergleich der installierten Leistung im öffentlichen Raum stehen ca. 5,9 GW (5.941 MCS-LP mit je 1 MW) ca. 11,3 GW (3.334 MCS-LP mit je 1 MW und 52.282 CCS-LP mit je 150 kW) gegenüber.

örtlicher Fahrleistungen des schweren SGV abseits der BAB gering sein.[133] Dadurch ist nicht zu erwarten, dass sich die benötigte Anzahl an MCS-LP signifikant erhöht, wenn im Bereich der Netz-LI Standorte abseits der BAB berücksichtigt werden. Letztlich erscheint es auch nicht plausibel zu sein, dass der zusätzliche Bedarf an Netz-LI abseits der BAB sich in einem B- und OB-Lkw-System unter Betrachtung der absoluten Anzahl signifikant voneinander unterscheidet. Die Vernachlässigung der Netz-LI abseits der BAB dürfte also gerade im Kontext des Lkw-System-Vergleichs nicht von signifikanter Bedeutung sein. Zur Schaffung von Mobilitätsoptionen dürfte Netz-LI abseits der BAB allerdings von hoher Bedeutung sein.

- Neben der Netz-LI ist die Start-Ziel-LI voraussichtlich für E-Lkw-Systeme von entscheidender Relevanz. In dieser Studie wird angenommen, dass die Hälfte der Ladevorgänge für die Fahrleistung auf der BAB und alle Ladevorgänge für die Fahrleistung abseits der BAB an der Start-Ziel-LI stattfinden. Daher deckt die Start-Ziel-LI ca. 62,5 % der Ladevorgänge ab.[134] Im Rahmen dieser Studie wird angenommen, dass die Nutzung von längeren Standzeiten an Start- und Zielpunkten gleichermaßen zum Laden von B- als auch von OB-Lkw genutzt wird. Daher wird von Substitutionsbeziehungen zwischen Start-Ziel- und Netz-LI abstrahiert, und die Start-Ziel-LI wird als Lkw-System-unabhängige Kostenposition berücksichtigt.
- Aufgrund der geringen Relevanz für den Lkw-System-Vergleich werden die Kosten für die Start-Ziel-LI nur sehr grob abgeschätzt. Im Bereich der Start-Ziel-LI werden nur CCS-LP berücksichtigt und somit mögliche Substitutionsbeziehungen zwischen CCS-, MCS- und AC-LP nicht weiter berücksichtigt. Durchschnittlich wird angenommen, dass für jeden zweiten E-Lkw ein CCS-LP im Bereich der Start-Ziel-LI errichtet wird, sodass sich 150.000 CCS-LP ergeben.[135]

TECHNISCH-SYSTEMISCHE AUSGESTALTUNGSVARIANTEN EINES OB-LKW-SYSTEMS

Im Rahmen der Kostenkalkulationen werden fünf verschiedene Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems betrachtet, wodurch einerseits Unsicherheiten hinsichtlich der Dimensionierung der Batteriekapazität von OB-Lkw[136] und andererseits Unsicherheiten hinsichtlich der Ausgestaltung der L-O-LI[137] Beachtung finden. Folgend werden sowohl die Annahmen zu infrastruktur- und fahrzeugseitigen Charakteristika des OB-Lkw-System im Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs (OB-Lkw-System 2.000-ap) erläutert, bevor die Modifikationen der Annahmen im Rahmen der weiteren betrachteten Ausgestaltungsvarianten diskutiert werden.

---

[133] Vgl. dazu WIETSCHEL ET AL. (2017, S. 118), wo aufgezeigt wird, dass bei 89 % der Fahrten weniger als 50 km abseits der BAB zurückgelegt werden. Ebenso kann unter Rückgriff auf eine Datenbank der Gewerbeflächen in Deutschland gezeigt werden, dass 87 % der aufgeführten Gewerbeflächen weniger als 25 km von der BAB entfernt sind (LOGIVEST (2024)), was die Annahme unterstreicht, dass der Anteil der von der BAB weit entfernten Fahrten im Bereich des schweren SGV sehr gering sein dürfte.

[134] Zur Einordnung: KASTEN ET AL. (2022, S. 25 ff.) gehen davon aus, dass 70 % der Energie für den Fernverkehr und sogar 80 % für den Nah- und Regionalverkehr in Depots und bei Kunden aufgenommen wird und messen der Start-Ziel-LI somit einen noch größeren Wert bei. Auch in SPETH / PLÖTZ (2024) wird auf Grundlage von täglichen Fahrprofilen von 2.410 Lkw in Deutschland aufgezeigt, dass ein Großteil der Ladevorgänge an Depots mit niedrigen Ladeleistungen stattfinden kann. Untersuchungen, mit dem Erkenntnisziel einer vorteilhaften technisch-systemischen Ausgestaltung und damit einer Gegenüberstellung der Gesamtkosten sind nicht bekannt.

[135] Zur Einordnung: Für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t weisen GÖCKELER ET AL. (2023, S. 95) einen Bedarf von 120.363 CCS-LP am Depot aus.

[136] Vgl. Tabelle 2 a.

[137] Vgl. Tabelle 2 b.

- Folgende zuvor beschriebene Charakteristika des betrachteten B-Lkw-Systems werden auch für alle Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems übernommen: 300.000 E-Lkw, 500 kWh Batteriekapazität der B-Lkw und 150.000 CCS-LP im Bereich der Start-Ziel-LI.
- Auf der Seite der Infrastruktur ist das OB-Lkw-System 2.000-ap im Bereich der Netz-LI durch eine Gesamtlänge der L-O-LI von 2.000 km und durch 5.203 MCS-LP gekennzeichnet. Die Ermittlung der benötigten Anzahl an MCS-LP erfolgt grundsätzlich analog zum B-Lkw-System, wobei zusätzlich für Ladestandorte an den L-O-LI-Strecken angenommen wird, dass 50 % der E-Lkw Energie über die L-OLI aufnehmen und somit die Ankunftsrate von E-Lkw an den Ladestandorten an den L-O-LI-Strecken sinkt.[138] Auch wenn das Einsparpotenzial an MCS-LP unter der Annahme eines festgelegten L-O-LI-Netzes bestimmt wurde, wird die Verortungsstrategie der L-O-LI im Rahmen der Kostenkalkulationen nicht festgelegt. Denn es erscheint durchaus plausibel, dass Lücken von L-O-LI-Abschnitten an einigen Stellen möglich sind und somit ein größerer Teil der BAB durch L-O-LI abgedeckt werden kann, ohne die Gesamtlänge der L-O-LI zu erhöhen.[139] Wesentliche damit einhergehende Veränderungen des Einsparpotenzials von MCS-LP sind nicht zu erwarten, wenn die L-O-LI prinzipiell auf vielbefahrenen Strecken verortet wird. Insgesamt haben diese infrastrukturseitigen Charakteristika für alle betrachteten OB-Lkw-System mit 2.000 km L-O-LI Gültigkeit.
- Zudem beträgt in allen betrachteten OB-Lkw-Systemen 2.000 sowohl die angenommene Anzahl der B- als auch der OB-Lkw 150.000. Basis für diese eigene Abschätzung ist die der Ermittlung der Anzahl der benötigten MCS-LP zugrunde liegende Annahme, dass die Hälfte der E-Lkw auf den L-O-LI-Strecken Energie über die L-O-LI aufnehmen.
- Für OB-Lkw wird im OB-Lkw-System 2.000-ap eine durchschnittliche Batteriekapazität von 350 kWh und somit eine Reduktion von 150 kWh im Vergleich zum B-Lkw auf Basis eigener Überlegungen angenommen. Dies setzt voraus, dass OB-Lkw regelmäßig auf den L-O-LI-Strecken unterwegs sind und Energie in ausreichendem Umfang aufnehmen können, da ansonsten eine unterbrechungsfreie Fahrt von 4,5 Stunden nicht möglich ist. In diesem Kontext sind die Verortung und die Ladeleistung der L-O-LI-Abschnitte entscheidend. Zudem sei noch erwähnt, dass aufgrund der Anforderungen an die Einsatzflexibilität die Dimensionierung der Batteriekapazitäten der OB-Lkw letztlich für ein Spektrum an Touren und nicht für eine spezifische Tour erfolgt, sodass sehr kleine Batteriekapazitäten bei einer Gesamtlänge der L-O-LI von 2.000 km nicht realistisch sein dürften. Dennoch erscheint eine durchschnittliche Batteriekapazität von 350 kWh der OB-Lkw, die 50 % des Lkw-Bestands ausmachen, optimistisch aber durchaus plausibel zu sein.[140]

---

[138] Vgl. dazu Kasten 2.

[139] Vgl. dazu Abschnitt 2.1.2.1.2.2.

[140] Die folgend dargestellten Erkenntnisse werden nur zur Einordnung der eigenen Annahmen herangezogen und bieten keine direkten Anhaltspunkte zur Ableitung der Anzahl und der durchschnittlichen Batteriekapazität der OB-Lkw: GÖCKELER ET AL. (2023, S. 82) weisen im Rahmen von Markthochlaufmodellierungen, in denen Kaufentscheidungen anhand von TCO-Betrachtungen gefällt werden, in der langen Frist unter der Annahme eines zusammenhängenden L-O-LI-Netzes mit einer Gesamtlänge von 3.800 km einen Anteil der OB-Lkw am Bestand von 32 % aus. Der Anteil wird durch das technische Einsatzpotenzial der OB-Lkw beschränkt, das unter Rückgriff auf Analysen eines Fahrten-Datensatzes für das Jahr 2050 bestimmt wird (vgl. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 50 f.) und

In den Ausgestaltungsvarianten OB-Lkw-System 2.000-k und -m werden zur Berücksichtigung der Unsicherheiten hinsichtlich des Einsparpotenzials die durchschnittlichen Batteriekapazitäten der OB-Lkw – wie folgend erläutert – variiert.

- In der Ausgestaltungsvariante OB-Lkw-System-2.000-k wird von keiner Reduktion der Batteriekapazität eines OB-Lkw im Vergleich zu einem B-Lkw ausgegangen.[141] Die Batteriekapazität eines OB-Lkw und eines B-Lkw beträgt 500 kWh, sodass eine Einsatzflexibilität des OB-Lkw für alle Verortungsstrategien der L-O-LI in vollem Umfang gegeben ist.
- In der Ausgestaltungsvariante OB-Lkw-System 2.000-m wird mit einer Batteriekapazität von OB-Lkw von 425 kWh ein mittleres Einsparpotenzial angenommen, das zwischen dem Einsparpotenzial von 150 kWh im OB-Lkw-System 2.000-ap und keinem Einsparpotenzial im OB-Lkw-System 2.000-k liegt. Dies ist als sehr moderatere Batteriekapazitätsreduktion zu betrachten, da die OB-Lkw bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 1,3 kWh/km[142] eine durchschnittliche Reichweite von 325 km aufweisen und somit nahezu ohne die Aufnahme zusätzlicher Energie 4,5 Stunden mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 80 km/h fahren können.
- Im Rahmen der Variation der durchschnittlichen Batteriekapazität der OB-Lkw werden diesbezügliche Unsicherheiten adressiert. Die anderen Charakteristika des OB-Lkw-Systems 2.000-ap werden für die Ausgestaltungsvarianten OB-Lkw-System 2.000-k und -m übernommen.

Durch die Ausgestaltungsvarianten OB-Lkw-System 4.000 und OB-Lkw-System 6.000 werden Unsicherheiten hinsichtlich einer vorteilhaften Gesamtlänge der L-O-LI adressiert.[143] Die

---

HACKER ET AL. (2020, S. 99 ff.)). Zur Ermittlung des Einsatzpotenzials werden nur Fahrten von Lkw ab 4 Achsen, die mehr als 100 km auf dem betrachteten L-O-LI-Strecken liegen, betrachtet, was tendenziell zu einer Unterschätzung des Potenzials für OB-Lkw führt (vgl. HACKER ET AL. (2020, S. 154)). Weiterhin werden nur OB-Lkw mit 100 und 200 km Reichweite berücksichtigt, sodass Fahrten mit einem über die Reichweite hinausgehenden Vor- oder Nachlauf für den Einsatz von OB-Lkw ausgeschlossen werden. Zudem werden bei der Ermittlung des Vor- und Nachlaufs auch im Ausland liegende Strecken berücksichtigt. Neben den Erkenntnissen von GÖCKELER ET AL. (2023) und HACKER ET AL. (2020) bieten auch Erkenntnisse von JÖHRENS ET AL. (2022) und WIETSCHEL ET AL. (2017) Anhaltspunkte zur Plausibilitätsprüfung. JÖHRENS ET AL. (2022, S. 42) geben für ein grundsätzlich zusammenhängendes L-O-LI-Netz mit einer Gesamtlänge von 3.050 km an, dass für ungefähr 50 % der Fahrleistung von schweren Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 26 t gilt, dass ein Teil der Fahrt auf den L-O-LI Strecken stattfindet. Für schwere Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 26 t trifft dies sogar für 70 % der Fahrleistung zu. WIETSCHEL ET AL. (2017, S. 125) bereiten auf, dass auf 2.000 bzw. 4.000 km der BAB 38 % bzw. 64 % der Fahrleistung der Sattelzugmaschinen stattfindet.

[141] Vgl. dazu auch MARQUEZ-FERNANDEZ ET AL. (2022), die im Rahmen von Untersuchungen zum LI-Bedarf in Schweden für jede Fahrzeugklasse eine Batteriekapazität zur Gewährleistung der Einsatzflexibilität festlegen und bei einer Abdeckung von 2.200 km und somit 14 % der Hauptverkehrsstrecken in Schweden keine Batteriekapazitätsreduktion annehmen. Die Verortung der L-LI wird allerdings im Rahmen der Untersuchungen nicht optimiert, sondern die 2.200 km ergeben sich aus dem Kriterium, dass alle Strecken mit einem Geschwindigkeitslimit von 110 km/h oder höher mit L-LI ausgestattet werden.

[142] Vgl. dazu Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2.

[143] Zur Einordnung: In Studien aus drei Forschungsvorhaben zur L-O-LI werden Zielnetze mit einer Gesamtlänge zwischen 3 200 und 4 300 km ausgewiesen, vgl. HACKER / JÖHRENS / PLÖTZ (2020, S. 24). In der im Jahr 2018 veröffentlichten alle Sektoren umfassende Studie „Klimapfade für Deutschland“ weisen BOSTON CONSULTING GROUP / PROGNOS (2018, S. 167 ff.) den Aufbau von L-O-LI mit einer Gesamtlänge von 4.000 km bzw. 8.000 km und den Einsatz von Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-H-Lkw) als kosteneffiziente Maßnahmen zur Transformation des SGV in dem 80 %- bzw. dem 95 %-Klimapfad aus, während im Jahr 2021 ein Ausbau der L-O-LI in dem großen Umfang aufgrund der dynamischen Entwicklungen der Batterien und der Schwerpunktsetzung der Nutzfahrzeughersteller

Modifikation der Gesamtlänge der L-O-LI hat Auswirkungen auf weitere infrastruktur- und fahrzeugseitige Annahmen, was folgend erörtert wird.

- Die Annahmen zu den weiteren Charakteristika des OB-Lkw-System 4.000 und 6.000 basieren auf eigenen Einschätzungen und Plausibilitätsüberlegungen.
- Für das OB-Lkw-System 4.000 wird angenommen, dass die Reduktion der Anzahl der MCS-LP im Zuge des Aufbaus von weiteren 2.000 km L-O-LI 50 % der Reduktion der MCS-LP im Zuge des Aufbaus der ersten 2.000 km L-O-LI entspricht. Während in einem OB-Lkw-System 2.000 im Vergleich zum B-Lkw-System 738 MCS-LP eingespart werden, reduziert sich die Anzahl der benötigten MCS-LP in einem OB-Lkw-System 4.000 um 369 MCS-LP im Vergleich zum OB-Lkw-System 2.000. Daraus ergeben sich 4.834 MCS-LP im OB-Lkw-System 4.000.
- Durch die Erhöhung der Gesamtlänge der L-O-LI sind auch fahrzeugseitige Implikationen zu erwarten. Im OB-Lkw-System 4.000 wird der Anteil der OB-Lkw im Vergleich zu einem Anteil von 50 % in den OB-Lkw-Systemen 2.000 auf 65 % der E-Lkw erhöht, sodass sich 195.000 OB- und 105.000 B-Lkw ergeben. Mit zunehmender Gesamtlänge der L-O-LI nimmt auch die Option während der Fahrt Energie aufzunehmen zu, während die Länge des Vor- und Nachlaufs zu mit L-O-LI ausgestatteten Strecken sinkt. Die OB-Lkw in einem OB-Lkw-System 4.000 weisen daher eine durchschnittliche Reichweite von 230 km auf, was einer Batteriekapazität von 300 kWh entspricht.[144]
- Für die Abschätzung des Bedarfs an MCS-LP wird für das OB-Lkw-System 6.000 ein anderer Ansatz verfolgt. Denn bei den Abschätzungen für ein OB-Lkw-System 2.000 und somit auch bei den darauf basierenden Abschätzungen für ein OB-Lkw-System 4.000 wird nur eine mögliche Reduktion der MCS-LP im Vergleich zum B-Lkw-System an mit L-O-LI ausgestatteten Strecken betrachtet. Es ist aber durchaus plausibel, dass der MCS-Ladebedarf auch an Ladestandorten der Netz-LI abseits des L-O-LI-Netzes verringert werden kann. Dies ist gerade dann der Fall, wenn ein Großteil der Lkw mit Pantographen ausgestattet ist und regelmäßig auf längeren Strecken über die L-O-LI Energie aufnehmen kann. Daher werden in dem OB-Lkw-System 6.000 5 MCS-LP pro Ladestandort und somit insgesamt 2.500 MCS-LP angenommen.
- Das OB-Lkw-System 6.000 ist durch 250.000 OB- und nur 50.000 B-Lkw gekennzeichnet. Aufgrund der steigenden Optionen zum Laden während der Fahrt ist die Batteriekapazität der OB-Lkw mit 250 kWh und einer Reichweite von ca. 190 km nur halb so groß wie die Batteriekapazität eines B-Lkw.[145]

---

auf E- und H2-Lkw als nicht mehr wahrscheinlich, der komplementäre Einsatz von L-O-LI aber weiterhin als denkbar angesehen wird. Vgl. dazu BOSTON CONSULTING GROUP (2021, S. 14).

[144] Zur Einordnung: Der Schätzung liegt die Annahme zugrunde, dass das L-O-LI-Netz nicht lückenlos errichtet wird, sondern ein größerer Teil der BAB durch das L-O-LI-Netz abgedeckt werden kann. Zur Einordnung wurden auch die Annahmen in MAREEV / SAUER (2018) einbezogen, die eine minimale Batteriekapazität von 120 kWh für OB-Lkw annehmen, wenn ein Drittel der BAB abschnittsweise mit L-O-LI ausgestattet ist. Grundlage für die Annahme ist die Erkenntnis aus dem ENUBA 2-Projekt, dass durch die Energieaufnahme an der L-O-LI über 1 km eine zusätzliche Reichweite von 2 km gewonnen werden kann (SIEMENS AG / TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN / DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. (2016, S. 86 f.)).

[145] Zur Einordnung: Im Rahmen eines Vergleichs von Lkw-Technologien auf Basis von Systemkosten wird in UNTERLOHNER (2021, S. 34) eine Reichweite von 200 km für OB-Lkw angenommen, um Strecken abseits der zu

4.1.1.1.1.1.2.2 Annahmen zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen

In diesem Abschnitt werden die Annahmen zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen dargestellt und erläutert. Tabelle 4 bietet einen Überblick. Im Folgenden werden die festzulegenden Annahmen nach den betrachteten Kostenpositionen gruppiert vorgestellt. Erstens werden die Annahmen mit Bezug zur LI und zweitens die mit Bezug zu den Fahrzeugen erörtert. Im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs werden die Investitions-, aber nicht die Erhaltungs- und Betriebskosten berücksichtigt, da die Erhaltungs- und Betriebskosten aktuell noch hohen Unsicherheiten unterliegen und nach erster Einschätzung von geringerer Relevanz für den Lkw-System-Vergleich sein dürften.[146] Abschnitt 4.1.1.1.1.2.2 beinhaltet die Einordnung der Erhaltungs- und Betriebskosten. Im Anschluss an die Erläuterung der für die Kostenpositionen der LI und Fahrzeuge festzulegenden Annahmen werden drittens weitere Annahmen mit Bezug zu den Zeitverlusten und der Energieversorgung dargestellt.

LADEINFRASTRUKTUR (LI) – INVESTITIONSKOSTEN UND NUTZUNGSDAUERN DER BETRACHTETEN LI

Für die Kostenkalkulationen werden Durchschnittswerte für die Investitionskosten von MCS- und CCS-LP i. H. v. 400.000[147] und 80.000 €[148] verwendet. Diese enthalten die Netzanschlusskosten, die allerdings von dem Leistungsbedarf an dem jeweiligen Ladestandort sowie weiteren standortspezifischen Charakteristika abhängig sind.[149] Die angenommenen durchschnittlichen Investitionskosten für die L-O-LI von 2.500.000 €/km beziehen sich auf eine elektrifizierte Strecke in beiden Fahrrichtungen und enthalten ebenfalls die Netzanschlusskosten.[150] Übergreifend wird für P-S-LI und L-O-LI inklusive der Netzanschlüsse eine Nutzungsdauer von 20 Jahren angenommen. Die Angaben für die Nutzungsdauer von P-S-LI weisen ein breites Spektrum zwischen 8 und 20 Jahren auf,

---

90 % mit L-O-LI ausgestatteten BAB und die kurzen BAB-Abschnitte ohne L-O-LI zu überbrücken. Bei einer Abdeckung der europäischen Hauptverkehrsachsen werden in INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 49) – unter der Annahme der Verfügbarkeit von Start-Ziel-LI – OB-Lkw mit einer Reichweite von 150 km ausgestattet. Somit erscheint es plausibel zu sein, dass eine Reichweite von 200 km für OB-Lkw ausreicht, auch wenn nur 50 % der BAB mit L-O-LI ausgestattet ist, aber ein größerer Teil durch den abschnittsweisen Aufbau abgedeckt werden kann.

[146] Dies ist nicht zuletzt auf mangelnde Langzeiterfahrungen im Betrieb zurückzuführen. Vgl. dazu MOTTSCHALL ET AL. (2023, S. 31).

[147] Vgl. dafür auch die durchschnittliche Investitionskosten i. H. v. 400.000 € pro LP in PLÖTZ ET AL. (2021, S. 29), die auch auf den Schätzungen von KÜHNEL / HACKER / GÖRZ (2018, S. 89) i. H. v. 420.000 € für die Investitionskosten eines Ladepunkts mit 1,2 MW inklusive der Netzanschlusskosten basieren. In INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 22) werden 300.000 bis 700.000 € als Investitionskosten für 1 MW Ladeleistung angenommen. Für die kurze Frist werden in GÖCKELER ET AL. (2023, S. 53) Investitionskosten von 400.000 bis 800.000 € pro MCS-LP exklusive der Netzanschlusskosten angegeben. Da die MCS-LI noch am Anfang der Entwicklung steht, sind Lerneffekte in größerem Umfang denkbar.

[148] Zur Einordnung: In GÖCKELER ET AL. (2023, S. 53) werden für die kurze Frist Investitionskosten von 45.000 bis 215.000 € pro CCS-LP exklusive der Netzanschlusskosten angenommen, während in BASMA / SABOORI / RODRÍGUEZ (2021, S. 16 ff) angenommene Hardware- und Installationskosten i. H. v. ca. 50.000 € für 100 kW- und ca. 165.000 € für 350 kW-CCS-LP im Jahr 2030 ausgewiesen werden. In INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 22) liegen die Investitionskosten für 100 kW-LP zwischen 50.000 und 70.000 € und für 350-kW-LP zwischen 170.000 und 240.000 €. Es zeigt sich, dass die Kosten für CCS-LP maßgeblich von der Ladeleistung beeinflusst werden. Im Rahmen dieser Studie werden keine vertieften Betrachtungen zur erforderlichen Ladeleistung der CCS-LP im Bereich der Start-Ziel-LI durchgeführt. Grundsätzlich sind aber in vielen Fällen voraussichtlich 100 kW ausreichend. Daher orientiert sich der angenommene Durchschnittswert eher an den Kosten für CCS-LP mit 100 als mit 350 kW. Da CCS-LI bereits im Bereich der Pkw-LI eingesetzt werden, werden geringere Kostensenkungspotenziale im Vergleich zur MCS-LI erwartet.

[149] Vgl. dafür KIPPELT ET AL. (2022, S. 41 f.) und PLÖTZ ET AL. (2021, S. 29).

[150] Vgl. dazu PLÖTZ ET AL. (2021, S. 26) mit 2,5 Mio. €/km, BÖRJESSON / PROOST (2024, S. 16) mit Prognosen zwischen 2 und 3 Mio. €/km und INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 22) mit 2,2 bis 3,3 Mio. €/km.

während für L-O-LI üblicherweise eine Nutzungsdauer von 20 Jahren geschätzt wird.[151] Durch eine detailliertere Betrachtung der Komponenten der LI und des Netzanschlusses könnte die Genauigkeit des Lkw-System-Vergleichs erhöht werden, was aber im Rahmen dieser Studie nicht erfolgt. Schließlich wirkt sich die Annahme von 20 Jahren Nutzungsdauer am oberen Ende des Spektrums kostensenkend auf die Kostenpositionen der P-S-LI aus. Die Kosteneinsparung im Zuge der Reduktion von MCS-LP in den OB-Lkw-Systemen wird somit tendenziell unterschätzt.

Übergreifend	
Fahrleistung (Fzg.-km/ Jahr)	40,7*
Zu A.1 und B.1) Ladeinfrastruktur	
Investitionskosten	
Ladepunkt MCS (€ / Stück)	400.000
Ladepunkt CCS (€ / Stück)	80.000
Beidseitige L-O-LI (€ / km)	2.500.000
Nutzungsdauer (Jahre)	20
Zu A.2 und B.2) Fahrzeuge	
Investitionskosten	
Batterie	
Annahme im Ausgangspunkt (€ / kWh)	129
Variation im Rahmen der Sensitivitäts-Betrachtungen (€ / kWh)	50-250
Pantograph	12.000
Fahrzeug ohne Batterie / Pantograph (€ /Stück)	75.000
Nutzungsdauer (Jahre)	5*
Zu A.3) Zeitverlust durch Ladevorgänge an P-S-LI	
Ø Zeitkosten (€ / Std.)	35
Anteil der Ladevorgänge an BAB (%)	50
Anteil der Ladevorgänge an BAB-P-S-LI (%)	# LP in bet. Lkw-System / # LP in B-Lkw-System
Zu B.3) Energieversorgung	
Ø Stromkosten inkl. Netzkosten (ct / kWh)	10*
Ø Energieverbrauch von B- und OB-Lkw (kWh / km)	1,3

Hinweise:
- Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1 beinhaltet die Erläuterung zur Annahme zur Fahrleistung, da diese maßgeblich für den Bedarf an technischen Komponenten und somit auch die technisch-systemischen Ausgestaltungsfragen ist.
- Wirkungen der Variation von mit *-gekennzeichneten Annahmen werden folgend qualitativ betrachtet

Tabelle 4: Annahmen zu Kosten- und weiteren Umweltentwicklungen für den Lkw-System-Vergleich

[151] In KÜHNEL / HACKER / GÖRZ (2018, S. 89 ff.), BASMA / SABOORI / RODRÍGUEZ (2021, S. 17) und NOLL ET AL. (2022) wird für P-S-LI eine Nutzungsdauer von 15 Jahren angenommen, während in KIPPELT ET AL. (2022, S. 15) von einer Nutzungsdauer der LP von 8 Jahren und in JÖHRENS ET AL. (2022, S. 62) von einer Nutzungsdauer von 20 Jahren ausgegangen wird. Es sei darauf hingewiesen, dass die Annahme einer sehr kurzen Nutzungsdauer auch auf eine Orientierung an Refinanzierungszeiträumen zurückgeführt werden könnte, die im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs nicht entscheidend sind. Vgl. dazu Abschnitt 2.3. Für L-O-LI wird in KÜHNEL / HACKER / GÖRZ (2018, S. 89 ff.) und in UNTERLOHNER (2021, S. 96) eine Nutzungsdauer von 20 Jahren angenommen.

FAHRZEUGE – INVESTITIONSKOSTEN UND NUTZUNGSDAUERN DER FAHRZEUGKOMPONENTEN SOWIE ENERGIEVERBRAUCH

B- und OB-Lkw weisen viele Ähnlichkeiten auf, sodass ein grundsätzlicher Investitionsbedarf von 75.000 €[152] angenommen wird, zu dem noch die Lkw-System-abhängigen Kostenpositionen, insbesondere die Batterien und Pantographen, hinzukommen. Die Kosten für die Pantographen werden mit 12.000 €[153] pro OB-Lkw abgeschätzt und nicht variiert. Die Batteriekosten werden dagegen variiert.[154] Denn die Batteriekostenentwicklung unterliegt hohen Unsicherheiten und während aktuelle Batteriekosten für Lkw bei ca. 250 €/kWh liegen, werden Batteriekostenreduktionen auf bis zu 50 €/kWh prognostiziert.[155] Im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs werden zunächst Batteriekosten von 129 €/kWh verwendet. Die Höhe der Batteriekosten ist so festgelegt, dass sich für den Lkw-System-Vergleich im Ausgangspunkt – B-Lkw-System vs. OB-Lkw-System 2.000-ap – ein Gleichstand ergibt. Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten werden die Gesamtkosten des B- und der fünf Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems auch bei einer drastischen Reduktion der Batteriekosten auf 50 €/kWh bestimmt und schließlich im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtungen in Abhängigkeit von Batteriekosten zwischen 50 und 250 €/kWh dargestellt. Es sei angemerkt, dass bei den Kostenkalkulationen nur die nutzbare Batteriekapazität beachtet wird, sodass die Kostenposition der Batterien tendenziell unterschätzt wird.[156] Somit wird das Ausmaß an Reduktionen der Batteriekapazitäten in OB-Lkw im Vergleich zu B-Lkw auch in einem gewissen Umfang unterschätzt, was sich vorteilhaft für das B-Lkw-System auswirkt.

