

Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw – Identifikation und Einordnung wesentlicher Ausgestaltungsfragen auf Basis (institutionen-) ökonomischer Erkenntnisse

Prof. Dr. Thorsten Beckers

Dipl.-Ing. Nils Bieschke

Erstellt 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 in dem (Förder-)Programm „Erneuerbar Mobil“ vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs – My eRoads“.

März 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Idealtypische Angebotsarten für Pkw-LI.....	5
2.2	Grundlegende institutionenökonomische Erkenntnisse als Grundlage für die Analyse von (Politik- und Regulierungs-)Maßnahmen	8
2.2.1	Institutionenökonomische (Grundsatz-)Frage des angemessenen Umfangs öffentlicher (Politik- und Regulierungs-)Eingriffe	8
2.2.2	Herausforderung bei der zielgerichteten Entwicklung und Analyse alternativer öffentlicher (Eingriffs-)Maßnahmen als „institutioneller Ingenieursaufgabe“	13
2.2.3	Schlussfolgerungen für die (institutionen-)ökonomischen Analysen in diesem Kurzgutachten.....	13
2.3	Überschlägige beispielhafte Kalkulationen zu Batteriegrößen und Ladebedarfen im Kontext der Regelungen zu Lenk- und Ruhezeiten	14
3	Betriebshof-Ladeinfrastruktur (“Lkw-BH-LI“)	16
3.1	Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung.....	16
3.2	Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung.....	17
4	Schnelllade-Ladeinfrastruktur in Anlehnung an das Tankstellen-Konzept (“Lkw-T-LI“)	17
4.1	Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung.....	17
4.1.1	Lkw- T-LI für im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw	17
4.1.2	Lkw-T-LI für im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw und Potentiale für Synergieeffekte mit der Pkw-T-LI	20
4.2	Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung.....	20
5	Längere Standzeiten- und Ruhepausen-Ladeinfrastruktur (“Lkw-LSR-LI“).	22
5.1	Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung.....	22
5.1.1	Lkw-LSR-LI für im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw.....	22
5.1.2	Lkw-LSR-LI für im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw und Potentiale für Synergieeffekte mit der Pkw-LI.....	23
5.2	Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung.....	24
6	Rampen-Ladeinfrastruktur (“Lkw-RA-LI“)	25
6.1	Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung.....	25
6.2	Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung.....	26
7	Nachgelagerte Überlegungen mit Bezug zu alternativen bzw. ergänzenden Systemausgestaltungsoptionen bei E-Lkw	27
7.1	Batterie-Wechsel-Systeme	27
7.2	Stromzuführung durch Oberleitungen	27

8 Übergreifende Schlussfolgerungen.....	29
Literaturverzeichnis	31

Management Summary

- Es besteht ein weitgehender Konsens, dass zur Erreichung der in Deutschland angestrebten (fast) vollständigen Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 umfangreiche Transformationsmaßnahmen auch im Straßengüterverkehr erforderlich sind. In diesem Zusammenhang könnte Lastkraftwagen (Lkw) eine besondere Bedeutung zukommen, die von einem Elektromotor angetrieben werden und dabei aus Erneuerbaren Energien erzeugten Strom „direkt“ einsetzen, der während Standzeiten an Ladeinfrastruktur (LI) aus dem Stromnetz „entnommen“ und in (Traktions-)Batterien zwischengespeichert wird. Derartige elektrisch angetriebene Lkw können – auf die gebräuchliche Abkürzung „BEV“ („battery electric vehicle“) zurückgreifend – als BEV-Lkw bezeichnet werden. Großer Vorteil der Abwicklung von Straßengüterverkehr durch BEV-Lkw ist, dass diese im Vergleich zu Lkw, die „grünen“ Wasserstoff oder klimaneutral erzeugte synthetische Kraftstoffe als Energieträger einsetzen, eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz bei der Nutzung Erneuerbarer Energien aufweisen.
- Die von BEV-Lkw genutzte Ladeinfrastruktur kann abgekürzt als „Lkw-LI“ bezeichnet werden. Deren Bereitstellung und Finanzierung, die im Fokus dieses Kurzgutachtens steht, geht mit nicht unerheblichen Herausforderungen einher. Das vorliegende Kurzgutachten ist darauf ausgerichtet, wesentliche Fragestellungen mit Bezug zur Bereitstellung und Finanzierung von Lkw-LI in Deutschland zu identifizieren und aus ökonomischer (und dabei nicht zuletzt auch aus institutionenökonomischer) Sicht einzuordnen. Vereinzelt können „vorsichtige“ Ausgestaltungsempfehlungen abgegeben werden, aber oftmals werden in erster Linie Hinweise auf zukünftigen Klärungs- und somit Forschungsbedarfe herausgearbeitet.
- Es kann der öffentlichen Hand empfohlen werden, Maßnahmen bezüglich der Bereitstellung und Finanzierung von Lkw-LI mit Bezug zu vier verschiedenen Lkw-LI-Arten (und zwar Lkw-BH-LI, Lkw-T-LI, Lkw-LSR-LI und Lkw-RA-LI) differenziert zu gestalten, auf die folgend eingegangen wird:
 - Die Verantwortung für die Bereitstellung und Finanzierung von **Lkw-LI auf den Betriebshöfen („Lkw-BH-LI“)** sollte zumindest in erster Linie bei den Fuhrunternehmen liegen. Gewichtige Argumente für eine umfassende staatliche Involvierung in Bereitstellungs- und Finanzierungsfragen sind – Fragen der Anbindung an das Stromnetz nicht thematisierend – zunächst nicht erkennbar. Eine gewisse staatliche Förderung von Lkw-BH-LI kann jedoch als ein Substitut für eine Förderung des Aufbaus des Elektromobilitätssystems an anderen Stellen angesehen und sollte in Betracht gezogen werden. Die Relevanz von Lkw-BH-LI ist für im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte Lkw deutlich höher als für im Fernverkehr eingesetzte Fahrzeuge.
 - Im Hinblick auf einen erfolgreichen Markthochlauf bei BEV-Lkw ist eine flächendeckende Bereitstellung von **DC-Schnelllade-Ladeinfrastruktur in Anlehnung an das Tankstellen-Konzept („Lkw-T-LI“)** erforderlich. Diese sollten (zumindest) eine Ladeleistung aufweisen, die es innerhalb der für eine Fahrunterbrechung vorgegebenen (Mindest-)Zeit von 45 Minuten ermöglicht die Energie aufzunehmen, die für eine Fahrt in einem (zwischen zwei Fahrunterbrechungen liegenden) Zeitraum von 4,5 Stunden erforderlich ist. Derartige Lkw-T-LI wird insbesondere für im Fernverkehr eingesetzte Lkw von Bedeutung sein, weshalb eine besondere große Anzahl an Ladesäulen an Fernverkehrsstrecken errichtet werden sollte. Das

Wissen hinsichtlich grundsätzlicher Fragen der Kapazitätsbereitstellung bei Lkw-T-LI wird (zumindest in einem „akzeptablen Ausmaß“) zentral auf Seiten der öffentlichen Hand vorliegen. Bei dezentralen Bereitstellungsaktivitäten in einem wettbewerblichen Marktumfeld hingegen würden Koordinations- und Finanzierungsprobleme auftreten. Ein öffentliches Bereitstellungs- und Finanzierungsregime für Lkw-T-LI wird – zumindest in der Aufbauphase des Lkw-T-LI-Netzwerkes und zur Gewährleistung von Flächendeckung – von hoher Bedeutung sein.

- Aufgrund der hohen Zeitopportunitätskosten im Straßengüterverkehr bietet es sich – insbesondere bei Lkw mit einem zulässigen maximalen Gesamtgewicht von 40 t – an, dass die tägliche Ruhepause genutzt wird, um die Batterie zu beladen. Sofern sich hierfür nutzbare Ladeinfrastruktur nicht auf dem „eigenen“ Betriebshof befindet, kann diese auch als **„Längere Standzeiten- und Ruhepausen-Ladeinfrastruktur“ („Lkw-LSR-LI“)** bezeichnet werden. Lkw-LSR-LI ist insbesondere für die im Fernverkehr eingesetzten Lkw von Relevanz und kann sich auf den Lkw-Parkplätzen auf den Rasthöfen entlang der Fernverkehrsstrecken sowie auch in Gewerbegebieten oder auf Warteflächen für Lkw in der Nähe großer Logistikstandorte befinden. Hinsichtlich des grundsätzlichen Kapazitätsbedarfs an Lkw-LSR-LI entlang der Fernverkehrsstrecken wird bei der öffentlichen Hand („zentrales“) Wissen vorliegen bzw. dieses kann in sinnvoller Weise aufgebaut werden. Bei direkt an den Autobahnen gelegenen Parkplätzen auf Tankstellen und Rasthöfen dürfte es sich anbieten, im Rahmen öffentlicher Planungsentscheidungen Kapazitätsentscheidungen zur Lkw-LSR-LI (recht direkt) zu fällen. Für die Ladesäulen-Realisierung auf über Anschlussstellen erreichbaren Autohöfen etc. könnte es sinnvoll sein, designte Märkte (mit dem Ziel des „Einsammelns“ dezentralen Wissens) „einzusetzen“, über die Finanzmittel an die Akteure vergeben werden, die Lkw-LSR-LI aufbauen. Der Einsatz mit öffentlichem Zwang erhobener Finanzmittel, wozu in erster Linie Haushaltsmittel zählen, dafür, entlang der Fernverkehrsstrecken Lkw-LSR-LI zu realisieren, dürfte insbesondere in einer Hochlaufphase eines BEV-Lkw-Systems unumgänglich sein.
- Auch Standzeiten an Verloaderampen können zur Beladung der Batterie von BEV-Lkw genutzt werden. Solche **„Rampen-Ladeinfrastruktur“ (Lkw-RA-LI)** kann dazu beitragen, Batteriegrößen (und damit Fahrzeuggewichte und Energieverbräuche) etwas zu reduzieren sowie Bedarf und Standzeiten an Lkw-T-LI zu vermindern. Aufgrund relativ gesehen seltenerer „Nutzung“ von Verloaderampen im Fernverkehr wird Lkw-RA-LI voraussichtlich zumindest für diesen eine begrenzte Rolle spielen. Entscheidungen über die Realisierung von Lkw-RA-LI sollten vornehmlich durch die „Betreiber der Rampen“ gefällt werden, da bei diesen das (dezentrale) Wissen darüber vorliegt, welche Kosten und Nutzen damit einhergehen werden. Eine gewisse staatliche Förderung kann allerdings (auch) für Lkw-RA-LI sinnvoll sein.
- Bei der Errichtung von Lkw-T-LI und Lkw-LSR-LI vor allem entlang stark frequentierter Fernverkehrsstrecken dürfte eine Herausforderung darin bestehen, ausreichende Flächen für die Errichtung der Ladeinfrastruktur und dabei insbesondere die erforderlichen Standflächen für die Lkw zu finden bzw. zu schaffen. In diesem Kontext erklärt sich die Notwendigkeit bzw. weitere Herausforderung, geeignete Kapazitätsallokationsmechanismen (und dabei vor allem Möglichkeiten zur „Reservierung“) für diese Ladeinfrastruktur zu entwickeln.

- Weitere in diesem Kurzgutachten betrachtete wesentliche technisch-systemische und institutionenökonomische Fragen hinsichtlich der Ausgestaltung eines Lkw-LI-Systems konnten zwar (ebenfalls) nicht genau beantwortet werden, aber erste Einschätzungen zu voraussichtlich sinnvollen Maßnahmen konnten abgegeben werden. Als eine Fragestellung, die im Rahmen ausführlicher technisch-systemischer und -ökonomischer Analysen genauer zu beleuchten ist, ist die Auswahl der Leistung an DC-Schnellladesäulen im Bereich der Lkw-T-LI einzuordnen. In diesem Zusammenhang sind Fragen der Nutzung von Lkw-T-LI durch unterschiedliche Lkw-Typen sowie der Realisierung von Synergieeffekten mit der Pkw-T-LI (und dies insbesondere an nachfrageschwachen Standorten) zu berücksichtigen. Nicht zuletzt sind Koordinationsfragen zwischen der Wahl der Ladeleistung bei der Lkw-LI und den Lkw zu beachten und dabei auch Standardisierungseffekte zu thematisieren. Eine weitere genauer zu untersuchende und zu klärende Grundsatzfrage ist, welches Potential für AC-3-LI im Lkw-Bereich besteht und bei welchen Lkw-Typen bei Nutzung welcher Lkw-LI-Arten dieses genau vorliegt. Auch in diesem Zusammenhang stellen sich Koordinations- und Standardisierungsfragen.
- Wenn Fernverkehrsachsen mit Oberleitungs-Infrastruktur ausgestattet würden, könnte dort der Bedarf an Lkw-T-LI und Lkw-LSR-LI erheblich reduziert werden, was ebenfalls die thematisierten Flächenprobleme verhindern bzw. deutlich verringern würde. Voraussetzung dafür wäre, dass Lkw nicht nur über eine Batterie sondern auch über einen Pantografen zur Aufnahme von Strom aus der Oberleitung verfügen. Dieser Strom kann insbesondere direkt für den elektrischen Antrieb genutzt werden, aber auch dem Aufladen der Batterie dienen. Ein derartiges „Oberleitungs-Batterie-Lkw-System“ könnte nach aktuellem Wissensstand u.U. ein besonders großes Potential für eine effektive und effiziente Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs aufweisen. Daher sollten vertiefte (technisch-systemische und -ökonomische sowie institutionenökonomische und juristische) Analysen bezüglich der Etablierung eines derartigen Systems durchgeführt werden.

Vorbemerkungen

Dieses Kurzgutachten ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs – My eRoads“ erstellt worden. Die Förderung durch das BMU ist in das (Förder-) Programm „Erneuerbar Mobil“ eingebettet gewesen. Dieses Forschungsvorhaben ist unter anderem vom ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH bearbeitet worden, welches das Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM) als Unterauftragnehmer einbezogen hat. Das IKEM und Thorsten Beckers als dessen Unterauftragnehmer sind für das vorliegende Kurzgutachten verantwortlich.

Dieses Kurzgutachten ist im Wesentlichen von Thorsten Beckers erstellt worden. In unterstützender Weise ist Nils Bieschke an der Erstellung dieses Kurzgutachtens beteiligt gewesen und hat inhaltliche Fragen mit Thorsten Beckers diskutiert sowie eine erste (Entwurfs-)Fassung dieses Kurzgutachtens kritisch kommentiert. Ferner hat Julius Jöhrens (ifeu) an der Erstellung dieses Kurzgutachtens mitgewirkt, indem er sonstige im Projekt My eRoads generierte Erkenntnisse beigesteuert und außerdem ebenfalls kritische Rückmeldungen zu einer Entwurfsfassung dieses Kurzgutachtens gegeben hat. Die Erstellung dieses Kurzgutachtens ist im März 2021 abgeschlossen worden.

Angaben gemäß Punkt II.4 des Ethikkodexes des Vereins für Socialpolitik („In wissenschaftlichen Arbeiten sind Sachverhalte zu benennen, die auch nur potentiell zu Interessenskonflikten oder Befangenheit des Autors/der Autorin führen könnten.“) können mit Bezug zu Thorsten Beckers dessen Homepage entnommen werden.

An einigen Stellen dieses Kurzgutachtens sind einzelne kurze Textpassagen aus BECKERS ET AL. (2019a) und BECKERS ET AL. (2019b) in unveränderter oder nur leicht veränderter Form übernommen worden. Dies ist nicht unbedingt durchgängig gemäß den üblichen Zitierregeln angezeigt.



Thorsten Beckers (31.03.2021)

1 Einleitung

LADINFRASTRUKTUR FÜR BATTERIE-ELEKTRISCHE LKW ALS UNTERSUCHUNGSgegenSTAND IN DIESEM KURZGUTACHTEN

Es besteht ein weitgehender Konsens, dass zur Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens und zur Erreichung der daraus abgeleiteten nationalen Klimaschutzziele in Deutschland, die eine kontinuierliche Reduktion der Treibhausgasemissionen bis hin zu einer fast vollständigen Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 vorsehen, umfangreiche Transformationsmaßnahmen auch im Straßengüterverkehr erforderlich sind.¹ Im Kontext einer nur begrenzt möglichen Verlagerung von Transportleistungen von der Straße auf die Schiene stellt sich die Frage, wie im Straßengüterverkehr Reduktionen von Treibhausgasemissionen erreicht werden können. Hierfür könnte zunächst auf mithilfe Erneuerbarer Energien hergestellte Kraftstoffe in gasförmiger oder flüssiger Form als Energieträger zurückgegriffen werden, die synthetische Kohlenwasserstoffe enthalten. Ferner könnte unter Einsatz Erneuerbarer Energien erzeugter („grüner“) Wasserstoff als alternativer Kraftstoff eingesetzt werden. Nicht zuletzt könnten Lastkraftwagen (Lkw) von einem Elektromotor angetrieben werden und dabei aus Erneuerbaren Energien erzeugten Strom „direkt“ einsetzen, der aus dem Stromnetz geladen und in einer (Traktions-)Batterie zwischengespeichert wird. Derartige elektrisch angetriebene Lkw („E-Lkw“) können – auf die gebräuchliche Abkürzung „BEV“ („battery electric vehicle“) zurückgreifend – als BEV-Lkw bezeichnet werden.² BEV-Lkw benötigen Ladeinfrastruktur (LI), um während Standzeiten über einen Anschluss an das Stromnetz ihre Batterien „aufzufüllen“. Derartige Ladeinfrastruktur, die abgekürzt auch als „Lkw-LI“ bezeichnet werden kann, steht im Fokus dieses Kurzgutachtens.³ Großer Vorteil der Abwicklung von klimaneutralem Straßengüterverkehr durch E-Lkw ist, dass diese eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz bei der Nutzung Erneuerbarer Energien im Vergleich zum Rückgriff auf Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe als Energieträger aufweisen.⁴

BEREITSTELLUNG UND FINANZIERUNG VON LKW-LI ALS WESENTLICHE THEMEN IN DIESEM KURZGUTACHTEN

Die wesentlichen Themen, die in diesem Kurzgutachten betrachtet werden, sind die Bereitstellung und Finanzierung von Lkw-LI. In diesem Zusammenhang kommt der Fällung diesbezüglicher (Bereitstellungs- und Finanzierungs-)Entscheidungen bzw. der Institutionen, die den Rahmen für die

¹ Dieser Absatz basiert weitgehend auf BECKERS ET AL. (2019b, S. 1).