Die Nutzungsdauer der B- und OB-Lkw inklusive der Batterien und Pantographen wird auf 5 Jahre geschätzt.[157] Die Annahme spiegelt das obere Ende der Erstnutzungsdauer wider, vernachlässigt aber

---

[152] JÖHRENS ET AL. (2021, S. 72) geben Kosten für B-Lkw exklusive der Batterien für das Jahr 2030 zwischen 59.300 für B-Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 12 und 18 t und 90.200 € für B-Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 26 t an. In SPETH / FUNKE (2021, S. 7) werden für das Jahr 2030 Kosten eines B-Lkw i. H v. 77.500 € exklusive der Batterie erwartet. Die angenommenen Kosten i. H. v. 75.000 € basieren auf den Annahmen, dass ein hoher Anteil an B-Lkw mit hoher Gewichtsklasse eingesetzt wird und nur verhältnismäßig geringe Kostensenkungen erreicht werden.

[153] PLÖTZ ET AL. (2021, S. 22) nehmen Kosten für den Pantographen i. H. v. 12.000 € an, was die obere Grenze bei langfristigen Abschätzungen in INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 23) darstellt, während die untere Grenze bei 10.000 € liegt. Vgl. weiterhin dazu auch die Kostenunterschiede von einem B- und OB-Lkw mit 100 km Reichweite i. H. v. knapp über 15.000 € im Jahr 2030 in JÖHRENS ET AL. (2022, S. 31).

[154] Vgl. dazu Tabelle 2 c.

[155] Vgl. den in AGORA VERKEHRSWENDE IN KOOPERATION MIT TRANSPORT AND ENVIRONMENT (2022, S. 17) dargestellten möglichen Entwicklungspfad der Batteriekosten für schwere Lkw, der im Jahr 2024 noch über 250 €/kWh und im Jahr 2050 bei 50 €/kWh liegt. Langfristig nehmen auch HACKER ET AL. (2020, S. 151) Batteriepreise von 78 €/kWh an. In INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 22) werden Szenarien mit Batteriekosten für den schweren SGV im Jahr 2050 zwischen 50 €/kWh und 100 €/kWh betrachtet. Zudem wird in LINK ET AL. (2024) auf Basis einer Metastudie und Regressionsanalysen für das Jahr 2050 ein Spektrum zwischen 70 und 115 €/kWh als Projektion für Batteriepreise ermittelt. Es handelt sich dabei um die Einkaufspreise der Batterien für Original Eqiupment Manufacturer (OEM).

[156] Vgl. dazu Abschnitt 2.1.2.1.1.2.

[157] HACKER / JÖHRENS / PLÖTZ (2020, S. 25) geben eine Nutzungsdauer von 5 bis 6 Jahren für schwere Lkw an. MARQUEZ-FERNANDEZ ET AL. (2022, S. 622) beziffern die Abschreibungsdauer für Fahrzeugkomponenten mit 5 Jahren, wobei neben Lkw auch Pkw betrachtet werden. Das BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI) (2020, S. 6) weist Einsatzzyklen von drei bis fünf Jahren für schwere Lkw aus. In einem Forschungsbericht zur „grundsätzliche[n] Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung“ wird für schwere Lkw eine Nutzungsdauer von 11 Jahren angenommen. UNTERLOHNER (2021, S. 47) nehmen einen Restwert von ca. 25 % nach der Erstnutzungsdauer von

die Zweit- oder Weiternutzung der Lkw. Da eine hohe Unsicherheit hinsichtlich der Zweit- und Weiternutzung der schweren Lkw – insbesondere auch in Deutschland – besteht, wird die gesamte Nutzungsdauer in dieser Studie am unteren Ende abgeschätzt. Dies führt tendenziell zu einer Überschätzung der Fahrzeugkosten über den gesamten Betrachtungszeitraum. Daher werden mögliche Implikationen von längeren Nutzungsdauern oder einer differenzierteren Betrachtung der Nutzungsdauern für die einzelnen Fahrzeugkomponenten in Abschnitt 4.1.1.1.1.2.3 diskutiert. Schließlich ist auch die Entwicklung des Energieverbrauchs eines E-Lkw als Umweltentwicklung einzuordnen. Im Rahmen der Kostenkalkulationen finden keine differenzierten Betrachtungen für B- und OB-Lkw statt und es wird ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 1,3 kWh/km angenommen.[158] Es sei weiterhin darauf hingewiesen, dass Energieverluste beim Laden, die sich aus der Energieeffizienz der P-S-LI und der L-O-LI ergeben, vernachlässigt werden.

ZEITKOSTEN UND NUTZUNG DER P-S-LI IN BAB-NÄHE

Bei der Dimensionierung der P-S-LI in BAB-Nähe wird eine Unterschreitung einer mittleren Wartezeit von 5 Minuten pro Ladevorgang an den lokalen Ladestandorten als Ziel berücksichtigt.[159] Diese Wartezeit wird unter Rückgriff auf Zeitkosten für schwere Lkw in Kosten übersetzt. Der Bestimmung von Zeitkosten erfolgt auf Basis unterschiedlicher Ansätze. Zum Teil werden Zeitkosten unter Einbezug der Personal- und Vorhaltungskosten und zum Teil basierend auf Opportunitätskosten ermittelt. Im Rahmen der Kostenkalkulationen werden die Zeitkosten i. H. v. 35 € / Std. verwendet, die am obersten Rand der Schätzungen auf Basis der einzelnen Ansätze einzuordnen sind und unterhalb der Schätzung, die beide Ansätze kombiniert, liegen.[160] Die Annahme wird trotz der relativ hohen Unsicherheiten aufgrund der geringen Relevanz der Zeitkosten für den Lkw-System-Vergleich nicht variiert.[161]

---

5 Jahren an, während BASMA / SABOORI / RODRÍGUEZ (2021, S. 12) nach 5 Jahren von einem Restwert von 30 % von Sattelzugmaschinen exklusive der Batterie und einem Verlust der Batteriekapazität von 20 %, der das Ende der Nutzungsdauer kennzeichnet, ausgehen. Im Gegensatz dazu weisen BASMA / RODRÍGUEZ (2023a, S. 23) für B-Lkw eine Erstnutzungsdauer von 5 und eine Zweitnutzungsdauer von 10 Jahren aus, wobei sie einen Verlust der Batteriekapazität i. H. v. 20 % nach der Zweitnutzungsdauer und damit auch das Ende der Nutzungsdauer prognostizieren. In INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022) bzw. NOLL ET AL. (2022) wird eine 7- bzw. 8-jährige Erstnutzungsdauer und ein Restwert zwischen 20 und 35 % bzw. von 18 % angenommen.

[158] Vgl. dazu GÖCKELER ET AL. (2023, S. 42), die für das Jahr 2030 für B-Lkw in der Gewichtsklasse mit einer Reichweite von 400 km Energieverbräuche von 1,08 bis 1,41 kWh/km und für OB-Lkw mit einer Reichweite von 200 km 1,43 kWh/km als Energieverbrauch angeben. In UNTERLOHNER (2021, S. 89) wird in der langen Frist ein Energieverbrauch von 1,15 kWh/km bzw. 1,25 kWh/km für B- bzw. OB-Lkw angenommen. JÖHRENS ET AL. (2022, S. 25 ff.) nehmen im Jahr 2030 für B-Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 26 t mit einer Reichweite von 100 bzw. 600 km einen Energieverbrauch von 1,16 bzw. 1,27 kWh/km und für OB-Lkw in der gleichen Gewichtsklasse mit einer Reichweite von 50 bzw. 100 km von 1,25 bis 1,2 kWh/km an. Die Unterschiede der Energieverbräuche von B- und OB-Lkw sind einerseits durch die Gewichtsunterschiede, die sich durch unterschiedliche Batteriekapazitäten begründen, und andererseits durch die Erhöhung des Luftwiderstands durch den Pantographen zu erklären. Vereinfachend wird ein einheitlicher Energieverbrauch für E-Lkw angenommen.

[159] Vgl. Kasten 2.

[160] JÖHRENS ET AL. (2021, S. 55) ermitteln unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten Zeitkosten i. H. v. 34 €/Std. für schwere Nutzfahrzeuge. RIEKEN ET AL. (2015, S. 286 ff.) bestimmen im Rahmen der Betrachtung von Personal- und Vorhaltungskosten Zeitkosten um die 25 €/h für Lkw, wobei für Anhänger ca. 5 €/ Std. hinzukommen. BAUM / KRANZ (2012, S. 17 f.) geben unter Berücksichtigung von Personal- und Vorhaltungskosten sowie weiteren kleineren Kostenpositionen Zeitkosten zwischen ca. 32 und 38 €/ Std. für schwere Lkw an. INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2022, S. 47) weisen für das Jahr 2020 Personalkosten i. H. v. ca. 19 €/ Std. aus und zeigen ferner auf, dass unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten die Zeitkosten bei mindestens 52 €/ Std. liegen müssen.

[161] Vgl. dazu die ermittelten Zeitkosten im Verhältnis zu den Gesamtkosten in Abschnitt 4.1.1.1.2 und in Anhang A.

Weiterhin liegt der Dimensionierung der P-S-LI in BAB-Nähe die Annahme zugrunde, dass die Hälfte der Energie, die für Fahrten auf den BAB benötigt wird, an der Netz-LI in BAB-Nähe geladen wird.[162] Zudem wird für alle betrachteten E-Lkw-Systeme angenommen, dass die Auslastung der P-S-LI in BAB-Nähe grundsätzlich konstant ist. Daher wird der Anteil der Ladevorgänge an der P-S-LI in BAB-Nähe in den Ausgestaltungsvarianten des OB-Lkw-Systems unter Verwendung des Verhältnisses zwischen der Anzahl der MCS-LP in der betrachteten Ausgestaltungsvariante eines OB-Lkw-System und der Anzahl der MCS-LP in dem B-Lkw-System ermittelt. Diese Annahme wird aufgrund der geringen Relevanz der Zeitkosten nicht variiert, obwohl es durchaus plausibel erscheint, dass die Auslastung der MCS-LP variieren könnte.

ENERGIEVERSORGUNG

Die Kosten für die Energieversorgung bzw. die Stromkosten von B- und OB-Lkw enthalten zum einen die Stromgestehungskosten (engl. levelised cost of electricity (LCOE)) und zum anderen die Netzkosten, wobei die Netzanschlusskosten in den Investitionskosten der LI beinhaltet sind. Im Rahmen dieser Studie werden durchschnittliche Stromkosten für B- und OB-Lkw von 10 ct/ kWh angenommen.[163] Es findet keine Differenzierung der Stromkosten von B- und OB-Lkw statt. Es ist aber durchaus denkbar, dass sich die Kosten für die Stromproduktion und das Stromnetz unterscheiden, sodass die Relevanz potenzieller Kostenunterschiede für den Lkw-System-Vergleich in Abschnitt 4.1.1.1.1.2.5 diskutiert wird.

4.1.1.1.1.2 Diskussion und Einordnung der Relevanz von nicht oder nicht differenziert in den Kostenkalkulationen betrachteten Positionen

In diesem Abschnitt werden Kostenpositionen angesprochen, die im Rahmen der Kostenkalkulationen nicht oder nicht differenziert betrachtet werden und nach einer allerersten Abschätzung (zum größten Teil) nicht von entscheidender Relevanz für die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System sein dürften. Dafür werden teils potenzielle Kostenänderungen quantifiziert und vor dem Hintergrund der Gesamtkosten der betrachteten E-Lkw-Systeme zwischen 243 und 301 Mrd. € in einem Betrachtungszeitraum über 20 Jahre eingeordnet.[164]

4.1.1.1.1.2.1 (Park-)Flächen

Im Rahmen der Kostenkalkulationen werden die Kosten für die Flächen für die LI nicht berücksichtigt. Die L-O-LI wird auf den BAB errichtet und es dürfte sich nur ein geringer zusätzlicher Flächenbedarf am Rand der BAB ergeben. Die P-S-LI ist in der Nähe der BAB verortet und der zusätzliche Flächenbedarf dürfte im Vergleich zur L-O-LI von großer Relevanz sein. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Flächen für die L-O-LI direkt an den BAB im Vergleich zu denen für die P-S-LI in der Nähe der BAB keinen (hohen) Wert für andere Nutzungsoptionen haben dürften. Insgesamt könnte durch die Berücksichtigung der Kosten für die Beschaffung und Nutzung von LI-Flächen, die relative Vorteilhaftigkeit eines OB-Lkw-Systems steigen, da der Bedarf nach P-S-LI in BAB-Nähe und somit

[162] Vgl. Kasten 2.

[163] Vgl. dazu langfristige Prognosen der Stromerzeugungs- und Netzkosten in UNTERLOHNER (2021, S. 92), mit 9,25 ct/kWh für Deutschland.

[164] Vgl. dazu Abschnitt 4.1.1.1.3 sowie für weitere Details Abschnitt 4.1.1.1.2 und Anhang A.

auch der erforderlichen Flächen reduziert werden kann. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Kosten für die Flächen in OB-Lkw-Systemen nur begrenzt im Vergleich zu einem B-Lkw-System sinken, da in allen E-Lkw-Systemen zur Gewährleistung einer Einsatzflexibilität flächendeckend P-S-LI zu errichten ist und sich der Bedarf an Parkflächen für die 45 Min.-Pause und die 9 Std.-Ruhezeit in BAB-Nähe nicht signifikant unterscheiden dürfte.[165] Nach einer allerersten vereinfachten Abschätzung der Kosten für die Beschaffung von Flächen für P-S-LI in BAB-Nähe in dem B-Lkw-System basierend auf Annahme zu Grundstückskosten und zur Anzahl der LP insgesamt, ist nicht zu erwarten, dass sich Grundstückskosten im Rahmen der Kostenkalkulationen entscheidend auf die relative Vorteilhaftigkeit des OB-Lkw-Systems auswirken dürfte.[166] Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser ersten Kostenabschätzungen potenzielle Flächenknappheiten sowie die Eigentumsverhältnisse nicht berücksichtigt sind, sondern diese Aspekte in Ergänzung zu dem Lkw-System-Vergleich auf Basis von Kostenkalkulationen in Abschnitt 4.1.1.2.1 beleuchtet werden.

4.1.1.1.1.2.2 Erhaltung und Betrieb von Ladeinfrastruktur und Fahrzeugen

Da sich sowohl B- und OB-Lkw als auch L-O-LI sowie P-S-LI im Allgemeinen und MCS-LI im Speziellen in der Entwicklung befinden, liegen noch keine (umfangreichen) Erfahrungen zur Erhaltung und zum Betrieb vor. Auf Basis des aktuellen Wissenstands erscheinen die Erhaltungs- und Betriebskosten für die L-O-LI, die für die P-S-LI zu übertreffen, während sowohl für B- als auch für OB-Lkw ca. 15.000 €/Jahr an Erhaltungs- und Betriebskosten erwartet werden.[167] Mit Bezug zu den Erhaltungs- und Betriebskosten für die Lkw lässt sich feststellen, dass die Kostenposition zwar für die Höhe der Gesamtkosten relevant ist, aber keine Auswirkungen auf die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System hat. Dagegen sei mit Blick auf die Erhaltungs- und Betriebskosten der LI darauf hingewiesen, dass zu erwarten ist, dass die Betriebskosten sich zulasten des OB-Lkw-Systems im Lkw-System-Vergleich auswirken. Zum einen ist es wahrscheinlich, dass die Investitionskosten der L-O-LI die Investitionskosten der in einem OB-Lkw-System eingesparten P-S-LI regelmäßig deutlich überschreiten dürften. Zum anderen verstärkt sich dieser Effekt noch dadurch, dass die Erhaltungs- und Betriebskosten der L-O-LI relativ zu den Investitionskosten höher sind als die der P-S-LI. Nach aktuellen Einschätzungen dürfte der Umfang dennoch mit Blick auf die Gesamtkosten begrenzt sein. Eine weiterführende Betrachtung der Erhaltungs- und Betriebskosten findet im Rahmen dieser Studie nicht statt, ist aber (nach der Sammlung weiterer Betriebserfahrungen und der Verbesserung des Wissensstands) empfehlenswert.

---

[165] Vgl. Abschnitt 2.1.1.

[166] In einer ersten vereinfachten Abschätzung werden Flächenkosten eines B-Lkw-Systems i. H. v. 7 bis 14 Mio. € ermittelt. Dabei wird unterstellt, dass an den heute verfügbaren 70.000 Stellplätzen LP (z. T. MCS und z. T. CCS) errichtet werden. Für die Anzahl an Stellplätzen vgl. IRZIK ET AL. (2019, S. 5). Für einen LP wird ein zusätzlicher Flächenbedarf von 10 bis 20 m² angenommen, der sich aus einem Streifen für die Ladesäulen zwischen zwei Parkplätzen mit einer Breite von 0,5 bis 1 m und einer Länge von 20 m ergibt. Ferner werden durchschnittliche Flächenkosten von 100.000 €/ ha (10 €/m²) berücksichtigt.

[167] UNTERLOHNER (2021, S. 95 f.) weisen für P-S-LI 1 % der Investitionskosten als Betriebskosten und für L-O-LI 2 % der Investitionskosten als Betriebskosten aus. Für B- und OB-Lkw nehmen UNTERLOHNER (2021, S. 90) 14.632 €/Jahr an. Auch JÖHRENS ET AL. (2022, S. 34) geben an, dass sich die sonstigen Kosten, die allerdings neben Wartungs- und Instandhaltungskosten auch Versicherungskosten, Steuern und Personalkosten enthalten, für B- und OB-Lkw kaum unterscheiden.

4.1.1.1.1.2.3 Combined Charging System (CCS) als Substitut für das Megawatt Charging System (MCS) im Bereich der Netz-Ladeinfrastruktur

In den Kostenkalkulationen werden ausschließlich MCS-LP in BAB-Nähe als P-S-LI berücksichtigt.[168] Es ist allerdings durchaus plausibel, dass P-S-LI in BAB-Nähe teils auch mit geringeren Ladeleistungen und somit als CCS-LI errichtet wird.[169] Folgend wird anhand einer kurzen und sehr vereinfachten Beispielrechnung dargestellt, dass die Kostenänderungen durch die Substitution von MCS-LP durch CCS-LP in BAB-Nähe sich im einstelligen Milliardenbereich befinden dürften. Im Kontext der in Abschnitt 4.1.1.1.2 bzw. Abschnitt 4.1.1.1.3 dargestellten Lkw-System-unabhängigen bzw. -abhängigen Kosten sind die Kostenänderungen als nicht entscheidend zu bewerten. Für die Beispielrechnung wird auf die in Tabelle 4 dargestellten Investitionskosten für MCS- und CCS-LP i. H. v. 400.000 € und 80.000 € zurückgegriffen. Ferner wird das Substitutionsverhältnis auf Basis von Annahmen zur durchschnittlichen Auslastung der CCS- und MCS-LP getroffen. Es wird angenommen, dass die Auslastung eines MCS-LP ungefähr zehnmal[170] so hoch ist wie die eines CCS-LP, sodass ein MCS-LP durch 10 CCS-LP substituiert werden könnte. Das geht mit einer Verdopplung der Kosten einher, da die Kosten eines MCS-LP das fünffache der Kosten eines CCS-LP darstellen. Würden folglich alle MCS-LP des betrachteten B-Lkw-Systems durch CCS-LP ersetzt, müssten anstatt 5.941 LP mit Gesamtkosten i. H. v. 2,4 Mrd. € insgesamt 59.410 CCS-LP mit Gesamtkosten i. H. v. 4,8 Mrd. € errichtet werden. Im Hinblick auf die Größenordnung ist zunächst anzumerken, dass unter den gesetzten Annahmen nicht ausschließlich auf CCS-LP zurückgegriffen werden kann. Denn es ist z. T. auch erforderlich, dass 500 kWh für die nächsten 4,5 Stunden Fahrt in der 45 Min.-Pause geladen werden können.[171] Dadurch reduziert sich die zu erwartende Kostenänderung, wenn nur ein Teil der MCS-LP durch CCS-LP substituiert wird. Ferner ist zu beachten, dass für den Lkw-System-Vergleich nicht die Änderung der Gesamtkosten, sondern die Kostenänderung eines B-Lkw-Systems im Verhältnis zur Kostenänderung eines OB-Lkw-Systems von Relevanz ist. Dahingehend ist festzustellen, dass die Einsparungen eines OB-Lkw-Systems größer werden, desto höher der Anteil der CCS-LI ist. Letztlich erscheint die Vereinfachung im Rahmen der Betrachtung der Netz-LI in BAB-Nähe, die ausschließlich MCS-LP berücksichtigt, sich somit tendenziell positiv auf die relative Vorteilhaftigkeit des B-Lkw-Systems auszuwirken. Potenzielle Kostenänderungen sind vor dem Hintergrund der in den Abschnitten 4.1.1.1.2 und 4.1.1.1.3 dargestellten Ergebnisse der Kostenkalkulationen allerdings als gering einzuordnen.

4.1.1.1.1.2.4 Nutzungsdauer der Lkw- bzw. der Lkw-Komponenten

Die Nutzungsdauer aller Lkw-Komponenten wird im Rahmen der Kostenkalkulationen auf 5 Jahre geschätzt, und ist somit im Vergleich zu aktuellen Gesamtnutzungsdauern (Erst- und Zweitnutzungsdauern) von Lkw gering.[172] Es bestehen allerdings – auch im Kontext der mangelnden

[168] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1.

[169] Vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1.2, Abschnitt 2.1.2.1.2.2 sowie Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1.

[170] Vgl. dazu die Annahmen in GÖCKELER ET AL. (2023, S. 53) zur Auslastung mit 1,5 Lkw/Tag für CCS-LP für das Laden in den 9 Std.-Ruhezeiten und 16 Lkw/Tag für MCS-LP.

[171] Vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1.2.

[172] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2.

Langzeiterfahrungen – insbesondere im Hinblick auf die Nutzungsdauern der neuen Lkw-Komponenten – Batterien und Pantographen – erhebliche Unsicherheiten. Da es denkbar erscheint, dass Batterien und Pantographen während der Nutzungsdauer eines E-Lkw ersetzt werden, werden in diesem Abschnitt die Implikationen für die Variation der Nutzungsdauer der einzelnen E-Lkw-Komponenten diskutiert. Die Variation der Nutzungsdauer aller Lkw-Komponenten außer der Batterien und Pantographen wirkt sich nicht auf den Lkw-System-Vergleich aus, da eine konstante Anzahl von E-Lkw und grundsätzlich gleiche Investitionskosten für B- und OB-Lkw abzüglich der spezifischen Investitionskosten für Batterien und ggf. den Pantographen zu erwarten sind. Die Investitionskosten des Pantographen machen mit 12.000 € nur einen kleinen Anteil der Investitionskosten des Lkw insgesamt aus. Dennoch werden im Folgenden exemplarisch die Wirkungen einer Verdopplung der Nutzungsdauer der Pantographen im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs ermittelt. Grundsätzlich wirkt sich eine Verlängerung der Nutzungsdauer positiv für das OB-Lkw-System aus und insbesondere dann, wenn viele OB-Lkw im Einsatz sind. Die Kostenreduktion im Zuge der Einsparung einer Reinvestition durch die Verdopplung der Nutzungsdauer der Pantographen auf 10 Jahre beträgt im OB-Lkw-System 6.000, das durch die größte Anzahl an OB-Lkw gekennzeichnet ist, 3 Mrd. €.[173] Somit beträgt auch die sich maximal ergebende Kostendifferenz über 10 Jahre durch eine Verdopplung der Nutzungsdauer der Pantographen im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs auf Basis der folgenden Kostenkalkulationen, 3 Mrd. €.

Analog zu den vorstehenden Überlegungen werden auch die maximalen Kostendifferenzen des B- und des OB-Lkw-Systems 6.000 im Zuge der Einsparung einer Reinvestition durch die Verdoppelung der Nutzungsdauer der Batterien auf 10 Jahre ermittelt. Unter der Annahme von Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh sinken die Batteriekosteneinsparungen eines OB-Lkw-Systems 6.000 im Vergleich zum B-Lkw-System durch die Einsparung einer Reinvestition in 10 Jahren um 8 Mrd. €.[174] Bei Batteriekosten von 50 €/kWh reduziert sich die Verringerung der Kostendifferenz auf ca. 3 Mrd. €. Dennoch zeigt sich auf Grundlage der Abschätzung, dass sich eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Batterien durchaus in relevantem Umfang positiv auf die relative Vorteilhaftigkeit eines B-Lkw-Systems auswirken könnte.

4.1.1.1.1.2.5 Stromnetzanschlüsse und Wirkungen auf das Stromsystem

Im Rahmen der Kostenkalkulationen werden die Kosten für Stromnetzanschluss, Stromerzeugung und Verteil- und Übertragungsnetze vereinfacht und nicht differenziert für ein B- und ein OB-Lkw-System betrachtet. Die Kosten für die Stromnetzanschlüsse sind Teil der Investitionskosten der LI und werden somit proportional zur Anzahl der LP bzw. der Länge der L-O-LI betrachtet. Die in den Kostenkalkulationen angenommenen Stromkosten umfassen die Stromerzeugungskosten und die

[173] Die Kostenreduktion ergibt sich aus einer Anzahl von 250.000 OB-Lkw und Investitionskosten des Pantographen i. H. v. 12.000 €.

[174] Die Differenz der Batteriekosteneinsparungen durch die Verdopplung der Nutzungsdauer der Batterien ergibt sich aus der Differenz der Batteriekapazitäten von B- und OB-Lkw i. H. v. 250 kWh, den Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh sowie der Anzahl der OB-Lkw i. H. v. 250.000. Die sich im Zuge der Einsparung einer Reinvestition durch die Verdopplung der Nutzungsdauer der Batterien ergebende Kostendifferenz des B-Lkw-Systems beträgt 19 Mrd. und die des OB-Lkw-Systems ca. 11 Mrd. €.

Kosten für Verteil- und Übertragungsnetze.[175] Im Rahmen dieser Studie erfolgt aufgrund der hohen Komplexität keine dezidierte Betrachtung der Interdependenzen zwischen den E-Lkw-Systemen und dem Stromsystem. Im Folgenden werden erste Hinweise aufgezeigt, die nahelegen, dass eine detaillierte Betrachtung des Stromsystems keine wesentlichen Auswirkungen auf die relative Vorteilhaftigkeit eines B- und OB-Lkw-Systems haben könnte. Nichtsdestotrotz bestehen dahingehend noch hohe Unsicherheiten und weitere Untersuchungen sind zu empfehlen.

Zunächst sind sowohl für B- als auch für OB-Lkw-Systeme Stromnetzanschlüsse für die Netz- und die Start-Ziel-LI erforderlich. Da die Start-Ziel-LI im Rahmen dieser Studie als Lkw-System-unabhängige Kostenposition aufgefasst wird, sind keine signifikanten Unterschiede für die Netzanschlusskosten zu erwarten. Im Bereich der Netz-LI ist eine Gegenüberstellung der Netzanschlusskosten der P-S-LI in einem B-Lkw-System und der Netzanschlusskosten der L-O-LI sowie der P-S-LI in einem OB-Lkw-System erforderlich. Grundsätzlich ist anzumerken, dass hinsichtlich der Netzanschlusskosten einerseits Synergie- und Skaleneffekte und andererseits auch Sprünge in dem Netzanschlusskostenverlauf in Abhängigkeit der Netzanschlussleistung zu bedenken sind.[176] Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass für große Ladestandorte perspektivisch Anschlüsse am Hochspannungsnetz erforderlich sind, während kleine Standorte am Mittelspannungsnetz angeschlossen werden können.[177] Weiterhin können die Netzanschlusskosten von den lokalen Gegebenheiten bestimmt werden, wobei nicht zuletzt die Charakteristika der in Betracht kommenden Netzverknüpfungspunkte in der Umgebung als auch Interdependenzen und insbesondere Synergien zwischen der P-S-LI und L-O-LI für Lkw sowie der LI für Pkw und für leichte Nutzfahrzeuge von Relevanz für die Netzanschlusskosten sein können.[178] Zudem können die Anforderungen an den Netzanschluss durch Lademanagement und stationäre Speicher reduziert werden, wobei nach einer ersten Einschätzung stationäre Speicher keine vielversprechende Option für Ladestandorte an den BAB darstellen dürften.[179]

Für die L-O-LI werden verschiedene Netzanschlusskonzepte in Betracht gezogen. Die Unterwerke, die das Verbindungsglied zwischen L-O-LI und Stromnetz darstellen, können einzeln üblicherweise im Mittelspannungsnetz oder gebündelt im Hochspannungsnetz angeschlossen werden, wobei die Anzahl der gebündelten Unterwerke auch von der Verortungsstrategie der L-O-LI beeinflusst wird.[180] Es sei grundsätzlich darauf hingewiesen, dass leistungsstarke Netzanschlüsse im Hochspannungsnetz Realisierungszeiträume von bis zu 10 Jahren mit sich bringen können, wobei eine Verkürzung der Planungs- und Genehmigungsprozesse möglich sein dürfte.[181] In der langen Frist wirken sich diese

---

[175] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2.

[176] Vgl. dazu KIPPELT ET AL. (2022) und INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2023, S. 18).

[177] KIPPELT ET AL. (2022, S. 7).

[178] Vgl. dafür GÖCKELER ET AL. (2023, S. 107), KIPPELT ET AL. (2022, S. 11) und SIEMENS MOBILITY GMBH (2020, S. 28 f.).

[179] Vgl. dazu auch KIPPELT ET AL. (2022, S. 34 ff.).

[180] Vgl. GÖCKELER ET AL. (2023, S. 105 f.) und SIEMENS AG / TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN / DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. (2016, S. 41) und SIEMENS MOBILITY GMBH (2020, S. 30 f.).

[181] Vgl. KIPPELT ET AL. (2022, S. 28 ff.) und INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2023, S. 18). In KIPPELT ET AL. (2022, S. 22) werden bereits im Jahr 2035 in Deutschland Ladestandorte, die eine Fahrtrichtung an internationalen

allerdings – vorausschauende Planung unterstellend – nicht auf die Gesamtkosten aus. Insgesamt gibt es zahlreiche Einflussfaktoren auf die Netzanschlusskosten, wodurch eine Abschätzung von Kostenunterschieden für verschiedene E-Lkw-Systeme im Rahmen dieser Studie nicht möglich ist. Dennoch erscheint es plausibel zu sein, dass in der Tendenz mit steigendem Infrastrukturbedarf auch die Netzanschlusskosten zunehmen.

Da im Rahmen der Kostenkalkulationen für B- und OB-Lkw-System die gleichen durchschnittlichen Stromkosten angenommen werden, werden Differenzen der Stromerzeugungskosten sowie der Kosten für Verteil- und Übertragungsnetze vernachlässigt. Aus ersten Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen den Energiebezugsprofilen von B- und/ oder OB-Lkw und dem Stromsektor folgt, dass die Stromnachfrage von E-Lkw und die Erzeugungsprofile von Wind- und Sonne durchaus vereinbar sind, die globalen Implikationen des schweren E-SGV auf den Stromsektor begrenzt, aber in einigen Regionen dennoch deutliche Implikationen des schweren SGV auf den Stromsektor zu erwarten sind.[182] Ein Vergleich der aus dem Einsatz von B- und OB-Lkw resultierenden zusätzlichen Kosten im Stromsektor in GAETE-MORALES ET AL. (2024) zeigt auf Basis von routen-basierten Verkehrsdaten, dass die zusätzlichen Kosten beim Einsatz von B-Lkw die beim Einsatz von OB-Lkw in geringem Umfang unterschreiten, wenn Lademanagement – und somit die zeitliche Verschiebung des Ladens während der Standzeiten – möglich ist.[183] Dies ist auf die größeren Batteriekapazitäten der B-Lkw im Vergleich zu den OB-Lkw und dem daraus resultierenden höheren Flexibilitätspotenzial zurückzuführen und setzt auch voraus, dass Laden mit perfekter Voraussicht möglich ist und E-Lkw während Standzeiten stets Energie laden können. Aufgrund der geringen Kostendifferenzen und im Kontext der gesetzten Annahmen für die Untersuchung, erscheint es durchaus plausibel, die Stromkosten grundsätzlich in der gleichen Höhe anzunehmen. Es gilt allerdings zu bedenken, dass kleine Unterschiede der Stromkosten sich aufgrund der hohen Fahrleistung bzw. des kumulierten Energieverbrauchs von 53 TWh signifikant auf die Gesamtkosten auswirken könnten. Bei einer durchschnittlichen Abweichung der Stromkosten i. H. v. 1 ct/kWh beträgt über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren die Kostendifferenz bereits ungefähr 5,3 Mrd. €.

Insgesamt ist auf Grundlage des aktuellen Wissensstands nicht ersichtlich, ob und in welche Richtung sich die vereinfacht betrachteten Netzanschlusskosten, die proportional zum LI-Bedarf angesetzt werden, sowie die für ein B- und OB-Lkw-System in gleicher Höhe angesetzten Stromkosten auf die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System auswirken. (Weitere) Untersuchungen zu den Wechselwirkungen von E-Lkw-Systemen und dem Stromsystem sind daher zu empfehlen.

Hauptverkehrsachsen bedienen, mit 32 MVA Netzanschlussleistung erwartet, sodass ein Anschluss in der Hochspannungsnetz erforderlich und ein Anschluss im Mittelspannungsnetz nicht mehr ausreichend ist. Die Ladestandorte mit einer Netzanschlussleistung von 32 MVA umfassen 24 MCS-LP und 81 CCS-LP für Lkw sowie 32 CCS-LP für Pkw, wobei ein Lademanagement zur Reduktion der Netzanschlussleistung bereits angenommen wird.

[182] Vgl. HACKER ET AL. (2020, S. 2020 ff.), GAETE-MORALES ET AL. (2024) und SIEMENS AG / TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN / DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. (2016, S. 42 f.) .

[183] Die Option von Rückspeisungen des in den Batterien von E-Lkw geladenen Stroms in das Stromnetz (vehicle-to-grid) und auch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch E-Lkw werden in GAETE-MORALES ET AL. (2024) auch angesprochen, aber im Rahmen dieser Studie ausgeklammert.

4.1.1.1.2 Lkw-System-unabhängige Kosten zur Einordnung

In Tabelle 5 sind die Lkw-System-unabhängigen Kosten aufgezeigt, die auf den in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2 vorgestellten Annahmen basieren. Die Investitionskosten für die Start-Ziel-LI betragen über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren 12 Mrd. €. Die Investitionskosten der 300.000 B- und OB-Lkw stellen mit 90 Mrd. € die zweitgrößte Kostenposition dar, wobei die Kosten für die Batterien und Pantographen nicht inbegriffen sind. Den größten Anteil an den Lkw-System-unabhängigen Kosten stellen die Kosten der Energieversorgung i. H. v. 106 Mrd. € dar.

B) Lkw-System-unabhängige Kostenpositionen	
B.1) Infrastruktur an Start- und Zielpunkten	
Anzahl von schweren Lkw	*300.000*
Verhältnis CCS-LP / Lkw	*1/2*
Kosten für CCS-LP	*80.000 €*
Nutzungsdauer (Jahre)	*20*
Kosten B.1) Infrastruktur	*12.000.000.000 €*
B.2) Fahrzeuge	
Anzahl von schweren Lkw	*300.000*
Investitionskosten exkl. Batterie und Pantograph	*75.000 €*
Nutzungsdauer (Jahre)	*5*
Kosten B.2) Fahrzeuge	*90.000.000.000 €*
B.3) Energieversorgung	
Ø Stromkosten (ct/kWh)	*10*
Anzahl der gefahrenen km/ Jahr an BAB	*30.500.000.000*
Anteil der gefahrenen km an BAB	*75 %*
Ø Energieverbrauch (kWh/km)	*1,3*
Gesamtenergiebedarf (TWh/Jahr)	*53*
Kosten B.3) Energieversorgung	*105.733.000.000 €*
Gesamtkosten B	**207.733.000.000 €**

Tabelle 5: Lkw-System-unabhängige Kosten über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren

4.1.1.1.3 Lkw-System-abhängige Kosten und Lkw-System-Vergleich in Szenarien

Zur Berücksichtigung wesentlicher Unsicherheiten hinsichtlich der technisch-systemischen Ausgestaltung des OB-Lkw-Systems als auch der Kosten- und weiterer Umweltentwicklungen werden folgend einige Annahmen variiert.[184] In Abschnitt 4.1.1.1.3.1 wird der Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs dargestellt und zunächst die Lkw-System-abhängigen Kosten des B-Lkw-Systems und anschließend des OB-Lkw-System 2.000-ap dargestellt. In den folgenden zwei Abschnitten wird das B-Lkw-System mit weiteren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-System verglichen, wobei in Abschnitt 4.1.1.1.3.2 Unsicherheiten hinsichtlich der erforderlichen Batteriekapazität der OB-Lkw in einem OB-Lkw-System mit einer Gesamtlänge der L-O-LI von 2.000 km berücksichtigt werden und in Abschnitt 4.1.1.1.3.3 (weitere) Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems, die durch eine Gesamtlänge der L-O-LI von 4.000 und 6.000 km gekennzeichnet sind, betrachtet werden. Nach der Betrachtung von Szenarien, die sich hinsichtlich der technisch-systemischen Ausgestaltung des OB-Lkw-Systems unterscheiden, werden in Abschnitt 4.1.1.1.3.4 die Implikationen der Unsicherheiten der Batteriekostenentwicklung auf den Lkw-System-Vergleich beleuchtet. In Abschnitt 4.1.1.1.3.5 werden weiterführend die in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1 thematisierten Unsicherheiten hinsichtlich des Bedarfs der

[184] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2 und Tabelle 2.

MCS-LP in BAB-Nähe sowie hinsichtlich der Entwicklung der Fahrleistung des schweren SGV aufgegriffen und die sich für den Lkw-System-Vergleich ergebenden Implikationen diskutiert.

4.1.1.1.3.1 Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs mit einem Gleichstand zwischen dem B-System und einem OB-Lkw-System mit 2.000 km Oberleitungs-Ladeinfrastruktur

In diesem Abschnitt wird die Ermittlung der Lkw-System-abhängigen Kosten des B-Lkw-Systems und des OB-Lkw-Systems 2.000-ap im Detail dargestellt. Anschließend werden die sich ergebenden Gesamtkosten verglichen.

4.1.1.1.3.1.1 (Feststehendes) B-Lkw-System

A) Lkw-System-abhängige Kostenpositionen	B-Lkw-System
A.1) Infrastruktur: Flächendeckung in BAB-Nähe	
A.1.1) Investitionskosten P-S-LI	2.376.400.000 €
Anzahl der Lade-Standorte	*500*
Anzahl der MCS-LP	*5.941*
Investitionskosten für MCS-LP (€/ Stück)	*400.000 €*
Nutzungsdauer (Jahre)	*20*
A.1.2) Investitionskosten L-O-LI	/
Kosten A.1) Infrastruktur: Flächendeckung in BAB-Nähe	*2.376.400.000 €*
A.2) Fahrzeuge	
A.2.1) Investitionskosten Batterien	77.318.937.333 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*
Anzahl der B-Lkw	*300.000*
Anzahl der OB-Lkw	/
Ø Batteriekapazität B-Lkw (kWh)	*500*
Ø Batteriekapazität OB-Lkw (kWh)	
Ø Energieverbrauch (kWh/km)	*1,3*
Ø Reichweite B-Lkw (km)	*385*
Batteriekosten (€/kWh)	129
Ø Batteriekosten B-Lkw (€/Lkw)	*64.432*
Ø Batteriekosten OB-Lkw (€/Lkw)	
Nutzungsdauer (Jahre)	*5*
A.2.2) Investitionskosten Pantographen	/
Kosten A.2) Fahrzeuge	*77.318.937.333 €*
A.3) Zeitverlust durch Ladevorgänge an P-S-LI	
A.3) Kosten durch Zeitverlust	2.471.064.800 €
Anzahl der gef. km/Jahr an BAB	*30.500.000.000*
Gef. Strecke zw. P-S-LI-Laden (km)	*360*
Anteil des Ladens an A.1)-LI an BAB	*50%*
Anteil des Ladens an A.1.1)-P-S-LI	*100%*
Anzahl d. Ladevorgänge A.1.1)-LI/ Jahr	*42.361.111*
Mittlere Wartezeit / Ladevorgang (Min.)	*5*
Zeitkostensatz (€/ Std.)	*35*
Kosten A.3) Zeitverlust	*2.471.064.800 €*
Gesamtkosten A	**82.166.402.133 €**

Legende
In Kostenkalkulationen veränderte Größen
In allen Kostenkalkulationen feststehende Größen
Informationen zur Orientierung

Tabelle 6: Lkw-System-abhängigen Kosten des (feststehenden) B-Lkw-Systems bei Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren

Die Lkw-System-abhängigen Kosten des B-Lkw-Systems betragen – wie in Tabelle 6 dargestellt – bei Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh insgesamt ca. 82 Mrd. €. Im Rahmen dieser Studie werden die Annahmen zur technisch-systemischen Ausgestaltung des B-Lkw-Systems nicht verändert. Mit Bezug zum (feststehenden) B-Lkw-System sind die Batteriekosten die einzige im Rahmen der Kostenkalkulationen variierte Größe.

Somit sind die Investitionskosten für die P-S-LI in der Nähe der BAB in jedem Lkw-System-Vergleich konstant und liegen für den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren bei ca. 2,4 Mrd. €, wenn eine Anzahl von 5.941 MCS-LP mit einer Nutzungsdauer von 20 Jahren und Investitionskosten von 400.000 € pro LP angenommen werden.[185] Ebenso liegen die Kosten im Zuge von Zeitverlusten für das B-Lkw-System konstant bei ca. 2,5 Mrd. €. Die Kosten für die Zeitverluste ergeben sich aus der prognostizierten Anzahl der Ladevorgänge in der Nähe der BAB, der mittleren Wartezeit von 5 Minuten für jeden Ladevorgang und den angenommenen Zeitkosten von 35 €/Stunde. Die Anzahl der Ladevorgänge in der Nähe der BAB ergibt sich aus der Fahrleistung an der BAB, dem Anteil des Ladens in der Nähe der BAB für die auf den BAB zurückgelegten Strecken sowie der durchschnittlich zurückgelegten Distanz zwischen zwei Ladevorgängen. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Zeitkosten hier vereinfacht berechnet und unter Berücksichtigung der in Kasten 2 beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung des Bedarfs an MCS-LP leicht überschätzt werden dürften, da die mittlere Wartezeit von 5 Minuten außerhalb der Peakstunde regelmäßig unterschritten werden dürfte.[186] Die größte Kostenposition der Lkw-System-abhängigen Kosten für ein B-Lkw-System stellen die Batteriekosten mit ca. 77,3 Mrd. € dar. Die Batteriekosten werden auf Basis der nutzbaren Batteriekapazität, der Anzahl der B-Lkw, der spezifischen Batteriekosten und der Nutzungsdauer der Batterien bestimmt.

4.1.1.1.3.1.2 OB-Lkw-System mit 2.000 km Oberleitungs-Ladeinfrastruktur im Vergleich zum B-Lkw-System

Die in Tabelle 7 dargestellten Lkw-System-abhängigen Kosten des OB-Lkw-Systems 2.000-ap betragen wie die des B-Lkw-Systems ca. 82 Mrd. €.[187] Die Fahrzeuge stellen mit Kosten i. H. v. ca. 72,9 Mrd. €, wie auch beim B-Lkw-System, die größte Kostenposition dar. Die Fahrzeugkosten des OB-Lkw-System 2.000-ap unterschreiten die des B-Lkw-Systems um ca. 4,4 Mrd. €, da die Einsparungen durch die reduzierten Batterien in den OB-Lkw stärker als die zusätzlichen Kosten für die Pantographen ins Gewicht fallen. Zudem weisen OB-Lkw-Systeme grundsätzlich geringere Kosten für Zeitverluste auf, da die Anzahl der Ladevorgänge an der P-S-LI in BAB-Nähe durch die Nutzung der L-O-LI in OB-Lkw-Systemen verringert wird.[188] Für das OB-Lkw-System 2.000-ap ergibt sich in dem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren eine Reduktion der Kosten für Zeitverluste im Vergleich zum B-Lkw-System von 307 Mio. €. Diese Kostendifferenz ist als sehr gering einzuordnen. Trotz geringerer Kosten für Fahrzeuge und Zeitverluste ergibt sich ein Gleichstand hinsichtlich der Lkw-System-abhängigen Kosten, da die Infrastrukturkosten des OB-Lkw-Systems 2.000-ap die Infrastrukturkosten des B-Lkw-Systems um ca.

[185] Vgl. Tabelle 3 und Tabelle 4.

[186] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1.

[187] Die Höhe der Batteriekosten wurde so festgelegt, dass sich im Ausgangspunkt des Lkw-System-Vergleichs ein Gleichstand ergibt. Vgl. dazu auch Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2.

[188] Die Annahmen zum Ladeverhalten an der P-S-LI und der L-O-LI sind in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2 beschrieben.

4,7 Mrd. € überschreiten. Dies ist zum größten Teil auf die Investitionskosten der L-O-LI i. H. v. 5 Mrd. € zurückzuführen. Denn infolge der Reduktion von MCS-LP in der BAB-Nähe können in dem OB-Lkw-System 2.000-ap im Vergleich zum B-Lkw-System nur 0,3 Mrd. € eingespart werden.

	B-Lkw-System	OB-Lkw-System 2.000-ap	Kosten-Delta (B abzgl. OB)
A) Lkw-System-abhängige Kostenpositionen			
A.1) Infrastruktur: Flächendeckung in BAB-Nähe			
A.1.1) Investitionskosten P-S-LI	2.376.400.000 €	2.081.200.000 €	295.200.000 €
Anzahl der Lade-Standorte	*500*	*500*	
Anzahl der MCS-LP	5.941	5.203	
Investitionskosten MCS-LP (€/Stück)	*400.000*	*400.000*	
Nutzungsdauer (Jahre)	*20*	*20*	
A.1.2) Investitionskosten L-O-LI		5.000.000.000 €	- 5.000.000.000 €
Länge der L-O-LI (km)		2.000	
Investitionskosten L-O-LI (€/km)		*2.500.000*	
Nutzungsdauer (Jahre)		*20*	
Kosten A.1) Infrastruktur	*2.376.400.000 €*	*7.081.200.000 €*	*- 4.704.800.000 €*
A.2) Fahrzeuge			
A.2.1) Investitionskosten Batterien	77.318.937.333 €	65.721.096.733 €	11.597.840.600 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*	*300.000*	
Anzahl der B-Lkw	300.000	150.000	
Anzahl der OB-Lkw		150.000	
Ø Batteriekapazität B-Lkw (kWh)	*500*	*500*	
Ø Batteriekapazität OB-Lkw (kWh)		350	
Ø Energieverbrauch (kWh/km)	*1,3*	*1,3*	
Ø Reichweite B-Lkw (km)	*385*	*385*	
Ø Reichweite OB-Lkw (km)		*269*	
Batteriekosten (€/kWh)	129	129	
Ø Batteriekosten B-Lkw (€/Lkw)	*64.432*	*64.432*	
Ø Batteriekosten OB-Lkw (€/Lkw)		*45.103*	
Nutzungsdauer (Jahre)	*5*	*5*	
A.2.2) Investitionskosten Pantographen		7.200.000.000 €	- 7.200.000.000 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*	*300.000*	
Anzahl der OB-Lkw		150.000	
Kosten Pantograph (€/Stück)		*12.000*	
Nutzungsdauer (Jahre)		*5*	
Kosten A.2) Fahrzeuge	*77.318.937.333 €*	*72.921.096.733 €*	*4.397.840.600 €*
A.3) Zeitverlust durch Ladevorgänge an P-S-LI			
A.3) Kosten durch Zeitverlust	2.471.064.800 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €
Anzahl der gef. km/Jahr an BAB	*30.500.000.000*	*30.500.000.000*	
Gef. Strecke zw. P-S-LI-Laden (km)	*360*	*360*	
Anteil des Ladens an A.1)-LI an BAB	*50%*	*50%*	
Anteil des Ladens an A.1.1)-P-S-LI	100%	88%	
Anzahl d. Ladevorgänge A.1.1)-LI/ Jahr	*42.361.111*	*37.098.950*	
Mittlere Wartezeit / Ladevorgang (Min.)	*5*	*5*	
Zeitkostensatz (€/ Std)	*35*	*35*	
Kosten A.3) Zeitverlust	*2.471.064.800 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*
Gesamtkosten A	**82.166.402.133 €**	**82.166.402.133 €**	**Gleichstand**

Legende

In Kostenkalkulationen veränderte Größen
In Kostenkalkulationen feststehende Größen
Informationen zur Orientierung

Tabelle 7: Lkw-System-abhängige Kosten des OB-Lkw-System 2.000-ap bei Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh im Vergleich zu den des (feststehenden) B-Lkw-Systems über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren

4.1.1.1.3.2 Reduktion der Batteriekapazitätseinsparungen bei OB-Lkw in weiteren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km Oberleitungs-Ladeinfrastruktur

In diesem Abschnitt werden Gesamtkosten von drei verschiedenen Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km L-O-LI den des feststehenden B-Lkw-Systems gegenübergestellt, indem neben den Lkw-System-abhängigen Kosten auch die Lkw-System-unabhängigen Kosten zur Einordnung einbezogen werden. Eine Übersicht über die Gesamtkosten zeigt Abbildung 7.

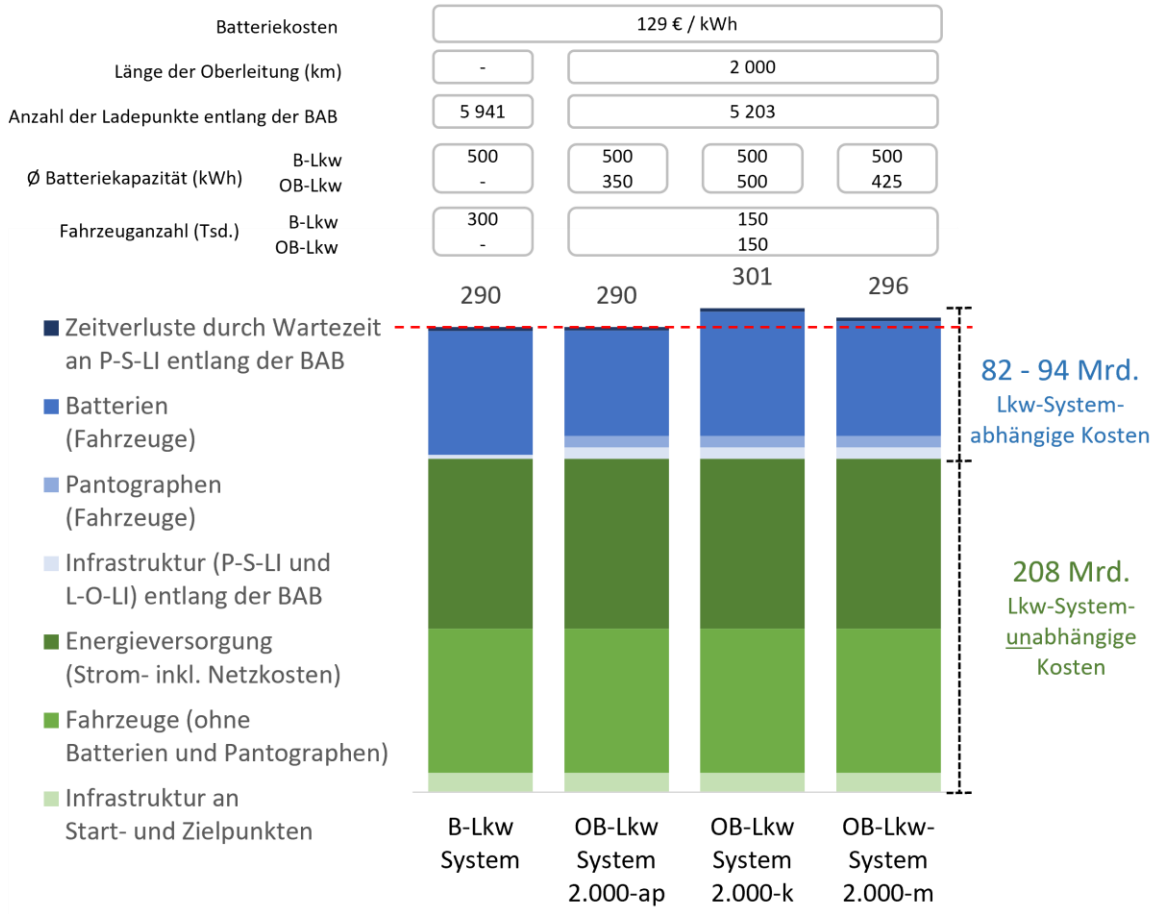


Abbildung 7: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und von drei Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km L-O-LI

Der Gleichstand des B- und des OB-Lkw-Systems 2.000-ap hinsichtlich der Gesamtkosten, die in Abschnitt 4.1.1.1.3.1 detailliert erläutert werden, ist in der Abbildung 7 ersichtlich. Zudem wird deutlich, dass eine geringere Reduktion der Batteriekapazitäten in dem OB-Lkw-System 2.000-k und dem OB-Lkw-System 2.000-m im Vergleich zur Reduktion der Batteriekapazitäten im OB-Lkw-Systems 2.000-ap insgesamt zu relativ geringen Kostendifferenzen führt. Unter der Annahme, dass die Batteriekapazitäten der OB-Lkw überhaupt nicht im Vergleich zu denen der B-Lkw reduziert werden, ergibt sich eine Kostendifferenz i. H. v. 11 Mrd. €. D.h. die Gesamtkosten des OB-Lkw-Systems 2.000-k übersteigen die Gesamtkosten des B-Lkw-Systems in 20 Jahren um insgesamt 11 Mrd. €. Das entspricht ca. 4 % der betrachteten Gesamtkosten des B-Lkw-Systems. Es sei angemerkt, dass der prozentuale Anteil der Kostendifferenz an den Gesamtkosten noch geringer sein dürfte, da einige, zum großen Teil Lkw-System-unabhängige Kostenpositionen in den Gesamtkosten nicht berücksichtigt sind

und somit die tatsächlichen Gesamtkosten über den hier ausgewiesenen Gesamtkosten liegen dürften.[189] Insgesamt wird weiterhin aus der Abbildung 7 deutlich, dass der Großteil der Gesamtkosten Lkw-System-unabhängig ist. Die Kosten für die Energieversorgung haben mit 35 bis 36 % den größten Anteil an den Gesamtkosten, während die Kosten für die Netz- und Start-Ziel-LI nur einen Anteil von 5 bis 7 % aufweisen. Außerdem wird deutlich, dass die Zeitkosten im Rahmen des Lkw-System-Vergleichs nicht ins Gewicht fallen. Die betrachteten Kosten sowie die Berechnungsgrundlage sind in Abschnitt 4.1.1.1.2 und in Anhang A im Detail dargestellt.

4.1.1.1.3.3 Erweiterung des Umfangs der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur in weiteren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems

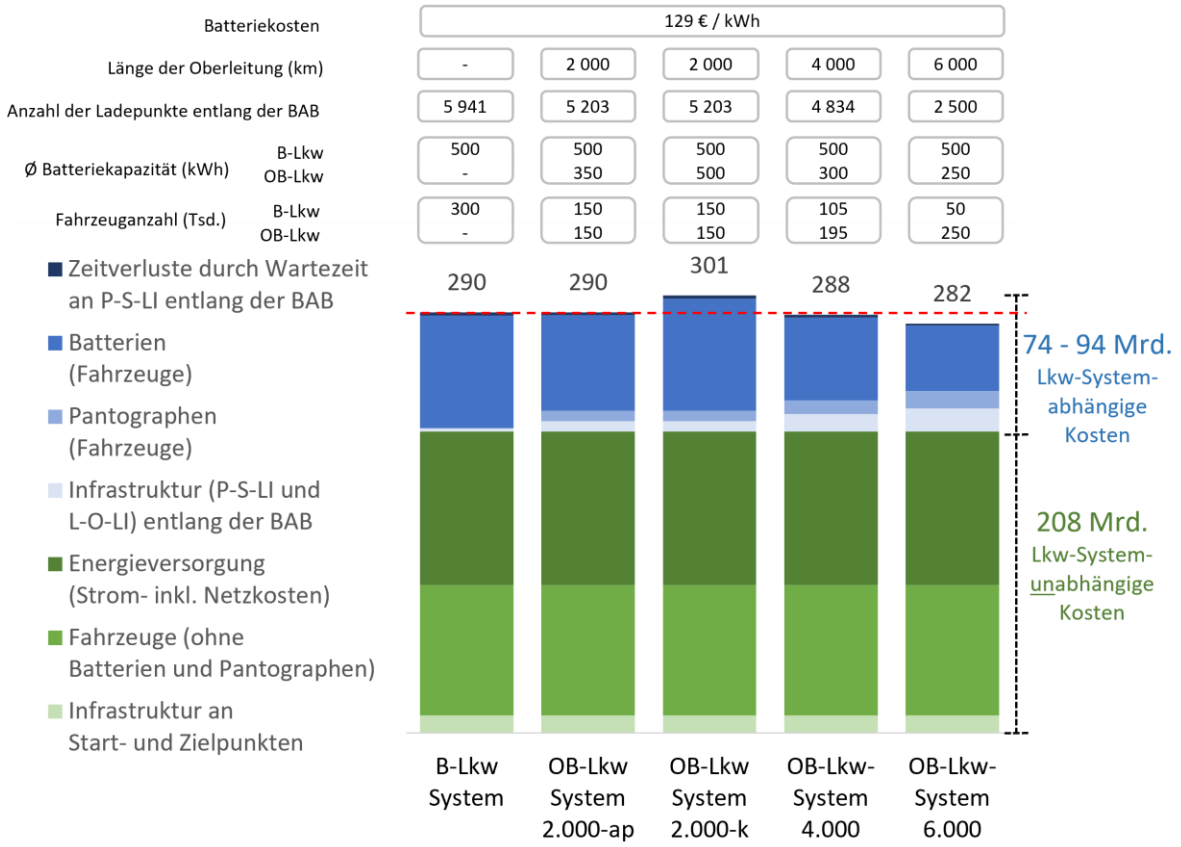


Abbildung 8: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und verschiedenen Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems mit 2.000 km, 4.000 km und 6.000 km L-O-LI

In diesem Abschnitt werden die Gesamtkosten von verschiedenen Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems, die durch eine Gesamtlänge der L-O-LI von 2.000, 4.000 oder 6.000 km gekennzeichnet sind, mit den des feststehenden B-Lkw-Systems verglichen. Abbildung 8 veranschaulicht den Vergleich der Gesamtkosten. Auf die Darstellung des in Abschnitt 4.1.1.1.3.2 vorgestellten OB-Lkw-

[189] Die Kosten für ein B- und ein OB-Lkw-System werden tendenziell unterschätzt, da nicht alle Kostenpositionen betrachtet werden. Unter dem Begriff der Gesamtkosten wird die Summe der Kosten der betrachteten Kostenpositionen und nicht die Summe aller Kostenpositionen verstanden (vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.1).