² Zu den E-Lkw werden somit nicht die Lkw gezählt, deren Elektromotoren ausschließlich Strom zugeführt wird, der im Lkw (bzw. in Umwandlungsanlagen im Lkw) durch Umwandlung von gasförmigen oder flüssigen Energieträgern (wie Wasserstoff, synthetischen Kohlenwasserstoffen oder „konventionellen Kraftstoffen“) erzeugt worden ist.

³ Im Übrigen besteht auch die Option, dass E-Lkw, die über einen Pantografen verfügen, auf mit einer Oberleitungs-Infrastruktur ausgestatteten Strecken während der Fahrt mit Strom versorgt werden, was in diesem Kurzgutachten jedoch nur am Rande (und zwar in Abschnitt 7.2) betrachtet wird. Auf ein derartiges Oberleitungs-Lkw-System wird z.B. in BECKERS ET AL. (2019b), wo ein Fokus auf die Fahrzeugbereitstellung und -finanzierung gelegt wird, und BECKERS ET AL. (2021) eingegangen, wo die Oberleitungs-Infrastrukturbereitstellung im Mittelpunkt steht.

⁴ Diese Aussage gilt übergreifend mit Bezug zu (flüssigen oder gasförmigen) synthetischen Kohlenwasserstoffen als auch zu Wasserstoff; vgl. z.B. GÖCKELER ET AL. (2020).

Entscheidungsfällungen bilden, eine besondere Bedeutung zu. Mit Bereitstellungsentscheidungen wird vom Anbieter eines Gutes festgelegt, was er den (potentiellen) Nachfragern anbietet. Bei Lkw-LI betrifft dies insbesondere erstens Entscheidungen bezüglich der Kapazität an bestimmten Standorten und bezüglich deren (Qualitäts-)Eigenschaften, wozu nicht zuletzt die (mögliche) Ladegeschwindigkeit zählt. Zweitens sind Entscheidungen über Nutzungsregeln von Relevanz, zu denen auch Bepreisungsentscheidungen gehören, die ein (mögliches) Instrument zur Beeinflussung der Allokation der bestehenden Kapazität darstellen.

Im Rahmen der Finanzierung ist über die Herkunft von Mitteln und somit zunächst über Einnahmequellen zu entscheiden, auf welche zurückgegriffen wird, um die Ausgaben für die (physische) Bereitstellung der Lkw-LI und somit deren Herstellung sowie Erhaltung (bzw. Instandhaltung und -setzung) und Betriebsführung abzudecken bzw. zu finanzieren. Durch Kapitalaufnahmen, die einen weiteren Gestaltungsbereich der Finanzierung darstellen, können Lasten und damit einhergehend die Erhebung von Mitteln zur Abdeckung der bei der Bereitstellung anfallenden Ausgaben intertemporal verschoben werden.

(UMFANG DER) BERÜCKSICHTIGUNG DER SYSTEMISCHEN EINBETTUNG VON LKW-LI, VERSCHIEDENER LKW-TYPEN UND -EINSATZPROFILE SOWIE DER INTERDEPENDENZEN ZUR PKW-LI

Die Bereitstellung von LI (und insofern auch speziell von Lkw-LI) ergibt sich aus der koordinierten Bereitstellung von vier Gütern und zwar (1) der „Ladeinfrastruktur an sich“ (konkret der Ladesäule), (2) einer Abstell- bzw. Parkfläche, auf der sich der Lkw während des Beladungsvorgangs befindet, sowie (3) des Stromnetzes, an welches die LI angeschlossen wird, und (4) des Stroms, der über das Stromnetz und die LI in die Batterie des Lkw fließt. Im Zusammenhang damit, dass die Bereitstellung von Lkw-LI sich folglich aus der koordinierten Bereitstellung mehrerer komplementärer (Teil-)Güter „zusammensetzt“, kann Lkw-LI als Systemgut eingeordnet werden.⁵ In diesem Kurzgutachten stehen die LI bzw. die „Ladeinfrastruktur an sich“ und die Abstellfläche im Fokus, aber teilweise wird am Rande auch auf den Anschluss an das Stromnetz und die Strombelieferung eingegangen.

Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung und Finanzierung von Lkw-LI werden dadurch „verkompliziert“, dass es verschiedene Lkw-Typen gibt, die insbesondere bezüglich der fahrzeugbezogenen Merkmale des zulässigen Gesamtgewichts und der Aufbauform unterschieden werden können. Auch Unterschiede bezüglich der Grundfläche der Fahrzeuge sind von Relevanz, da sie den Platzbedarf bei der Nutzung von Lkw-LI beeinflussen. Für die Nachfrage nach Lkw-LI ist ferner das Einsatzprofil von Lkw von Relevanz, wobei für bestimmte Einsatzprofile üblicherweise Lkw eingesetzt werden, bei denen die fahrzeugbezogenen Merkmale identische oder zumindest ähnliche Ausprägungen haben. Aus Vereinfachungsgründen wird in diesem Kurzgutachten vornehmlich auf zwei idealtypische Kombinationen von fahrzeugbezogenen Ausprägungen und Einsatzprofilen eingegangen. Zum einen werden im Fernverkehr eingesetzte Sattelzüge berücksichtigt, die aus Sattelzugmaschinen und Sattelaufliegern bestehen und deren zulässiges maximales Gesamtgewicht

⁵ Vgl. zu den Herausforderungen bei der Bereitstellung von Systemgütern z.B. BECKERS / GIZZI / JÄKEL (2013) und GIZZI (2015).

40 t beträgt, weshalb für diese Lkw im Folgenden die Abkürzung „40 t-Lkw“ Verwendung finden wird. Derartige 40 t-Lkw werden beispielsweise im Rahmen der Beschaffungslogistik für Direkttransporte zwischen Versendern und Empfängern eingesetzt. Zum anderen werden Kasten-Lkw mit einem maximalen zulässigen maximalen Gesamtgewicht von 7,5 t thematisiert, die im Nah- und Regionalverkehr u.a. im Rahmen der regionalen Distributionslogistik eingesetzt werden. Dieser Lkw-Typ wird folgend verkürzt als 7,5 t-Lkw bezeichnet werden. Den 40 t- und 7,5 t-Lkw ist gemeinsam, dass die europäischen Vorgaben zu Lenk- und Ruhezeiten gemäß der Verordnung (EG) 561/2006 für sie von Relevanz sind, was deren Nutzung und damit deren tägliche und wöchentliche Fahrprofile beeinflusst. Dies gilt in besonderer Weise und nahezu stets für die 40 t-Lkw im Fernverkehr, während diese Vorgaben für 7,5 t-Lkw in Abhängigkeit des konkreten Einsatzprofils eine mehr oder weniger große Relevanz haben.

Fahrzeugbezogene Merkmale und Einsatzprofile beeinflussen das Nachfrageverhalten der BEV-Lkw bezüglich der Lkw-LI und sind somit zu berücksichtigen, wenn Bereitstellungsentscheidungen getroffen werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, was für Ladeinfrastruktur-Arten für Lkw („Lkw-LI-Arten“), die jeweils bestimmte Angebots- bzw. Bereitstellungskonzepte umsetzen und damit einhergehend bestimmte Kombinationen von Ausgestaltungsentscheidungen bezüglich der Bereitstellung „enthalten“, die Nachfragerbedürfnisse verschiedener Lkw-Typen und für unterschiedliche Einsatzprofile (in einer sinnvollen Weise) gemeinsam befriedigen können. Insoweit dies möglich ist, können Synergieeffekte bei der Bereitstellung realisiert werden, was in diesem Kurzgutachten vornehmlich mit (übergreifendem) Bezug zu den dargestellten idealtypischen 7,5 t- und 40 t-Lkw thematisiert werden wird. Ergänzend wird auch auf mögliche Synergieeffekte zwischen einerseits LI für batterieelektrische Pkw („BEV-Pkw“)⁶, die abgekürzt als „Pkw-LI“ bezeichnet werden kann, und andererseits BEV-Lkw eingegangen. Die Nutzung von Lkw-LI durch OB-Lkw wird ebenfalls kurz angeschnitten.

ZIELSTELLUNG UND (AUSGANGS-)ANNAHMEN, ZIELSYSTEM SOWIE VORGEHEN UND THEORETISCHE BASIS

Aufgrund von Ressourcenrestriktionen bei der Erstellung dieses Kurzgutachtens wird lediglich angestrebt, wesentliche Fragestellungen mit Bezug zur Bereitstellung und Finanzierung von Lkw-LI in Deutschland zu identifizieren und aus ökonomischer (und dabei nicht zuletzt auch aus institutionen-ökonomischer) Sicht einzuordnen. Vereinzelt können „vorsichtige“ Ausgestaltungsempfehlungen abgegeben werden, aber oftmals werden durch die Identifikation und Einordnung von Ausgestaltungsfragen in erster Linie Hinweise auf zukünftigen Klärungs- und somit Forschungsbedarfe herausgearbeitet. Diese eingeschränkte Aussagekraft ergibt sich nicht zuletzt auch daraus, dass die Analysen in diesem Kurzgutachten sich – die Realität stark vereinfachend – vornehmlich auf die beiden vorgestellten idealtypischen Lkw beziehen, die als 7,5 t-Lkw im Nah- und Regionalverkehr bzw. als 40 t-Lkw im Fernverkehr eingesetzt werden. Die Analysen sind ferner insofern abstrakt, als dass der bestehende rechtliche Rahmen nur in einer sehr groben Weise berücksichtigt wird und damit einhergehend auch die Implikationen von Pfadabhängigkeiten

⁶ Bei BEV-Pkw handelt es sich dabei stets um rein batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle (BEV)).

weitgehend ausgeklammert werden, so dass auch in diesem Kontext auf zukünftigen Forschungsbedarf verwiesen werden kann. Angenommen wird, dass es eine politische Entscheidung geben wird, dass ein Markthochlauf bei E-Lkw erfolgen soll und dass damit einhergehend eine Bereitstellung von Lkw-LI geboten ist.⁷

Die (ökonomischen) Analysen in diesem Kurzgutachten sind – zumindest implizit – darauf ausgerichtet, dass die Bereitstellung von Lkw-LI auf eine aus wohlfahrtsökonomischer Sicht vorteilhafte Weise und gemäß den Präferenzen der BEV-Lkw-Nutzer erfolgen soll.⁸ Insoweit technisch-ökonomisches Wissen zu Präferenzen auf der Nachfrageseite und zu mit Bereitstellungsaktivitäten einhergehenden Kosten vorliegt, ist es möglich, (relativ) konkrete Handlungsempfehlungen bezüglich der Bereitstellung abzugeben. Wenn derartiges Wissen jedoch in einem unzureichenden Ausmaß vorliegt, fokussieren sich die Analysen vielmehr auf die Frage, welche institutionellen Arrangements geeignet sind, den Rahmen für die Fällung entsprechend vorteilhafter Entscheidungen zu bieten. In diesem Zusammenhang stellen Entscheidungsfällungen in einem (weitgehend) unregulierten Markt einerseits und durch die öffentliche Hand als zentralen Akteur andererseits idealtypische Randlösungen dar. Für die Analyse und Beurteilung derartiger institutioneller Arrangements, die als „Governance-Formen“ bezeichnet werden können, ist auf Erkenntnisse der Institutionenökonomik und dabei insbesondere der Neuen Institutionenökonomik (NIÖ) zurückzugreifen.

DEFINIERTER LKW-LI-ARTEN UND STRUKTUR DIESES KURZGUTACHTENS

Dieses Kurzgutachten ist wie folgt aufgebaut:

- In Abschnitt 2 werden Grundlagen vorgestellt, die für die Analysen in den anschließenden Abschnitten von Relevanz sind. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 dargestellt, welche Ladeinfrastruktur-Arten für Be-Pkw bedeutsam sind bzw. sein sollten und welche wesentlichen Ausgestaltungsentscheidungen hinsichtlich der Bereitstellung bei den einzelnen dieser LI-Arten empfehlenswert sind. In Abschnitt 2.2 werden sodann grundlegende institutionenökonomische Erkenntnisse vorgestellt, auf die bei den (i.d.R. impliziten) institutionenökonomischen Analysen zurückgegriffen wird, die den (institutionenökonomischen) Einordnungen und Empfehlungen in den späteren Abschnitten zugrunde liegen. In Abschnitt 2.3 erfolgen mit Bezug zu im Nah- und Regionalverkehr eingesetzten 7,5 t-BEV-Lkw und zu im Fernverkehr genutzten 40 t-BEV-Lkw überschlägige beispielhafte Kalkulationen zu Batteriegrößen und Ladebedarfen im Kontext der gesetzlichen Regelungen zu Lenk- und Ruhezeiten.
- In den Abschnitten 3 bis 6 werden vier Ladeinfrastruktur-Arten für Lkw definiert und untersucht, die grundsätzlich geeignet erscheinen, die Nachfrage der Lkw bzw. von deren

⁷ An einigen Stellen wird im Folgenden unterstellt, dass zukünftig nahezu sämtliche Lkw BEV-Lkw sind, worauf dann jeweils explizit hingewiesen wird.

⁸ Dabei wird (implizit) auf das Kaldor-Hicks-Kriterium zur Beurteilung wohlfahrtsökonomischer Vorteilhaftigkeit zurückgegriffen.

Nutzern nach Ladeinfrastruktur in einer geeigneten Weise abzudecken. Im Einzelnen werden die folgenden Ladeinfrastruktur-Arten für Lkw betrachtet:

- In Abschnitt 3 wird die so genannte „Betriebshof-Ladeinfrastruktur“ („Lkw-BH-LI“) thematisiert.
- Abschnitt 4 befasst sich mit Schnelllade-Ladeinfrastruktur, deren Bereitstellung in Anlehnung an das aktuell übliche Tankstellen-Konzept („Lkw-T-LI“) erfolgt.
- In Abschnitt 5 steht Ladeinfrastruktur im Mittelpunkt, die während längerer Standzeiten- und Ruhepausen genutzt werden kann („längere Standzeiten- und Ruhepausen-Ladeinfrastruktur“ (Lkw-LSR-LI))
- Ladeinfrastruktur, über die während des Be- und Entladens an Rampen bei Versendern und Empfängern Energie aufgenommen werden kann („Rampen-Ladeinfrastruktur“ (Lkw-RA-LI)), ist Thema in Abschnitt 6.

In diesen Abschnitten 3 bis 6 werden jeweils zunächst Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung identifiziert und eingeordnet, wofür auf technisch-ökonomisches Wissen zurückgegriffen wird. Sodann werden unter (impliziten) Rückgriff auf Erkenntnisse der Neuen Institutionenökonomik wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung thematisiert.⁹ Die Betrachtungen erfolgen stets mit Bezug zu den idealtypischen 7,5 t- und 40 t-Lkw und auch auf mögliche Synergieeffekte mit der Bereitstellung der Pkw sowie verschiedene Standorttypen wird z.T. eingegangen.

- Nachgelagert wird in Abschnitt 7 zunächst kurz auf die Option der Etablierung eines „Batterie-Wechsel-Systems“ für (E-)Lkw (in Abschnitt 7.1) eingegangen. Ferner werden die Potentiale der Etablierung eines „Oberleitungs-Lkw-Systems“ und damit einhergehend der Realisierung von Oberleitungs-Infrastruktur an Fernverkehrsstrecken (in Abschnitt 7.2) angeschnitten, über die den (E-)Lkw Strom zugeführt werden kann.
- In Abschnitt 8 werden die Lkw-LI-Arten übergreifende Schlussfolgerungen gezogen und dabei auch die ergänzenden Analysen in Abschnitt 7 berücksichtigt.