Systems 2.000-m wird verzichtet, da es zwischen den beiden anderen betrachteten OB-Lkw-Systemen mit 2.000 km L-O-LI liegt und dadurch keine weiteren Erkenntnisse gewonnen werden können.

Die Abbildung 8 zeigt, dass ein OB-Lkw-System 6.000 unter den getroffenen Annahmen mit den geringsten Gesamtkosten einhergeht. Die Kostendifferenz zum B-Lkw-System beträgt 6 Mrd. €. Ebenso unterschreiten die Gesamtkosten des OB-Lkw-System 4.000 die Gesamtkosten des B-Lkw-Systems, wobei die Kostendifferenz nur ca. 2 Mrd. € entspricht. Im Kontext des Betrachtungszeitraums von 20 Jahren sind die Kostendifferenzen insgesamt als sehr gering einzuordnen. Hintergrund für die mit der L-O-LI-Länge steigende relative Vorteilhaftigkeit der betrachteten OB-Lkw-Systeme mit bis zu 6.000 km L-O-LI ist, dass die Einsparungen im Zuge der Batteriekapazitätsreduktion die zusätzlichen Kosten für LI und Pantographen überschreiten. Es sei darauf hingewiesen, dass dies ab einer bestimmten Gesamtlänge der L-O-LI nicht mehr der Fall sein dürfte, da die Infrastrukturkosten (in einer ersten Näherung) linear mit der mit L-O-LI ausgestatteten Strecken ansteigen, während die zusätzlichen Potenziale zur Batteriekapazitätsreduktion bei OB-Lkw nur noch begrenzt sein dürften.

4.1.1.1.3.4 Variation der Batteriekosten in dem B-Lkw-System und den OB-Lkw-Systemen

Die Entwicklung der Batteriekosten unterliegt hohen Unsicherheiten.[190] In den vorherigen Abschnitten zum Vergleich eines B- und OB-Lkw-Systems wurden Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh angenommen. Der Wert liegt zwischen den aktuellen Batteriekosten von über 250 €/kWh für Batterien für den schweren SGV und den für die lange Sicht prognostizierten Batteriekostenreduktionen auf bis zu 50 €/kWh. In diesem Abschnitt werden das bereits vorgestellte B-Lkw-System sowie die betrachteten Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems erneut, aber nun unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Batteriekostenentwicklung, gegenübergestellt. Abschnitt 4.1.1.1.3.4.1 stellt die Gesamtkosten der betrachteten Lkw-Systeme dar, wenn anstelle von Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh, Batteriekosten i. H. v. 50 €/kWh angenommen werden. In Abschnitt 4.1.1.1.3.4.2 werden die Gesamtkosten der betrachteten E-Lkw-Systeme in Abhängigkeit der Batteriekosten dargestellt und die Eignung von B- und OB-Lkw-System in Abhängigkeit davon diskutiert.

4.1.1.1.3.4.1 Drastische Reduktion der Batteriekosten

Abbildung 9 stellt die Gesamtkosten des B- und der OB-Lkw-Systeme bei Batteriekosten von 129 €/kWh und 50 €/kWh gegenüber. Mit der Reduktion der Batteriekosten sinken die Gesamtkosten insgesamt um 10 bis 16 %. Die größte Kostenreduktion betrifft das B-Lkw-System und das OB-Lkw-System 2.000-k, da diese Lkw-Systeme durch die größten Batteriekapazitäten gekennzeichnet sind. Es wird weiterhin deutlich, dass unter der Annahme von Batteriekosten i. H. v. 50 €/kWh, das B-Lkw-System im Vergleich zu allen betrachteten OB-Lkw-Systemen im Vorteil ist. Die größte Kostendifferenz von knapp 12 Mrd. € besteht zwischen dem B-Lkw-System und dem OB-Lkw-System 6.000 bei Batteriekosten von 50 €/kWh. Wenn Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh angenommen werden, liegen die Gesamtkosten des OB-Lkw-System 6.000 dagegen 8 Mrd. € unter den Gesamtkosten des B-Lkw-Systems. Schließlich ist auch ersichtlich, dass die Gesamtkosten des OB-Lkw-System 2.000-ap die Gesamtkosten des B-Lkw-

[190] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2.

System bei Batteriekosten i. H. v. 50 €/kWh übersteigen und sich somit kein Gleichstand – wie bei Batteriekosten von 129 €/kWh – ergibt. Hintergrund dafür ist, dass die Batteriekapazitäten in dem OB-Lkw-System 2.000-ap kleiner sind als in dem B-Lkw-System, sodass sich die Kostenreduktion weniger stark auf die Gesamtkosten des OB-Lkw-Systems 2.000-ap auswirkt.

4.1.1.1.3.4.2 Gesamtkosten der E-Lkw-Systeme in Abhängigkeit der Batteriekosten

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass in einer ersten Näherung bei Batteriekosten i. H. v. 129 €/kWh das B-Lkw-System im Vergleich zu OB-Lkw-Systemen mit 2.000 km L-O-LI mit maximal gleich hohen Gesamtkosten verbunden und somit größtenteils im Vorteil ist. Im Vergleich zum betrachteten OB-Lkw-System 4.000 und zum OB-Lkw-System 6.000 ergeben sich für das B-Lkw-System allerdings höhere Gesamtkosten. Wird eine drastische Reduktion der Batteriekosten auf 50 €/kWh angenommen, ist das B-Lkw-System gegenüber allen betrachteten OB-Lkw-Systemen im Vorteil. Um die Implikationen der Batteriekosten auf den Lkw-System-Vergleich genauer zu untersuchen, werden in Abbildung 10 die Gesamtkosten der E-Lkw-Systeme für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren in Abhängigkeit der Batteriekosten dargestellt. Die Höhe der Kosten, die unabhängig von der Entwicklung der Batteriekosten sind und somit den Schnittpunkt mit der y-Achse determinieren, ergibt sich aus den Infrastrukturkosten, den Kosten für die Pantographen und den Zeitkosten des jeweiligen Lkw-Systems sowie den Lkw-System-unabhängigen Kosten. Die Steigung der Gesamtkosten hängt von den für die B- und OB-Lkw benötigten Batteriekapazitäten in dem jeweiligen Lkw-System ab.

Es wird deutlich, dass das B-Lkw-System bei Batteriekosten bis zu 97 €/kWh stets im Vorteil ist. Bei Batteriekosten von 97 €/kWh weisen die Gesamtkosten des B- und OB-Lkw-System 6.000 die gleiche Höhe auf. Aufgrund der höheren Infrastrukturkosten übersteigen die Gesamtkosten des OB-Lkw-System 6.000 bei geringen Batteriekosten die des B-Lkw-Systems. Die Steigung der Gesamtkosten ist für das B-Lkw-System im Vergleich zu den dargestellten OB-Lkw-Systemen allerdings größer, da die insgesamt für B- und OB-Lkw benötigten Batteriekapazitäten in dem B-Lkw-System und dem OB-Lkw-System 2.000-k am größten sind. Es sei angemerkt, dass zugunsten der Übersichtlichkeit in der Abbildung 10 auf eine Darstellung des OB-Lkw-Systems 2.000-k verzichtet wird.[191] Der Schnittpunkt der Gesamtkosten-Kurve des B-Lkw-Systems und des OB-Lkw-Systems 4.000 liegt bei 118 €/kWh. Liegen die Batteriekosten in der langen Frist unter 118 €/kWh, ergibt sich ceteris paribus ein Gesamtkostenvorteil des B-Lkw-Systems gegenüber dem OB-Lkw-System 4.000. Die Schnittpunkte für das B-Lkw-System und das OB-Lkw-System 2.000-ap und das OB-Lkw-System 2.000-m liegen bei 129 €/kWh und bei 258 €/kWh.[192] Eine um 75 kWh niedrigere Reduktion der Batteriekapazitäten der OB-Lkw in dem OB-Lkw-System 2.000-m im Vergleich zur Reduktion in dem OB-Lkw-System 2.000-ap, die mit einer zusätzlichen Reichweite von unter 60 km einhergeht, wirkt sich somit signifikant aus.

[191] Aufgrund der Annahme, dass B- und OB-Lkw die gleichen Batteriekapazitäten aufweisen, sind die Gesamtkosten des OB-Lkw-System 2.000-k stets oberhalb der Gesamtkosten des B-Lkw-Systems.

[192] Es sei darauf hingewiesen, dass die Batteriekosten für schwere Lkw bereits heute bei ca. 250 €/kWh liegen. Vgl. dazu Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.2.

Insgesamt zeigt die Abbildung 10 auf, dass die Batteriekosten einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten der E-Lkw-Systeme haben. So liegen die Gesamtkosten des B-Lkw-Systems bei Batteriekosten von 50 €/kWh bei ca. 243 Mrd. € und bei Batteriekosten von 200 €/kWh bei ca. 333 Mrd. €. Für den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ergibt sich somit eine Differenz von 90 Mrd. €. Zudem wird ersichtlich, dass die relative Vorteilhaftigkeit der betrachteten Lkw-Systeme maßgeblich von den Batteriekostenentwicklungen abhängt. Ist nur eine geringe Reduktion der Batteriekosten von heute ca. 250 €/kWh auf 200 €/kWh möglich, liegen die Gesamtkosten des OB-Lkw-System 6.000 26 Mrd. € unter den Gesamtkosten des B-Lkw-Systems. Eine drastische Reduktion der Batteriekosten auf 50 €/kWh führt allerdings dazu, dass die Gesamtkosten des B-Lkw-Systems die des OB-Lkw-System- 6.000 um 12 Mrd. € unterschreiten. Insgesamt wird ersichtlich, dass die Batteriekostenentwicklung eine entscheidende Größe für den Vergleich von B- und OB-Lkw-System darstellt.

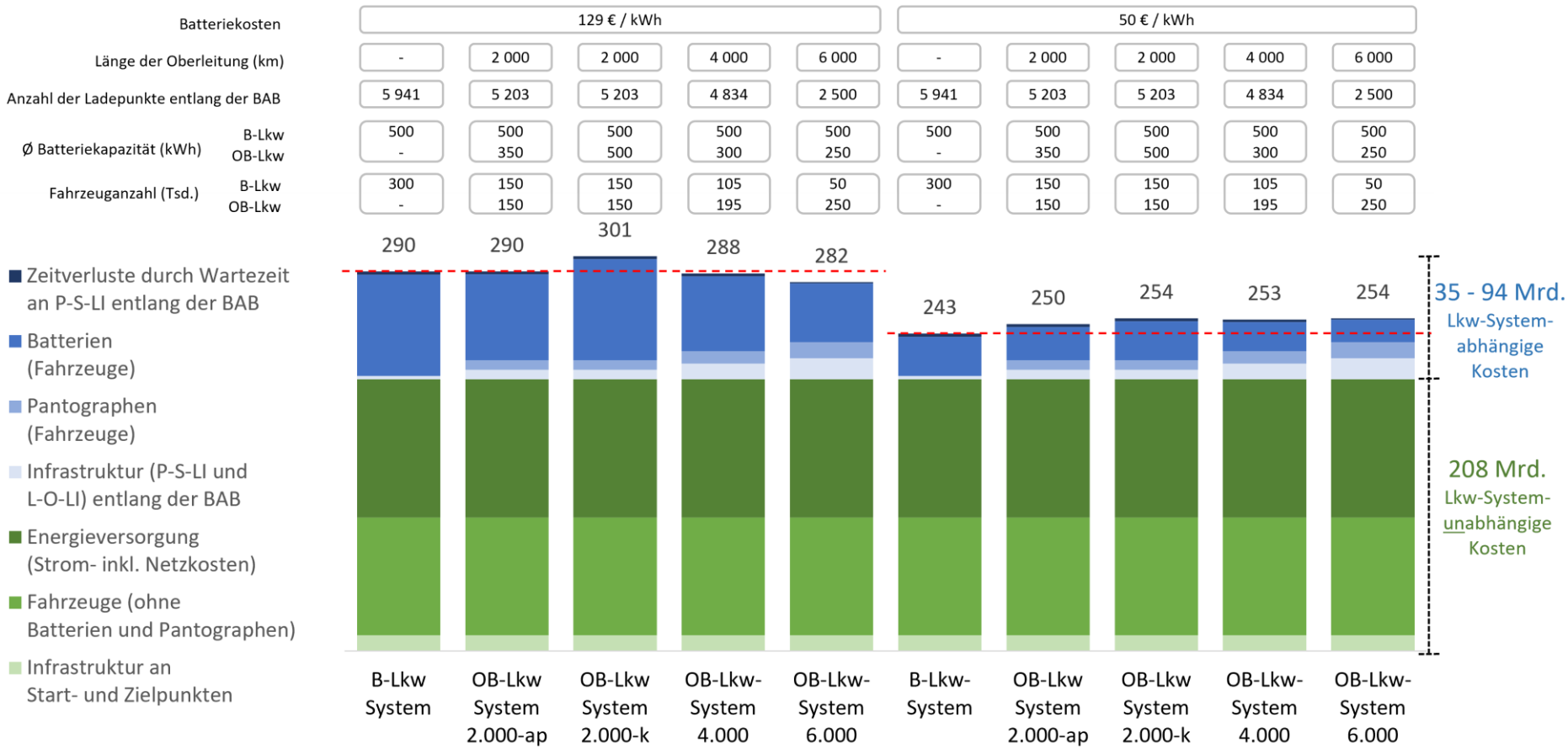
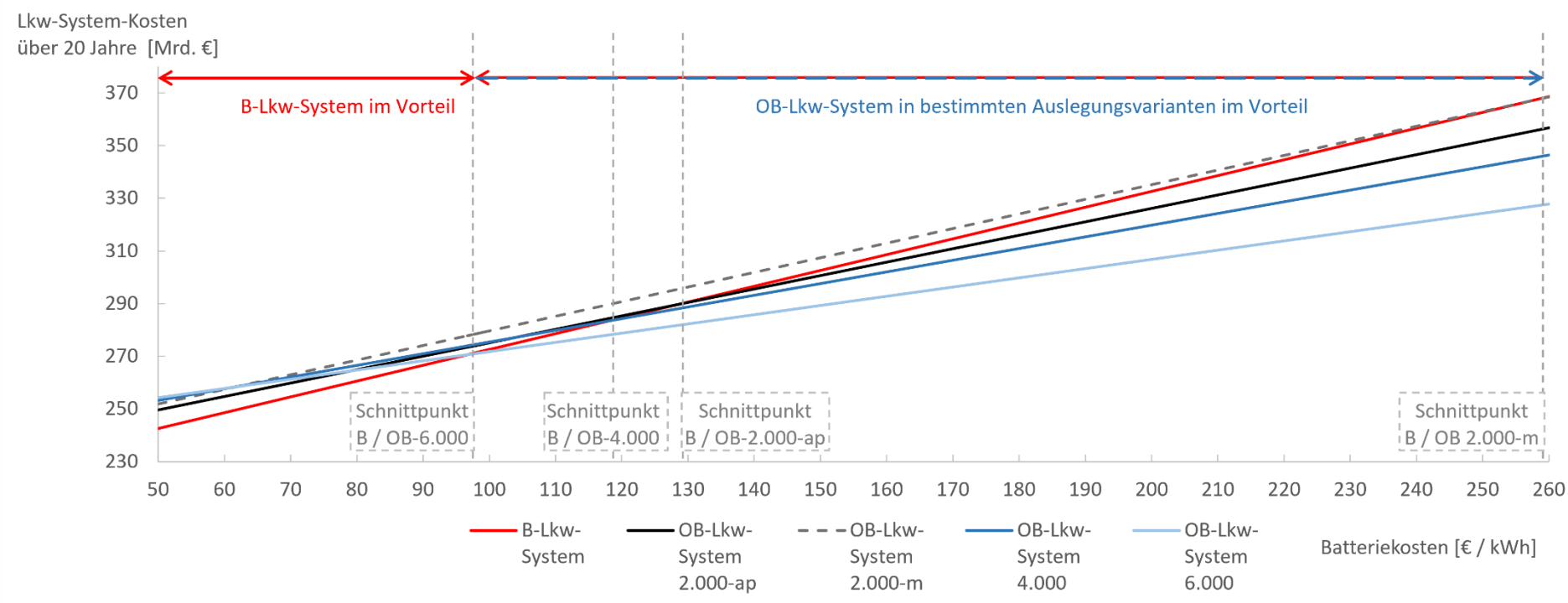


Abbildung 9: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und den Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems bei Batteriekosten von 50 €/kWh im Vergleich zu 129 €/kWh



		B-Lkw-System	OB-Lkw-System 2.000-ap	OB-Lkw-System 2.000-m	OB-Lkw-System 4.000	OB-Lkw-System 6.000
Länge der Oberleitung (km)		-	2 000	2 000	4 000	6 000
Anzahl der Ladepunkte entlang der BAB		5 941	5 203	5 203	4 834	2 500
Ø Batteriekapazität (kWh)	B-Lkw	500	500	500	500	500
	OB-Lkw	-	350	425	300	250
Fahrzeuganzahl (Tsd.)	B-Lkw	300	150	150	105	50
	OB-Lkw	-	150	150	195	250

Abbildung 10: Vergleich der Gesamtkosten über 20 Jahre von einem B-Lkw-System und den Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems in Abhängigkeit der Batteriekosten

4.1.1.1.3.5 Adressierung von Unsicherheiten bezüglich weiterer Umweltentwicklungen

In diesem Abschnitt werden weitere in Abschnitt 4.1.1.1.1 identifizierte Unsicherheiten aufgegriffen und hinsichtlich ihrer Relevanz für den Lkw-System-Vergleich eingeordnet. Zum einen werden in Abschnitt 4.1.1.1.3.5.1 die Implikationen einer Unterschätzung der Anzahl der MCS-LP in BAB-Nähe auf den Lkw-System-Vergleich diskutiert. Zum anderen wird in Abschnitt 4.1.1.1.3.5.2 erörtert, welche Implikationen auf den Lkw-System-Vergleich mit einer Erhöhung der kumulierten Fahrleistung aller E-Lkw einhergehen könnten.

4.1.1.1.3.5.1 Höherer Bedarf an Ladepunkten in der Nähe der Bundesautobahnen

Die Überlegungen in Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1 deuten darauf hin, dass die auf Basis von Modellierungen für die jeweiligen Szenarien festgelegte Anzahl der MCS-LP möglicherweise zu gering angesetzt wurde. Mit Bezug zum Lkw-System-Vergleich stellt sich die Frage, ob die Anzahl der MCS-LP in (nahezu) gleichem oder unterschiedlichen Umfang für das B- und das OB-Lkw-System unterschätzt sein könnte. Zunächst wird angenommen, dass der Bedarf für das B- und die OB-Lkw-Systeme mit dem gleichen Faktor ansteigt. Unter dieser Annahme würden die Einsparungen der MCS-LP in einem OB-Lkw-System im Vergleich zum B-Lkw-System ebenfalls mit dem gleichen Faktor ansteigen. Somit würde beispielsweise eine Verdoppelung der benötigten MCS-LP für die B- und OB-Lkw-Systeme zu einer verdoppelten Kosteneinsparung für die MCS-LP in den OB-Lkw-Systemen bei gleichbleibenden Kosten für die L-O-LI führen. Dies würde sich insgesamt positiv auf die relative Vorteilhaftigkeit der OB-Lkw-Systeme auswirken. Es ist aber durchaus auch denkbar, dass der nicht ausgewiesene Bedarf an MCS-LP bei einem B-Lkw-System höher ausfällt als bei einem OB-Lkw-System. Dies dürfte insbesondere dann zutreffen, wenn ein OB-Lkw-System nur durch eine geringe Anzahl an B-Lkw geprägt ist. In einem solchen Fall wäre der nicht ausgewiesene Bedarf geringer, da ein hoher Anteil der P-S-LI zur Gewährleistung der Flächendeckung und nicht zur Einhaltung der mittleren Wartezeit erforderlich sein dürfte.

Es folgt somit, dass die relative Vorteilhaftigkeit der OB-Lkw-Systeme im Vergleich zu den vorstehenden Kostenkalkulationen steigen könnte. Da die Infrastrukturkosten aber insgesamt nicht stark ins Gewicht fallen, ist die Relevanz im Hinblick auf eine mögliche Verschiebung bei der relativen Bewertung der E-Lkw-Systeme vermutlich begrenzt.

4.1.1.1.3.5.2 Stärkeres Wachstum der kumulierten Fahrleistung

Dem vorstehenden Lkw-System-Vergleich liegt die Annahme zugrunde, dass die kumulierte Fahrleistung der schweren Lkw ab 2030 auf einem konstanten Niveau verbleibt.[193] In diesem Abschnitt wird diskutiert, mit welchen Implikationen auf den Lkw-System-Vergleich ein (deutliches) Wachstum des SGV und damit auch der kumulierten Fahrleistung der E-Lkw einhergehen könnte. Um eine höhere Fahrleistung zu ermöglichen, wird ab einem gewissen Umfang eine höhere Anzahl an Lkw benötigt. Die Kosten von OB-Lkw bei relevanten Batterieeinsparungen sind geringer sind als die von B-Lkw. Insbesondere im Fall von hohen Batteriekosten könnte eine höhere Fahrleistung die relative Bewertung

[193] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.1.2.1.

von B- und OB-Lkw-System deutlich zugunsten des OB-Lkw-Systems beeinflussen. Denn mit einer zunehmenden Anzahl an Lkw vergrößern sich auch die Unterschiede bei den erforderlichen Batteriekapazitäten zwischen den Ausgestaltungsvarianten der OB-Lkw-Systeme und dem B-Lkw-System.

Mit einer erhöhten Fahrleistung nimmt zudem der Energiebedarf und damit auch die Häufigkeit der Nutzung der Infrastrukturen zu. Auslastungserhöhungen von der L-O-LI dürften bis zu einem gewissen Grad ohne signifikante Kostenerhöhungen möglich sein. Eine höhere Auslastung der P-S-LI dürfte jedoch nur eingeschränkt oder allenfalls unter Inkaufnahme längerer Wartezeiten möglich sein. Mit steigender Fahrleistung ist daher von einem deutlich zunehmenden Bedarf an P-S-LI auszugehen. Die Kosten für die P-S-LI an vielbefahrenen BAB-Abschnitten könnten (nahezu) proportional steigen. Insgesamt dürften bei einer Steigerung der kumulierten Fahrleistung die Infrastrukturkosten eines OB-Lkw-Systems in einem geringeren Ausmaß ansteigen als die eines B-Lkw-Systems. Grundsätzlich sei aber darauf hingewiesen, dass die Infrastrukturkosten im Kontext der Gesamtkosten nur einen kleinen Anteil aufweisen, sodass die Implikationen der Infrastrukturkosten gering sein könnten.

Schließlich könnte sich bei einem stärkeren Wachstum der kumulierten Fahrleistung – und insbesondere bei hohen Batteriekosten und hohem Einsparpotenzial von Batteriekapazitäten in OB-Lkw – die relative Vorteilhaftigkeit zugunsten eines OB-Lkw-Systems entwickeln.

4.1.1.1.4 Diskussion und Fazit: Kein klarer Gewinner, aber B-Lkw-System eher im Vorteil

In dem vorstehenden Lkw-System-Vergleich auf Basis von Kostenkalkulationen wurden die Gesamtkosten des B-Lkw-Systems denen verschiedener Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems gegenübergestellt. Mit Blick auf die Gesamtkosten aller Lkw-Systeme hat sich gezeigt, dass diese noch hohen Unsicherheiten unterliegen. Weiterhin verdeutlichen die Kostenkalkulationen, dass die Batteriekosten – stets, aber insbesondere bei verhältnismäßig geringen Batteriekostenreduktionen – einen im Vergleich zu den Kosten für die Netz-LI hohen Anteil aufweisen. Dies impliziert auch, dass die Batteriekapazitäten für eine Fahrt von 4,5 Stunden ausgelegt werden sollten. Denn es ist nicht plausibel, dass die mit größeren Batteriekapazitäten einhergehende Batteriekosten durch Einsparungen im Bereich der Netz-LI ausgeglichen werden könnten. Außerdem sei erwähnt, dass die Zeitkosten unter den gesetzten Annahmen im Kontext der Gesamtkosten von geringer Relevanz sind.

Mit Blick auf die sich ergebenden Differenzen der Gesamtkosten des B-Lkw-Systems und der OB-Lkw-Systemen wird deutlich, dass das B-Lkw-System eher im Vorteil ist, sich aber im Zuge der Variationen von Annahmen teilweise die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System „verschoben“ hat. Insbesondere die Entwicklung der Batteriekosten wirkt sich auf die relative Vorteilhaftigkeit der E-Lkw-Systeme aus. Ferner hat sich mit Bezug zur Gesamtlänge der L-O-LI gezeigt, dass die mit der Gesamtlänge der L-O-LI zunehmenden Infrastrukturkosten und Kosten für Pantographen von der steigenden Anzahl an OB-Lkw mit den im Zuge des Ausbaus der L-O-LI möglichen Kostenreduktionen durch Einsparungen der Batteriekapazitäten in den OB-Lkw abzuwägen sind. Ferner sei noch erwähnt, dass eine signifikante Steigerung der Fahrleistung die relative Vorteilhaftigkeit eines OB-Lkw-Systems erhöhen könnte. Insgesamt sind die Kostendifferenzen aber – gerade im Kontext des Betrachtungszeitraums von 20 Jahren – als gering einzuordnen. Daher

könnten die in Abschnitt 4.1.1.1.1.2 dargestellten Kostenpositionen, die nicht oder nicht differenziert betrachtet wurden, an Bedeutung für die relative Vorteilhaftigkeit gewinnen. Nichtsdestotrotz ist auch unter deren Berücksichtigung kein klares Ergebnis zu erwarten, da diese sich nur in einem bestimmten Umfang und auch in unterschiedliche Richtungen auswirken dürften.

4.1.1.2 Einbezug weiterer qualitativ betrachteter Aspekte

Im Anschluss an den Lkw-System-Vergleich auf Basis von Kostenkalkulationen werden in diesem Abschnitt weitere Aspekte einbezogen, die sich auf die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System auswirken könnten.

4.1.1.2.1 Flächenknappheiten und die Gefahr einer ineffektiven Nutzung von Flächenpotenzialen

Für den Aufbau von P-S-LI im Bereich der Netz-LI werden die entsprechenden Flächen benötigt.[194] Insbesondere an vielbefahrenen Strecken auf den BAB könnte der Aufbau der P-S-LI (zumindest temporär) durch Flächenknappheiten limitiert werden. Mit der Errichtung von L-O-LI an den vielbefahrenen Strecken könnten die (Flächen-)Probleme reduziert werden, da dadurch der Bedarf an P-S-LI und somit auch der Flächenbedarf für die P-S-LI sinkt.

Ferner stellt sich die Frage, ob Flächenpotenziale effektiv und somit zeitnah genutzt werden könnten. Die Flächen, die für den Aufbau von L-O-LI benötigt werden, sind im Eigentum des Bundes. Die Flächen für die P-S-LI können im Eigentum vieler unterschiedlicher Akteure sein, sodass Koordinations- und Machtprobleme eine effektive Nutzung der Flächenpotentiale (temporär) erschweren oder gar verhindern könnten. Abschnitt 4.1.1.2.3 thematisiert die Entwicklung einer institutionellen Lösung, um derartige Probleme zu reduzieren.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Überlegungen ist es somit denkbar, dass Flächenknappheiten oder eine ineffektive Nutzung von Flächen mit Verzögerungen des Aufbaus der P-S-LI einhergeht. Eine von den vorstehenden Aspekten abstrahierende Betrachtung der Grundstückskosten – wie in Abschnitt 4.1.1.1.1.2.1 – ist somit nicht ausreichend. Denn im Zuge von Verzögerungen bei dem Aufbau der P-S-LI könnte das Ziel einer effektiven Transformation des SGV hin zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 verfehlt werden. Insgesamt wirken sich die dargestellten Gefahren mit Bezug zu den Flächen für die P-S-LI im Bereich der Netz-LI bei Realisierung im Rahmen der relativen Bewertung der E-Lkw-Systeme negativ auf das B-Lkw-System aus.

4.1.1.2.2 Qualitätsunterschiede von Punkt-Säulen- und Linien-Oberleitungs-Ladeinfrastruktur

In diesem Abschnitt wird die Qualität der P-S-LI und der L-O-LI gegenübergestellt. Zunächst ist es nicht auszuschließen, dass Ladevorgänge an der P-S-LI mit einem Zeitbedarf einhergehen, der über die 45 Min.-Pause und die 9 Std.-Ruhezeit hinausgeht. Dabei wird nicht die bereits in Abschnitt 4.1.1.1 berücksichtige Wartezeit vor den Ladevorgängen adressiert, sondern die Zeit im Zusammenhang mit dem Start und Ende des Ladevorgangs angesprochen. Welche Relevanz diese zusätzliche Zeit hat, ist

[194] Vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1.1 und Abschnitt 4.1.1.1.1.2.1.

aktuell noch unklar, da der zusätzliche Zeitbedarf nicht zuletzt von der technischen Lösung und dem rechtlichen Rahmen abhängen dürfte.