2 Grundlagen

2.1 Idealtypische Angebotsarten für Pkw-LI

Die Nachfrage nach Ladeinfrastruktur durch Be-Pkw erfolgt in quasi unendlich vielen verschiedenen Konstellationen, die aber im Bereich des motorisierten Individualverkehrs (MIV) im Wesentlichen drei verschiedenen Ladebedürfnissen zugeordnet werden können, die auch als (Ladeinfrastruktur-)Nachfrage-Arten bezeichnet werden können.^{10, 11} Zur Befriedigung dieser Ladebedürfnisse eignen sich wiederum drei verschiedene Arten von Ladeinfrastruktur für Pkw. Diesen drei Ladeinfrastruktur-

⁹ Dabei wird z.T. auch kurz auf die Umsetzung von Bereitstellungsentscheidungen bezüglich des physischen Angebots (und somit auf die Leistungserstellung) eingegangen.

¹⁰ Vgl. BECKERS ET AL. (2015) und HILDEBRANDT (2016).

¹¹¹¹ Dieser Abschnitt 2.1 ist aus BECKERS / GIZZI (2019, S. 1 ff) übernommen.

Arten kann jeweils ein Ladebedürfnis zugeordnet werden und die Bereitstellung gemäß jeder dieser drei Ladeinfrastruktur-Arten sollte jeweils einem speziellen Konzept folgen. Diese Konzepte können als Bereitstellungskonzepte oder Angebotskonzepte bezeichnet werden und enthalten grundsätzliche Gestaltungsüberlegungen bezüglich der einzelnen Bereitstellungsparameter (wie insbesondere Kapazitäten und Standorte, Ladegeschwindigkeiten, Nutzungsregeln und Bepreisung etc.). Im Einzelnen sind vor diesem Hintergrund die folgenden Ladeinfrastruktur-Arten für die Nutzer von Be-Pkw im Bereich des MIV von Bedeutung (vgl. dazu auch Abbildung 1):

- **Basis-Ladeinfrastruktur (PKW-B-LI):** Auf die regelmäßig erfolgende Beladung zu Zeiten, in denen ein Fahrzeug ohnehin für einen längeren Zeitraum eines Tages parkt, ist die so genannte Basis-Ladeinfrastruktur (PKW-B-LI) ausgerichtet. Diese dürfte bei den derzeit üblichen bzw. den zu erwartenden Batteriekapazitäten und unter Berücksichtigung durchschnittlicher täglicher Fahrtweiten, bei denen Elektrofahrzeuge hinsichtlich der „Total Cost of Ownership“ (TCO) relativ vorteilhaft abschneiden, mehrfach pro Woche (und dabei wohl oftmals vor bzw. an den meisten (Arbeits-)Tagen) bzw. zumindest häufiger als andere Ladeinfrastruktur-Arten genutzt werden. PKW-B-LI kann im Hinblick auf ein i.d.R. nächtliches Laden im privaten Bereich („PKW-p-B-LI“) auf dem Grundstück bzw. in der (Tief-)Garage des Nutzers verortet sein. Dabei kann zwischen PKW-p-B-LI im alleinigen Verfügungsbereich des Nutzers („private Garagen-LI“ bzw. „PKW-p-G-B-LI“) und PKW-p-B-LI bei Mehrfamilienhäusern („private Tiefgaragen-LI“ bzw. „PKW-p-TG-B-LI“) unterschieden werden. Im Wohnumfeld kann die Ladeinfrastruktur auch im öffentlich zugänglichen Bereich und dabei insbesondere im öffentlichen Straßenraum („PKW-ö-B-LI“), aber auch im halböffentlichen Bereich („PKW-hö-B-LI“, z.B. in Parkhäusern) platziert sein. Weiterhin kann B-LI auch beim Arbeitgeber verortet sein („PKW-AG-B-LI“). An PKW-B-LI können Nutzer ihre Fahrzeuge in der Regel ohne Inkaufnahme von Einschränkungen ihres Mobilitätsverhaltens über eine längere Zeit und damit auch mit geringeren Leistungen laden und dabei oftmals vollladen, weshalb der Rückgriff auf Schnellladetechnologie grundsätzlich nicht erforderlich bzw. nicht sinnvoll ist und sich vielfach die AC 1-Technologie (und ansonsten ggf. die AC 3-Technologie) eignen wird.
- **Tankstellen-Ladeinfrastruktur (PKW-T-LI):** Öffentlich zugängliche Tankstellen-Schnellladeinfrastruktur – oder verkürzt Tankstellen-Ladeinfrastruktur – (PKW-T-LI) entspricht in ihrer Funktion z.T. den Tankstellen für konventionellen Kraftstoff und die Bereitstellung lehnt sich in diesem Zusammenhang in gewisser Hinsicht an das Konzept von Tankstellen an. Entfernte Reiseziele können jenseits der maximalen Reichweite von Elektrofahrzeugen liegen, was insbesondere den Fernverkehr betrifft. Die maximale Reichweite kann außerdem bereits durch Fahrten in einer Region überschritten werden („Regionenverkehr“), z.B. wenn nicht während der normalen Standzeit geladen werden kann (wie beispielsweise an einem Urlaubsort, wo ggf. kein Rückgriff auf PKW-B-LI möglich ist, und somit in einer „Urlaubsregion“) oder wenn an einem Tag – ggf. auch in der „Heimatregion“ – längere Fahrten stattfinden, welche die von einer vollgeladenen Batterie ermöglichte Reichweite übersteigen. Da in diesen Fällen Fahrten zum Laden unterbrochen werden müssen, eignet sich zur Abdeckung dieser Nachfrage öffentlich zugängliche Gleichstrom (DC)-

Schnellladeinfrastruktur. Denn bei der Nutzung fallen bei den Nachfragern Zeitkosten an, wobei diesen (Brutto-)Kosten etwaige Nutzen aus während der Ladezeit durchgeführten Aktivitäten gegenüberzustellen sind (z.B. „Kaffeetrinken“ oder „Einkaufen im Tankstellenshop“). Um die Nachfrage adäquat zu befriedigen und dabei auch die durch PKW-T-LI generierbaren Mobilitäts Optionen zu berücksichtigen, ist es unentbehrlich, dass ein PKW-T-LI-Netzwerk existiert. Dieses muss sich auszeichnen durch eine ausreichende räumliche Abdeckung (an Fernverkehrsadern und außerdem gewisse Flächendeckung) und eine hohe Verfügbarkeit gewährleistende Kapazität an einzelnen Standorten (und insofern eine entsprechend große Anzahl an Ladesäulen insbesondere an „Hot-Spots“ der Nachfrage) sowie durch hohe Lade-Geschwindigkeiten an den Säulen (DC-Laden deutlich jenseits von 50 kW, also z.B. 250 kW oder 350 kW).

- Ergänzungs-Ladeinfrastruktur (PKW-E-LI):** Wenn Nutzer Wegeketten „abfahren“, parken Fahrzeuge oftmals und dabei besteht die Möglichkeit, entsprechend geeignet platzierte Ladeinfrastruktur quasi „nebenbei“ zu nutzen und zu laden. Hierauf ausgerichtete Ladeinfrastruktur kann die Basis- und Tankstellen-Ladeinfrastruktur ergänzen und daher als „Ergänzungs-Ladeinfrastruktur“ (PKW-E-LI) bezeichnet werden. Durch PKW-E-LI kann ggf. die Nutzung von PKW-T-LI unterbleiben und entsprechend Zeit eingespart werden. Bei PKW-E-LI können verschiedene Ladegeschwindigkeiten und damit einhergehend auch Ladetechnologien (AC 1 und AC 3 sowie auch DC) sinnvoll einsetzbar sein. PKW-E-LI dürfte insbesondere im so genannten halböffentlichen Bereich („PKW-hö-E-LI“) und dort z.B. auf Parkflächen von Einzelhandelsgeschäften (Supermärkten, Möbelhäusern usw.) und von Freizeitangebietern (Sportstudio etc.) zu finden sein. Anzumerken ist, dass Ladeinfrastruktur, die zu bestimmten Zeiten durch ein entsprechendes Angebotskonzept als PKW-B-LI einzuordnen ist (z.B. PKW- ö-B-LI für eine regelmäßige nächtliche Beladung) sich zu anderen Zeit in Verbindung mit einem entsprechend anderen Angebotskonzept als PKW-E-LI eignen kann (im aufgeführten Beispiel dann als „PKW-ö-E-LI“, die z.B. tagsüber vom Einkaufsverkehr genutzt werden kann).

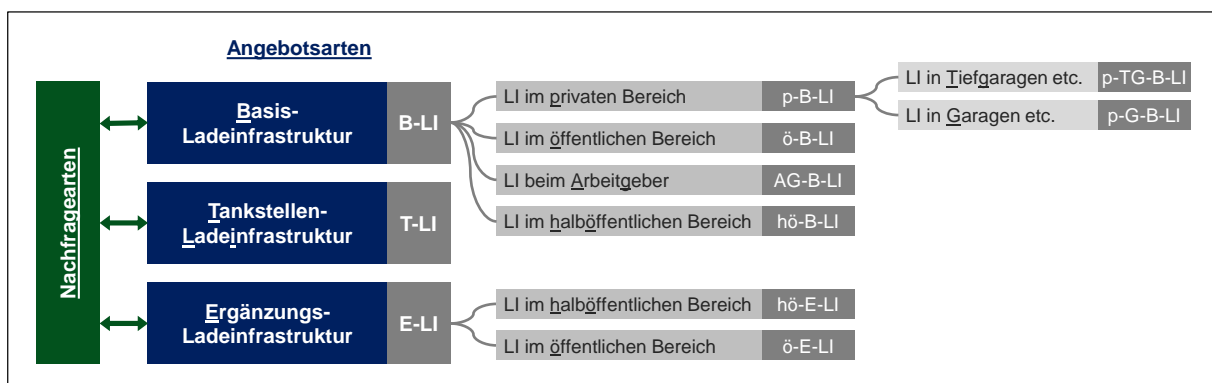


Abbildung 1: Nachfrage- und Angebotsarten bei der Ladeinfrastruktur für Be-Pkw im MIV

Für eine große Anzahl der potentiellen Nutzer der Elektromobilität dürfte die Verfügbarkeit von für sie nutzbarer PKW-B-LI dafür bedeutsam sein, dass sie in die Elektromobilität einsteigen. Für die (wohl eher wenigen) Nutzer der Elektromobilität, die über keine PKW-B-LI verfügen, weist PKW-T-LI dann

eine umso größere Bedeutung auf.¹² Ein gewisses Nachfragesegment kann im privaten Bereich unkompliziert und (mehr oder weniger) eigenständig die Verfügbarkeit von PKW-B-LI sicherstellen, was insbesondere für Eigenheimbesitzer und – wenn auch mit Einschränkungen – bei Mehrfamilienhäusern gilt. Mit diesen Nachfrageschichten dürfte in den folgenden Jahren relevante Fortschritte beim Markthochlauf für die Elektromobilität in Deutschland zu erreichen sein. Allerdings werden diese (potentiellen) Nutzergruppen – genau wie die Nutzer von PKW-B-LI im halböffentlichen und im öffentlichen Bereich – der Verfügbarkeit von PKW-T-LI eine große Bedeutung beimessen, sodass sie sich vermutlich in einem nicht nur geringen Umfang gegen den Kauf von Elektrofahrzeugen entscheiden werden, wenn die Bereitstellung von PKW-T-LI nicht bzw. in einem recht suboptimalen Ausmaß gewährleistet ist.¹³ In diesem Kontext kann auf Beckers / Gizzi/ Hermes/ Weiß (2019) verwiesen werden, die unter Berücksichtigung ökonomischer Erkenntnisse und (verfassungs- und unions-)rechtlicher Aspekte analysieren, wie die Bereitstellung von PKW-T-LI in Deutschland organisiert werden sollte. Vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) ist im Übrigen ein Vorgehen bei der Bereitstellung von Pkw-T-LI angekündigt worden, das den Empfehlungen in BECKERS / GIZZI (2019) ähnelt.¹⁴

2.2 Grundlegende institutionenökonomische Erkenntnisse als Grundlage für die Analyse von (Politik- und Regulierungs-)Maßnahmen

2.2.1 Institutionenökonomische (Grundsatz-)Frage des angemessenen Umfangs öffentlicher (Politik- und Regulierungs-)Eingriffe

Die öffentliche Hand kann durch (Politik- und Regulierungs-)Maßnahmen bzw. (Markt-)Eingriffe die Aktivitäten der Akteure in einem ansonsten grundsätzlich marktwirtschaftlichen Wirtschaftssystem (und dabei insbesondere der privaten Unternehmen) beeinflussen.¹⁵ Im Hinblick auf die Erreichung definierter Ziele stellen sich die Fragen des angemessenen Umfangs und der Ausgestaltung derartiger öffentlicher Aktivität durch die Politik in der Legislative, die als „wirtschaftspolitische Eingriffe“ eingeordnet werden können, und durch Regulierer bzw. die Verwaltung, die als „regulatorische Eingriffe“ angesehen werden können. Übergreifend können derartige Eingriffe in das Wirtschaftssystem als „öffentliche Eingriffe“ oder „öffentliche Maßnahmen“ bezeichnet werden. In

¹² Zu beachten ist, dass die Verfügbarkeit von Pkw-B-LI für die Nutzer der Elektromobilität auch aus gesamtsystemischer Sicht von Bedeutung ist, da die Nutzer (bzw. von den Nutzern beauftragte Dienstleister (wie z.B. Stromvertriebe) oder gesetzlich bzw. regulatorisch damit beauftragte Akteure (wie z.B. Verteilnetzbetreiber)) die Beladung der Fahrzeuge während ihrer Standzeiten an der PKW-B-LI insbesondere dann durchführen können, wenn der Strompreis niedrig und somit tendenziell aus fluktuierenden erneuerbaren Energien erzeugter Strom „übrig“ ist und in den Elektrofahrzeugen bzw. deren Batterien gespeichert werden kann.

¹³ In diesem Kontext ist darauf hinzuweisen, dass die Verfügbarkeit eines PKW-T-LI-Netzwerkes auch die relative Attraktivität von BEV und PHEV beeinflusst. Sofern kein geeignetes PKW-T-LI-Netzwerk existiert, erhöht sich die relative Attraktivität von PHEV. Dies bedeutet aber auch, dass dann aus einer relativ hohen Nachfrage nach PHEV nicht geschlossen werden kann, dass die Nachfrager nicht an BEV interessiert sind.

¹⁴ Vgl. dazu die am 20.12.2019 vom BMVI veröffentlichte Pressemitteilung „Ladeinfrastruktur kommt! – Neue Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur gegründet / Eckpunkte für Finanzierung von Schnellladeinfrastruktur steht“ (Im Internet abgerufen am 15.01.2021 unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2019/100-scheuer-ladeinfrastruktur-kommt.html>).

¹⁵ Dieser Abschnitt 2.2 entspricht (weitgehend) Abschnitt 2.1 in BECKERS ET AL. (2019a).

diesem Kurzgutachten werden u.a. derartige für das gesamte Wirtschaftssystem relevante Fragen mit Bezug zur Ladeinfrastruktur für BEV-Lkw betrachtet. Die wesentliche Grundlage für die diesbezüglichen Analysen stellt die Institutionenökonomik und dabei insbesondere die Neue Institutionenökonomik (NIÖ) dar.

EINE UNREGULIERTE MARKTWIRTSCHAFT UND EINE PLANWIRTSCHAFT ALS EXTREMFORMEN FÜR ÖFFENTLICHE EINGRIFFE SOWIE DIE BEDEUTUNG VON WISSEN GEMÄß JENSEN / MECKLING (1995)

Extremformen öffentlicher Eingriffe und Aktivität im Wirtschaftssystem stellen einerseits eine unregulierte Marktwirtschaft und andererseits eine (vollumfassende) Planwirtschaft mit dem Staat als (einzigem und) zentralem Akteur dar. In einer Marktwirtschaft, in der Unternehmen in einem wettbewerblichen Kontext agieren, führt die Koordination der wirtschaftlichen Aktivität unter Nutzung des Preismechanismus gemäß den Aussagen (einfacher) (formaler mikro-)ökonomischer Modelle zu einer effizienten Ressourcenallokation. Auch wenn diese ökonomischen Modelle auf sehr vielen unrealistischen Annahmen basieren, dürften sie dennoch auf relevante Aspekte der Koordination in einer Marktwirtschaft und der Vorteile dieser Koordination hinweisen. JENSEN / MECKLING (1995), die dabei (Vor-)Arbeiten in HAYEK (1945) aufgreifen, zeigen mit auf einfachen Modellierungen basierenden Überlegungen, dass insbesondere über den Preismechanismus in einer Marktwirtschaft auch Wissen effizient allokiert und genutzt werden kann, während in einer Planwirtschaft das Problem bzw. die Herausforderung besteht, dass das für die zentrale Planung erforderliche Wissen bei dem zentralen Planer auch tatsächlich vorliegt. Allerdings weisen ökonomische Erkenntnisse auch auf Ineffizienzen im Rahmen einer Koordination der wirtschaftlichen Aktivitäten der Akteure in einem wettbewerblichen Kontext in einer Marktwirtschaft hin.

Vor diesem Hintergrund sind bei der Befassung der öffentlichen Hand – und somit auch von Wissenschaftlern/innen und sonstigen Analytikern/innen, die die öffentliche Hand (gefragt oder ungefragt) beraten – mit Bezug zum Einzelfall und zu konkreten Fragestellungen im Wirtschaftssystem Vergleiche zur Eignung unterschiedlicher öffentlicher (politischer und regulatorischer) Eingriffsumfänge und -ausgestaltungen durchzuführen. Einen vollkommenen Verzicht auf öffentliche Eingriffe und eine somit vollkommen unregulierte Marktwirtschaft, in der der Staat lediglich Eigentumsrechte garantiert, gibt es in der Praxis quasi nicht. Aber relativ wenig regulierte (markt-)wirtschaftliche Bereiche haben durchaus eine hohe empirische Relevanz.¹⁶

¹⁶ Bei der Analyse der Eignung von öffentlicher Planungsaktivität ist im Übrigen auch zu berücksichtigen, dass dabei nicht nur die bereits erwähnten Herausforderungen des Wissensmanagements bestehen, damit der öffentliche zentrale Planer über das erforderliche Wissen zur adäquaten Aufgabenwahrnehmung verfügt, sondern dass sich in einer Demokratie (aber – dann in anderer Weise – auch in anderen Gesellschaftssystemen) mit Bezug zu öffentlicher Planungsaktivität spezielle Anreiz- und Kontrollprobleme im öffentlichen und nicht zuletzt im politischen Bereich stellen. Diese Probleme stehen im Übrigen im Mittelpunkt der Betrachtungen der Neuen Politischen Ökonomie (NPO), die dabei auf diverse Erkenntnisse der Prinzipal-Agent-Theorie zurückgreift. Derartige Probleme werden in diesem Kurzgutachten jedoch nicht thematisiert.

UNTERSCHIEDLICHE ARTEN UND EBENEN ÖFFENTLICHER PLANUNGSAKTIVITÄT IM KONTEXT VON ÖFFENTLICHEN (POLITIK- UND REGULIERUNGS-)MAßNAHMEN

Bei Vergleichen unterschiedlicher öffentlicher Eingriffsumfänge und -ausgestaltungen ist zu berücksichtigen, dass öffentliche Planungsaktivität in vielfältiger Form erfolgen kann, die sich insbesondere durch die Art und die Ebene der öffentlichen Planung unterscheiden kann:

- **Frage der Planungsart:** Die öffentliche Planung kann sich auf technisch-systemische Maßnahmen und damit direkt auf die Ressourcen-Allokation beziehen, z.B. durch den Beschluss eine bestimmte Autobahn zu errichten (und der damit – das sei hier angenommen – direkt einhergehenden Umsetzung dieses Beschlusses). Damit wird von der öffentlichen Hand recht unmittelbar über die Bereitstellung von Gütern entschieden. Öffentliche Planung muss aber nicht direkt auf das technische System einwirken, sondern kann sich auch auf die Gestaltung von Institutionen beziehen, die mehr oder weniger direkt (und damit i.d.R. einhergehend früher oder später) dann die Ressourcenallokation im technischen System (mehr oder weniger) beeinflussen. Dies weist darauf hin, dass regulatorische Eingriffe in das Wirtschaftsgeschehen zentral erfolgen und somit ebenfalls Ergebnis einer zentralen Planung sind. Zunächst können Institutionen durch die öffentliche Hand gestaltet werden, die recht direkt die Ressourcenallokation beeinflussen, z.B. durch die Ausgestaltung eines Vergabeverfahrens, in dem Akteure das Recht und die Pflicht ersteigern, an einem von ihnen ausgewählten Ort in Deutschland Windenergieanlagen zu errichten. Eine vergleichsweise indirekte Beeinflussung der Ressourcenallokation kann erfolgen, indem der Gesetzgeber Institutionen in Form von Governance-Mechanismen definiert und damit festlegt, wie in bestimmten Bereichen planerische Entscheidungen zukünftig zustande kommen.¹⁷
- **Frage der Planungsebene im technisch-systemischen Sinne (und damit der Output- bzw. Input-Orientierung der Planung):** Planungsaktivität zu technisch-systemischen Maßnahmen kann – beispielsweise wenn das Ziel besteht, den Kohlendioxid Ausstoß (CO₂-Ausstoß) in einer Volkswirtschaft zu reduzieren – in einer mehr oder weniger „Output-orientierten“ bzw. „Input-orientierten Weise“ erfolgen. Mit Bezug zum aufgeführten Beispiel kann der Einsatz von CO₂-Zertifikaten als ein sehr Output-orientierter Ansatz angewendet werden und dabei werden die konkreten Maßnahmen im technisch-systemischen Sinne im Wirtschaftssystem im Rahmen von diversen Koordinationsaktivitäten auf Märkten durch einzelne (dezentrale) Unternehmen und sonstige Akteure festgelegt. Alternativ könnten durch zentrale Planung auch eher Input-orientiert konkrete technisch-systemische Entscheidungen im Hinblick auf eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes getroffen werden, z.B. durch die Vorgabe

¹⁷ Beispiele hierfür sind diverse Kompetenzübertragungen an die Bundesnetzagentur als Regulierer, die u.a. (Vor-)Entscheidungen über den Bau bestimmter Infrastrukturen treffen darf und Erlaubnisse oder Verbote bezüglich der Stilllegung von Kraftwerken aussprechen kann. Auch durch legislative (Grundsatz-)Entscheidungen etablierte (Vor-)Festlegungen zur späteren legislativen Involvierung in Bedarfsplanungsentscheidungen bei Infrastrukturen im Einzelfall, die etwa beim Netzentwicklungsplan für die Stromübertragungsnetze und bei der Bundesverkehrswegeplanung vorliegen, stellen Beispiele für Governance-Mechanismen dar.

von CO₂-Ausstoß-Reduktionszielen in einzelnen Sektoren (wie im Energiesektor, im Verkehrssektor oder in der Landwirtschaft) oder – noch Input-orientierter – durch die konkrete Beschlussfassung zur Errichtung von einer bestimmten Windenergieanlagenkapazität in einem bestimmten Zeitraum.

Je nachdem auf welcher Ebene (und damit in einer mehr oder weniger Input- oder Output-orientierten Weise) öffentliche technisch-systemische Planungsaktivitäten ansetzen, sind dann regelmäßig direkt anschließend weitere Planungsaktivitäten bezüglich von Institutionen erforderlich, die im direkten Anschluss an die planerisch getroffene technisch-systemische Entscheidung die Grundlage dafür bilden, dass die zur Umsetzung dieser Entscheidung von den Wirtschaftssubjekten (und dabei insbesondere Unternehmen) durchzuführenden Maßnahmen stattfinden können. Beispielsweise kann an einen gesetzlichen Beschluss mit einem technisch-systemischen Charakter hinsichtlich der Errichtung von einer bestimmten Windenergieanlagenkapazität in einem bestimmten Zeitraum ein Beschluss zur Ausgestaltung der Institutionen anknüpfen, mit denen die Orte und die Akteure auszuwählen sind, wo bzw. durch welche die Windenergieanlagen zu errichten sind (was im Übrigen aktuell in Deutschland durch Auktionsverfahren erfolgt).

DIE BEDEUTUNG VON WISSEN BEIM VERGLEICH VON ALTERNATIVEN (MIT UNTERSCHIEDLICHEN ÖFFENTLICHEN PLANUNGSAKTIVITÄTEN EINHERGEHENDEN) ÖFFENTLICHEN (POLITIK- UND REGULIERUNGS-)MAßNAHMEN

Bei den diversen (bzw. eigentlich nahezu „unendlich vielen“) bestehenden Möglichkeiten öffentlicher Planung, die sich nicht zuletzt durch die Art und Ebene der Planung unterscheiden, ist unterschiedliches Wissen dafür bedeutsam, dass eine „gute Planung“ durchgeführt wird. Für sich direkt auf die Ressourcenallokation beziehende Planungsentscheidungen ist technisch-systemisches Wissen von Bedeutung, über welches vielfach Ingenieure/innen verfügen, während institutionelles Wissen hierfür grundsätzlich unwichtig ist. Für die Gestaltung von Institutionen und dabei auch von Governance-Formen wird institutionelles Wissen benötigt, welches insbesondere bei Institutionenökonom/innen und Rechtswissenschaftlern/innen vorliegt. Ferner ist i.d.R. aber auch (in einem mal mehr und mal weniger großen Ausmaß) technisch-systemisches Wissen von Relevanz, um die Eignung der Anwendung bestimmter institutioneller Lösungen in einem bestimmten, nicht zuletzt auch durch technisch-systemische Besonderheiten bedingten Kontext beurteilen zu können. Je nachdem auf welcher technisch-systemischen Ebene die öffentliche Planung erfolgt und die öffentlichen (Politik- oder Regulierungs-)Maßnahmen ansetzen, unterscheidet sich das erforderliche technisch-systemische Wissen und hat – anders formuliert – eine stärkere Output- oder Input-Orientierung aufzuweisen.

Wenn auf Seiten bzw. aus dem Blickwinkel der öffentlichen Hand unterschiedliche Optionen für den Umfang und die Ausgestaltung öffentlicher Planungsaktivität untersucht und die damit einhergehenden Wirkungen prognostiziert (und dann auf Basis eines Zielsystems regelmäßig auch bewertet) werden, sind nicht zuletzt auch der verfügbare Wissensstand der für Planungsaktivitäten zuständigen öffentlichen Stellen, die dortigen Möglichkeiten zur (kurz- oder zumindest mittel- bzw. langfristigen) Aneignung und zum Einbezug von bereits verfügbarem Wissen sowie zum (i.d.R. eher mittel- oder langfristig möglichem) Aufbau von neuem (bislang nirgendwo im Wirtschaftssystem

verfügbarem) Wissen zu betrachten. Dies betrifft sowohl technisches-systemisches als auch institutionelles Wissen.

Bei der Untersuchung der Alternative einer weitgehend unregulierten Marktwirtschaft hat nicht unbedingt in einem analogen Ausmaß eine Befassung mit Wissensständen und deren Veränderbarkeit bei den relevanten Akteuren (und dabei insbesondere bei den in den entsprechenden Wirtschaftsbereichen tätigen Unternehmen) zu erfolgen. Denn es ist gerade ein großer Vorteil von weitgehend unregulierten Marktwirtschaften, dass es – von der Planung der allgemeinen (Restriktionen für die Akteure etablierenden) Rahmenbedingungen im Rahmen einer (weitgehend unregulierten) Marktwirtschaft abgesehen – keines öffentlichen Planers Bedarf. Nichtsdestotrotz kann es auch mit Bezug zu einer weitgehend unregulierten Marktwirtschaft geboten sein, Wissensstände zu betrachten. Dies gilt speziell dann, wenn der Verdacht besteht, dass durch öffentliche Eingriffe in das Wirtschaftsgeschehen Ziele besser erreicht werden könnten als in einer weitgehend unregulierten Marktwirtschaft.¹⁸ In dieser Situation bietet sich vielfach eine Prognose der Wirkungen des fortgesetzten Nicht-Eingreifens zum einen und der Alternative des öffentlichen Eingreifens in die (bislang) weitgehend unregulierte Marktwirtschaft zum anderen an. Für die Prognose der Wirkungen des Nicht-Eingreifens sind dann Erkenntnisse über Markt- und Wettbewerbsprozesse erforderlich, welche insbesondere in der Industrieökonomik und der dieser zurechenbaren Netzwerkökonomik eine Rolle spielen.¹⁹ Insofern ist für die Analyse der Alternative des öffentlichen Nicht-Eingreifens in eine weitgehend unregulierte Marktwirtschaft ebenfalls institutionelles Wissen bzw. – enger formuliert – industrieökonomisches Wissen erforderlich.

Zu beachten ist, dass bestimmtes Wissen regelmäßig dezentral im Wirtschaftssystem bei „irgendwelchen“ Akteuren (wie Unternehmen) vorhanden ist; dann wird auch von „dezentralem Wissen i.e.S.“ gesprochen. Anderes Wissen hingegen kann „von der Natur der Sache her“ als „zentrales Wissen“ bezeichnet werden, z.B. der öffentlich bekannte Forschungsstand zu einer bestimmten Fragestellung. Neben „irgendwo“ im Wirtschaftssystem vorliegendem dezentralem Wissen i.e.S. (im Folgenden nur als „dezentrales Wissen“ bezeichnet) kann sich dezentrales Wissen i.w.S. auch speziell auf örtliche Gegebenheiten beziehen und wird dann als „lokales Wissen“ eingeordnet. Je nachdem, ob für bestimmte wirtschaftliche Aktivitäten zentrales, dezentrales oder lokales Wissen von Bedeutung ist, können sich unterschiedliche öffentliche (Politik- und Regulierungs-)Maßnahmen tendenziell mehr bzw. weniger eignen.

¹⁸ Z.T. wird – Erkenntnisse einfacher formaler mikroökonomischer Modelle berücksichtigend – die Position vertreten, dass öffentliche Eingriffe in das Wirtschaftsgeschehen insbesondere dann erfolgen bzw. in Betracht gezogen werden sollten, wenn Marktmachtprobleme, externe Effekte oder Informationsasymmetrien vorliegen und in diesem Zusammenhang von „Marktversagen“ gesprochen werden kann. Dazu ist anzumerken, dass mit diesem „Marktversagens-Ansatz“ eine durchaus geeignete grobe Daumenregel vorliegt, wann regulatorische Maßnahmen (i.w.S.) untersucht werden sollten. Allerdings kommt es dabei sehr auf das Ausmaß von Marktversagens-Tatbeständen an und selbst dann, wenn dieses berücksichtigt wird, kann dieser Ansatz letztendlich doch lediglich als eine Daumenregel dafür angesehen werden, wann (u.a.) öffentliche Eingriffe in Betracht zu ziehen und genauer zu untersuchen sind.

¹⁹ Da sich die Industrieökonomik mit der Wirkung der Institution „Marktwirtschaft“ befasst, kann diese auch einer im weiten Sinne verstandenen Institutionenökonomik zugerechnet werden.

Angemerkt sei ferner, dass im öffentlichen Bereich in Deutschland – aber analog auch in mehr oder weniger ähnlichen Ausgestaltungsweisen in anderen Ländern – ein Mehrebenensystem existiert, in dem – hier vereinfachend von einem genau zwei Ebenen umfassenden Mehrebenensystem ausgehend (und damit die institutionelle Realität in Deutschland ignorierend) – die Zuordnung von Aufgaben und die Koordination zwischen der zentralen Ebene und der dezentralen Ebene sowie auf der dezentralen Ebene z.T. gemäß zentral definierter Regeln erfolgt. Dabei kann es regelmäßig als eine große Stärke der Gebietskörperschaften auf der dezentralen Ebene gegenüber der zentralen Ebene angesehen werden, dass sie über lokales Wissen verfügen.²⁰ Aufgaben die zentrales Wissen erfordern, können in einem staatlichen Mehrebenensystem oftmals von der zentralen Ebene besser wahrgenommen werden als von der dezentralen Ebene.

2.2.2 Herausforderung bei der zielgerichteten Entwicklung und Analyse alternativer öffentlicher (Eingriffs-)Maßnahmen als „institutioneller Ingenieursaufgabe“

Die Entwicklung und Analyse von alternativen öffentlichen (Politik- und Regulierungs-)Maßnahmen, die zur Erreichung vorgegebener Ziele beitragen sollen, weist Ähnlichkeiten zu Entwicklungsaufgaben im technisch-systemischen Bereich auf. Daher kann – Einordnungen und Überlegungen von COLANDER (1992) und COLANDER (2017) berücksichtigend – auch von einer „institutionellen Ingenieursaufgabe“ gesprochen werden. Die Identifikation optimaler Lösungen bei dieser institutionellen Ingenieursaufgabe ist dabei quasi nicht möglich und die Analysen weisen Besonderheiten auf, die so bei ökonomische Analysen zu anderen Fragestellungen (wie z.B. bei empirischen Analysen sowie formalen mikroökonomischen Modellierungen zur Erklärung beobachtbarer Sachverhalte) nicht vorliegen.

Als eine wesentliche Grundlage für die Erfüllung des Anspruchs der Wissenschaftlichkeit kann bei derartigen Analysen zu institutionellen Ingenieursaufgaben die Gewährleistung der intersubjektiven Nachvollziehbarkeit bzw. das Anstreben dieses Ziels angesehen werden, wobei dieses Ziel vollumfassend faktisch niemals erreichbar sein wird. In diesem Zusammenhang beeinflussen die für Analysen und deren Darstellung zur Verfügung stehenden Ressourcen auf eine nicht unerhebliche Weise, inwieweit dem (unerreichbaren) Ziel der Gewährleistung intersubjektiver Nachvollziehbarkeit nahe gekommen werden kann.