Ferner könnte ein Informations- und Reservierungssystem für die P-S-LI im Bereich der Netz-LI von entscheidender Bedeutung sein, um die zusätzlichen Zeitverluste und auch die Unsicherheit bei den Transportunternehmen und den Fahrenden so weit wie möglich zu reduzieren.[195] Die Etablierung eines Informations- und Reservierungssystems und auch deren Nutzung geht allerdings mit Kosten im Allgemeinen und auch Transaktionskosten im Speziellen einher. Es sei hier angemerkt, dass ein zentrales Informations- und Reservierungssystem nach einer ersten Einschätzung mit den geringsten Transaktionskosten verbunden sein dürfte. Im Hinblick auf den Lkw-System-Vergleich dürften in einem OB-Lkw-System die Transaktionskosten im Kontext des Informations- und Reservierungssystems im Vergleich zum B-Lkw-System geringer sein, da für die Nutzung der L-O-LI kein Bedarf an Informationsübertragung und Reservierungen besteht und somit auch die Transaktionskosten für die durch die L-O-LI substituierten Ladevorgänge an der P-S-LI in einem OB-Lkw-System entfallen.

Weiterhin dürfte die Zuverlässigkeit von L-O-LI höher sein als von P-S-LI, da nahezu keine Koordination bei der Nutzung der L-O-LI erfolgen muss. Dies setzt allerdings voraus, dass die technische Verfügbarkeit für L-O-LI mindestens auf einem (nahezu) identischen Niveau wie die der P-S-LI liegt. Insgesamt wirken sich die vorstehenden Aspekte positiv auf die relative Vorteilhaftigkeit eines OB-Lkw-Systems mit L-O-LI als weitere LI im Vergleich zu der eines B-Lkw-Systems mit ausschließlich P-S-LI als LI aus.

4.1.1.2.3 Herausforderungen der Etablierung einer geeigneten institutionellen Lösung für Aufbau und Betrieb von Ladeinfrastruktur für B- und OB-Lkw

Folgend werden erste Einschätzungen bezüglich möglicher Herausforderungen bei der Etablierung einer institutionellen Lösung für eine effektive und effiziente Bereitstellung von LI für ein B- und ein OB-Lkw-System beleuchtet. Die Entscheidung der öffentlichen Hand für ein OB-Lkw-System geht mit einer grundsätzlich zentralen Planung für die L-O-LI und somit der Festlegung einer Aufbaustrategie (Gesamtlänge, Verortungsstrategie, Qualität), der Finanzierungslösung sowie der grundlegenden Nutzungsbedingungen der L-O-LI einher.

Im Gegenteil dazu bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Organisation der Bereitstellung von P-S-LI und insbesondere hinsichtlich des Umfangs und der Tiefe der zentralen Planung der P-S-LI im Bereich der Netz-LI, die sowohl für ein B- als auch für ein OB-Lkw-System erforderlich ist. Denn durch die Option des inkrementellen Aufbaus sind weitreichende dezentrale Aktivitäten denkbar.[196] Die Bereitstellung der

---

[195] Vgl. dazu auch BÖRJESSON / PROOST (2024, S. 2), die erwarten, dass Transportunternehmen eine sehr hohe Zahlungsbereitschaft für Laden ohne Warteschlangen aufweisen dürften und sich im Zuge von langfristigen Verträgen mit LI-Betreibern eine „Überkapazität“ der LI an den BAB ergeben würde. In diesem Kontext ist allerdings zu bedenken, dass bei der Dimensionierung der LI alle Kostenpositionen – auch die Warte- und Risikokosten im Kontext von Wartezeiten – berücksichtigt werden sollten, sodass die Bewertung, ob eine Überkapazität vorliegt, nicht zuletzt von den berücksichtigten Kostenpositionen abhängig sein dürfte. Weiterhin liegt der Prognose die Annahme zugrunde, dass mehrere LI-Betreiber unabhängig langfristige Verträge schließen.

[196] Vgl. dazu die in BECKERS ET AL. (2019) diskutierten Organisationsmodelle für die Bereitstellung von Pkw-LI. Die Bereitstellung der Lkw-LI weist einige Analogien zur Pkw-LI auf, sodass auch für die Lkw-LI die drei folgenden Organisationsmodelle grundsätzlich in Betracht gezogen werden können: (1) eine weitestgehend unregulierte

P-S-LI könnte dadurch mit größeren Koordinations- und Machtprobleme verbunden sein als die Bereitstellung der L-O-LI. Ein zu beachtender Aspekt ist in diesem Kontext auch, dass nicht nur bundeseigene, sondern auch Flächen von diversen Akteuren voraussichtlich für den Aufbau der P-S-LI im Bereich der Netz-LI benötigt werden. Im Rahmen der institutionellen Ausgestaltung könnten Koordinations- und Machtprobleme adressiert werden und dürften somit auch (weitgehend) reduzierbar sein. In diesem Kontext sei aber darauf hingewiesen, dass auch Untersuchungen zu den Koordinations- und Machtproblemen sowie zur Gestaltung institutioneller Lösungen zum Umgang mit diesen mit Kosten verbunden sind und Zeit in Anspruch nehmen. Weiterhin gilt es zu bedenken, dass sich schließlich auch aus ökonomischer Sicht suboptimale institutionelle Ausgestaltungsoptionen in der politischen Entscheidungsfindung durchsetzen könnten. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass eine effiziente Bereitstellung der P-S-LI mit größeren Herausforderungen einhergehen könnte als die Bereitstellung der L-O-LI und Risiken eines verzögerten Aufbaus der P-S-LI sowie einer Erhöhung der Kosten für die P-S-LI bestehen. Es ist somit denkbar, dass die Herausforderungen bei der Entwicklung einer geeigneten institutionellen Lösung für die P-S-LI sich vorteilhaft auf die Eignung eines OB-Lkw-Systems auswirken. Denn in einem OB-Lkw-System können durch die Bereitstellung von L-O-LI Ineffizienzen bei der Bereitstellung (des substituierbaren Teils) der P-S-LI reduziert (bzw. eliminiert) werden.

4.1.1.3 Übergreifende Diskussion und Fazit: Anstieg der relativen Vorteilhaftigkeit des OB-Lkw-Systems

Vor dem Hintergrund des in Abschnitt 4.1.1.1 dargestellten Lkw-System-Vergleichs auf Basis von Kostenkalkulationen ist das B-Lkw-System – insbesondere bei einer signifikanten Reduktion der Batteriekosten – (eher) im Vorteil. Die Differenz der Gesamtkosten des betrachteten B-Lkw-Systems und der betrachteten OB-Lkw-Systeme sind allerdings als sehr gering einzuordnen. Weiterhin ist zu bedenken, dass aufgrund von Wissensdefiziten einige Kostenpositionen nicht oder nur stark vereinfacht betrachtet wurden, sodass diese – trotz der im Hinblick auf die Gesamtkosten eher geringen Relevanz – zu Verschiebungen der relativen Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System führen könnten.

Letztlich zeigt sich, dass auf Basis der Kostenkalkulationen ein B-Lkw-System zwar grundsätzlich im Vorteil zu sein scheint, aber auch ein OB-Lkw-System gegenüber einem B-Lkw-System überlegen sein könnte. Die in Abschnitt 4.1.1.2 betrachteten Aspekte gehen mit Risiken einher, die sich insbesondere zulasten eines B-Lkw-Systems auswirken. Aus diesem Grund ist die Risikoeinstellung im Hinblick auf die effektive und effiziente Transformation des SGV von Bedeutung für den Lkw-System-Vergleich. Bei Risikoaversion nimmt die relative Vorteilhaftigkeit des OB-Lkw-Systems zu, da in einem OB-Lkw-System der Aufbau und Betrieb von L-O-LI, die teilweise P-S-LI substituieren kann, u.a. auch als Risikomanagement-Maßnahme im Hinblick auf die Risiken bezüglich des Aufbaus und des Betriebs der P-S-LI dienen kann. Im Kontext der hohen Relevanz der Transformation hin zur Klimaneutralität und des relevanten Anteils des schweren SGV an den CO2-Emissionen erscheint risikoaverses Entscheiden

Marktwirtschaft, (2) ein Organisationsmodell, dass durch eine umfangreiche Übernahme der Bereitstellungsverantwortung durch die öffentliche Hand in Kombination mit dem Einbezug privater Akteure für die Umsetzung der Bereitstellungsentscheidungen gekennzeichnet ist und (3) ein Organisationsmodell, bei dem die öffentliche Hand umfangreich zentral regulierend in die Bereitstellungs- und Finanzierungsentscheidungen von privaten – im Wettbewerb stehenden – Akteuren eingreift.

rational zu sein.[197] Dennoch sei angemerkt, dass auf Grundlage der vorstehenden Überlegungen kein eindeutiges Ergebnis hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System abgeleitet werden kann, sondern auch von einem Kopf-an-Kopf-Rennen gesprochen werden könnte.

4.1.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen

In diesem Abschnitt werden (kurzfristige) Handlungsempfehlungen auf Basis der Endzustands-Betrachtungen für Deutschland abgeleitet, wobei Aspekte der europäischen Einbettung vernachlässigt werden. Dabei wird die Option von sequenziellem Entscheiden zum Umgang mit Unsicherheiten und zu erwartenden Wissenszuwächsen berücksichtigt.[198] Zunächst werden in Abschnitt 4.1.2.1 die umzusetzenden Maßnahmen dargestellt, die als „no regret"-Maßnahmen eingeordnet werden können, da sie für jegliche Ausgestaltungsvarianten von B- und OB-Lkw-System erforderlich sind. In Abschnitt 4.1.2.2 wird diskutiert, ob (kurzfristig) aufgrund des Kopf-an-Kopf-Rennens von B- und OB-Lkw-System – auch unter Inkaufnahme von zusätzlichen Kosten – beide Optionen offengehalten werden sollten. Abschließend werden die aus der Diskussion resultierenden kurzfristigen Handlungsempfehlungen erläutert.

4.1.2.1 „No regret"-Maßnahmen: Aufbau von Punkt-Säulen-Ladeinfrastruktur und Weiterentwicklung der Stromnetzanbindung

Für jegliche E -Lkw-Systeme sind ein flächendeckender Aufbau von P-S-LI sowie der Anschluss der LI im Allgemeinen und der P-S-LI im Speziellen an das Stromnetz erforderlich.[199] Daher sollte der Aufbau der P-S-LI schnellstmöglich vorangetrieben werden. Auf absehbare Zeit dürfte der Aufbau grundsätzlich nicht spezifisch für eine bestimmte Ausgestaltungsvariante eines E-Lkw-Systems sein. Es ist allerdings denkbar, dass die Stromnetzanschlüsse für die LI durchaus spezifisch sind, da sich die Anzahl, Verortung und die maximalen Kapazitäten der Ladestandorte für verschiedene Ausgestaltungsvarianten von B- und OB-Lkw-System in der langen Frist unterscheiden dürften. Es ist aufgrund der langen Realisationszeiten der Stromnetzanschlüsse zu empfehlen, die Planungen für die Netzanschlüsse integriert mit der Betrachtung des gesamten Stromsystems inklusive weiterer Lasten, wie der Pkw-LI, zeitnah voranzutreiben.[200] Dafür sind vorgelagert Konzepte für die LI zu erstellen. Weiterhin könnten Maßnahmen ergriffen werden, um die langen Realisationszeiträume der LI zu verkürzen. Es ist denkbar, dass eine für den SGV spezifische Ausgestaltung eines institutionellen Rahmens für die Fällung von Planungs- und Investitionsentscheidungen mit Bezug zu den Stromnetzen und Netzanschlüssen und für deren Umsetzung vorteilhaft im Hinblick auf die Effektivität und (Kosten-)Effizienz der Transformation des SGV sein könnte.[201] Dabei sollte nicht zuletzt berücksichtigt werden, dass für den Aufbau von P-S-LI voraussichtlich der Einbezug von Flächen erforderlich ist, die im Eigentum unterschiedlicher Akteure

[197] Vgl. dazu auch die Ausführungen in BECKERS ET AL. (2009, S. 79 ff.) zur gesellschaftlichen Risikoaversion bezüglich des systematischen Risikos, mit dem Auswirkungen auf die allgemeine Wohlfahrt einhergehen können.

[198] Die Vorgehensweise ist in Abschnitt 2.2.2.1.2 dargestellt.

[199] Vgl. Abschnitt 2.1.1, Abschnitt 2.1.2.1.1.1, Abschnitt 2.1.2.1.2.1 und Abschnitt 4.1.1.1.1.2.5.

[200] Vgl. dafür die in Abschnitt 2.2.2.1.2 beschriebene Vorgehensweise zur Ableitung zeitkritischer Maßnahmen.

[201] Vgl. Abschnitt 4.1.1.1.1.2.5.

sind.[202] Auch über die Thematik der Netzanschlüsse hinausgehend erscheint der Wissensaufbau bezüglich der Flächenbedarfe und die Adressierung potenzieller Flächenknappheiten sinnvoll zu sein. Schließlich sei erwähnt, dass vorgelagert zu einem umfangreichen Aufbau der P-S-LI die institutionelle Lösung für den Aufbau und den Betrieb der P-S-LI entwickelt werden sollte, um Gefahren späterer signifikanter Verzögerungen und hoher Kosten im Zuge von Koordinations- und Machtproblemen schnellstmöglich weitgehend zu reduzieren.[203]

4.1.2.2 Diskussion zum kurzfristigen Flexibilitätserhalt von B- und OB-Lkw-System und resultierende Handlungsempfehlungen

Folgend wird die Frage diskutiert, ob kurzfristig beide Optionen – der Aufbau eines B- sowie eines OB-Lkw-Systems – offengehalten werden sollten. Basierend auf den diesbezüglichen Überlegungen werden (kurzfristige) Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Wert und Kosten des Flexibilitätserhalts im Kontext von zu erwartenden Wissenszuwächsen

Zunächst werden der Wert und die Kosten des kurzfristigen Flexibilitätserhalts gegenübergestellt. Der Wert ergibt sich grundsätzlich daraus, dass aktuelle Wissensdefizite bestehen, ob ein B- oder ein OB-Lkw-System in der langen Frist vorteilhaft ist. Ein B-Lkw-System würde bei aktuell prognostizierten drastischen Reduktionen der Batteriekosten auf Basis der Gesamtkosten-Betrachtung im Vorteil sein. Die Differenzen der Gesamtkosten von B- und OB-Lkw-System sind allerdings insgesamt als gering einzuordnen, sodass vor dem Hintergrund der aktuell noch bestehenden Unsicherheiten Verschiebungen der relativen Vorteilhaftigkeit keinesfalls auszuschließen sind. Weiterhin bestehen Risiken, z.B. im Kontext von Flächenknappheiten und Koordinations- und Machtproblemen, die sich bei Realisierung in einem größeren Umfang negativ auf ein B- als auf ein OB-Lkw-System auswirken würden. Daher würde die relative Vorteilhaftigkeit des OB-Lkw-Systems bei einer risikoaversen Entscheidungsfindung weiter ansteigen.[204] Schließlich sei auch erwähnt, dass industriepolitische Aspekte für eine Entscheidung für ein OB-Lkw-System sprechen könnten.[205]

Als Ausgangspunkt für die Betrachtung der Kosten des Flexibilitätserhalts werden die kurzfristig umzusetzenden spezifischen Maßnahmen für ein B- und ein OB-Lkw-System beleuchtet. Für den Aufbau des B-Lkw-Systems ist insbesondere der flächendeckende Aufbau der P-S-LI von Relevanz, der eine „no regret"-Maßnahme darstellt.[206] Für das OB-Lkw-System ist der Aufbau von L-O-LI spezifisch, wobei aktuell für die Offenhaltung der Option eines OB-Lkw-Systems nur ein sehr begrenzter Handlungsbedarf erwartet wird. Denn im Rahmen von Pilotprojekten in Deutschland konnten technische Prüfungen der OB-Lkw inklusive der Pantographen sowie der L-O-LI erfolgen, sodass die Option des

[202] Vgl. Abschnitt 4.1.1.2.1.

[203] Vgl. Abschnitt 4.1.1.2.3.

[204] Vgl. Abschnitt 4.1.1.3.

[205] Der deutsche Konzern Siemens ist als Infrastrukturhersteller für L-O-LI und P-S-LI tätig. Vgl. dazu Siemens AG / Technische Universität Dresden / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2016), Siemens Mobility GmbH (2020) und PIARC (2023, S. 173 ff.). Durch das Engagement von Siemens in zahlreichen L-O-LI-(Pilot-)Projekten erscheint es plausibel zu sein, dass der deutsche Konzern von einer Entscheidung für ein OB-Lkw-System besonders profitieren würde.

[206] Vgl. Abschnitt 4.1.2.1.

OB-Lkw-Systems grundsätzlich technisch entwickelt erscheint.[207] Durch den Aufbau längerer L-O-LI-Strecken könnten Betriebserfahrungen erweitert und somit auch der Wissensaufbau hinsichtlich des OB-Lkw-Systems insgesamt gefördert werden. Vor dem Hintergrund des in Abschnitt 4.1.1.1 dargestellten Lkw-System-Vergleichs auf Basis von Kostenkalkulationen ist aber nicht zu erwarten, dass diese Wissenszuwächse sich signifikant auf den Lkw-System-Vergleich auswirken dürften. Daher besteht aus aktueller Sicht dahingehend kein kurzfristiger Handlungsbedarf. Es ist aber zu bedenken, dass die Zeit, in der die Flexibilität zu geringen Kosten – insbesondere auf Seiten von Herstellern von L-O-LI und auch OB-Lkw – aufrechterhalten wird, berücksichtigt werden sollte.[208]

Für die Vorbereitung der Grundsatzentscheidung zwischen B- und OB-Lkw-System dürften weitere Untersuchungen zu vorteilhaften Ausgestaltungsvarianten des OB-Lkw-Systems von Relevanz sein. Zudem dürften die Kosten für den diesbezüglichen Wissensaufbau begrenzt sein, sodass insbesondere technisch-systemische Analysen zur Aufbau- und Verortungsstrategie der L-O-LI zu empfehlen sind. Diese sind auch im Kontext der Vorbereitung der Stromnetzanschlüsse relevant, wenn die Option des OB-Lkw-Systems offengehalten werden soll.[209]

Im Hinblick auf die Kosten des Flexibilitätserhalts zeigt sich somit, dass ein B-Lkw-System durch die Umsetzung der „no regret"-Maßnahmen in absehbarer Zukunft als Option für einen klimaneutralen SGV erhalten bleibt. Für das OB-Lkw-System wären für einen kurzfristigen Flexibilitätserhalt nur in einem sehr geringen Umfang spezifische Maßnahmen umzusetzen, sodass auch die damit verbundenen Kosten im Kontext der Gesamtkosten als sehr gering einzuordnen sind. Grundsätzlich sei allerdings angemerkt, dass die spezifischen Kosten auf Seiten des B- und auch auf Seiten des OB-Lkw-Systems ab einem gewissen Zeitpunkt steigen. Für ein B-Lkw-System wird der über den Bedarf an P-S-LI in einem OB-Lkw-System hinausgehende Ausbau von P-S-LI sowie die Beschaffung von Batteriekapazitäten zu einem bestimmten Zeitpunkt spezifisch. Das ist aber in den nächsten Jahren noch nicht zu erwarten. Für ein OB-Lkw-System dürften die Kosten zur Flexibilitätserhaltung deutlich zunehmen. Denn mit der Zeit steigt die Rationalität für die Errichtung von längeren L-O-LI-Strecken und einem L-O-LI-Netz, um die Erreichung vorteilhafter Endzustände zu ermöglichen. Dies könnte auch mit der Gefahr von „stranded assets" verbunden sein. Es stellt sich somit die Frage, ob in absehbarer Zeit Wissenszuwächse zu erwarten oder generiert werden können, um eine verbesserte Grundlage für die Auswahlentscheidung zwischen B- und OB-Lkw-System zu schaffen. Insgesamt erscheint dies möglich zu sein. Zum einen könnte der Wissensstand über die technisch-systemische Ausgestaltung von B- und OB-Lkw-System verbessert und somit die betrachtete Bandbreite von Ausgestaltungsvarianten reduziert werden. Infolgedessen könnte zudem die Güte der Annahmen – insbesondere hinsichtlich potenzieller Einsparungen der Batteriekapazitäten in OB-Lkw verbessert werden. Zum anderen sind im Hinblick auf die Entwicklung der Batteriekosten in den nächsten Jahren Wissenszuwächse wahrscheinlich. Diese können auch durch den Anstoß von weiteren Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten sowie der Entwicklung von Beschaffungsstrategien gefördert werden.

---

[207] Vgl. SPETH / FUNKE (2021) und PREKER (2024).

[208] Eine Unterstützung der Hersteller zur Flexibilitätserhaltung könnte aus gesamtwirtschaftlicher Sicht durchaus rational sein, wobei die Festlegung des Zeitpunkts und der Höhe stets mit Unsicherheiten verbunden sein dürfte.

[209] Vgl. Abschnitt 4.1.2.1.

Schließlich dürfte auch Wissen zur Bedeutung der in Abschnitt 4.1.1.2 dargestellten Aspekte, die sich insbesondere zulasten eines B-Lkw-System auswirken, in absehbarer Zeit aufgebaut werden können.

Auf Basis der vorstehenden Überlegungen erscheint es empfehlenswert zu sein, aktuell beide Optionen offenzuhalten. Es sei angemerkt, dass die Kosten für die Umsetzung der für das OB-Lkw-System zeitkritischen und spezifischen Maßnahmen, die nicht zuletzt auch der Verbesserung des Wissenstands und der Weiterentwicklung der Option dienen, auch im weiten Sinne als Versicherungskosten angesehen werden können, um eine effektive Transformation hin zum E-SGV zu gewährleisten.

Resultierende Kurzfristige Handlungsempfehlungen im Überblick

Auf Basis der Abwägung des Werts und der Kosten des Flexibilitätserhalts im Kontext der erwarteten Wissenszuwächse ist es zu empfehlen, die zeitkritischen und für ein OB-Lkw-System spezifischen Maßnahmen umzusetzen, um dadurch kurzfristig sowohl die Option, ein B- als auch ein OB-Lkw-System aufzubauen, offenzuhalten. Somit sollten technisch-systemische Untersuchungen zu Aufbau und Verortungsstrategien der LI in einem B- und OB-Lkw-System – nicht zuletzt auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der Fahrleistung – fort- und umgesetzt werden. Weiterhin erscheint es plausibel zu sein, bei Bedarf darauf einzuwirken, dass die Option einer kurzfristigen Bereitstellung von OB-Lkw und L-O-LI (zumindest) nicht verloren geht.

Neben der Umsetzung der spezifischen Maßnahmen ist es von hoher Bedeutung die Grundsatzentscheidung zwischen dem B- und OB-Lkw-System zielgerichtet vorzubereiten. In Ergänzung zu den Untersuchungen zu technisch-systemischen Ausgestaltungsvarianten von B- und OB-Lkw-Systemen sollten insbesondere für die P-S-LI, aber auch für die L-O-LI Untersuchungen zu Flächenbedarfen und zur Flächennutzung sowie den Stromnetzanschlüssen erfolgen. Weiterhin ist zu empfehlen, Wissen bezüglich der zukünftigen Verfügbarkeit von Batteriekapazitäten sowie der Kostenentwicklungen und der Entwicklung der Nutzungsdauer aufzubauen. Darüber hinaus sollten auch die institutionellen Herausforderungen zeitnah adressiert werden, um die diesbezüglichen Risiken bewerten und unter Umständen reduzieren zu können.

4.2 Fokus auf Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungen zur Ausgestaltung des Bereichs der E-Lkw-Systeme um Aspekte der europäischen Einbettung erweitert. Zunächst werden die Implikationen der europäischen Einbettung auf die Endzustands-Betrachtungen beleuchtet. Im Anschluss werden auf Basis der im Rahmen der Endzustands-Betrachtungen gewonnenen Erkenntnisse zur relativen Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System kurzfristige Handlungsempfehlungen für das Agieren in Deutschland sowie für das Agieren im Kontext der europäischen Aktivitäten abgeleitet. Der methodische Hintergrund und die Vorgehensweise sind in Abschnitt 2.2.2 erläutert.

4.2.1 Endzustands-Betrachtungen

In diesem Abschnitt werden die Implikationen der europäischen Einbettung auf die Endzustands-Betrachtungen für Deutschland untersucht. In Abschnitt 4.2.1.1 wird vorgelagert die Etablierung eines europaweiten E-Lkw-Systems im Zuge des sowohl für ein B- als auch für ein OB-Lkw-System

erforderlichen Aufbaus von P-S-LI in allen Ländern diskutiert. Abschnitt 4.2.1.2 thematisiert die Fragen, ob ein B- oder OB-Lkw-System in anderen Ländern unter Vernachlässigung der europäischen Einbettung von Vorteil sein dürfte, und welche Endzustände in den einzelnen Ländern aus gesamteuropäischer Perspektive angestrebt werden sollten. Abschließend werden auf Basis der Erkenntnisse zu den beiden Fragen Schlussfolgerungen für die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System in Deutschland aufgezeigt.

4.2.1.1 Flächendeckendes europaweites E-Lkw-System durch Punkt-Säulen-Ladeinfrastruktur

Insgesamt dürften E-Lkw-Systeme aufgrund der Effizienzvorteile aus der Perspektive der meisten europäischen Länder mit den größten Vorteilen einhergehen.[210] Daher ist in den meisten Ländern zu erwarten, dass P-S-LI flächendeckend errichtet wird, da dies nur von der Entscheidung für ein E-Lkw-System, aber nicht von der Entscheidung zwischen einem B- und einem OB-Lkw-System abhängig ist. Würden sich sehr wenige einzelne Länder gegen die Errichtung eines E-Lkw-Systems entscheiden, dürfte dennoch die Errichtung von P-S-LI in diesen Ländern aus europäischer Sicht mit Vorteilen einhergehen, da im Zuge der europäischen Flächendeckung Nutzungskompatibilität entsteht.[211] Es sei erwähnt, dass dafür eine technische Kompatibilität zwischen P-S-LI sowie B- und ggf. OB-Lkw erforderlich ist. Aus den vorstehenden Überlegungen folgt, dass eine europaweite Standardisierung der P-S-LI sowie B- und ggf. OB-Lkw sowie ein flächendeckender Aufbau von P-S-LI aus gesamteuropäischer Sicht vorteilhaft ist.

4.2.1.2 „B- vs. OB-Lkw-System“ in Europa

Im Folgenden werden zunächst Überlegungen zur relativen Bewertung von B- und OB-Lkw-System in anderen europäischen Ländern vorgestellt. Anschließend werden potenzielle Koordinationsvorteile im Kontext von B- und OB-Lkw-Systemen aufgezeigt und deren Implikationen auf die relative Bewertung von B- und OB-Lkw-System aus europäischer Perspektive diskutiert. Abschließend werden die Implikationen der relativen Bewertung aus europäischer Perspektive auf die Evaluierung der Endzustands-Betrachtungen für Deutschland dargestellt.

„B- vs. OB-Lkw-System“ aus der Perspektive einzelner Länder bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung, potenzielle Koordinationsvorteile und schließlich die „B- vs. OB-Lkw-System“-Frage aus der europäischen Perspektive

Die relative Bewertung von B- und OB-Lkw-System könnte aufgrund unterschiedlicher Strukturparameter im Allgemeinen und der Verkehrsleistung im Speziellen für einzelne europäische Länder unterschiedlich ausfallen, da L-O-LI insbesondere an vielbefahrenen Strecken geeignet ist. Die Berücksichtigung der anderen Länder könnte bei unterschiedlichen Präferenzen aufgrund von potenziellen Koordinationsvorteilen mit Verschiebungen der relativen Bewertung des B- und OB-Lkw-Systems einhergehen. Durch die technische Standardisierung von P-S-LI kann grundsätzlich eine

[210] Vgl. Abschnitt 3.2.

[211] Vgl. Abschnitt 2.2.2.2.1.

Nutzungskompatibilität für B- und OB-Lkw-Systeme erreicht werden. Im Hinblick auf das B-Lkw-System sind keine signifikanten Kostensenkungspotenziale bei Koordination zu erwarten. Der Bedarf an B-Lkw und P-S-LI dürfte im Allgemeinen so hoch sein, dass der Einstieg weiterer Länder in ein B-Lkw-System voraussichtlich nicht zu relevanten Kostenreduktionen im Zuge von Skaleneffekten führen würde. Im Hinblick auf ein OB-Lkw-System sind dagegen neben Koordinationsvorteilen durch technische Kompatibilität und Nutzungskompatibilität weitere Koordinationsvorteile denkbar, die auch zu Verschiebungen der relativen Bewertung des B- und OB-Lkw-Systems führen könnten.