2.2.3 Schlussfolgerungen für die (institutionen-)ökonomischen Analysen in diesem Kurzgutachten

Die vorstehenden dargestellten Erkenntnisse zu (institutionen-)ökonomischen Analysen bezüglich öffentlicher (wirtschaftspolitischer und regulatorischer) Eingriffe in das Wirtschaftsgeschehen werden bei den Untersuchungen in diesem Kurzgutachten – zumindest implizit – berücksichtigt. Dies bedeutet u.a., dass Wissensstände bei der öffentlichen Hand (bzw. bei den diese – gefragt oder ungefragt – durch Analysen unterstützenden Akteuren) eine erhebliche Relevanz für die Untersuchungsergebnisse aufweisen; dies gilt im Übrigen analog für Prognosen über die Entwicklung

²⁰ Zu berücksichtigen ist, dass u. U. auch „vor Ort“ tätige Unternehmen über lokales Wissen verfügen werden.

von Wissensständen (z.B. bei der öffentlichen Hand, der infolge legislativer Beschlüsse eine Planungsaufgabe zugeordnet wird).

Im Hinblick auf das Anstreben der intersubjektiven Nachvollziehbarkeit ist anzumerken, dass in diesem Kurzgutachten – aufgrund sehr begrenzter Ressourcen bei ihrer Erstellung – bei den Analysen Untersuchungsgänge allenfalls ansatzweise erläutert werden können und diverse Analyseschritte vielmehr implizit vorgenommen werden.

2.3 Überschlägige beispielhafte Kalkulationen zu Batteriegrößen und Ladebedarfen im Kontext der Regelungen zu Lenk- und Ruhezeiten

GRUNDLEGENDE ZUSAMMENHÄNGE UND ÜBERLEGUNGEN

Die Häufigkeit, mit der BEV-Lkw Lkw-LI nutzen, ist abhängig von der Größe ihrer Batterien und den Energieverbräuchen der Fahrzeuge. Bei der Wahl der Batteriegröße besteht ein Zielkonflikt:

- Einerseits erlauben größere Batterien längere Fahrzeiten, die nicht durch die Nutzung von Lkw-LI unterbrochen werden müssen.
- Andererseits fallen für größere Batterien höhere Kosten als für kleinere an und das höhere Gewicht größerer Batterien führt zumindest in einem gewissen Ausmaß zu höheren Energieverbräuchen und kann bei fixiertem maximalem Gesamtgewicht die Beladungsmöglichkeiten einschränken.²¹ Dem letztgenannten Nachteil kann entgegengewirkt werden, indem speziell für BEV-Lkw entsprechend erhöhte maximal Gesamtgewichte festgelegt werden. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden von der möglichen Einschränkung der Zuladungsmöglichkeiten bei Rückgriff auf größere Batterien in Lkw abstrahiert.²²

Im Kontext der hohen Zeitopportunitätskosten beim Gütertransport per Lkw liegt es nahe, gerade (auch) die Ruhe- und Standzeiten, die Lkw bzw. deren Fahrer/innen gemäß den europäischen Vorgaben in der Verordnung (EG) 561/2006 einzuhalten haben, zu nutzen, um in dieser Zeit die Batterien der an Lkw-LI angeschlossenen BEV-Lkw aufzuladen. Dabei kann – die Rechtslage in einer leicht vereinfachten Weise berücksichtigend – von den folgenden Pausen und damit einhergehend Standzeiten der Lkw ausgegangen werden:

- Alle 4,5 Stunden Fahrzeit haben Lkw – davon ausgehend, dass diese mit nur einem/r Fahrer/in besetzt sind – eine als „Fahrunterbrechung“ bezeichnete Pause von 45 Minuten vorzusehen.

²¹ Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass es deutliche Hinweise darauf gibt, dass kleinere Batterien schneller altern, was nicht zuletzt mit dem häufiger erforderlichen Be- und Entladen im Kontext ihrer geringeren Kapazität zusammenhängen dürfte.

²² Zu beachten ist, dass insbesondere bei BEV-Lkw in der „40 t-Gewichtsklasse“ eine Erhöhung des zulässigen maximalen Gesamtgewichts, die durch die Kompensation des Nachteils des Batteriegewichts bei Lkw motiviert ist, mit einer erhöhten Schädigung von Fahrbahnen und insbesondere von Brückenbauwerken zu rechnen ist.

- Einmal am Tag haben Lkw eine (zumindest) 11 Stunden lange so genannte „Ruhezeit“ einzulegen. Dreimal pro Woche darf diese regelmäßige tägliche Ruhezeit im Übrigen auf 9 Stunden verkürzt werden.

KALKULATIONEN MIT BEZUG ZU 40 T-LKW, DIE IM FERNVERKEHR EINGESETZT WERDEN

Wenn mit einem 40 t-Lkw, der im Fernverkehr eingesetzt wird, zwischen zwei Fahrunterbrechungen und somit während 4,5 Stunden mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h gefahren wird, kann eine Strecke von 360 km zurückgelegt werden. Hierfür hat die Batterie von 40 t-Lkw bei einem angenommenen Energieverbrauch von 1,5 kWh / km eine Kapazität von 540 kWh aufzuweisen.

Um während einer 45 minütigen Fahrunterbrechung Energie für eine derartige 360 km lange Fahrt aufzunehmen, hat die Lkw-LI eine Leistung von 720 kW aufzuweisen. Eine Leistung von 720 kW ist nur mit der Gleichstrom-(DC)-Technologie erreichbar. Mit dem derzeit gängigen CCS („Combined Charging System“)-Standard kann eine solche Leistung noch nicht erreicht werden. Der derzeit in der Entwicklung befindliche Standard für ein „Megawatt Charging System“ (MCS) wird dies hingegen ermöglichen und soll Ende 2021 zur Verfügung stehen.²³

Während der täglichen Ruhezeit von 11 Stunden kann eine Batterie mit einer Kapazität von 540 kWh unproblematisch auch bereits mit heute in der Praxis üblichen DC-Ladesäulen vollgeladen werden, die überwiegend Leistungen im Bereich von 50 bis 350 kWh aufweisen. Mit für dreiphasiges AC-Laden ausgelegte LI („AC-3-LI“) sind Leistungen bis 44 kW erreichbar („AC-3-44 kW-LI“). Für das Beladen einer Batterie mit 540 kWh sind für derartige AC-3-LI ca. 12,5 Stunden einzukalkulieren. Dies zeigt, dass AC-3-LI im Bereich von 40 t-Lkw nicht zwangsläufig keinerlei Rolle spielen wird. Der Vorteil von AC-3-LI sind deutlich geringere Kosten im Vergleich zur DC-Ladeinfrastruktur. Diesem Vorteil steht der Nachteil gegenüber, dass die Lkw mit einem für dreiphasiges Wechselstrom-Laden geeigneten Wechselrichter auszustatten sind.

KALKULATIONEN MIT BEZUG ZU 7,5 T-LKW, DIE IM NAH- UND REGIONALVERKEHR EINGESETZT WERDEN

Wenn man bei einem im Nah- und Regionalverkehr eingesetzten 7,5 t-Lkw von einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 60 km/h ausgeht, kann dieser in den 4,5 Stunden zwischen zwei 45 minütigen Fahrunterbrechungen eine Strecke von 270 km zurücklegen. Hierfür ist eine Batterie mit einer Kapazität von 135 kWh erforderlich. Diese kann während einer 45-minütigen Fahrunterbrechung von einer DC-LI vollständig aufgeladen werden, deren Leistung mindestens 180 kW beträgt. Derartige DC-Ladesäulen sind bereits aktuell in der Praxis im Einsatz. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass in dieser Lkw-Größenklasse die Tagesfahrweite in den meisten Fällen deutlich weniger als 200 km beträgt. Deshalb dürfte es für diese Fahrzeuge nicht besonders häufig erforderlich sein, während einer (45 minütigen) Pause eine DC-LI zu nutzen. Das vollständige Aufladen einer derartigen Batterie mit AC-3-LI ist in Abhängigkeit von deren Leistung in etwa 12,5 Stunden (bei einer

²³ Vgl. hierzu die Angaben auf der Homepage <https://www.charin.global/technology/mcs/> (abgerufen am 31.03.2021).

Leistung von 11 kW), 6,25 Stunden (bei einer Leistung von 22 kW) oder 3 Stunden (bei einer Leistung von 44 kW) möglich.

3 Betriebshof-Ladeinfrastruktur (“Lkw-BH-LI“)

3.1 Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung

LKW-BH-LI FÜR IM NAH- UND REGIONALVERKEHR EINGESETZTE 7,5 T-LKW

Im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw werden i.d.R. zu ihren täglichen Touren von ihrem Betriebshof aus starten und dorthin abends bzw. nach Abschluss ihrer Touren zurückkehren.²⁴ Damit einhergehend werden die Lkw in der überwiegenden Anzahl der Fälle zwischen ihren täglichen Touren und dies vornehmlich nachts auf den Betriebshöfen eine ausreichende Standzeit haben, um ihre Batterien mit AC-3-LI aufladen zu können. In Abhängigkeit der Batteriekapazität und der regelmäßigen täglichen Standzeit hat diese LI, die folgend auch als „Lkw-Betriebshof-LI“ (Lkw-BH-LI) bezeichnet wird, eine Leistung von 11 kW, 22 kW oder 44 kW aufzuweisen. In diesem Zusammenhang sei auf die beispielhaften Kalkulationen in Abschnitt 2.3 verwiesen. Zur Beladung von 7,5 t-Lkw kann AC-3-LI auf Betriebshöfen im Übrigen in jedem Fall durch DC-Ladesäulen ersetzt werden, da diese ja stets eine höhere Leistung als AC-3-LI aufweisen werden. Diese dürften jedoch bei einer Gesamtbetrachtung - vgl. dazu Abschnitt 2.3 – mit höheren Kosten als AC-3-LI einhergehen.

LKW-BH-LI FÜR IM FERNVERKEHR EINGESETZTE 40 T-LKW

Im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw dürften in Abhängigkeit ihres konkreten Einsatzprofils in einer sehr unterschiedlichen Frequenz ihre jeweiligen Betriebshöfe ansteuern und dort dann eine Standzeit von zumindest 9 Stunden aufweisen.²⁵ Im internationalen Straßengüterverkehr eingesetzte Fahrzeuge werden im Vergleich zu national eingesetzten Fahrzeugen eher selten ihre Betriebshöfe „nutzen“.

AC-3-44 kW-LI wird bei Standzeiten von etwa 12 bis 13 Stunden eine ausreichende Leistung aufweisen, um Batterien mit der Energie zu füllen, die für max. 4,5 Stunden dauernde Fahrten zwischen zwei Fahrunterbrechungen erforderlich ist. Insbesondere wenn die Lkw-BH-LI nur an manchen Tagen genutzt wird kann es dann Argumente dafür geben, AC-3-44 kW-LI anstelle von DC-Ladesäulen vorzusehen. Bei einer (ggf. sogar mehrfachen) täglichen Nutzung der Li und regelmäßigen kürzeren Standzeiten hingegen steigt die Rationalität für die Errichtung von DC-LI.

POTENTIALE FÜR SYNERGIEEFFEKTE MIT DER PKW-LI

Zwischen Lkw-BH-LI und Pkw-LI dürfte es nur in Ausnahmefällen relevante Potentiale für die Realisierung von Synergieeffekten geben. Denkbar ist beispielsweise, dass nachts im Nah- und

²⁴ Zwar werden nicht alle 7,5 t-Lkw auf Betriebshöfen abgestellt, aber die Anzahl derartiger Lkw, die im öffentlichen Straßenraum abgestellt werden, dürfte relativ gering sein.

²⁵ Die hier thematisierten 9 Stunden entsprechen der (dreimal pro Woche „erlaubten“) reduzierten täglichen Ruhezeit.

Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw an LI aufgeladen werden, an die tagsüber Pkw von auf dem Betriebshof tätigen Mitarbeitern/innen angeschlossen sind.

ÜBERGREIFENDE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es ist festzustellen, dass in Abhängigkeit des konkreten Lkw-Fuhrparks, des Einsatzprofils der Fahrzeuge und der Batteriegrößen durchaus ein Anwendungspotential nicht nur für DC-Ladesäulen, sondern – insbesondere bei 7,5 t-Lkw – auch für AC-3-44 kW-LI im Bereich der Lkw-BH-LI bestehen dürfte.²⁶ Allerdings könnte die Größe dieses Anwendungspotentials sensibel auf die Entwicklung der Batteriekapazitäten reagieren. Die Frage der Verwendung auch der AC-Technologie für Lkw-BH-LI verweist im Übrigen auf den Koordinationsbedarf zwischen Lkw-LI und Lkw hinsichtlich der Verwendung von Ladetechnologien.

3.2 Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung

Die Verantwortung für die Bereitstellung von Lkw-BH-LI sollte grundsätzlich bei den Fuhrunternehmen liegen, da diese über das (dezentrale) Wissen hinsichtlich des Bedarfs verfügen. Gewichtige Argumente für eine umfassende staatliche Involvierung in Bereitstellungs- und Finanzierungsfragen sind – Fragen der Anbindung an das Stromnetz nicht thematisierend – nicht erkennbar. Eine gewisse staatliche Förderung von Lkw-BH-LI kann als ein Substitut für eine Förderung des Aufbaus des Elektromobilitätssystems an anderen Stellen angesehen und eingesetzt werden. Inwieweit dies zu empfehlen ist, erfordert weitergehende Untersuchungen. Bei derartigen Förderregimen ist zu beachten, dass durch deren Regime eine Finanzierung von „Investitionsruinen“ verhindert wird.²⁷

4 Schnelllade-Ladeinfrastruktur in Anlehnung an das Tankstellen-Konzept („Lkw-T-LI“)

4.1 Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung

4.1.1 Lkw- T-LI für im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw

GRUNDSÄTZLICHE RATIONALITÄT UND GRUNDSÄTZLICHE AUSGESTALTUNGSFRAGEN

Davon ausgehend, dass die Batterien von im Fernverkehr eingesetzten 40 t-Lkw „nur“ darauf ausgelegt sind, Energie aufzunehmen, die ausreichend dafür ist, im zwischen zwei

²⁶ Zu beachten ist allerdings auch der bei AC-3-LI vorliegende Nachteil (gegenüber DC-Ladeinfrastruktur), dass kaum Potential dafür besteht, das Beladen nicht mit der gleichen Leistung während der gesamten Standzeit durchzuführen, sondern vor allem in die Zeiten zu „schieben“, in denen der Strompreis besonders niedrig ist (und dann mit der maximal möglichen Leistung die Beladung durchzuführen).

²⁷ Vgl. in diesem Zusammenhang z.B. BECKERS ET AL. (2019b), wo mit Bezug zu E-Lkw, die als Bestandteil eines Oberleitungs-Lkw-Systems während der Fahrt mit Strom aus Oberleitungen versorgt werden (können), thematisiert wird, wie durch die Ausgestaltung eines Förderregimes verhindert werden kann, dass „Investitionsruinen“ finanziert werden.

Fahrunterbrechungen liegenden Zeitraum von 4,5 Stunden mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h zu fahren und somit 360 km zurückzulegen, ist eine Ladeinfrastruktur erforderlich, die möglichst innerhalb der für eine Fahrunterbrechung vorgegebenen (Mindest-)Zeit von 45 Minuten die Batterie wieder aufladen kann. Hierfür ist – wie bereits in Abschnitt 2.3 aufgezeigt – Ladeinfrastruktur mit einer Leistung von 720 kW erforderlich. Derartige Ladeinfrastruktur wird insbesondere an Fernverkehrsstrecken im Allgemeinen und im besonderen Maße an den „großen Fernverkehrsachsen“ zu errichten sein. Darüber hinaus ist jedoch – analog zur T-LI bei den Pkw – auch eine flächendeckende Bereitstellung derartiger (Schnell-)Ladeinfrastruktur für Lkw grundsätzlich erforderlich. Ferner wird es gewisse „Nachfrage-Hotspots“ jenseits der Fernverkehrsstrecken geben, an denen derart leistungsfähige Lkw-LI von Bedeutung ist, um ein effizientes BEV-Lkw-System etablieren zu können. Dies dürften insbesondere Gebiete sein, in denen viele Versender und Empfänger „verortet“ sind und somit z.B. Ballungsräume sowie ggf. auch große Gewerbegebiete und Logistik-Hubs betreffen.

Auch wenn BEV-Lkw derartige Schnelllade-Ladeinfrastruktur zwar möglichst während ihrer „normalen“ Fahrtunterbrechungen nutzen würden und dafür die gesamte Zeit der Fahrtunterbrechung „einsetzen“ würden, liegen doch erhebliche Gemeinsamkeiten mit der Kraftstoffaufnahme durch die derzeit eingesetzten Diesel-Lkw an konventionellen „Tankstellen“ vor. Die Energieaufnahme soll so schnell wie möglich erfolgen, da Synergieeffekte nur hinsichtlich der in den Lenk- und Ruhezeitvorgaben vorgesehenen Fahrtunterbrechung möglich sind. Vor diesem Hintergrund wird derartige Lkw-LI folgend auch als (Lkw-)Schnelllade-Ladeinfrastruktur in Anlehnung an das Tankstellen-Konzept bezeichnet und als „Lkw-T-LI“ abgekürzt. Die Analogien zur Pkw-T-LI sind unübersehbar.

Wie auch bei der Pkw-T-LI ist zur Lösung des „zwischen“ BEV-Lkw und Lkw-LI bestehenden „Henne-Ei-Problems“ eine frühzeitige ausreichende und somit nach kurzer Zeit auch flächendeckende Bereitstellung von Lkw-T-LI bedeutsam. Angestrebt werden sollte ebenfalls, die Transaktionskosten der Nutzung durch gewisse Standardisierungen zu begrenzen und die Ausübung (möglicher) Marktmacht von Lkw-T-LI-Betreibern zu verhindern.

AN AUTOBAHNEN UND WEITEREN FERNSTRABEN SOWIE IN DEREN UNMITTELBARER NÄHE

Für die Bereitstellung von Lkw-T-LI an den Fernverkehrsachsen kommen insbesondere die an den Autobahnen gelegenen Tank- und Rasthöfe in Betracht. Hier wird es jedoch erhebliche Flächenknappheit geben, da die Energieaufnahme pro Zeiteinheit bei dem „konventionellen“ (Diesel-)Kraftstoff deutlich schneller erfolgen kann als an Ladesäulen für Lkw-T-LI. In diesem Zusammenhang kommt der Frage der Kapazitätsallokation an den Ladesäulen eine hohe Relevanz zu. Derartige „Flächenknappheits-Probleme“ werden insbesondere dann von Relevanz sein, wenn zukünftig nahezu sämtliche Lkw BEV-Lkw sein sollten. Ergänzend ist auch auf die Herausforderung hinzuweisen, dass ausreichend dimensionierte Anschlüsse an das Stromnetz im Falle der umfangreichen Realisierung von Lkw-T-LI zur Verfügung stehen.

Ferner kann Lkw-T-LI an Autobahnanschlussstellen und in der Nähe von sonstigen Fernverkehrsstraßen (wie Bundesstraßen) gelegenen Tankstellen und Rasthöfen errichtet werden. Denkbar ist, dass auch neue Flächen hierfür erschlossen werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass ein leistungsfähiger Anschluss an das Stromnetz gegeben bzw. möglich sein muss. Insofern wird es

wohl trotz der Nutzung dieser Optionen für die Realisierung von Lkw-T-LI eine Herausforderung sein, eine ausreichende Anzahl an Ladesäulen zu errichten, sofern sich BEV-Lkw „breit durchsetzen“ werden.

ZUR FLÄCHENABDECKUNG

Jenseits der Fernverkehrsstrecken wird zwar ein gewisser Lkw-T-LI-Aufbau auch für 40 t-Lkw erforderlich sein, aber diese Infrastruktur wird relativ wenig genutzt werden.²⁸ Aufgrund der begrenzten Anzahl an zu errichtenden Ladesäulen dürfte das „Auffinden“ von Flächen i.d.R. eher kein Problem darstellen. Zu klären ist, wie viel Ladesäulen an einzelnen Lkw-T-LI-Standorten errichtet werden sollten. Dabei ist einerseits zu berücksichtigen, dass geringe Wartezeiten für die bzw. (zeitlich gesehen) „vor“ der Nutzung der Ladeinfrastruktur gewährleistet werden können. Andererseits sind die Errichtungskosten im Kontext der zu erwartenden relativ geringen Auslastung der Ladesäulen „im Blick zu haben“. Zu berücksichtigen ist, dass Wartezeiten auch durch (vorausschauende) Regeln zur Kapazitätsallokation (und somit Möglichkeiten zur „Reservierung“ von Lkw-T-LI) zu beeinflussen sind. Nicht zuletzt ist in Betracht zu ziehen, zur Begrenzung der Kosten für die Kapazitätserrichtung und -vorhaltung an sehr nachfrageschwachen Standorten Synergieeffekten mit Pkw-T-LI zu nutzen. Aufgrund der geringeren Leistung von DC-Säulen, die der Pkw-T-LI zuzurechnen sind, würden dabei jedoch längere Ladezeiten als Nachteil in Kauf zu nehmen sein.

IN BALLUNGSRÄUMEN UND AN SONSTIGEN „NACHFRAGE-HOTSPOTS“

Die Errichtung von Lkw-T-LI in Ballungsräumen könnte ebenfalls durch Flächenknappheit erschwert werden. Allerdings kann die Anzahl an Lkw-T-LI in Ballungsräumen – anders als entlang der Fernverkehrsstrecken – durchaus auch eher „knapp gehalten“ werden, was z.B. mit einer erhöhte (Knappheits-)Preise vorsehenden Preissetzung kombiniert werden könnte. Denn in vielen Fällen wird durch eine vorausschauende Planung der Energieaufnahme vermieden werden können, dass Lkw-T-LI (unbedingt) in Ballungsräumen zu nutzen ist. Dies kann allerdings mit erhöhten Kosten, z.B. infolge von „Zeitverlusten“, für die Lkw-Betreiber einhergehen.

In oder in der Nähe von Gewerbegebieten und anderen Nachfrage-Hotspots dürften sich derartige Flächenprobleme eher nicht stellen. Daher dürfte hier die Realisierung von Lkw-T-LI recht unkompliziert möglich sein.

SUBSTITUTIVES VERHÄLTNIS ZU DEN ANDEREN DREI LKW-LI-ARTEN

Zu beachten ist, dass ein substitutives Verhältnis zwischen Lkw-T-LI einerseits und den anderen drei Lkw-LI-Arten (also Lkw-BH-LI sowie Lkw-LSR-LI und Lkw-RA-LI, welche in den folgenden Abschnitten 5 und 6 betrachtet werden) andererseits besteht.²⁹ Allerdings ist das Potential für die Nutzung dieser

²⁸ Für diese Lkw-T-LI „in der Fläche“ wird keine hohe Auslastung erwartet, sondern vielmehr der Effekt, dass sie Optionsnutzen „erzeugt“; vgl. in diesem Kontext BECKERS ET AL. (2019a), wo dies mit Bezug zur Bereitstellung von T-LI für Pkw diskutiert wird. Zu beachten ist, dass der durch T-LI generierte Optionsnutzen in gewisser Hinsicht auch eine „psychologische Komponente“ aufweisen dürfte, der bei Lkw-T-LI deutlich geringer als bei Pkw-T-LI sein dürfte. (U.a.) aus diesem Grund dürfte die Bedeutung von T-LI für Lkw geringer als für Pkw sein.

²⁹ Im Übrigen geht die Nutzung der Lkw-T-LI (im Vergleich zu den anderen drei Lkw-LI-Arten) mit dem Nachteil einher, dass aufgrund ihrer höheren Leistung Batterien schneller altern dürften.

anderen Lkw-LI-Arten bei vielen Einsatzprofilen von 40 t-Lkw eher begrenzt. Dies gilt insbesondere für im internationalen Fernverkehr eingesetzte Fahrzeuge.

40 t-Lkw, die innerhalb von Deutschland zwischen zwei Standorten hin und her pendeln, werden hingegen oftmals 50% oder sogar deutlich mehr ihrer Energie an Ladesäulen aufnehmen, die nicht der Lkw-T-LI zuzurechnen sind (und werden dann stattdessen vielmehr vornehmlich auf Lkw-BH-LI und Lkw-RA-LI zurückgreifen).³⁰ In diesem Kontext dürfte für im innerdeutschen Betrieb eingesetzte 40 t-Lkw Lkw-T-LI eine relative kleine und Lkw-BH-LI eine relativ große Bedeutung aufweisen.

4.1.2 Lkw-T-LI für im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw und Potentiale für Synergieeffekte mit der Pkw-T-LI

Im Nahverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw werden in Abhängigkeit ihres konkreten Einsatzprofils in einem sehr unterschiedlichen Ausmaß Lkw-T-LI nutzen. Viele 7,5 t-Lkw werden nahezu stets Energie an Lkw-BH-LI und ggf. ergänzend an (im späteren Abschnitt 6) Lkw-RA-LI aufnehmen. Andere 7,5 t-Lkw hingegen, die z.B. in dünnbesiedelten Gebieten recht große tägliche Strecken zurücklegen, werden ggf. sogar täglich auf Lkw-T-LI zurückgreifen. Lkw mit derartigen Einsatzprofilen, die im Übrigen in der Praxis eine eher begrenzte Rolle spielen dürften, werden aber gemäß der Vorgaben zu Lenk- und Ruhezeiten dann u.U. ihre Fahrunterbrechungen für die Lkw-T-LI-Nutzung „verwenden“ können. Grundsätzlich wird Lkw-T-LI für 7,5 t-Lkw deutliche geringe Ladeleistungen als für 40 t-Lkw aufweisen können. Gemäß den beispielhaften Kalkulationen in Abschnitt 2.3 würden bereits eine DC-Schnellladesäule mit einer Leistung von 180 kW ausreichend sein, um während einer Fahrunterbrechung von 45 Minuten eine Batterie in einer Größe, die für im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw „passend“ ist, wieder aufzuladen. Dies verweist auf das erhebliche Potential, dass für die Nutzung von Synergieeffekten zwischen der für Pkw einerseits und für 7,5 t-Lkw andererseits vorgesehenen T-LI besteht.

4.2 Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung

Das Wissen hinsichtlich grundsätzlicher Fragen der Kapazitätsbereitstellung bei Lkw-T-LI wird (zumindest in einem „akzeptablen Ausmaß“) zentral auf Seiten der öffentlichen Hand vorliegen.³¹ Bei dezentralen Bereitstellungsaktivitäten in einem wettbewerblichen Marktumfeld hingegen würden Koordinations- und Finanzierungsprobleme auftreten. Insbesondere in der Aufbauphase eines Lkw-T-

³⁰ Vollkommen auf die Lkw-T-LI-Nutzung verzichten können u.U. – die Kalkulation in Abschnitt 2.3 hier erneut aufgreifend – speziell 40 t-Lkw, deren zweimal täglich zu „absolvierende“ „Pendelstrecke“ maximal 360 km beträgt.

³¹ Diese Aussage berücksichtigt die Option, dass die öffentliche Hand Analytiker/innen beauftragt, diesbezügliche Untersuchungen für sie durchzuführen. In diesem Zusammenhang kann auch zunächst auf die (im Kontext der Überlegungen zur Etablierung eines O-Lkw-Systems durchgeführten) Analysen zum Straßengüterverkehr in Deutschland in JÖHRENS ET AL. (2020) und HACKER ET AL. (2020) verwiesen werden. Ferner sei auf analoge Analysen zum Ladeinfrastrukturbedarf im Pkw-Bereich hingewiesen, die von der bzw. im Auftrag der „Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur“ durchgeführt werden, die der im vollständigen Bundeseigentum befindlichen NOW GmbH „angehört“. Im Rahmen dieser Analysen ist im Übrigen ein so genanntes „Standort-Tool“ entwickelt worden, dass die Beurteilung des Ladeinfrastrukturbedarfs in bestimmten Gebieten erlaubt.

LI-Netzwerkes und zur Gewährleistung von Flächendeckung wird ein öffentliches Finanzierungsregime bedeutsam sein. Ggf. sollte dieses öffentliche Finanzierungsregime – Analyseergebnisse bezüglich der Pkw-T-LI in BECKERS ET AL (2019b) aufgreifend – sogar dauerhaft für sämtliche Lkw-T-LI vorgesehen werden, was vertieft zu untersuchen wäre. Insbesondere im Falle von Flächenknappheiten sind Kapazitätsallokationsregeln in ein öffentliches Bereitstellungsregime zu integrieren. Im Rahmen vertiefter Untersuchungen ist zu klären, wie die Aufgaben bei der Fällung öffentlicher Planungsentscheidungen bezüglich der auf Flächendeckung ausgerichteten Bereitstellung von Lkw-T-LI und bezüglich Lkw-T-LI in Ballungsräumen auf die Ebenen des staatlichen Mehrebenensystems (und somit auf Bund und Länder) aufgeteilt werden sollten.

Für die Umsetzung öffentlich gefällter Bereitstellungsentscheidungen bietet es sich grundsätzlich an, umfangreich auf private Akteure und deren (dezentrales) Wissen zurückzugreifen. Speziell im Falle von erwarteten Flächenknappheiten für die Errichtung von Lkw-T-LI bestehen kaum oder sogar keine Auswahlmöglichkeiten bezüglich der Flächen. Dies wird in besonderem Maße für Tank- und Rastanlagen an Autobahnen gelten, deren Betreiber im Übrigen regelmäßig über staatlich vergebene Konzessionen verfügen. Allerdings dürften – entsprechende (gesetzliche und / oder vertragliche) Regelungen vorausgesetzt – auch dann Optionen bestehen, andere („dritte“) Akteure für die Realisierung und den Betrieb der Lkw-T-LI einzubeziehen.

Zu den zu fällenden Bereitstellungsentscheidungen zählt nicht zuletzt auch die Leistung von Ladesäulen für Lkw-T-LI. In diesem Zusammenhang dürfte es sinnvoll sein, in technisch-ökonomischen Analysen (mit einem Nutzen-Kosten-analytischen Ansatz) verschiedene Optionen zur Realisierung von Synergieeffekten zwischen T-LI für Pkw und Lkw verschiedener Größenklassen zu untersuchen. Hierbei sind auch verschiedene Optionen zur Gestaltung von Kapazitätsallokationsregeln zu berücksichtigen. Es ist schwerlich vorstellbar, aber auch nicht auszuschließen, dass derartige Systemausgestaltungsentscheidungen in einer aus gesamtwirtschaftlichen Sicht sinnvollen Weise in einem wettbewerblichen Marktumfeld von privaten, Umsetzungsverantwortung wahrnehmenden Akteuren gefällt werden würden. Dies ist jedoch noch vertieft zu untersuchen.

Im Rahmen bzw. im Kontext öffentlicher Planungs- und Finanzierungsregime sollten im Übrigen Maßnahmen zur Verhinderung der Ausnutzung von Marktmacht vorgesehen werden, die an nachfragestarken Standorten und bei Vorliegen von Flächenknappheiten eine besondere Gefahr darstellen dürfte.³² Auch zur Begrenzung von Transaktionskosten bei der Interaktion zwischen Betreibern von Lkw-T-LI und Lkw-Betreibern sollten gewisse (Standardisierungs-)Vorgaben etabliert werden.

³² Vgl. in diesem Zusammenhang die Analysen in BECKERS ET AL. (2019a) zur Bereitstellung von Pkw-T-LI, bei der analoge Probleme vorliegen (können).

5 Längere Standzeiten- und Ruhepausen-Ladeinfrastruktur („Lkw-LSR-LI“)

5.1 Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung

5.1.1 Lkw-LSR-LI für im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw

GRUNDSÄTZLICHE RATIONALITÄT UND „VERORTUNGSOPTIONEN“

Aufgrund der hohen Zeitopportunitätskosten im Straßengüterverkehr bietet es sich an, dass bei 40 t-Lkw die tägliche Ruhepause (bzw. die tägliche Ruhepause ihrer Fahrer/in) genutzt wird, um die Batterie zu beladen. Sofern sich hierfür nutzbare Ladeinfrastruktur nicht auf dem „eigenen“ Betriebshof befindet, kann diese auch als „Längere Standzeiten- und Ruhepausen-Ladeinfrastruktur“ (Lkw-LSR-LI) bezeichnet werden. Zu beachten ist, dass Lkw-LSR-LI stets erfordert, dass eine Parkfläche für den Lkw zur Verfügung steht. Wie in Abschnitt 2.3 in einer überschlägigen Berechnung aufgezeigt, sind für DC-Säulen relativ niedrige Leistungen von z.B. 100 kW ausreichend. Bei Standzeiten von 12,5 Stunden kann sogar AC-3-44 kW-LI als Lkw-LSR-LI genutzt werden.

Lkw-LSR-LI kann sich auf den Lkw-Parkplätzen auf den Rasthöfen entlang der Fernverkehrsstrecken befinden, wobei zwischen den direkt an den Autobahnen gelegenen Parkplätzen und über Anschlussstellen erreichbare Autohöfe unterschieden werden kann. Ferner kommen insbesondere Gewerbegebiete und die Warteflächen für Lkw auf den Grundstücken von großen Empfängern und Versendern und dabei auch von Logistikzentren als Standorte in Betracht.