- Zunächst ist es möglich, dass durch den Aufbau und Betrieb von L-O-LI in mehreren Ländern die möglichen Einsparungen von Batteriekapazitäten bei OB-Lkw steigen und somit die Fahrzeugkosten insgesamt sinken könnten. Denn die Reduktion der Batteriekapazitäten bei OB-Lkw setzt den Aufbau von L-O-LI-Strecken in einem Ausmaß voraus, dass weiterhin grundsätzlich eine Einsatzflexibilität der OB-Lkw mit reduzierten Batteriekapazitäten gegeben ist. Der Koordinationsvorteil dürfte bei hohen Batteriekosten von besonderer Bedeutung sein.[212]
- Ferner könnten sich die Kosteneinsparungen im Bereich der Infrastrukturkosten im Fall von länderübergreifender Etablierung von OB-Lkw-Systemen verglichen mit dem Fall von einem unkoordinierten Aufbau von B- und OB-Lkw-Systemen in Europa erhöhen. Denn mit einer länderübergreifenden Etablierung von L-O-LI dürfte die Anzahl der B-Lkw sinken, sodass auch die Anzahl der MCS-LP reduziert werden könnte. Eine Erhöhung der Anzahl von OB-Lkw dürfte sich dagegen in geringerem Umfang auf die Kosten für die L-O-LI auswirken.[213]

Aus den vorstehenden Überlegungen ergibt sich, dass es möglich ist, dass in der langen Frist aus der europäischen Perspektive ein OB-Lkw-System nur im Zuge einer erfolgreichen Koordination zwischen (einigen) europäischen Ländern im Vergleich zu einem europaweiten B-Lkw-System vorteilhaft ist. Allerdings könnte ein OB-Lkw-System in einigen europäischen Ländern auch unabhängig von den Koordinationsvorteilen von Vorteil sein. Die Koordination hinsichtlich des Aufbaus eines OB-Lkw-Systems könnte insbesondere für Länder relevant sein, in denen wichtige Strecken des Transitverkehrs liegen. Im Rahmen dieser Studie erfolgen allerdings keine weiteren Untersuchungen zur Gesamtlänge und Verortung der L-O-LI in Europa. Es sei aber darauf hingewiesen, dass auch weitere europäische Länder, Interesse an L-LI zeigen.[214] Das erste L-O-LI-Pilotprojekt in Europa wurde beispielsweise erfolgreich in Schweden umgesetzt.[215] Weiterhin ist insbesondere in den Beneluxstaaten und Österreich ein großes Interesse an L-O-LI zu erkennen.[216]

---

[212] Vgl. dazu die Kostenkalkulationen in Abschnitt 4.1.1.1.

[213] Vgl. dazu auch Überlegungen zu Implikationen einer höheren Verkehrsleistung auf die Infrastrukturkosten in Abschnitt 4.1.1.1.3.5.2.

[214] Vgl. dazu die in HACKER ET AL. (2023, S. 10–16) dargestellten Untersuchungen und Aktivitäten zu und von Deutschland, Schweden, Frankreich, Österreich, Niederlande, Dänemark, Belgien und Großbritannien, die sich allerdings nicht ausschließlich auf L-O-LI sondern auch andere L-LI beziehen.

[215] Vgl. dazu PIARC (2023, S. 122 ff.).

[216] Vgl. HARTWIG / BUßMANN-WELSCH / LEHMANN (2020), WIDEGREN ET AL. (2022) sowie Pläne aus dem Jahr 2024 des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft, die den Aufbau von L-LI zwischen Rotterdam und Antwerpen sowie Rotterdam und Venlo bis zum Jahr 2032 vorsehen.

IMPLIKATIONEN DER EUROPÄISCHEN EINBETTUNG FÜR ENDZUSTANDS-BETRACHTUNGEN AUS DER DEUTSCHEN PERSPEKTIVE

Basierend auf den vorstehenden Überlegungen zeigt sich, dass auch unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit eines B- und verschiedener Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems ergeben. Eine technische Kompatibilität sowie der europaweite flächendeckende Aufbau der P-S-LI ist sowohl für ein B- als auch ein OB-Lkw-System erforderlich und gewährleistet eine Nutzugskompatibilität bei dem Einsatz von B-Lkw und OB-Lkw, die allerdings durch Einsparungen der Batteriekapazitäten eingeschränkt sein kann. Welche Bedeutung eine länderübergreifende Koordination durch mögliche Kostensenkungspotenziale für den Wert des OB-Lkw-Systems in Europa und somit auch Deutschland hat, kann auf Grundlage des aktuellen Wissensstands nicht beantwortet werden. Daher kann auch nicht beurteilt werden, ob im Zuge einer europäischen Koordination ein OB-Lkw-System in Deutschland eindeutig im Vorteil gegenüber einem B-Lkw-System sein könnte.

4.2.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen

In diesem Abschnitt werden die sich unter Einbezug der Option sequenziellen Entscheidens auf Basis der Endzustands-Betrachtungen unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung ergebenden (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen für Deutschland dargestellt. Zunächst werden in Abschnitt 4.2.2.1 die Implikationen der Berücksichtigung der europäischen Einbettung auf die (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Agierens in Deutschland diskutiert. In Abschnitt 4.2.2.2 werden zudem Handlungsempfehlungen für das Agieren im Kontext europäischer Aktivitäten abgeleitet.

4.2.2.1 Agieren in Deutschland

Die Berücksichtigung der europäischen Einbettung beeinflusst die in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Handlungsempfehlungen für das Agieren in Deutschland nicht. Die Bedeutung für den flächendeckenden Aufbau von P-S-LI wird verstärkt. Hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System bestehen auch weiterhin Unsicherheiten, sodass kurzfristig – auch unter begrenzter Inkaufnahme von zusätzlichen Kosten – sowohl die Option der Etablierung eines B- als auch eines OB-Lkw-Systems offengehalten werden sollte. Gleichzeitig sollte die Grundsatzentscheidung zwischen B- und OB-Lkw-System vorbereitet werden, um die Kosten im Zuge des Flexibilitätserhalts zu begrenzen.

4.2.2.2 Agieren im Kontext europäischer Aktivitäten

Aus den in Abschnitt 4.2.1 dargestellten Endzustands-Betrachtungen zur Ausgestaltung des Bereichs der E-Lkw-Systeme in Europa werden im Folgenden zwei kurzfristige Handlungsempfehlungen abgeleitet. Zunächst werden die technische Standardisierung sowie der europaweit flächendeckende Aufbau von P-S-LI als „no regret"-Maßnahmen dargestellt. [217] Im Anschluss wird erläutert, dass eine europaweite technische Standardisierung von L-O-LI sowie weitere Analysen zur Länge und Verortung

[217] Vgl. dazu in Abschnitt 2.2.2.1.2 beschriebene Vorgehensweise.

der L-O-LI in Europa von Deutschland angestoßen werden sollten, um kurzfristig Flexibilität hinsichtlich der Etablierung eines B- und OB-Lkw-Systems zu erhalten und zeitgleich die Grundsatzentscheidung zwischen B- und OB-Lkw-System vorzubereiten.

EUROPAWEITE TECHNISCHE STANDARDISIERUNG UND FLÄCHENDECKENDER AUFBAU VON P-S-LI

Auf europäischer Ebene ist der Aufbau von P-S-LI zur Gewährleistung einer Nutzungskompatibilität von hoher Bedeutung, um die Transformation des SGV effektiv und effizient realisieren zu können. Es ist daher empfehlenswert, darauf hinzuwirken, dass durch zentrale Vorgaben – beispielsweise auf Ebene des EU-Sekundärrechts – der Aufbau von P-S-LI in sämtlichen EU-Ländern umgesetzt wird. Denn das Anstreben von vorteilhaften Endzuständen durch zentrale Entscheidungen dürfte regelmäßig mit Vorteilen einhergehen, auch wenn dezentrale Entscheidungen auch zu vorteilhaften Endzuständen führen könnten.[218] Zudem sei darauf hingewiesen, dass institutionelle Fragen zur Nutzung der P-S-LI unter Berücksichtigung des internationalen Verkehrs und somit länderübergreifend gedacht werden sollten. Daher ist zu empfehlen, darauf hinzuwirken, dass eine geeignete institutionelle Lösung, die auch den internationalen Verkehr berücksichtigt, entwickelt wird.

KURZFRISTIGER FLEXIBILITÄTSERHALT VON B- UND OB-LKW-SYSTEM SOWIE VORBEREITUNG DER GRUNDSATZENTSCHEIDUNG

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System sollte Deutschland eine technische Standardisierung der L-O-LI anstoßen, um eine länderübergreifende Nutzungskompatibilität von OB-Lkw-Systemen in (einzelnen) europäischen Ländern grundsätzlich zu ermöglichen. Die damit verbundenen Kosten dürften begrenzt sein und sollten somit in Kauf genommen werden, auch wenn sich im Zuge von Wissenszuwächsen zukünftig herausstellen kann, dass ein B- und kein OB-Lkw-System in Deutschland etabliert werden sollte. Zudem sollten kurzfristig sowohl mit Bezug zu einem OB-Lkw-System (nur) in Deutschland als auch in Europa bzw. in mehreren europäischen Ländern Varianten bezüglich der Verortungs- und Aufbaustrategie der L-O-LI untersucht werden, um die Option einer europäischen Koordination zu schaffen, weiterzuentwickeln und auch bewerten zu können.

[218] Vgl. dazu Abschnitt 2.2.2.2.1.

5 *K-Frage:* Ausgestaltung des Bereichs der K-Lkw-Systeme

Im Folgenden werden die Ausgestaltung des Bereichs der K-Lkw-Systeme zunächst in Abschnitt 5.1 unter Vernachlässigung der europäischen Einbettung und im Anschluss in Abschnitt 5.2 unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung betrachtet und darauf basierend kurzfristige Handlungsempfehlungen für Deutschland abgeleitet. Die grundsätzliche Vorgehensweise für die Untersuchung ist in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

5.1 Fokus auf Deutschland bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung

Dieser Abschnitt beinhaltet zunächst eine Diskussion zur relativen Vorteilhaftigkeit von möglichen Endzuständen für den Bereich der K-Lkw-Systeme in Deutschland unter Vernachlässigung der europäischen Einbettung. Mögliche Endzustände können durch ein K-Lkw-System oder durch eine Kombination von mehreren K-Lkw-Systemen gekennzeichnet sein. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Endzustands-Betrachtungen werden unter Einbezug der Option sequenziellen Entscheidens kurzfristige Handlungsempfehlungen für die K-Lkw-Systeme abgeleitet.

5.1.1 Endzustands-Betrachtungen

Dieser Abschnitt dient dazu, die Eignung verschiedener Endzustände für den Bereich der K-Lkw-Systeme unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.2.1 dargestellten Ziele gegenüberzustellen. Vorgelagert werden die Erkenntnisse aus dem Kapitel 3 zur Frage der relativen Bedeutung von E- und K-Lkw-Systemen aufgegriffen. Anschließend werden die K-Lkw-Systeme hinsichtlich der für die relative Vorteilhaftigkeit relevanten Charakteristika gegenübergestellt. Ferner werden für die Bewertung der relativen Vorteilhaftigkeit verschiedener Endzustände wesentliche Aspekte aufgezeigt und diskutiert. Dabei werden z. T. auch für die relative Vorteilhaftigkeit bedeutende Aspekte, die den Pfad der Transformation betreffen, dargestellt. Abschließend werden erste Schlussfolgerungen aus den Überlegungen gezogen.

Erkenntnis aus Kapitel 3: Bereich der K-Lkw-Systeme sollte deutlich kleiner sein als der Bereich des E-Lkw-Systems

Abschnitt 3.1 zeigt auf, dass für den Großteil des SGV auf ein E-Lkw-System zurückgegriffen werden sollte. Dennoch ist es durchaus zu erwarten, dass auch der Bedarf nach mindestens einem K-Lkw-System besteht. Denn es ist nicht unplausibel, dass nicht alle Anforderungen der Nachfrage durch ein E-Lkw-System gedeckt werden können und ein K-Lkw-System einen hohen Wert durch die zusätzliche Absicherung der Mobilitätsoption aufweist. Es folgt, dass in den Endzuständen auch ein Bereich für K-Lkw-Systeme zu berücksichtigen ist, der aber insgesamt relativ gesehen als klein einzuordnen ist.

Für die Bewertung relevante Charakteristika der K-Lkw-Systeme

In dem Bereich für K-Lkw-Systeme können für einen klimaneutralen SGV H2-, f-SKW und g-SKW-Lkw-Systeme eingesetzt werden. Die für die relative Bewertung relevanten Charakteristika der K-Lkw-Systeme werden folgend in Anlehnung an die in Abschnitt 2.1.2.2 dargestellten Grundlagen aufgezeigt:

- Ein **H2-Lkw-System** zeichnet sich im Vergleich zu den weiteren K-Lkw-Systemen durch die höchste Energieeffizienz aus. Weiterhin bestehen mögliche Synergien zwischen einem H2-Lkw-System und weiteren Nachfragern von Wasserstoff in Deutschland, wie z.B. der Industrie und dem Stromsektor. [219] Es sei ferner darauf hingewiesen, dass auch wenn aktuell H2-BTI nur in einem sehr geringen Umfang vorhanden ist, zu erwarten ist, dass diese (zumindest temporär) aus industriepolitischen Gründen in einem gewissen Umfang ausgebaut werden dürfte.[220] H2-Lkw sind nicht als Serienprodukt verfügbar, sodass Kostenentwicklungen noch unsicher sind.[221] Insgesamt erscheint es allerdings plausibel zu sein, dass H2-Lkw auch in der langen Frist im Vergleich zu den anderen K-Lkw mit den höchsten Investitionskosten verbunden sind.[222]
- Ein **f-SKW-Lkw-System** weist eine geringere Energieeffizienz als ein H2-Lkw-System auf. Allerdings existieren bereits in einem großen Umfang Transport-, Verteil- und BT-Infrastruktur für flüssige Kraftstoffe, die auch grundsätzlich für f-SKW nutzbar sein dürften. Zudem könnte ein f-SKW-Lkw-System von Synergien mit dem Schiffs- und Luftverkehr profitieren.[223] Schließlich sei angemerkt, dass ein vollständiger Verzicht auf f-SKW in der langen Frist aufgrund von speziellen Anwendungen, z.B. dem Militär und Schwer- und Sondertransporten, eher unwahrscheinlich ist.[224]
- Ein **g-SKW-Lkw-System** ist durch eine ähnliche – als niedrig einzuordnende – Energieeffizienz wie ein f-SKW-Lkw-System gekennzeichnet. Ferner existieren bereits Transport-, Verteil- und BT-Infrastruktur für gasförmige Kraftstoffe, die voraussichtlich auch für ein g-SKW-Lkw-System genutzt werden könnten. Allerdings ist die Energiedichte von g-SKW geringer als von f-SKW, sodass die Reichweiten der Lkw heute üblicherweise geringer sind als Reichweiten von Lkw mit flüssigen Kraftstoffen. Dies kann den Einsatz von g-SKW-Lkw im Fernverkehr erschweren.

Insgesamt ist allen K-Lkw-Systemen gemein, dass die Produktion der klimaneutralen Kraftstoffe noch nicht in einem großen Maßstab erfolgt, sodass die (Kosten-)Entwicklung und Verfügbarkeit hohen Unsicherheiten unterliegen.

IDENTIFIKATION WESENTLICHER ASPEKTE FÜR DIE RELATIVE BEWERTUNG VON ENDZUSTÄNDEN UND DISKUSSION

Die K-Lkw-Systeme sind durch verschiedene Charakteristika gekennzeichnet. Es stellt sich die Frage, welches K-Lkw-System oder welche Kombination aus K-Lkw-Systemen im Endzustand – und auch

---

[219] Synergien könnten z.B. im Zuge von gemeinsam Produktionsanlagen, Transport- und Verteilinfrastrukturen entstehen.

[220] Dieser Aspekt bezieht sich auf den Pfad. Denn eine aus industriepolitischen Gründen umgesetzte Weiterentwicklung der H2-BTI kann sich auf die relative Vorteilhaftigkeit der K-Lkw-Systeme im Endzustand auswirken und wird somit einbezogen. In diesem Kontext sei auch darauf hingewiesen, dass sich Fahrzeughersteller, Technologieunternehmen, Infrastrukturbetreiber und Logistikunternehmen im Jahr 2020 dazu bekannt haben, einen Beitrag zum Einsatz von H2-Lkw zu leisten (vgl. dafür *Coalition Statement on the deployment of fuel cell and hydrogen heavy-duty trucks in Europe* (2020)).

[221] Vgl. dazu Abschnitt 2.1.2.2.1 sowie PLÖTZ (2022).

[222] Vgl. UNTERLOHNER (2021, S. 90 f.).

[223] Synergien könnten – wie auch für Wasserstoff – z.B. im Zuge von gemeinsam Produktionsanlagen, Transport- und Verteilinfrastrukturen entstehen.

[224] Vgl. Abschnitt 3.1.

unter Berücksichtigung von für den Pfad hin zum Endzustand relevanten Aspekten – mit den größten Vorteilen einhergeht. Dafür werden verschiedene Aspekte aufgezeigt und die relative Vorteilhaftigkeit möglicher Endzustände im Kontext dieser beleuchtet. Es wird auf die Anzahl der K-Lkw-Systeme, die Importkosten der Kraftstoffe sowie die Größe des Bereichs der K-Lkw-Systeme eingegangen.

Grundsätzlich gehen Endzustände, die durch eine Kombination aus mehreren K-Lkw-Systemen gekennzeichnet sind, mit höheren Infrastrukturkosten einher, da für alle im Endzustand vorgesehenen K-Lkw-Systeme eine flächendeckende Infrastruktur zu errichten ist.[225] Daher könnte sich eine Reduktion der K-Lkw-Systeme im Endzustand positiv auf die (Kosten-)Effizienz auswirken. Ein g-SKW-Lkw-System ist auf Basis der dargestellten Charakteristika im Vergleich zum f-SKW- und H2-Lkw-System im Nachteil. Da auch keine wesentlichen Synergieeffekte zwischen dem Einsatz von g-SKW in anderen Bereichen des Energiesystems sowie einem g-SKW-Lkw-System zu erwarten sind, ist es unwahrscheinlich, dass ein g-SKW-Lkw-System Teil eines vorteilhaften Endzustands ist. Dagegen ist ein Verzicht auf ein f-SKW-Lkw-System als unwahrscheinlich anzusehen. Ein H2-Lkw-System müsste voraussichtlich nicht zwangsläufig errichtet werden, wenn ein f-SKW-Lkw-System vorhanden ist. Einerseits sprechen voraussichtlich geringere Kosten für die Transport-, Verteil- und BT-Infrastruktur für die Fokussierung auf einen Endzustand mit nur einem K-Lkw-System und somit dem f-SKW-Lkw-System. Andererseits kann die höhere Energieeffizienz des H2-Lkw-Systems gegenüber des f-SKW-Lkw-Systems zur Reduktion der Kraftstoff- und somit Energiekosten beitragen.

In diesem Kontext ist insbesondere auch die Entwicklung der Importkosten der Kraftstoffe von Bedeutung. Im Fall von niedrigen Importkosten schlägt sich die Energieeffizienz des Lkw weniger stark in der (Kosten-)Effizienz der K-Lkw-Systeme nieder. [226] Daher könnte die relative Vorteilhaftigkeit eines Endzustands, der nur durch ein f-SKW-Lkw-System gekennzeichnet ist, bei niedrigen Importkosten steigen.[227]

Es ist aber auch zu bedenken, dass noch Unsicherheiten hinsichtlich des Umfangs des Bereichs der K-Lkw-Systeme bestehen. Niedrige Importkosten könnten auch dazu führen, dass die relative Bedeutung der K-Lkw-Systeme gegenüber der E-Lkw-Systeme in einem gewissen – aber weiterhin begrenzten Umfang – zunimmt. Die Begrenzung des Umfangs ergibt sich aus den deutlichen Effizienzvorteilen der E-Lkw-Systeme sowie der Gefahren von Abhängigkeiten durch ein großes Ausmaß an Importen. Wenn die Größe des Bereichs der K-Lkw-Systeme zunimmt, sinkt generell die Bedeutung der Infrastrukturkosten. Dadurch könnte die Rationalität steigen, ein H2-Lkw-System ergänzend zum f-SKW-Lkw-System zu etablieren. Analog dazu steigt die Rationalität dafür ausschließlich ein f-SKW-

[225] Vgl. Abschnitt 2.1.1.

[226] Hier werden die Energieverluste von dem Tank bis zum Antrieb („tank to wheel“) adressiert und nicht wie in Kapitel 3 die gesamte Kette von der Quelle bis zum Antrieb („Well to wheel“). Für H2-Lkw wird in der langen Frist ein Energieverbrauch von 1,79 kWh/km und für g- bzw. f-SKW-Lkw von ca. 2,3 kWh/km (bzw. 2,33 kWh km und 23,47 l/100 km) angegeben (UNTERLOHNER (2021, S. 89).

[227] Es sei weiterhin angemerkt, dass die Importkosten der unterschiedlichen Kraftstoffe sich unterscheiden dürften. Aufgrund der hohen Unsicherheiten werden diese aber nicht differenziert betrachtet, sondern schließlich nur die Wirkungen des grundsätzlichen Niveaus der Importkosten diskutiert. Weitere Untersuchungen zu den Importkosten, die insbesondere mögliche Differenzen hinsichtlich der Entwicklung der Importkosten von H2 und f-SKW in den Blick nehmen, sind zu empfehlen.

Lkw-System zu errichten, wenn die Größe des Bereichs der K-Lkw-Systeme – beispielsweise aufgrund von hohen Importkosten – besonders klein ist.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorstehenden Überlegungen zeigen, dass unter der Annahme von risikoaversem Entscheiden ein K-Lkw-System in den in Betracht zu ziehenden Endzuständen enthalten ist. Es kann aber nicht eindeutig abgeleitet werden, ob Endzustände anzustreben sind, die zusätzlich zum f-SKW-Lkw-System durch ein H2-Lkw-System gekennzeichnet sind. Unter Berücksichtigung des aktuellen Wissensstands erscheint es unplausibel zu sein, dass ein g-SKW-Lkw-System Bestandteil von vorteilhaften Endzuständen ist.

5.1.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen

Aus den in Abschnitt 5.1.1 dargestellten Überlegungen zur relativen Vorteilhaftigkeit möglicher Endzustände für den Bereich der K-Lkw-Systeme ergeben sich unter Einbezug der Option sequenziellen Entscheidens folgende Handlungsempfehlungen für die betrachteten K-Lkw-Systeme.

Mit Bezug zu einem f-SKW-Lkw-System bestehen aktuell voraussichtlich nahezu keine zeitkritischen Handlungserfordernisse. Die Technologieentwicklung für die Bereitstellung von f-SKW dürfte durch andere Anwendungsfelder, wie z.B. den Luft- und Seeverkehr, vorangetrieben werden. Mit Blick auf die Infrastrukturen kann voraussichtlich in weiten Teilen auf bestehende Infrastrukturen zurückgegriffen werden. Die Umwidmung der bestehenden Infrastrukturen für flüssige Kraftstoffe auf f-SKW sollte untersucht werden, wobei der Bedarf an Infrastrukturen für ein f-SKW-Lkw-System nicht zuletzt von der Größe des Bereichs des f-SKW-Lkw-Systems abhängen dürfte, die wiederrum von der Entwicklung der E-Lkw-Systeme beeinflusst wird. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen, diesbezügliche Wissenszuwächse abzuwarten und einzubeziehen.

Die technischen Komponenten eines H2-Lkw-Systems befinden sich aktuell noch in der Entwicklung. Daher sollte in Betracht gezogen werden, die Weiterentwicklung voranzutreiben, um die Eignung der durch ein H2-Lkw-System gekennzeichneten Endzustände zukünftig besser bewerten zu können. Zudem könnten industriepolitische Gründe dafürsprechen, die Option eines H2-Lkw-Systems in Deutschland zu entwickeln. Dies gilt sowohl für die Fahrzeuge als auch für die Infrastrukturen für Wasserstoff im Allgemeinen und die BTI für H2-Lkw im Speziellen. In diesem Kontext sollten Interdependenzen mit weiteren Bereichen des Energiesystems beachtet werden. Es bietet sich an, Wissen zum H2-Lkw-System im Rahmen von Insel-Systemen aufzubauen, bei denen möglichst Synergieeffekte mit weiteren Anwendungsfeldern für Wasserstoff im Energiesystem realisiert werden können.[228] Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Bedeutung eines H2-Lkw-Systems im Endzustand sollte aktuell keinesfalls eine flächendeckende BTI errichtet werden, um die Kosten und die Gefahr von „stranded assets“ zu begrenzen. Es ist allerdings zu beachten, dass ab einem gewissen Zeitpunkt die umfangreiche Errichtung der H2-BTI für bestimmte Endzustände auf einem zeitkritischen Pfad mit Blick auf die Erreichung der Klimaziele liegen wird, sodass bis zu diesem Zeitpunkt die Grundsatzentscheidung zwischen einem f-SKW-Lkw-System und dem parallelen Aufbau

[228] Vgl. dazu auch TRANSPORT & ENVIRONMENT (2021, S. 46 ff.) und INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (2023, S. 22).

von f-SKW- und H2-Lkw-System vorbereitet werden sollte. Hinsichtlich der Rationalität für ein g-SKW-Lkw-System in Deutschland bestehen erhebliche Zweifel. Weiterhin erscheint nicht zu erwarten zu sein, dass kurzfristig Maßnahmen erforderlich sind, wenn sich – wider Erwarten – herausstellen sollte, dass ein g-SKW-Lkw-System Teil eines vorteilhaften Endzustands ist, da dieses dann vermutlich nur einen geringen Anteil des SGV abdecken und eine Ergänzung zum f-SKW- und unter Umständen auch zum H2-Lkw-System darstellen würde.

5.2 Fokus auf Deutschland bei Berücksichtigung der europäischen Einbettung

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungen zur Ausgestaltung des Bereichs der K-Lkw-Systeme um Aspekte der europäischen Einbettung erweitert. Zunächst werden die Implikationen der europäischen Einbettung auf die Endzustands-Betrachtungen beleuchtet. Im Anschluss werden auf Basis der im Rahmen von Endzustands-Betrachtungen gewonnenen Erkenntnisse (kurzfristige) Handlungsempfehlungen für die deutsche Politik hinsichtlich des Agierens in Deutschland sowie des Agierens mit Bezug zu europäischen Aktivitäten abgeleitet.

5.2.1 Endzustands-Betrachtungen

Zu Beginn der Untersuchungen wird die relative Vorteilhaftigkeit möglicher Endzustände für den Bereich der K-Lkw-Systeme aus der Perspektive anderer Länder betrachtet. Anschließend wird unter Berücksichtigung von möglichen Koordinationsvorteilen die europäische Perspektive eingenommen. Zuletzt werden die sich ergebenden Implikationen für die Endzustands-Betrachtungen aus der deutschen Perspektive beleuchtet.

Endzustände für den Bereich der K-Lkw-Systeme aus der Perspektive einzelner Länder bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung, potenzielle Koordinationsvorteile und schließlich die „K-"Frage aus der europäischen Perspektive

Abschnitt 3.2 zeigt auf, dass die relative Eignung der K-Lkw-Systeme in einigen anderen Ländern größer sein könnte als in Deutschland. Infolgedessen könnte es bei isolierter Betrachtung in diesen Ländern vorteilhaft sein, einen größeren Anteil des SGV durch K-Lkw-Systeme und somit ein kleinerer Anteil durch E-Lkw-Systeme abzudecken. Mit zunehmender Größe des Bereichs der K-Lkw-Systeme steigt die Rationalität für ein H2-Lkw-System, da die geringere Energieeffizienz von f-SKW-Lkw-Systemen sich dann stärker in der (Kosten-)Effizienz niederschlägt.[229] Weiterhin können auch Interdependenzen des H2-Lkw-Systems mit anderen Bereichen des Energiesystems oder industriepolitische Gründe zu einer höheren Bedeutung der K-Lkw-Systeme im Vergleich zu den E-Lkw-Systemen führen. Es ist daher durchaus denkbar, dass ein H2-Lkw-System in anderen Ländern Teil eines aus der Perspektive der einzelnen Länder vorteilhaften Endzustands ist. In den aus der Perspektive der einzelnen Länder – bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung – vorteilhaften Endzuständen dürfte auch stets ein f-SKW-Lkw-System enthalten sein. Der Hintergrund ist einerseits, dass ein f-SKW-Lkw-System voraussichtlich für einige spezielle Anwendungsfelder auch in der langen Frist erforderlich bleibt.

[229] Vgl. Abschnitt 5.1.1.

Andererseits existieren bereits europaweit Infrastrukturen für flüssige Kraftstoffe, die voraussichtlich in einem gewissen Umfang auch in einem f-SKW-Lkw-System genutzt werden können.[230] Mit Bezug zum g-SKW-Lkw-System bestehen aktuell keine Anhaltspunkte, dass dieses in einem aus der Perspektive einzelner Länder vorteilhaften Endzustand enthalten ist. Auf Basis des aktuellen Wissensstands erscheint es unwahrscheinlich, dass der Aufbau eines g-SKW-Lkw-System in der langen Frist in einzelnen Ländern mit Vorteilen einhergeht. Es ist allerdings auch nicht vollständig auszuschließen. Insgesamt rücken somit – wie auch bei der Betrachtung Deutschlands unter Vernachlässigung der europäischen Einbettung – das f-SKW- und das H2-Lkw-System in den Fokus.

Im Folgenden werden potenzielle Koordinationsvorteile zwischen den europäischen Ländern diskutiert, um darauf basierend die relative Vorteilhaftigkeit möglicher Endzustände aus europäischer Perspektive beleuchten zu können.[231] Zunächst können Koordinationsvorteile durch technische Standardisierung ermöglicht werden. Einerseits sind Kostensenkungen durch die technische Standardisierung, insbesondere für die Komponenten eines H2-Lkw-Systems, denkbar. Denn aktuell ist noch ein breites Spektrum an Ausgestaltungsvarianten des H2-Lkw-Systems in der Diskussion, sodass durch eine Einigung und Standardisierung die Kosten im Zuge von Synergieeffekten deutlich gesenkt werden könnten.[232] Andererseits kann durch eine technische Standardisierung und einen flächendeckenden Aufbau der BTI eine Nutzungskompatibilität erreicht werden.

Da ein f-SKW-Lkw-System in allen Ländern – zumindest in einem kleinen Umfang – erwartet wird, ist eine Nutzungskompatibilität im Bereich der K-Lkw-Systeme höchstwahrscheinlich. Durch einen flächendeckenden Aufbau von BTI für H2-Lkw könnte die Nutzungskompatibilität auf weitere Lkw-Systeme erweitert werden. Dies dürfte insbesondere dann von Bedeutung sein, wenn in einigen Ländern für den Großteil des SGV ein H2-Lkw-System eingesetzt wird, da damit auch die Bedeutung der europaweiten Einsatzflexibilität der H2-Lkw steigt. Es ist aber zu bedenken, dass die Infrastrukturkosten durch die Fokussierung auf ein f-SKW-Lkw-System für den internationalen Verkehr reduziert werden dürften.[233] Zudem sind allerdings auch die Transaktionskosten einer europäischen Koordination nicht zu vernachlässigen, die Abstimmungsprozesse erschweren können. Im Verhältnis zur Koordination im Hinblick auf eine technische Standardisierung könnte eine Abstimmung hinsichtlich der europaweit flächendeckend zu errichtenden K-Lkw-Systeme mit besonders hohen Transaktionskosten einhergehen. Dies spricht wiederrum für eine europaweite Parallelität von f-SKW- und H2-Lkw-System.

IMPLIKATIONEN DER EUROPÄISCHEN EINBETTUNG FÜR ENDZUSTANDS-BETRACHTUNGEN AUS DER DEUTSCHEN PERSPEKTIVE

Es zeigt sich insgesamt, dass auch aus der europäischen Perspektive noch Unsicherheiten hinsichtlich der relativen Vorteilhaftigkeit möglicher Endzustände bestehen. Die Rationalität für ein f-SKW-Lkw-System in Deutschland wird allerdings durch die Entscheidungen anderer Länder nicht beeinflusst.

[230] Vgl. Abschnitt 5.1.1.
[231] Vgl. dazu die in Abschnitt 2.2.2.2.1 dargestellte Vorgehensweise.
[232] Vgl. Abschnitt 2.1.2.2.1.
[233] Vgl. Abschnitt 5.1.1.

Ebenso sind derzeit keine Anhaltspunkte bezüglich der Position und Entwicklungen in anderen Ländern bekannt, die die Rationalität für den Aufbau eines g-SKW-Lkw-Systems in Deutschland deutlich verändern und somit erhöhen. Weiterhin ist es denkbar, dass ein H2-Lkw-System in einigen europäischen Ländern langfristig mit Vorteilen einhergeht, wobei die Frage, ob ein europaweiter flächendeckender Aufbau vorteilhaft ist, auf Basis des aktuellen Wissensstands nicht beantwortet werden kann. Es wird allerdings deutlich, dass sich die Rationalität für den Aufbau eines H2-Lkw-Systems in Deutschland durch die Berücksichtigung der europäischen Einbettung erhöhen könnte. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass es in Deutschland auch bei einem flächendeckenden Aufbau eines H2-Lkw-Systems weiterhin vorteilhaft ist, dass für den Großteil des SGV auf E-Lkw-Systeme zurückgegriffen wird.[234]

5.2.2 Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen

Zunächst werden in Abschnitt 5.2.2.1 die Implikationen der Berücksichtigung der europäischen Einbettung auf die (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Agierens in Deutschland diskutiert. Im Anschluss werden in Abschnitt 5.2.2.2 die Handlungsempfehlungen für das Agieren der deutschen Politik im Kontext europäischer Aktivitäten abgeleitet.

5.2.2.1 Agieren in Deutschland

Die in Abschnitt 5.1.2 dargestellten kurzfristigen Handlungsempfehlungen, die auf Endzustands-Betrachtungen unter Vernachlässigung der europäischen Einbettung basieren, sind auch unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung weiterhin gültig. Auch wenn die Rationalität für die Parallelität von f-SKW- und H2-Lkw-System in Deutschland durch die Berücksichtigung der europäischen Einbettung tendenziell steigt, besteht nach aktueller Einschätzung kein Handlungsbedarf, der über Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten und kleinere Demonstrationsprojekte in Insel-Systemen hinausgeht. Es sei weiterhin angemerkt, dass Deutschland von den europäischen Aktivitäten zu H2-Lkw-Systemen profitieren könnte, da im Fall eines europäischen Wissensaustausches der Wissenszuwachs beschleunigt und somit die Grundlage zur relativen Bewertung der K-Lkw-Systeme zeitnah verbessert werden könnte.

5.2.2.2 Agieren im Kontext europäischer Aktivitäten

In Abschnitt 5.2.1 wird aufgezeigt, dass die technische Standardisierung Koordinationsvorteile ermöglicht. Durch die besondere Bedeutung von f-SKW und die Potenziale des H2-Lkw-Systems sollte die technische Standardisierung für diese Lkw-Systeme vorangetrieben werden. Es sollte allerdings darauf hingewirkt werden, dass keine (weiteren) zentralen Vorgaben zum kurzfristigen flächendeckenden Ausbau von BTI für ein H2-Lkw-System etabliert werden und diese insgesamt allenfalls einen kurzfristigen Ausbau in einem sehr begrenzten Umfang umfassen. Im Kontext der aktuellen und möglicherweise auch weiteren in naher Zukunft etablierten zentralen Vorgaben in der EU ist es zu empfehlen, die Inkaufnahme von Kosten und die Gefahr von „stranded assets“ so weit wie möglich zu begrenzen. Ferner ist aus aktueller Perspektive nicht zu erwarten, dass ein g-SKW-Lkw-

[234] Vgl. Kapitel 3 und Abschnitt 5.1.1.

System Teil eines vorteilhaften Endzustands sein wird, sodass diesbezügliche Aktivitäten in jedem Fall eingeschränkt werden sollten. Die existierenden BTI für flüssige Kraftstoffe dürften in einem bestimmten Umfang für f-SKW-Lkw-Systeme genutzt werden können, sodass ein (zeitnaher) Aufbau von Infrastrukturen eines f-SKW-Lkw-Systems nicht erforderlich erscheint.

6 Fazit und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen dieser Studie wurde die relative Eignung der unterschiedlichen Technologieoptionen für einen klimaneutralen schweren SGV mit Fokus auf Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung untersucht. Weiterhin wurden unter Einbezug (entscheidungstheoretisch fundierter) Überlegungen und dabei der Berücksichtigung der Option sequenziellen Entscheidens – insbesondere kurzfristige – Handlungsempfehlungen für die deutsche Politik, die u.a. auch Aktivitäten im europäischen Kontext betreffen, abgeleitet. Die zentralen Erkenntnisse der Untersuchungen sowie die abgeleiteten Handlungsempfehlungen werden im Folgenden dargestellt.

ERKENNTNISSE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN MIT BEZUG ZU DEN E-LKW-SYSTEMEN

Wesentliche Erkenntnisse und daraus resultierende Handlungsempfehlungen mit Bezug zu E-Lkw-Systemen folgen:

- Aus den Untersuchungen folgt, dass für den Großteil des SGV in Deutschland auf E-Lkw-Systeme zurückgegriffen und somit der Aufbau eines E-Lkw-Systems schnellstmöglich vorangetrieben werden sollte. Da ein flächendeckender Aufbau von P-S-LI sowohl für ein B- als auch für ein OB-Lkw-System erforderlich ist und kurzfristig zum allergrößten Teil nicht spezifisch für ein B-Lkw-System sein dürfte, ist zu empfehlen, den Aufbau sofort und in größtmöglichem Umfang anzustoßen.
- Weiterhin wird deutlich, dass auch ein europaweit flächendeckender Aufbau von P-S-LI aus europäischer Perspektive vorteilhaft ist, da – eine technische Standardisierung vorausgesetzt – somit eine grenzüberschreitende Einsatzflexibilität von B-Lkw und (ggf. in begrenztem Umfang) auch für OB-Lkw ermöglicht und somit eine Nutzungskompatibilität zu verhältnismäßig geringen Kosten gewährleistet wird. Der Einschätzung, dass relativ geringe Kosten im Zuge des flächendeckenden Aufbaus von P-S-LI anfallen, liegt die Annahme zugrunde, dass in den meisten europäischen Ländern der Aufbau von P-S-LI – auch unter Vernachlässigung der europäischen Einbettung – vorteilhaft sein dürfte. In diesem Kontext ist es empfehlenswert, dass die deutsche Politik darauf hinwirkt, dass zentrale Vorgaben in der EU, beispielsweise auf Ebene des Sekundärrechts, zum flächendeckenden Aufbau von standardisierter P-S-LI etabliert werden, um eine effektive und effiziente Transformation in Deutschland und Europa voranzutreiben.
- Zudem sollte mit Bezug zur P-S-LI der Entwicklung einer institutionellen Lösung eine hohe Aufmerksamkeit zukommen, um Verzögerungen und längerfristig Kosten infolge von Koordinations- und Machtproblemen so weit wie möglich zu vermeiden.
- Weiterhin wird in den Untersuchungen herausgearbeitet, dass die Gegenüberstellung von B- und OB-Lkw-System unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten in einem Kopf-an-Kopf-Rennen endet. Die relative Vorteilhaftigkeit wird zunächst bei Vernachlässigung der europäischen Einbettung maßgeblich von der Entwicklung der Batterien und Batteriekosten, dem Wachstum des SGV, der technisch-systemischen Ausgestaltung von B- und OB-Lkw-System sowie auch dem Umfang an Flächenknappheiten entlang der BAB sowie institutionellen Herausforderungen beeinflusst. Auch unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung kristallisiert sich kein klarer Gewinner aus der Gegenüberstellung von B- und OB-Lkw-System.

- Es ist aktuell zu empfehlen, sowohl die Option der Etablierung eines B- als auch eines OB-Lkw-Systems (kurzfristig) offenzuhalten und beide Optionen weiterzuentwickeln. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Kosten, die für einen kurzfristigen Flexibilitätserhalt in Kauf genommen werden müssen, als gering einzuordnen sind. Mit Bezug zu einem B-Lkw-System fallen zunächst (weitestgehend) keine spezifischen Kosten an.[235] Für die Erhaltung der Option eines OB-Lkw-Systems sollten insbesondere technisch-systemische Untersuchungen fort- und umgesetzt werden, um die Option des OB-Lkw-Systems weiterzuentwickeln und die relative Vorteilhaftigkeit von B- und OB-Lkw-System zeitnah auf Grundlage eines verbesserten Wissensstands beurteilen zu können. In diesem Kontext sollten sowohl mit Bezug zu einem OB-Lkw-System (nur) in Deutschland als auch in mehreren europäischen Ländern Varianten bezüglich der Aufbau- und Verortungsstrategie der L-O-LI untersucht werden. Ferner sollten die noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Batteriekostenentwicklungen, zukünftiger Fahrleistungen, der Stromkosten, Flächenknappheiten und institutioneller Herausforderungen adressiert werden, um einerseits den Wert von B- und OB-Lkw-System zu steigern und andererseits eine verbesserte Grundlage für die Entscheidung zwischen B- und OB-Lkw-System zu schaffen. Dies ist zwar in der kurzen Frist mit Kosten verbunden, die aber einer effizienten Transformation dienen.
- Weiterhin sollten technisch-systemische und institutionelle Fragen zu den Stromnetzanschlüssen aufgrund der langen Planungs- und Genehmigungszeiten zeitnah adressiert werden. Zum einen sind Konzepte für die Stromnetzanschlüsse und die Integration in das Stromsystem insgesamt für die P-S-LI und die L-O-LI zu entwickeln. Zum anderen könnte eine für den SGV spezifische Ausgestaltung eines institutionellen Rahmens für die Fällung von Planungs- und Investitionsentscheidungen und für deren Umsetzung vorteilhaft im Hinblick auf die Effektivität und (Kosten-)Effizienz der Transformation des SGV sein.
- Zuletzt ist es zu empfehlen, die Weiterentwicklung von im Rahmen dieser Studie nicht betrachteten Technologieoptionen und insbesondere von Batteriewechselsystemen im Blick zu behalten, um Potenziale zur Ergänzung der hier betrachteten Technologien zu erkennen.

ERKENNTNISSE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN MIT BEZUG ZU DEN K-LKW-SYSTEMEN

Wesentliche Erkenntnisse und daraus resultierende Handlungsempfehlungen mit Bezug zu K-Lkw-Systemen folgen:

- K-Lkw-Systeme könnten auch langfristig von Bedeutung sein, wenn einige spezielle Anforderungen, z.B. vom Militär und Bauwesen oder durch Schwer- und Sondertransporte, nicht vollständig durch den Einsatz von E-Lkw-Systeme erfüllt werden können. Weiterhin besteht eine Rationalität für ein K-Lkw-System, da dadurch eine Grundversorgung mit Lebensmitteln und weiteren wesentlichen Gütern nicht nur durch das E-Lkw-System sondern

[235] Es sei darauf hingewiesen, dass eine vorausschauende Planung von Stromnetzanschlüssen, die sowohl die Option des B- als auch des OB-Lkw-Systems umfassen, damit einhergehen könnte, dass es aufgrund der langen Realisationszeiträume von Stromnetzanschlüssen sinnvoll sein kann, diese nicht schrittweise auszubauen, sondern diese zeitnah für denkbare Ausgestaltungsvarianten mit besonders großen Anforderungen an den Netzanschluss zu dimensionieren.

auch ergänzend durch ein K-Lkw-System gewährleistet wird. Der Einsatz der K-Lkw-Systeme sollte allerdings in Deutschland aufgrund der Effizienzvorteile der E-Lkw-Systeme sowie im Kontext von Importabhängigkeiten auf ein kleines Ausmaß begrenzt werden.

- Es erscheint plausibel, dass langfristig sowohl in Deutschland als auch in Europa durch ein flächendeckendes standardisiertes f-SKW-Lkw-System eine Nutzungskompatibilität im Bereich der K-Lkw-Systeme sichergestellt werden sollte. Aufgrund des relativ geringen Umfangs der K-Lkw-Systeme, der bereits existierenden Infrastrukturen für kf-K-Lkw-Systeme sowie der Forschung- und Entwicklung im Kontext anderer Anwendungsfelder von f-SKW, wie z.B. dem Schiff- und Luftverkehr, dürften abgesehen von europäischen Abstimmungen zur technischen Standardisierung aktuell (nahezu) keine zeitkritischen Handlungsbedarfe bestehen.
- Hinsichtlich der Rationalität für ein H2-Lkw-System in Deutschland bestehen noch Unsicherheiten. Unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung steigt zwar die Rationalität, aber es ergibt sich nicht zwangsläufig eine Notwendigkeit für ein H2-Lkw-System in Deutschland. Denn es ist denkbar, dass, auch wenn ein H2-Lkw-System in einzelnen europäischen Ländern eingesetzt wird, ein Verzicht auf eine europaweit flächendeckende Etablierung eines zweiten K-Lkw-Systems aus europäischer Sicht mit Vorteilen einhergehen könnte. Daher sollte aktuell keine Flächendeckung bezüglich der H2-BTI angestrebt werden.
- Nichtsdestotrotz sollte die Weiterentwicklung der Technologien eines H2-Lkw-Systems vorangetrieben werden und eine europaweite technische Standardisierung angestoßen werden, um potenzielle Koordinationsvorteile heben zu können. Auch industriepolitische Gründe könnten für die Involvierung Deutschlands in die Weiterentwicklung des H2-Lkw-Systems sprechen. Für die Weiterentwicklung bietet es sich an, Synergieeffekte mit anderen Anwendungsfeldern von Wasserstoff im Rahmen von Insel-Systemen zu heben. Im Kontext von Vorgaben der EU, die einen darüberhinausgehenden Aufbau von H2-BTI fordern, sollten die Kosten und somit auch die Gefahren für „stranded assets“ so weit wie möglich reduziert werden.
- Hinsichtlich der Rationalität für ein g-SKW-Lkw-System in Deutschland bestehen – auch unter Berücksichtigung der europäischen Einbettung – erhebliche Zweifel. Weiterhin ist nicht zu erwarten, dass kurzfristig Maßnahmen erforderlich sind, wenn sich wider Erwarten herausstellen sollte, dass ein g-SKW-Lkw-System Teil eines vorteilhaften Endzustands ist.
- Schließlich wird deutlich, dass mit Bezug zu den K-Lkw-Systemen kurzfristig keine umfangreichen Handlungserfordernisse für eine effektive und effiziente Transformation des SGV bestehen. Nichtsdestotrotz sollten bestehende Wissensdefizite adressiert werden, um den Wert der betrachteten K-Lkw-Systeme zu erhöhen und zeitnah die Eignung möglicher Endzustände besser bewerten zu können.

Literatur

Agora Verkehrswende in Kooperation mit Transport and Environment (2022): Elektro-Lkw schneller auf die Straße bringen; Schlussfolgerungen auf Basis der TNO-Studie „Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe“, zuletzt abgerufen im Internet am 01.02.2023 unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Veranstaltungen/2022/Elektrische-Lkw/Elektro-Lkw_Agora-Schlussfolgerungen_20221012.pdf.

Basma, H. / Rodríguez, F. – The International Council on Clean Transportation (ICCT) (2023a): A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe; White Paper, zuletzt abgerufen im Internet am 24.06.2024 unter https://theicct.org/publication/total-cost-ownership-trucks-europe-nov23/.

Basma, H. / Rodríguez, F. – The International Council on Clean Transportation (ICCT) (2023b): The European heavy-duty vehicle market until 2040 - Analysis of decarbonization pathways; White Paper, zuletzt abgerufen im Internet am 24.06.2024 unter https://theicct.org/publication/hdv-europe-decarb-costs-jan23/.

Basma, H. / Saboori, A. / Rodríguez, F. – The International Council on Clean Transportation (ICCT) (2021): Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe - Battery electric versus diesel; White Paper, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/11/tco-bets-europe-1-nov21.pdf.

Basma, H. / Zhou, Y. / Rodríguez, F. – The International Council on Clean Transportation (ICCT) (2022): Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe - A total cost of ownership analysis; White Paper, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/eu-hvs-fuels-evs-fuel-cell-hdvs-europe-sep22.pdf.

Baum, H. / Kranz, T. (2012): Zeitbewertung in ökonomischen Planungsrechnungen; Untersuchung im Rahmen des Projekts „Die Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln, Bergisch Gladbach, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1845/file/V293_Anhang.pdf.

Becker, J. (2020): „Lkw mit LNG: Kaum ein Vorteil gegenüber dem Diesel“; Internetseite, zuletzt abgerufen im Internet am 24.07.2023 unter https://www.sueddeutsche.de/auto/lkw-lng-diesel-alternative-1.4911989.

Beckers, T. / Bieschke, N. (2021): Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw - Identifikation und Einordnung wesentlicher Ausgestaltungsfragen auf Basis (institutionen-) ökonomischer Erkenntnisse; in: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, , im Auftrag des ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und des Instituts für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM) im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens

„Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs – My eRoads“ erstelle Kurzstudie, Bd. 91. Jg., Heft 2021/3, S. 140–182.

Beckers, T. / Gizzi, F. / Hermes, G. / Weiß, H. (2019): Die Bereitstellung der Schnellladeinfrastruktur für die Elektromobilität in Deutschland. Eine ökonomisch-juristische Analyse zentraler Fragestellungen und alternativer Organisationsmodelle; am Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM) im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) beauftragten Projektes „Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen“ erstellte Studie, zuletzt abgerufen im Internet am 06.05.2024 unter https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/bauing/professuren_institute/Infrastrukturwirtschaft_und-management/Forschung/Publikationen/2019/beckers_et_al_2019-bereitstellung_der_schnell-ladeinfrastruktur_fuer_die_elektromobilitaet_in_deutschland.pdf.

Beckers, T. / Jöhrens, J. / Hermes, G. / Bieschke, N. / Grüter, C. (2022): Bereitstellung und Finanzierung von Oberleitungs-Infrastruktur für elektrisch angetriebene Lkw - Identifikation und Einordnung wesentlicher Ausgestaltungsfragen auf Basis (institutionen-)ökonomischer Erkenntnisse; in: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, , im Auftrag des ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und des Instituts für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM) im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs – My eRoads“ erstelle Kurzstudie, Bd. 92 Jg., Heft 2022/1, S. 27–55.

Beckers, T. / Klatt, J. P. / Corneo, G. / Mühlenkamp, H. (2009): Zeitliche Homogenisierung und Berücksichtigung von Risiko im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen; im Rahmen des vom Bundesrechnungshof beauftragten Projekt „Übertragbarkeit der klassischen betriebswirtschaftlichen Methoden zur Festlegung von Diskontierungszinssätzen bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen auf die öffentliche Verwaltung“ erstellter Endbericht, Berlin, Speyer.

Börjesson, M. / Proost, S. (2024): The costs and benefits of e-roads versus battery-only trucks when costs are uncertain; VTI Working Paper 2024:3, Swedish National Road and Transport Research Institute, zuletzt abgerufen im Internet am 04.06.2024 unter https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4813799.

Boston Consulting Group (2021): Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft; Im Auftrag des Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), zuletzt abgerufen im Internet am 04.07.2023 unter https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve.

Boston Consulting Group / Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland; im Auftrag des Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), zuletzt abgerufen im Internet am 04.07.2023 unter https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi) (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur

Nullemissionslogistik auf der Straße; zuletzt abgerufen im Internet am 12.06.2023 unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Die Systementwicklungsstrategie als Rahmen für die Transformation zum klimaneutralen Energiesystem; zuletzt abgerufen im Internet am 26.07.2023 unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/ses-prozess-und-beteiligung.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Burges, K. / Kippelt, S. – RE-expertise, ef.Ruhr (2021): Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for battery-electric long-haul trucks; Studie im Auftrag von Transport & Environment, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2022_01_TE_grid_integration_long_haul_truck_charging_study_final.pdf.

Coalition Statement on the deployment of fuel cell and hydrogen heavy-duty trucks in Europe; (2020): auf Basis einer Studie von Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), zuletzt abgerufen im Internet am 21.07.2023 unter https://nlhydrogen.nl/wp-content/uploads/2020/11/201123_Coalition-Statement-on-deployment-of-FCH-trucks-in-Europe-1.pdf.

electrive (2024): „Chargepoint stellt MCS-Lader mit bis zu 3 Megawatt in Aussicht"; Zeitungsartikel erschienen am 2024, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.electrive.net/2024/05/16/chargepoint-stellt-mcs-lader-mit-bis-zu-3-megawatt-in-aussicht/.

Fraunhofer ISI / Consentec / ifeu / Berlin – Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI / Consentec / Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg / Technische Universität Berlin - Fachgebiet Enerige- und Ressourcenmanagement (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - Kurzbericht: 3 Hauptszenarien; Karlsruhe.

Gaete-Morales, C. / Jöhrens, J. / Heining, F. / Schill, W.-P. (2024): Power sector effects of alternative options for de-fossilizing heavy-duty vehicles—Go electric, and charge smartly; in: Cell Reports Sustainability, Bd. 1, Nr. 6, S. 100123.

Gizzi, F. (2016): Implementierung komplexer Systemgüter – Ein methodischer Ansatz für ökonomische Untersuchungen und seine Anwendung auf Verkehrstelematiksysteme für die Straße; Dissertation, Technische Universität Berlin.

Göbel, E. (2002): Neue Institutionenökonomik: Konzeption und betriebswirtschaftliche Anwendungen; in: UTB 2235.

Gobernatz, M. / Jerratsch, J.-O. / Marker, S. (2023): Machine learning drivetrain model for battery electric trucks; proceedings, FISTA 2023 World Congress, Barcelona.

Göckeler, K. / Hacker, F. / Mottschall, M. / Blanck, R. / Görz, W. / Kasten, P. / Bernecker, T. / Heinzelmann, J. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr; Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“ (StratES), zuletzt abgerufen im Internet am 22.06.2023 unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf.

Göckeler, K. / Heinzelmann, J. / Hacker, F. / Ziegler, L. / Lesemann, L. / Bernecker, T. – Öko-Institut, Hochschule Heilbronn (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien. Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung; Zweiter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“ (StratES).

Göckeler, K. / Steinbach, I. / Görz, W. K. / Hacker, F. / Blanck, R. / Mottschall, M. – Öko-Institut (2023): Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs; Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen, Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“ (StratES), Berlin.

Grüter, C. / Beckers, T. / Jäkel, K. / Bieschke, N. / Lehmann, M. (2023): Balancing missed opportunities and stranded assets - Guiding principles of strategy development and implementation for climate neutral road freight transport from an economic point of view; proceedings, XXVIIth World Road Congress, Prag.

H2 Mobility GmbH (2021): Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen. Die Optionen im Überblick; zuletzt abgerufen im Internet am 24.07.2023 unter https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/sites/2/2021/10/H2M_Ueberblick_BetankungsoptionenLNFSNF_TankRast_2021-10-21.pdf.

H2 Mobility GmbH (2023): „H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa“; Internetseite, zuletzt abgerufen im Internet am 25.07.2023 unter https://h2.live/.

Hacker, F. / Bernecker, T. / Speiser, J. / Röckle, F. / Schubert, M. / Nebauer, G. / Blanck, R. / Görz, W. – Öko-Institut/ Hochschule Heilbronn / Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) / Intraplan Consult (2020): Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge; Endbericht zum vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Projekt, zuletzt abgerufen im Internet am 14.06.2023 unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf.

Hacker, F. / Jöhrens, J. / Gather, M. / Hartwig, M. / Gnann, T. / Göckeler, K. / Plötz, P. / Lehmann, M. – Öko-Institut / Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) / Fachhochschule Erfurt - Institut für Verkehr und Raum / Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM) / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2023): Expansion strategies for electric road systems (ERS) in Europe; im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) beauftragten Projektes „Collaboration on Electric Road Systems II“ (CollERS2) erstelltes Arbeitspapier, zuletzt abgerufen im Internet am 16.06.2024

unter https://electric-road-systems.eu/e-r-systems-wAssets/docs/CollERS-2-Discussion-paper-4-Expansion-strategies_2023-08-04.pdf.

Hacker, F. / Jöhrens, J. / Plötz, P. – Öko-Institut / Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland - Eine Synthese; im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Projekts „Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland“ (BOLD) entstandene Veröffentlichung, zuletzt abgerufen im Internet am 12.06.2023 unter https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/5a1d5449-8518-4114-98dc-284eaa617a35/content.

Hartwig, M. / Bußmann-Welsch, A. / Lehmann, M. – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM) (2020): Leitbilder für den Aufbau von -elektrischen Straßensystemen in Europa; im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes „AMELIE – Abrechnungssysteme und -methoden von elektrisch betriebenen Lkw, sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext“ entstandenes Working Paper, zuletzt abgerufen im Internet am 15.06.2023 unter https://zenodo.org/record/4327277.

Heinzmann, P. / Glöser-Chahoud, S. / Dahmen, N. / Langenmayr, U. / Schultmann, F. – Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2021): Techno-ökonomische Bewertung der Produktion regenerativer synthetischer Kraftstoffe; zuletzt abgerufen im Internet am 24.07.2023 unter https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000140638.

Hildebrandt, J. (2016): Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe - Eine institutionenökonomische Analyse; Dissertation, Technische Universität Berlin.

Holler, M. J. / Illing, G. / Napel, S. (2019): Einführung in die Spieltheorie; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

HyExperts (2021): Technologie-Steckbriefe. Wasserstoffmobilitätsregion Emscher-Lippe; im Rahmen eines vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi) im Kontext des Wettbewerbs „HyLand - Wasserstoffregionen in Deutschland“ geförderten Projekts entstandene Präsentation, zuletzt abgerufen im Internet am 25.07.2023 unter https://www.hy.land/wp-content/uploads/2021/12/Abschlussbericht_HyExperts_EmscherLippe_2021_2.pdf.

ifeu / Fraunhofer IML – Institut für Energie- und Umweltforschung / Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (2024): Lokaler, nationaler und internationaler umweltschonender Güterverkehr; vom Umweltbundesamt (UBA) herausgegebener Datenbericht zum Transformationsdialog und UBA Forum mobil und nachhaltig, Dessau-Roßlau, zuletzt abgerufen im Internet am 24.08.2024 unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/89_2024_texte_gueterverkehr_datenbericht.pdf.

International Transport Forum (ITF) (2022): Decarbonising Europe's Trucks. How to Minimise Cost Uncertainty; International Transport Forum Policy Papers, No. 107 ,OECD Publishing, Paris, zuletzt abgerufen im Internet am 24.06.2024 unter https://www.itf-oecd.org/decarbonising-europes-trucks-minimise-cost-uncertainty.

International Transport Forum (ITF) (2023): How governments can bring low-emission trucks to our roads - and fast; International Transport Forum Policy Papers, No. 127 OECD Publishing, Paris, zuletzt abgerufen im Internet am 24.06.2024 unter https://www.itf-oecd.org/low-emission-trucks.

Intraplan Consult / TTS TRIMODE Transport Solutions (2023): Prognose 2022 „Absehbarer Weg"; im Rahmen des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) beauftragten Projekts „Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022" erstellter Ergebnisbericht, zuletzt abgerufen im Internet am 14.06.2023 unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/prognose-berichtgleitende-langfrist-verkehrsprognose.pdf?__blob=publicationFile.