AN AUTOBAHNEN UND WEITEREN FERNSTRAßEN SOWIE IN DEREN UNMITTELBARER NÄHE

Parkplätze an Fernverkehrsstrecken im Allgemeinen und an den großen Fernverkehrsachsen im Speziellen, auf denen 40 t-Lkw ihre tägliche Ruhezeit „verbringen“ können, sind sehr knapp. Eine Ausstattung derartiger Parkplätze mit Lkw-LSR-LI dürfte (aufgrund des Platzbedarfs für die Ladesäulen) zu einer Verringerung der zur Verfügung stehenden Stellplätze führen und somit zu einer Verstärkung der Knappheit führen.³³ In diesem Zusammenhang dürfte die Rationalität dafür steigen, Kapazitätsallokationsregime für derartige Stellplätze und für Lkw-SLR-LI einzuführen, die auch eine vorausschauende Kapazitätsreservierung ermöglichen. Zu beachten ist, dass eine (wenn auch nur teilweise) Ausstattung von Stellflächen mit DC-Ladesäulen, die auch sehr hohe Ladeleistungen (von z.B. 720 kW) erlauben, die Nutzung gewisser Synergieeffekte zwischen der Bereitstellung von Lkw-T-LI und Lkw-LSR-LI erlauben würde und in diesem Zusammenhang Flächenknappheiten evtl. zumindest etwas abgemildert werden könnten. Insbesondere im Falle eines allgemeinen Umstiegs

³³ Außerdem ist zu bedenken, dass die Gesamtverfügbarkeit der Stellplätze beeinträchtigt werden könnte, wenn zwei Bereiche geschaffen würden, von denen der eine (nicht mit Ladesäulen ausgestattete) nur von Diesel-Lkw und der andere (mit Ladesäulen ausgestattete) nur von BEV-Lkw (sowie ggf. auch weiteren E-Lkw, die neben einer Batterie über einen Pantografen verfügen) genutzt werden dürfte. Allerdings kann diese Ineffizienz (zumindest weitgehend) vermieden werden, in dem eine relativ hohe (Stellplatz-)Kapazität dem mit Ladesäulen ausgestatteten Bereich „zugestanden“ wird, der im Kontext der Etablierung eines Kapazitätsallokations- / Reservierungssystems u.U. teilweise auch von Diesel-Lkw genutzt werden darf.

von Diesel betriebenen Lkw auf BEV-Lkw dürfte die Rationalität dafür steigen, an Autohöfen, die „nur“ über Anschlussstellen der Autobahnen erreichbar sind, in einem relevanten Ausmaß zusätzliche³⁴ Lkw-Parkplätze zu realisieren, auf denen 40 t-Lkw Lkw-LSR-LI nutzen können.

Bei Lkw-LSR-LI an Fernverkehrsstrecken ist eine Bereitstellung bereits in einer Anfangsphase des Aufbaus eines BEV-Lkw-Systems bedeutsam. Allerdings ist das zwischen Lkw-LSR-LI und den im Fernverkehr eingesetzten 40 t-Lkw bestehende Henne-Ei-Problem nicht so groß wie bei Lkw-T-LI. Deshalb ist ein leicht verzögerter Beginn der Bereitstellung von Lkw-LSR-LI (im Vergleich zur Lkw-T-LI) „verkraftbar“.

IN GEWERBEGEBIETEN SOWIE AUF DEN FLÄCHEN GROßER LADUNGS-VERSENDER UND -EMPFÄNGER

Im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw verbringen ihre täglichen Ruhezeiten oftmals in Gewerbegebieten, in denen sich Versender und Empfänger befinden, die sie ansteuern. Z.T. parken und warten die 40 t-Lkw auch bereits auf dafür vorgesehenen Flächen auf den Grundstücken von großen Empfängern und Versendern und dabei auch von Logistikzentren. Es wird sich grundsätzlich anbieten, auch derartige Lkw-Parkplätze mit Lkw-LSR-LI auszustatten. In welchem Ausmaß dies erfolgen sollte, kann hier jedoch nicht abgeschätzt werden und bedarf entsprechender Untersuchungen.

SONSTIGE STANDORTE

Für ihre täglichen Ruhezeiten werden Lkw ferner verschiedene weitere Standorttypen nutzen. Wenn 40 t-Lkw beispielsweise jenseits der Fernverkehrsstrecken und somit „in der Fläche“ längere Pausen einlegen, werden sie hierfür z.T. größere Tankstellen ansteuern, die insofern als Standort für Lkw-LSR-LI in Betracht kommen. Hinsichtlich des Potentials derartiger Standorte für die Bereitstellung von Lkw-LSR-LI sind ebenfalls vertiefte Analysen zu empfehlen, die die (typischen) Einsatzprofile von 40 t-Lkw berücksichtigen.

5.1.2 Lkw-LSR-LI für im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw und Potentiale für Synergieeffekte mit der Pkw-LI

Für nur im Nah- und Regionalverkehr eingesetzte 7,5 t-Lkw besteht grundsätzlich kein Bedarf zur Nutzung von Lkw-LSR-LI, da diese Fahrzeuge während der Ruhezeiten in aller Regel auf dem Betriebshof stehen. Potentiale für die Realisierung von Synergieeffekte zwischen Pkw-LI und für Lkw-LSR-LI, die von im Fernverkehr eingesetzten Lkw genutzt wird, sind (zumindest auf den ersten Blick) nicht erkennbar.

³⁴ Aufgrund der erwarteten Zunahme des „Lkw-Parkdrucks“ an den Fernverkehrsachsen wird ohnehin eine Erhöhung der Kapazitäten auf Autohöfen zu erwarten bzw. sinnvoll sein.

5.2 Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung

AN AUTOBAHNEN UND WEITEREN FERNSTRAßEN SOWIE IN DEREN UNMITTELBARER NÄHE

Hinsichtlich des grundsätzlichen Kapazitätsbedarfs an Lkw-LSR-LI entlang der Fernverkehrsstrecken wird bei der öffentlichen Hand zentrales Wissen vorliegen bzw. dieses kann in sinnvoller Weise aufgebaut werden.³⁵ Bei direkt an den Autobahnen gelegenen Parkplätzen auf Tankstellen und Rasthöfen dürfte es sich anbieten, im Rahmen öffentlicher Planungsentscheidungen Kapazitätsentscheidungen zur Lkw-LSR-LI (recht direkt) zu fällen. Für die Ladesäulen-Realisierung auf über Anschlussstellen erreichbaren Autohöfen etc. könnte es sinnvoll sein, designte Märkte (mit dem Ziel des „Einsammelns“ dezentralen Wissens) „einzusetzen“, über die Finanzmittel an die Akteure vergeben werden, die Lkw-LSR-LI aufbauen.³⁶ In einem gewissen (im Rahmen vertiefter Untersuchungen genauer festzulegenden) Ausmaß sollten von der öffentlichen Hand Vorgaben etabliert werden, wie bestehende Lkw-LSR-LI-Kapazität allokiert werden sollte.

Der Einsatz mit öffentlichem Zwang erhobener Finanzmittel, wozu in erster Linie Haushaltsmittel zählen, dafür, entlang der Fernverkehrsstrecken Lkw-LSR-LI zu realisieren, dürfte insbesondere in einer Hochlaufphase eines BEV-Lkw-Systems unumgänglich sein. Allerdings sollte bei der genaueren Analyse von möglichen Finanzierungsregimen, die langfristig implementiert und genutzt werden könnten, auch die Option in Betracht gezogen werden, dauerhaft auf ein derartiges öffentliches Finanzierungsregime zurückzugreifen.

IN GEWERBEGEBIETEN, AUF DEN FLÄCHEN GROßER LADUNGS-VERSENDER UND -EMPFÄNGER SOWIE AN SONSTIGEN STANDORTEN

Wo die Errichtung von Lkw-LSR-LI an den weiteren (in Abschnitt 5.1.1 im Einzelnen angeschnittenen) Standorten sinnvoll ist, sollte grundsätzlich unter Einbezug dezentralen Wissens und somit auf wettbewerblichen Märkten entschieden werden. Dies gilt analog für die Frage der Technologieauswahl und Leistungsfestlegung. Inwieweit langfristig eine öffentliche Förderung der Realisierung derartiger Lkw-LSR-LI erforderlich bzw. sinnvoll ist, kann im Rahmen dieses Kurzgutachtens nicht beurteilt werden. In einer Hochlaufphase des BEV-Lkw-Systems dürfte eine derartige Förderung jedoch in jedem Fall sinnvoll sein. Inwieweit ein derartiges öffentliches Engagement mit Vorgaben bezüglich der Nutzungsregeln und der Bepreisung verbunden werden sollte, kann an dieser Stelle nicht weiter untersucht werden. Zumindest wenn Versender und Empfänger sowie ggf. auch Betreiber von Logistik-Hubs als Betreiber von Lkw-LSR-LI agieren, dürften sie kurzfristig bestehende Marktmacht nicht unbedingt (umfangreich) ausnutzen, da sie in einem gewissen Ausmaß an einer

³⁵ Die in Abschnitt 4.2 (und dort konkret in Fußnote 31) vorgestellten Argumente mit Bezug zur Lkw-T-LI werden bei der Lkw-LSR-LI in analoger Weise gültig sein.

³⁶ Vgl. in diesem Zusammenhang HILDEBRANDT (2016), wo mit Bezug zur LI für Pkw diskutiert wird, wie über designte Märkte dezentrales Wissen hinsichtlich einer effizienten Bereitstellung von LI einbezogen werden kann.

(Wertschöpfungs-)Stufen-übergreifend effizienten Gestaltung der Wertschöpfungskette Interesse haben werden.³⁷

FRAGE DER STROMBEREITSTELLUNG

Vertieft zu untersuchen ist zukünftig, inwieweit die Betreiber von Lkw-LSR-LI oder die Lkw-Betreiber für die Strombeschaffung die Verantwortung übernehmen sollten. Eine Zuordnung dieser Aufgabe an die Lkw-Betreiber würde ein „Durchleitungsrecht“ für Strom „durch die Ladeinfrastruktur“ etablieren und könnte in besonderer Weise geeignet sein, Transaktionskosten bei der Nutzung der Lkw-LSR-LI zu begrenzen.³⁸

6 Rampen-Ladeinfrastruktur (“Lkw-RA-LI“)

6.1 Grundsätzlicher Bedarf und wesentliche Ausgestaltungsfragen bezüglich der Bereitstellung

LKW-RA-LI FÜR IM NAH- UND REGIONALVERKEHR EINGESETZTE 7,5 T-LKW

Während des häufig erfolgenden Be- und Entladens an Rampen bei Versendern und Empfängern sowie bei „dazwischen liegenden“ Logistik-Hubs besteht die Option, die Batterien von im Nah- und Regionalverkehr eingesetzten 7,5 t-Lkw zu beladen. Die entsprechende Ladeinfrastruktur kann auch als „Rampen-Ladeinfrastruktur“ (Lkw-RA-LI) bezeichnet werden. Die Versender und Empfänger sowie die Betreiber der „dazwischen liegenden“ Logistik-Hubs können auch als (potentielle) „Rampen-Betreiber“ angesehen werden. Der „Einsatz“ von Lkw-RA-LI kann dazu beitragen, Batteriegrößen (und damit Fahrzeuggewichte und Energieverbräuche) etwas zu reduzieren sowie Bedarf und Standzeiten an Lkw-T-LI zu vermindern.

An den Rampen verschiedener (Rampen-)Betreiber wird eine sehr unterschiedliche Rationalität dafür bestehen, die Kosten für die Bereitstellung von Lkw-RA-LI in Kauf zu nehmen. In diesem Zusammenhang werden die Einsatzprofile der die jeweiligen Rampen nutzenden 7,5 t-Lkw sowie deren dortige Standzeiten eine maßgebliche Rolle spielen.

LKW-RA-LI FÜR IM FERNVERKEHR EINGESETZTE 40 T-LKW

Im Fernverkehr eingesetzte 40 t-Lkw fahren Rampen im Verhältnis zu ihrer Fahrleistung gesehen relativ selten an. Nichtsdestotrotz kann es in bestimmten Konstellationen dennoch sinnvoll sein, Rampen, die überwiegend von derartigen Lkw genutzt werden, mit Lkw-RA-LI auszustatten. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn BEV-Lkw einerseits in hoher Frequenz die Rampe nutzen, aber andererseits auch eine ausreichende Zeitdauer dort „verbringen“, um Batterien in einem relevanten Ausmaß

³⁷ Allerdings werden auch Konstellationen vorliegen, an denen die Betreiber von Lkw-LSR-LI durchaus bestrebt sein werden, Marktmacht umfangreich auszunutzen. Die Gestaltung und Etablierung von Regeln, mit denen einer derartigen Marktmachtausübung entgegengewirkt werden kann, ist als durchaus anspruchsvoll anzusehen; vgl. in diesem Zusammenhang die Analysen in HILDEBRANDT (2016, S. 171 ff) mit Bezug zur LI für Pkw, in denen ähnliche Probleme und Herausforderungen thematisiert werden.

³⁸ Vgl. KREFT (2020) sowie ergänzend auch HILDEBRANDT (2016, S. 177) für grundsätzliche Überlegungen zu dieser Fragestellung mit Bezug zur Pkw-LI.

aufzuladen. Beispielsweise kann dies der Fall sein bei regelmäßigen Verkehren von 40 t-Lkw zwischen zwei Standorten. In Abhängigkeit der Standzeit an den Rampen kann eine Nutzung von DC- oder AC-LI in Betracht gezogen werden.

6.2 Wesentliche institutionelle Ausgestaltungsfragen im Bereich der Bereitstellung und Finanzierung

Entscheidungen über die Realisierung von Lkw-RA-LI sollten vornehmlich durch die Betreiber der einzelnen Rampen gefällt werden, da bei diesen das (dezentrale) Wissen darüber vorliegt, welche Kosten und Nutzen damit einhergehen werden. Bei einem integrierten Agieren bzw. übergreifenden Optimieren der Rampen-Betreiber würden diese die bei ihnen und den ihre Rampen ansteuernden Lkw-Betreibern anfallenden Kosten und Nutzen der Installation von Lkw-RA-LI berücksichtigen. Hiervon wird insbesondere ausgegangen werden können, wenn langfristige Beziehungen zwischen den Lkw- und den Rampen-Betreibern existieren und gemeinsam Optimierungspotentiale entlang der Wertschöpfungskette identifiziert und gehoben werden. Je kurzfristiger diese Beziehungen sind und je mehr Akteure mit Bezug zu einzelnen „Rampen-Standorten“ eingebunden sind, umso mehr dürfte die Realität von diesem „neoklassischen Idealfall“ abweichen. In diesem Zusammenhang kann eine gewisse staatliche Förderung von Lkw-RA-LI (und dies insbesondere in der Phase des E-Lkw-Markthochlaufs) dazu beitragen, mit Transaktionskosten einhergehende Koordinationsprobleme zu reduzieren und Rampen-Betreiber zu Investitionen in Ladesäulen zu animieren. Allerdings ist darauf zu achten, dass ein entsprechendes Förderregime (unter Rückgriff auf institutionenökonomisches Wissen) in einer geeigneten Weise ausgestaltet wird.³⁹

Zu untersuchen ist, inwieweit eine öffentliche Förderung von Lkw-RA-LI damit verbunden werden sollte, dass Vorgaben bezüglich deren Bepreisung etabliert werden. Unter der (neoklassischen) Annahmen der vollständigen Abstraktion von Transaktionskosten ist eine derartige Vorgabe komplett überflüssig. In der Realität können Marktmacht- und Wettbewerbsprobleme auf „hintereinandergeschalteten“ Märkten durchaus existieren und dann ggf. für eine derartige Vorgabe sprechen. Allerdings scheinen letztendlich die Probleme bei der Etablierung und Anwendung einer derartigen Vorgabe (bzw. der hohe dafür erforderliche institutionenökonomische Wissensbedarf) und die wohl eher zu erwartenden begrenzten Probleme hinsichtlich der Ausnutzung von Märkten gegen derartige Vorgaben mit Bezug zu der Bepreisung der Nutzung der Ladesäulen „an sich“ zu sprechen.⁴⁰ Vertieft analysiert werden sollte jedoch zukünftig wiederum noch, inwieweit die Betreiber von Lkw-RA-LI oder die Lkw-Betreiber für die Strombeschaffung die Verantwortung übernehmen sollten.

³⁹ Vgl. in diesem Zusammenhang wiederum die Analysen in HILDEBRANDT (2016, S. 171 ff), in denen analoge Fragestellungen mit Bezug zur LI für Pkw betrachtet sind.

⁴⁰ Dies sollte jedoch noch vertieft und unter Berücksichtigung verschiedener potentieller Typen von Rampen- und damit auch Lkw-RA-LI-Betreibern untersucht werden.

7 Nachgelagerte Überlegungen mit Bezug zu alternativen bzw. ergänzenden Systemausgestaltungsoptionen bei E-Lkw

7.1 Batterie-Wechsel-Systeme

Denkbar wäre es, im Einzelfall Batterie-Wechsel-Stationen anstelle von Lkw-T-LI zu errichten, an denen leere (oder zumindest nur noch geringfügig Energie enthaltende) Batterien gegen vollgeladene Batterien ausgetauscht werden. Die Zeiten für einen derartigen Batterie-Wechsel dürften deutlich unterhalb der Zeit des Vollladens einer Batterie an Lkw-T-LI liegen. Die thematisierten Flächenprobleme bei der Etablierung von Lkw-T-LI, die speziell an einigen Standorten bestehen dürften, könnten vermutlich durch derartige Batterie-Wechsel-Stationen gelöst bzw. zumindest deutlich reduziert werden. Dies wird insbesondere (eine hohe Nachfrage aufweisende) Standorte an den Fernverkehrsstrecken und ggf. auch in Ballungsräumen betreffen, wo es sich in diesem Kontext anbieten dürfte, ein Netzwerk an Batterie-Wechsel-Stationen zu errichten.