Irzik, M. / Habermann, M. / Löhe, U. / Treichel, H. – Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) (2019): Lkw-Parksituation im Umfeld der BAB 2018. Bundesweite Erhebung der Lkw-Parksituation an und auf BAB in Deutschland in den Nachtstunden; Bergisch Gladbach, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.bast.de/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Verkehrstechnik/Downloads/lkw-parksituation-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Jerratsch, J.-O. / Marker, S. (2023): Concept and Realization of Battery Swapping System for Electric Heavy Duty Long Haul Road Transport; proceedings, FISTA 2023 World Congress, Barcelona.

Jöhrens, J. / Allekotte, M. / Heining, F. / Helms, H. / Räder, D. / Köllermeier, N. / Waßmuth, V. – Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) / PTV Transport Consult (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030; Teilbericht im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads", Heidelberg, Karlsruhe, zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf.

Jöhrens, J. / Allekotte, M. / Heining, F. / Helms, H. / Räder, D. / Schillinger, M. / Thienel, M. / Dürrbeck, K. / Schwemmer, M. / Köllermeier, N. / Waßmuth, V. – Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) / Franhofer Arbeitsgruppe für Supply Chain Services / PTV Transport Consult (2021): Potentialanalyse für Batterie-Lkw; Teilbericht im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads", Heidelberg, Nürnberg, Karlsruhe, zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2021-07-29_-_My_eRoads_-_Potentialanalyse_Batterie-Nfz_-_final.pdf.

Jöhrens, J. / Rücker, J. / Kräck, J. / Allekotte, M. / Helms, H. / Biemann, K. / Schillinger, M. / Waßmuth, V. / Paufler-Mann, D. / Frischmuth, F. / Gerhardt, N. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030 - Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kosten- und Umwelteffekten in der Einführungsphase.; Untersuchung im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“ entstandene Veröffentlichung, Heidelberg, zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Roadmap-OH-Lkw-Bericht-Einfuehrungsszenarien-web.pdf.

Kasten, P. / Minnich, L. / Randrianarisoa, J. / Ritter, D. / Vogel, M. / Dünzen, K. / Just, L. / Novirdoust, A. / Diers, H. / Niesler, N. / Fabianek, P. – Öko-Institut / Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (ewi) / Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior an der RWTH Aachen (2022): Szenarien und regulatorische Herausforderungen für den Aufbau der Ladeinfrastruktur für elektrische Pkw und Lkw; im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Kopernikus-Forschungsprojekts „ENSURE – Neue EnergieNetzStruktURen für die Energiewende“ entstandene Veröffentlichung.

Katz, M. L. / Shapiro, C. (1985): Network Externalities, Competition, and Compatibility; in: The American Economic Review, Bd. 75, Nr. 3, S. 424–440.

Kilian, O. / Jerratsch, J.-O. / Marker, S. (2023): Economic Feasibility Study to Compare Battery Swapping with Other Electric Drivetrain Technologies for Emission Free Road Bound Long Haul Freight Transport; proceedings, FISTA 2023 World Congress, Barcelona.

Kippelt, S. / Probst, F. / Greve, M. / Burges, K. – ef.Ruhr / RE-xpertise (2022): Einfach laden an Rastanlagen. Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs; Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur unter dem Dach der NOW GmbH (Hrsg.), zuletzt abgerufen im Internet am 14.06.2023 unter https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2022/09/Leitstelle_LKW-Netzstudie.pdf.

Kotilainen, K. / Aalto, P. / Valta, J. / Rautiainen, A. / Kojo, M. / Sovacool, B. K. (2019): From path dependence to policy mixes for Nordic electric mobility: Lessons for accelerating future transport transitions; in: Policy Sciences, Bd. 52, Nr. 4, S. 573–600.

Kühnel, S. / Hacker, F. / Görz, W. – Öko-Institut (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr - Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich; Erster Teilbericht des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit geförderten Forschungsvorhabens „StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“, zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf.

Link, S. / Stephan, A. / Speth, D. / Plötz, P. (2024): Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification; in: Nature Energy.

LOGIVEST (2024): „Gewerbegebiete“; Internetseite, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter www.gewerbegebiete.de.

Mareev, I. / Sauer, D. U. (2018): Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation; in: Energies, Bd. 11, Nr. 12, S. 3446.

Marquez-Fernandez, F. J. / Bischoff, J. / Domingues-Olavarria, G. / Alakula, M. (2022): Assessment of Future EV Charging Infrastructure Scenarios for Long-Distance Transport in Sweden; in: IEEE Transactions on Transportation Electrification, Bd. 8, Nr. 1, S. 615–626.

Mauler, L. / Dahrendorf, L. / Duffner, F. / Winter, M. / Leker, J. (2022): Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: A U.S. case study; in: Journal of Energy Storage, Bd. 46, S. 103891.

Menter, J. / Fay, T.-A. / Grahle, A. / Göhlich, D. (2023): Long-Distance Electric Truck Traffic: Analysis, Modeling and Designing a Demand-Oriented Charging Network for Germany; in: World Electric Vehicle Journal, Bd. 14, Nr. 8, S. 205.

Mottschall, M. / Hacker, F. / Göckeler, K. / Jöhrens, J. / Heining, F. / Helms, H. / Gnann, T. / Burghard, U. / Scherrer, A. – Öko-Institut / Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2023): Herausforderungen und Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw. Diskussionspapier; im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts "Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland (BOLD) entstandenes Diskussionspapier, Berlin, Heidelberg, Karlsruhe, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.oeko.de/publikation/herausforderungen-und-handlungserfordernisse-fuer-eine-erfolgreiche-gestaltung-des-markthochlaufs-von-oberleitungs-lkw/.

Myers, S. C. (1977): Determinants of corporate borrowing; in: Journal of Financial Economics, Bd. 5, Nr. 2, S. 147–175.

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität – Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“ (2021): Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi) (Hrsg.), zuletzt abgerufen im Internet am 15.06.2023 unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG5_Ladeinfrastruktur_ELkw.pdf.

Noll, B. / Del Val, S. / Schmidt, T. S. / Steffen, B. (2022): Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe; in: Applied Energy, Bd. 306, S. 118079.

NOW – Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr. Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern; im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) erstellter Bericht, zuletzt abgerufen im Internet am 14.06.2023 unter https://www.now-gmbh.de/wp-

content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf.

PIARC – Permanent International Association of Road Congresses - Task Force 2.2 Electric Road Systems (2023): Electric Road Systems. A route to net zero.; A PIARC Technical Report., zuletzt abgerufen im Internet am 24.08.2024 unter https://www.piarc.org/en/order-library/42690-en-Electric%20Road%20Systems%20%E2%80%93%20A%20Route%20toNet%20Zero%20-%20Technical%20Report.

Plötz, P. (2022): Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport; in: Nature Electronics, Bd. 5, Nr. 1, S. 8–10.

Plötz, P. / Speth, D. / Gnann, T. / Scherrer, A. / Burghard, U. / Hacker, F. / Jöhrens, J. – Öko-Institut / Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2021): Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr - Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich; im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Projekts „Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland“ (BOLD) entstandenes Diskussionspapier, Karlsruhe, Berlin, Heidelberg, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BOLD_Truck_charging_discussion_paper.pdf.

Plötz, P. / Speth, D. / Kappler, L. / Klausmann, F. / Satvat, B. (2024): Megawatt-Laden im Lkw-Fernverkehr: Erste Erkenntnisse zu Herausforderungen und Lösungsansätzen; Veröffentlichung im Rahmen des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderten Projekts „Hochleistungsladen Lkw-Fernverkehr“ (HoLa), Karlsruhe.

Plötz, P. / Speth, D. / Rose, P. – Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2020): Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw; im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) erstellte Kurzstudie, Karlsruhe, zuletzt abgerufen im Internet am 16.06.2023 unter https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/300555.

Preker, A. (2024): „E-Highways für Lkw sollen wieder verschwinden - trotz positiver Tests“; Zeitungsartikel erschienen in: Der Spiegel (06.09.2024), zuletzt abgerufen im Internet am 06.09.2024 unter https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/e-autobahn-empoerung-ueber-foerderende-fuer-oberleitungs-lkw-trassen-a-5b9e9639-0f55-41a2-9426-1e0d6faebf29.

Prognos / Öko-Institut / Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.; im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende erstellte Studie (Langfassung), zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-langfassung/.

Ragon, P.-L. / Mulholland, E. / Basma, H. / Rodríguez, F. – The International Council on Clean Transportation (ICCT) (2022): A review of the AFIR proposal - Public infrastructure needs to support the transition to a zero-emission truck fleet in the European Union; White Paper.

Reinke, J. (2014): Bereitstellung öffentlicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge - Eine institutionenökonomische Analyse; Dissertation, Technische Universität Berlin.

Richter, R. / Furubotn, E. G. (2010): Neue Institutionenökonomik: Eine Einführung und kritische Würdigung; 4., überarbeitete und erweiterte Auflage., Tübingen: Mohr Siebeck.

Rieken, P. / Trosky, F. / Goldmann, K. / Mann, H.-U. / Pohl, M. / Nagel, K. / Beckers, T. / Liedtke, G. / Winter, M. / Kickhöfer, B. – Intraplan, Planco, TUBS (2015): Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung; Endbericht für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi), zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2014/14-12/PlancoItpTubs2015FeBerichtBvwpMethodik.pdf.

Rogstadius, J. (2022): Interaction Effects between Battery Electric Trucks, Electric Roads and Static Charging Infrastructure. Results from high resolution simulation of goods transport on the Swedish road network during 2020–2050; zuletzt abgerufen im Internet am 18.04.2023 unter http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-61185.

Sachverständigenrat (2024): Güterverkehr zwischen Infrastrukturanforderungen und Dekarbonisierung.; Kapitel 2 des Frühjahrsgutachten 2024, zuletzt abgerufen im Internet am 24.08.2024 unter https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/fg2024/FG2024_Kapitel_2.pdf.

Shoman, W. / Yeh, S. / Sprei, F. / Plötz, P. / Speth, D. (2023): Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements; in: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Bd. 121.

Siemens AG / Technische Universität Dresden / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2016): Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen; im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) geförderten Projekts „ENUBA 2“ erstellter gemeinsamer Abschlussbericht. Version 3, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2_Abschlussbericht_V3_TIB_31-08-2016.pdf.

Siemens Mobility GmbH (2020): Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen; im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Projekts „ELANO“ erstellter Abschlussbericht. Version 2.1, zuletzt abgerufen im Internet am 22.08.2024 unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2021-03/ELANO_Abschlussbericht_V2.1_TIB_200828.pdf.

Speth, D. / Funke, S. Á. (2021): Comparing Options to Electrify Heavy-Duty Vehicles - Findings of German Pilot Projects; in: World Electric Vehicle Journal, Bd. 12, Nr. 2, S. 67.

Speth, D. / Plötz, P. (2024): Depot slow charging is sufficient for most electric trucks in Germany; in: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Bd. 128, S. 104078.

Speth, D. / Plötz, P. / Funke, S. / Vallarella, E. (2022): Public fast charging infrastructure for battery electric trucks—a model-based network for Germany; in: Environmental Research: Infrastructure and Sustainability, Bd. 2, Nr. 2, S. 025004.

Speth, D. / Sauter, V. / Plötz, P. (2022): Where to Charge Electric Trucks in Europe - Modelling a Charging Infrastructure Network; in: World Electric Vehicle Journal, Bd. 13, Nr. 9, S. 162.

Speth, D. W. (2024): Electrification of road freight transport. Public fast charging infrastructure and the market diffusion of battery electric trucks; Dissertation, Karlsruher Instiut für Technologie (KIT) Karlsruhe.

Suzan, S. / Mathieu, L. – Transport & Environment (2021): Unlocking electric trucking in the EU: recharging along highways. Electrification of long-haul trucks (Vol. 2); zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/202102_pathways_report_final.pdf.

Tol, D. / Frateur, T. / Verbeek, M. / Riemersma, I. / Mulder, H. – TNO (2022): Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe.; im Rahmen eines von Transport & Environment und Agora Verkehrswende geförderten Projekts erstellter Bericht, zuletzt abgerufen im Internet am 30.06.2023 unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Veranstaltungen/2022/Elektrische-Lkw/TNO_2022_R11862_Techno-economic_uptake_potential_of_zero-emission_trucks_in_Europe.pdf.

Traffix Verkehrsplanung GmbH / Umweltbundesamt GmbH / e7 energy innovation & engineering (2023): Guidelines enabling renewable energy supply for zero emission road traffic infrastrucutre; im Rahmen des durch das österreichische Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) geförderten Projekts „GREENROAD“ erstellter Endbericht, zuletzt abgerufen im Internet am 24.07.2023 unter https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/GREENROAD-Final-Report-230621.pdf.

Transport & Environment (2021): Unlocking Electric Trucking in the EU. Long-haul trucks (Vol. 2); zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/202102_pathways_report_final.pdf.

Unterlohner, F. – Transport & Environment (2021): Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland - Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten; In-house Analyse von Transport & Environment, zuletzt abgerufen im Internet am 16.08.2024 unter https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2021_04_TE_Dekarbonisierung_des_Lkw_Fernverkehrs_in_Deutschland_kurzfassung_final.pdf.

Vorwerk, L. (2024): Wirtschaftssystemdesign und die Bereitstellung und Finanzierung von Energieinfrastrukturen im Kontext der Transformation zur Klimaneutralität - Eine

institutionenökonomische Analyse; Dissertation (noch unveröffentlicht), Technische Universität Berlin.

Vorwerk, L. / Beckers, T. / Westphal, M. / Bieschke, N. / Hermes, G. (2023): Energiewende, Sektorenkopplung und Infrastrukturen. Eine institutionenökonomische Analyse der zukünftigen (Infrastruktur-)Planung und Finanzierung unter Berücksichtigung juristischer Aspekte; im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) bzw. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) beauftragten Projektes „Szenarienbasierte Analyse der Anforderungen an die Infrastrukturen im Rahmen der Energiewende und Auswirkungen auf deren Finanzierung und Planung“ (AIRE) erstellte Studie, zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/bauing/professuren_institute/Infrastrukturwirtschaft_und-management/Forschung/Publikationen/2023/vorwerk_et_al_2021-2023-energiewende_sektorenkopplung_infrastrukturen-v700ext.pdf.

Widegren, F. / Helms, H. / Hacker, F. / Andersson, M. / Gnann, T. / Eriksson, M. / Plötz, P. – WSP Schweden / Institut für Enerige- und Umweltforschung (ifeu) / Öko-Institut / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2022): Ready to go? Technology Readiness and Life-cycle Emissions of Electric Road Systems; im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) beauftragten Projektes „Collaboration on Electric Road Systems II“ (CollERS2) erstelltes Diskussionspapier, zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/CollERS_2-Discussion_paper-1_Technology_assessment.pdf.

Wietschel, M. / Gnann, T. / Plötz, P. / Moll, C. / Speth, D. / Buch, J. / Kühn, A. / Stütz, S. / Schellert, M. / Rüdiger, D. / Balz, W. / Frik, H. / Waßmuth, V. / Paufler-Mann, D. / Rödl, A. / Schade, W. / Mader, S. – Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg - IUE, M-Five (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie; zuletzt abgerufen im Internet am 22.11.2023 unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS_Machbarkeitsstudie_Hybrid-Oberleitungs_Lkw_Bericht_2017.pdf.

Anhang A) Daten zu den Kostenkalkulationen

B- vs. OB-Lkw-System bei Batteriekosten von 129 € / kWh

(Lkw-System-abhängige Kosten)

Legende
In Kostenkalkulationen veränderte Größen
In Kostenkalkulationen feststehende Größen
Informationen zur Orientierung

	B-Lkw-System	OB-Lkw-System 2.000-ap	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 2.000-k	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 2.000-m	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 4.000	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 6.000	Delta ("B-OB")
A) Lkw-System-abhängige Kostenpositionen											
A.1) Infrastruktur: Flächendeckung in BAB-Nähe											
A.1.1) Investitionskosten P-S-LI	2.376.400.000 €	2.081.200.000 €	295.200.000 €	2.081.200.000 €	295.200.000 €	2.081.200.000 €	-2.081.200.000 €	1.933.600.000 €	442.800.000 €	1.000.000.000 €	1.376.400.000 €
Anzahl der Lade-Standorte	*500*	*500*		*500*		*500*		*500*		*500*	
Anzahl der MCS-LP	5941	5203	738	5203	738	5203	738	4834	1107	2500	3441
Investitionskosten für MCS-LP (€/ Stück)	*400.000 €*	*400.000 €*		*400.000 €*		*400.000 €*		*400.000 €*		*400.000 €*	
Nutzungsdauer (Jahre)	*20*	*20*		*20*		*20*		*20*		*20*	
A.1.2) Investitionskosten L-O-LI		5.000.000.000 €	-5.000.000.000 €	5.000.000.000 €	-5.000.000.000 €	5.000.000.000 €	-5.000.000.000 €	10.000.000.000 €	-10.000.000.000 €	15.000.000.000 €	-15.000.000.000 €
Länge der L-O-LI (km)		2000		2000		2000		4000		6000	
Investitionskosten für L-O-LI (€/km)		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*	
Nutzungsdauer (Jahre)		*20*		*20*		*20*		*20*		*20*	
Kosten A.1) Infrastruktur	*2.376.400.000 €*	*7.081.200.000 €*	*-4.704.800.000 €*	*7.081.200.000 €*	*-4.704.800.000 €*	*7.081.200.000 €*	*-4.704.800.000 €*	*11.933.600.000 €*	*-9.557.200.000 €*	*16.000.000.000 €*	*-13.623.600.000 €*
A.2) Fahrzeuge											
A.2.1) Investitionskosten Batterien	77.318.937.333 €	65.721.096.733 €	11.597.840.600 €	77.318.937.333 €	0 €	71.520.017.033 €	5.798.920.300 €	57.216.013.627 €	20.102.923.707 €	45.102.713.444 €	32.216.223.889 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*	*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*	
Anzahl der B-Lkw	300.000	150.000		150.000		150.000		105.000		50.000	
Anzahl der OB-Lkw		150.000		150.000		150.000		195.000		250.000	
Ø Batteriekapazität B-Lkw (kWh)	*500*	*500*		*500*		*500*		*500*		*500*	
Ø Batteriekapazität OB-Lkw (kWh)		350		500		425		300		250	
Ø Energieverbrauch (kWh/km)	*1,3*	*1,3*		*1,3*		*1,3*		*1,3*		*1,3*	
Ø Reichweite B-Lkw (km)	*385*	*385*		*385*		*385*		*385*		*385*	
Ø Reichweite OB-Lkw (km)		*269*		*385*		*327*		*231*		*192*	
Kosten Batteriepack (€/kWh)	129 €/kWh	129 €/kWh		129 €/kWh		129 €/kWh		129 €/kWh		129 €/kWh	
Ø Batteriekosten B-Lkw (€/Lkw)	*64.432 €*	*64.432 €*		*64.432 €*		*64.432 €*		*64.432 €*		*64.432 €*	
Ø Batteriekosten OB-Lkw (€/Lkw)		*45.103 €*		*64.432 €*		*54.768 €*		*38.659 €*		*32.216 €*	
Nutzungsdauer (Jahre)	*5*	*5*		*5*		*5*		*5*		*5*	
A.2.2) Investitionskosten Pantographen		7.200.000.000 €	-7.200.000.000 €	7.200.000.000 €	-7.200.000.000 €	7.200.000.000 €	-7.200.000.000 €	9.360.000.000 €	-9.360.000.000 €	12.000.000.000 €	-12.000.000.000 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*	*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*	
Anzahl der OB-Lkw		150.000		150.000		150.000		195.000		250.000	
Kosten Pantograph (€/Stück)		*12.000 €*		*12.000 €*		*12.000 €*		*12.000 €*		*12.000 €*	
Nutzungsdauer (Jahre)		*5*		*5*		*5*		*5*		*5*	
Kosten A.2) Fahrzeuge	*77.318.937.333 €*	*72.921.096.733 €*	*4.397.840.600 €*	*84.518.937.333 €*	*-7.200.000.000 €*	*78.720.017.033 €*	*-1.401.079.700 €*	*66.576.013.627 €*	*10.742.923.707 €*	*57.102.713.444 €*	*20.216.223.889 €*
A.3) Zeitverlust durch Ladevorgänge an P-S-LI											
A.3) Kosten durch Zeitverlust	2.471.064.800 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €	2.010.625.700 €	460.439.100 €	1.039.835.400 €	1.431.229.400 €
Anzahl der gef. km/Jahr an BAB	*30.500.000.000*	*30.500.000.000*		*30.500.000.000*		*30.500.000.000*		*30.500.000.000*		*30.500.000.000*	
Gef. Strecke zw. P-S-LI-Laden (km)	*360*	*360*		*360*		*360*		*360*		*360*	
Anteil des Ladens an A.1)-LI an BAB	*50%*	*50%*		*50%*		*50%*		*50%*		*50%*	
Anteil des Ladens an A.1.1)-P-S-LI	100%	88%	12%	88%	12%	88%	12%	81%	19%	42%	58%
Anzahl d. Ladevorgänge A.1.1)-LI/ Jahr	*42.361.111*	*37.098.950*	*5.262.161*	*37.098.950*	*5.262.161*	*37.098.950*	*5.262.161*	*34.467.869*	*7.893.242*	*17.825.749*	*24.535.362*
Mittlere Wartezeit / Ladevorgang (Min.)	*5*	*5*		*5*		*5*		*5*		*5*	
Zeitkostensatz (€/ Std.)	*35 €/h*	*35 €/h*		*35 €/h*		*35 €/h*		*35 €/h*		*35 €/h*	
Kosten A.3) Zeitverlust	*2.471.064.800 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*	*2.010.625.700 €*	*460.439.100 €*	*1.039.835.400 €*	*1.431.229.400 €*
Gesamtkosten A	**82.166.402.133 €**	**82.166.402.133 €**	**0 €**	**93.764.242.733 €**	**-11.597.840.600 €**	**87.965.322.433 €**	**-5.798.920.300 €**	**80.520.239.327 €**	**1.646.162.807 €**	**74.142.548.844 €**	**8.023.853.289 €**

Abbildung A.1 Daten zum Vergleich eines B-Lkw-Systems mit mehreren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems auf Basis wesentlicher Kostenpositionen mit Batteriekosten i. H. v. 129 € / kWh

B- vs. OB-Lkw-System bei Batteriekosten von 50 € / kWh (Lkw-System-abhängige Kosten)

Legende
In Kostenkalkulationen veränderte Größen
In Kostenkalkulationen feststehende Größen
Informationen zur Orientierung

	B-Lkw-System	OB-Lkw-System 2.000-ap	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 2.000-k	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 2.000-m	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 4.000	Delta ("B-OB")	OB-Lkw-System 6.000	Delta ("B-OB")
A) Systemabhängige Kostenpositionen											
A.1) Infrastruktur: Flächendeckung											
A.1.1) Investitionskosten P-S-LI	2.376.400.000 €	2.081.200.000 €	295.200.000 €	2.081.200.000 €	295.200.000 €	2.081.200.000 €	-2.081.200.000 €	1.933.600.000 €	442.800.000 €	1.000.000.000 €	1.376.400.000 €
Anzahl der Standorte für LP	*500*	*500*		*500*		*500*		*500*		*500*	
Anzahl der LP	5941	5203	738	5203	738	5203	-5203	4834	1107	2500	3441
Investitionskosten für LP (€/ Stück)	*400.000 €*	*400.000 €*		*400.000 €*		*400.000 €*		*400.000 €*		*400.000 €*	
Lebensdauer (Jahre)	*20*	*20*		*20*		*20*		*20*		*20*	
A.1.2) Investitionskosten L-O-LI		5.000.000.000 €	-5.000.000.000 €	5.000.000.000 €	-5.000.000.000 €	5.000.000.000 €	-5.000.000.000 €	10.000.000.000 €	-10.000.000.000 €	15.000.000.000 €	-15.000.000.000 €
Länge der L-O-LI (km)		2000		2000		2000		4000		6000	
Investitionskosten für L-O-LI (€/km)		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*		*2.500.000 €*	
Lebensdauer (Jahre)		*20*		*20*		*20*		*20*		*20*	
Kosten A.1) Infrastruktur	*2.376.400.000 €*	*7.081.200.000 €*	*-4.704.800.000 €*	*7.081.200.000 €*	*-4.704.800.000 €*	*7.081.200.000 €*	*-4.704.800.000 €*	*11.933.600.000 €*	*-9.557.200.000 €*	*16.000.000.000 €*	*-13.623.600.000 €*
A.2) Fahrzeuge											
A.2.1) Investitionskosten Batterien	30.000.000.000 €	25.500.000.000 €	4.500.000.000 €	30.000.000.000 €	0 €	27.075.000.000 €	2.925.000.000 €	22.200.000.000 €	7.800.000.000 €	17.500.000.000 €	12.500.000.000 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*	*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*	
Anzahl der B-Lkw	300.000	150.000		150.000		105.000		105.000		50.000	
Anzahl der OB-Lkw		150.000		150.000		195.000		195.000		250.000	
Ø Batteriekapazität B-Lkw (kWh)	*500*	*500*		*500*		*500*		*500*		*500*	
Ø Batteriekapazität OB-Lkw (kWh)		350		500		425		300		250	
Ø Energieverbrauch (kWh/km)	*1,3*	*1,3*	*0*	*1,3*	*0*	*1,3*	*0*	*1,3*	*0*	*1,3*	
Ø Reichweite B-Lkw (km)	*385*	*385*		*385*		*385*		*385*		*385*	
Ø Reichweite OB-Lkw (km)		*269*		*385*		*327*		*231*		*192*	
Kosten Batteriepack (€/kWh)	50 €/kWh	50 €/kWh		50 €/kWh		50 €/kWh		50 €/kWh		50 €/kWh	
Ø Batteriekosten B-Lkw (€/Fzg)	*25.000 €*	*25.000 €*		*25.000 €*		*25.000 €*		*25.000 €*		*25.000 €*	
Ø Batteriekosten OB-Lkw (€/Fzg)		*17.500 €*		*25.000 €*		*21.250 €*		*15.000 €*		*12.500 €*	
Lebensdauer (Jahre)	*5*	*5*		*5*		*5*		*5*		*5*	
A.2.2) Investitionskosten Pantographen		7.200.000.000 €	-7.200.000.000 €	7.200.000.000 €	-7.200.000.000 €	7.200.000.000 €	-7.200.000.000 €	9.360.000.000 €	-9.360.000.000 €	12.000.000.000 €	-12.000.000.000 €
Anzahl von schweren Lkw > 12 t	*300.000*	*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*		*300.000*	
Anzahl der OB-Lkw		150.000		150.000		150.000		195.000		250.000	
Kosten Pantograph (€/Stück)		*12.000 €*		*12.000 €*		*12.000 €*		*12.000 €*		*12.000 €*	
Lebensdauer (Jahre)		*5*		*5*		*5*		*5*		*5*	
Kosten A.2) Fahrzeuge	*30.000.000.000 €*	*32.700.000.000 €*	*-2.700.000.000 €*	*37.200.000.000 €*	*-7.200.000.000 €*	*34.275.000.000 €*	*-4.275.000.000 €*	*31.560.000.000 €*	*-1.560.000.000 €*	*29.500.000.000 €*	*500.000.000 €*
A.3) Zeitverlust durch Ladevorgänge an P-S-LI											
A.3) Kosten durch Zeitverlust	2.471.064.800 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €	2.164.105.400 €	306.959.400 €	2.010.625.700 €	460.439.100 €	1.039.835.400 €	1.431.229.400 €
Anzahl der gefahrenen km/ Jahr	*30.500.000.000*	*30.500.000.000*		*30.500.000.000*		*30.500.000.000*		*30.500.000.000*		*30.500.000.000*	
gef. Strecke zw. P-S-LI-Laden (km)	*360*	*360*		*360*		*360*		*360*		*360*	
Anteil der Ladens an der A.1)-LI	*50%*	*50%*		*50%*		*50%*		*50%*		*50%*	
Anteil des Ladens an A.1.1)-P-S-LI	100%	88%	12%	88%	12%	88%	12%	81%	19%	42%	58%
Anzahl d. Ladevorgänge an A.1.1)-LI/ Jahr	*42.361.111*	*37.098.950*	*5.262.161*	*37.098.950*	*5.262.161*	*37.098.950*	*5.262.161*	*34.467.869*	*7.893.242*	*17.825.749*	*24.535.362*
Mittlere Wartezeit pro Ladevorgang (min)	*5*	*5*		*5*		*5*		*5*		*5*	
Zeitkostensatz (€/ Std)	*35 €/h*	*35 €/h*		*35 €/h*		*35 €/h*		*35 €/h*		*35 €/h*	
Kosten A.3) Zeitverlust	*2.471.064.800 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*	*2.164.105.400 €*	*306.959.400 €*	*2.010.625.700 €*	*460.439.100 €*	*1.039.835.400 €*	*1.431.229.400 €*
Gesamtkosten A	**34.847.464.800 €**	**41.945.305.400 €**	**-7.097.840.600 €**	**46.445.305.400 €**	**-11.597.840.600 €**	**43.520.305.400 €**	**-8.672.840.600 €**	**45.504.225.700 €**	**-10.656.760.900 €**	**46.539.835.400 €**	**-11.692.370.600 €**

Abbildung A.2 Daten zum Vergleich eines B-Lkw-Systems mit mehreren Ausgestaltungsvarianten eines OB-Lkw-Systems auf Basis wesentlicher Kostenpositionen mit Batteriekosten i. H. v. 50 €/kWh