Ferner könnte die Bedeutung von Lkw-LSR-LI durch die Etablierung von Batterie-Wechsel-Stationen reduziert werden. Vor oder nach einer täglichen Ruhezeit könnten im Fernverkehr eingesetzte 40 t- (oder sonstige) Lkw ihre Batterien an diesen Stationen austauschen. Lkw-LSR-LI müsste dann nicht mehr von den Lkw genutzt werden. Auch so könnten Platzprobleme gelöst bzw. vermieden werden, die ansonsten bei der Etablierung von Lkw-LSR-LI entlang von Fernverkehrsstrecken wohl auftreten würden.

Es dürfte sich anbieten, in technisch-systemischen und technisch-ökonomischen Analysen die Potentiale von derartigen Batterie-Wechsel-Stationen genauer zu untersuchen.⁴¹ Ergänzend sollten institutionen- (und dabei auch industrie-)ökonomische Analysen bezüglich der Gestaltung institutioneller Maßnahmen zur Realisierung eines Batterie-Wechsel-Systems durchgeführt werden. Dabei ist zu thematisieren, dass die effektive und effiziente Etablierung eines Batterie-Wechsel-Systems voraussetzen dürfte, dass Lösungen für herausfordernde Koordinations- und nicht zuletzt auch Standardisierungserfordernisse zu finden und zu implementieren wären.

7.2 Stromzuführung durch Oberleitungen

Wenn Fernverkehrsachsen mit Oberleitungs-Infrastruktur ausgestattet würden, könnte dort der Bedarf an Lkw-T-LI und Lkw-LSR-LI erheblich reduziert werden, was ebenfalls die thematisierten Flächenprobleme verhindern bzw. deutlich reduzieren würde. Voraussetzung dafür wäre, dass E-Lkw

⁴¹ In diesem Zusammenhang kann auf Analysen und „praktische Erprobungen“ bezüglich Batterie-Wechsel-Systemen in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhaben „Route Charge – Batteriewechselsystem für die Erschließung mittlerer Distanzen bei der Filialbelieferung mit e-NFZ“ verwiesen werden; siehe dazu die Angaben auf der Homepage <http://www.routecharge.de> (abgerufen am 16.02.2021).

nicht nur über eine Batterie sondern auch über einen Pantografen zur Stromaufnahme aus der Oberleitung verfügen.

Die Errichtung und der Betrieb der Oberleitungs-Infrastruktur wird derzeit in Pilotvorhaben getestet und die grundlegende technische Machbarkeit auf öffentlichen Straßen konnte bereits aufgezeigt werden.⁴² Auch die Kosten der Ausstattung eines relevanten Anteils der Autobahnen in Deutschland dürften – wie z.B. in HACKER / JÖHRENS / PLÖTZ (2020) und HACKER ET AL (2020) thematisiert – letztendlich relativ „überschaubar“ sein.⁴³ Dies spricht dafür, die Option der Etablierung eines Netzes von mit Oberleitungs-Infrastruktur ausgestatteten Autobahn- (und ggf. auch einigen weiteren Fernverkehrs-) Strecken ernsthaft in Erwägung zu ziehen sowie die Etablierung eines „Oberleitungs-Batterie-Lkw-Systems“ (im Rahmen von technisch-systemischen und technisch-ökonomischen sowie institutionenökonomischen und juristischen Analysen) genauer zu beleuchten.⁴⁴ Koordinations- und Standardisierungsfragen würden (auch) bei diesem System eine erhebliche Relevanz aufweisen.⁴⁵

Eine flächendeckende Bereitstellung von Lkw-LI und vor allem Lkw-T-LI wäre auch bei Errichtung von Oberleitungs-Infrastruktur an Fernverkehrsachsen unumgänglich.⁴⁶ Diese würde zunächst von mit Pantografen ausgestatteten Lkw genutzt werden, wenn diese jenseits der Fernverkehrsachsen „unterwegs sind“ und Energie aufnehmen müssen. Ferner dürfte es bei (E-)Lkw, deren maximal zulässiges Gesamtgewicht weniger als 12 t beträgt, aufgrund ihrer äußeren Dimensionen und Einsatzprofile nicht erforderlich oder sinnvoll sein, bei diesen einen Pantografen vorzusehen. Diese Lkw würden dann als BEV-Lkw Energie stets an Lkw-LI aufnehmen. In diesem Kontext sollte an Fernverkehrsachsen und in Ballungsräumen in einem erhöhten (und dabei über das für die Erreichung des Ziels der Flächendeckung hinausgehenden) Ausmaß Lkw-T-LI errichtet werden.

⁴² Die mit einem Pantografen ausgestatteten Oberleitungs-Lkw („O-Lkw“) verfügen stets über eine Batterie zur Speicherung von Strom. O-Lkw können in „Oberleitungs-Hybrid-Lkw“ („OH-Lkw“) und die stets den E-Lkw zuzurechnenden „Oberleitungs-Batterie-Lkw“ (OB-Lkw) unterschieden werden. OH-Lkw sind mit einer zweiten Energieträger- bzw. Antriebsoption ausgerüstet, auf die auf (längeren) Strecken zurückgegriffen werden kann, die nicht mit einer Oberleitung ausgestattet sind. Als zweiter Energieträger kommen dabei insbesondere einerseits (grüner) Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe sowie andererseits (nicht klimaneutraler) Diesel in Betracht. Bei OH-Lkw ist vorgesehen, zur Überbrückung kürzerer Abschnitte ohne Oberleitungen Strom einzusetzen, der aus einer kleinen Batterie stammt, die dann beim Fahren „unter der Oberleitung“ wieder aufgeladen werden kann. OB-Lkw hingegen setzen auf längeren Strecken ohne Oberleitungen (stets) Strom ein, der aus größeren Kapazitäten aufweisenden Batterien stammt, die dann entweder beim Fahren unter einer Oberleitung oder während Standzeiten an Lkw-LI aufgeladen werden. In diesem Kurzgutachten wird ein Oberleitungs-Batterie-Lkw-System, das von OB-Lkw genutzt wird, thematisiert, während der Einsatz von OH-Lkw (zumindest implizit) ausgeklammert wird.

⁴³ Vgl. HACKER / JÖHRENS / PLÖTZ (2020) und HACKER ET AL (2020).

⁴⁴ In diesem Zusammenhang kann beispielhaft auf bereits in BECKERS ET AL. (2019b) erfolgte Analysen speziell zur Etablierung eines Förderregimes für mit einem Pantografen ausgestattete E-Lkw verwiesen werden.

⁴⁵ Auch die europäische Einbettung der Etablierung eines derartigen Systems wäre dabei zu berücksichtigen. Da die Energieaufnahme von E-Lkw im Ausland nur über Lkw-LI erfolgen könnte, wäre der dortige Einsatz der Fahrzeuge auch – jedoch in einer mit gewissen Nachteilen einhergehenden Weise – möglich, wenn dort keine Oberleitungs-Infrastruktur sondern „nur“ Lkw-LI und dabei vor allem Lkw-T-LI errichtet werden würde.

⁴⁶ Für die Errichtung von Batterie-Wechsel-Stationen dürfte hingegen keinerlei Rationalität mehr bestehen, wenn ein Oberleitungs-Batterie-Lkw-System etabliert wird und Fernverkehrsstrecken mit Oberleitungsinfrastruktur ausgestattet werden.

8 Übergreifende Schlussfolgerungen

Auch wenn die Analysen in den Abschnitten 3 bis 6 zu den definierten vier Ladeinfrastruktur-Arten auf vereinfachenden Annahmen basiert haben und in diesem Zusammenhang auf umfassenden weiteren Forschungsbedarf zu verweisen gewesen ist, können dennoch wertvolle Schlussfolgerungen zur Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur für Lkw abgeleitet werden. Bei der Errichtung von Lkw-T-LI und Lkw-LSR-LI entlang der Fernverkehrsstrecken und insbesondere der umfangreich vom Straßengüterverkehr genutzten großen Fernverkehrsachsen dürfte – von einem breiten Umstieg von den derzeitigen Diesel-betriebenen Lkw auf BEV-Lkw ausgehend – eine Herausforderung darin bestehen, ausreichende Flächen für die Errichtung der Ladeinfrastruktur und dabei insbesondere die erforderlichen Standflächen für die Lkw zu finden bzw. zu schaffen. In diesem Kontext erklärt sich die Notwendigkeit bzw. weitere Herausforderung, geeignete Kapazitätsallokationsmechanismen für diese Ladeinfrastruktur zu entwickeln. Aufgrund der hohen Effizienz von BEV-Lkw im Vergleich zu mit Wasserstoff betriebenen sowie (in einem nochmal größeren Ausmaß) zu mit (flüssigen oder gasförmigen) synthetischen Kohlenwasserstoffen angetriebenen Lkw und ihrer damit einhergehend aus gesamtsystemischer Sicht bestehenden relativ geringen Kosten zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs dürfte es sich jedoch lohnen anzustreben, diese Herausforderungen zu bewältigen bzw. vorgelagert (zunächst) zu untersuchen, wie diese Herausforderungen bewältigt werden können.

Weitere in diesem Kurzgutachten betrachtete wesentliche technisch-systemische und institutionenökonomische Fragen hinsichtlich der Ausgestaltung eines Lkw-LI-Systems konnten zwar (ebenfalls) nicht genau beantwortet werden, aber erste Einschätzungen zu voraussichtlich sinnvollen Maßnahmen konnten abgegeben werden.⁴⁷ Als eine Fragestellung, die im Rahmen ausführlicher technisch-systemischer und -ökonomischer Analysen genauer zu beleuchten ist, ist die Auswahl der Leistung an DC-Schnellladesäulen im Bereich der Lkw-T-LI einzuordnen. In diesem Zusammenhang sind Fragen der Nutzung von Lkw-T-LI durch unterschiedliche Lkw-Typen sowie der Realisierung von Synergieeffekten mit der Pkw-T-LI zu berücksichtigen. Nicht zuletzt sind Koordinationsfragen zwischen der Wahl der Ladeleistung bei der Lkw-LI und den Lkw zu beachten und dabei auch Standardisierungseffekte zu thematisieren. Eine weitere genauer zu untersuchende und zu klärende Grundsatzfrage ist, welches Potential für AC-3-LI im Lkw-Bereich besteht und bei welchen Lkw-Typen bei Nutzung welcher Lkw-LI-Arten dieses genau vorliegt. Auch in diesem Zusammenhang stellen sich Koordinations- und Standardisierungsfragen. Im Bereich der Lkw-BH-LI und der Lkw-RA-LI können (bzw. könnten) Fragen zur Ladeleistung und zur etwaigen Nutzung von AC-3-LI grundsätzlich in sinnvoller Weise im Einzelfall durch die jeweiligen Betreiber der LI und somit unter Rückgriff auf dezentrales Wissen beantwortet werden. Allerdings können Entscheidungen der Lkw-Hersteller zur (ggf. wahlweise erhältlichen) Ausstattung der Fahrzeuge mit AC-3-Ladetechnologie diesbezügliche Restriktionen etablieren, was auf einen letztendlich ebenfalls bestehenden gewissen Koordinationsbedarf hinweist.

⁴⁷ Diesbezügliche vertiefte Analysen sind also noch durchzuführen.

Ergänzende (über die Bereitstellung und Finanzierung von Lkw-LI sowie die Etablierung eines BEV-Lkw-Systems hinausgehende) Analysen haben zunächst aufgezeigt, dass es denkbar erscheint, Lkw-T-LI teilweise durch Batterie-Wechsel-Stationen zu substituieren. Allerdings würden bei der Etablierung eines Batterie-Wechsel-Stationen-Netzwerks erhebliche Koordinations- und dabei auch Standardisierungsprobleme vorliegen, für die Lösungen zu finden wären. Die aufgezeigten Flächenprobleme bezüglich der Errichtung von Lkw-T-LI und Lkw-LSR-LI an Fernverkehrsachsen könnten nicht nur durch die Realisierung eines Batterie-Wechsel-Stationen-Netzwerks gelöst bzw. vermieden werden, sondern auch durch die Errichtung von Oberleitungs-Infrastruktur an den Fernverkehrsachsen, was die Implementierung eines Oberleitungs-Batterie-Lkw-Systems ermöglichen würde. Nicht zuletzt bezüglich der Etablierung eines derartigen Systems sollten vertiefte technisch-systemische und technisch-ökonomische sowie institutionenökonomische und juristische Analysen durchgeführt werden. Die Umstellung auf E-Lkw in Verbindung mit der Kombination der Errichtung von Lkw-LI und Oberleitungs-Infrastruktur könnten nach aktuellem Wissensstand u.U. ein besonders großes Potential für eine effektive und effiziente Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs aufweisen.

Literaturverzeichnis

- Beckers, T. / Gizzi, F. (2019):** Die Bereitstellung von (Basis-)Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität im öffentlichen Straßenraum – Eine ökonomische Analyse; 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“ erstelltes Arbeitspapier, Online-Veröffentlichung.
- Beckers, T. / Gizzi, F. / Jäkel, K. (2013):** Organisations- und Betreibermodelle für Verkehrstelematikangebote – Untersuchungsansatz sowie beispielhafte Analyse von Verkehrsinformationsdiensten, Studie im Rahmen des von BMVBS, BMWi und BMBF geförderten Projektes simTD, Online-Veröffentlichung.
- BECKERS ET AL. (2019a) – 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, Online-Veröffentlichung.
- BECKERS ET AL. (2019b) – Beckers, T. / Gizzi, F. / Jöhrens, J. / Liedtke, G. (2019):** Zentrale Ausgestaltungsfragen hinsichtlich eines Förderregimes für Oberleitungs-Hybrid-LKW (OH-Lkw) – Eine (institutionen-)ökonomische Analyse, 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 „Roadmap OH-Lkw – Erforschung von Einführungspfaden elektrisch angetriebener schwerer Nutzfahrzeuge und deren Energieversorgung per Oberleitung“ erstellte Kurzstudie, Online-Veröffentlichung.
- BECKERS ET AL. (2015) – Beckers, T. / Gizzi, F. / Kreft, T. / Hildebrandt, J. (2015):** Effiziente Bereitstellung der (öffentlich zugänglichen) Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität in Deutschland – Ökonomische Grundlagen, kurze Beurteilung des Status quo und zentrale Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der europäischen Richtlinie 2014/94/EU, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erstellte Kurzstudie, Online-Veröffentlichung.
- BECKERS ET AL. (2021) – Beckers, T. / Jöhrens, J. / Hermes, G. / Bieschke, N. (2021):** Bereitstellung und Finanzierung von Oberleitungs-Infrastruktur für elektrisch angetriebene Lkw: Identifikation und Einordnung wesentlicher Ausgestaltungsfragen auf Basis (institutionen-)ökonomischer Erkenntnisse, 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“ erstelltes Kurzgutachten, Online-Veröffentlichung.

- Colander, D. (1992):** Retrospective – The Lost Art of Economics, in: The Journal of Economic Perspectives, Vol. 6, No. 3, S. 191-198.
- Colander, D. (2017):** Economists Should Stop Doing it with Models, Working Paper, Online-Veröffentlichung.
- Gizzi, F. (2015):** Implementierung komplexer Systemgüter – Ein methodischer Ansatz für ökonomische Untersuchungen und seine Anwendung auf Verkehrstelematiksysteme für die Straße, Dissertationsschrift, Online-Veröffentlichung
- GÖCKELER ET AL. (2020) – Göckeler, K. / Hacker, F. / Mottschall, M. / Blanck, R. / Görz, W. / Kasten, P. / Bernecker, T. / Heinzlmann, J. (2020):** Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr, Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“, Online-Veröffentlichung.
- HACKER ET AL. (2020) – Hacker, F. / Blanck, R. / Görz, W. / Bernecker, T. / Speiser, J. / Röckle, F. / Schubert, M. / Nebauer, G. (2020):** Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, Endbericht zu dem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhaben „Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“ (StratON), Online-Veröffentlichung.
- Hacker, F. / Jöhrens, J. / Plötz, J. (2020):** Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland – Eine Synthese, Studie im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens „Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland“ (BOLD), Online-Veröffentlichung.
- Hayek, F.A. von (1945):** The Use of Knowledge in Society; in: The American Economic Review, Vol. 35, Nr. 4, S. 519-530.
- Hildebrandt, J. (2016):** Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe – Eine institutionenökonomische Analyse, Dissertationsschrift, Online-Veröffentlichung,
- Jensen, M. C. / Meckling, W. H. (1995):** Specific and General Knowledge, and Organizational Structure; in: Journal of Applied Corporate Finance, Vol. 8, No. 2, S. 4-18.
- Kreft, T. (2020):** Institutionenökonomische Untersuchungen zum Angebot von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, Dissertationsschrift, Online-Veröffentlichung.
- WIETSCHEL ET AL. (2017) – Wietschel, M. / Gnann, T. / Kühn, A. / Plötz, P. / Moll, C. / Speth, D. / Buch, J. / Boßmann, T. / Stütz, S. / Schellert, M. / Rüdiger, D. / Balz, W. / Frik, H. / Waßmuth, V. / Paufler-Mann, D. / Rödl, A. / Schade, W. / Mader, S. (2017):** Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw, Studie erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) Studie im

Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, Online-Veröffentlichung.