



PROFILREGION

MOBILITÄTSSYSTEME
KARLSRUHE

ÖFFENTLICHE LADEINFRASTRUKTUR FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

ERGEBNISSE DER PROFILREGION MOBILITÄTSSYSTEME KARLSRUHE



PROFILREGION

MOBILITÄTSSYSTEME
KARLSRUHE

ÖFFENTLICHE LADEINFRASTRUKTUR FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

ERGEBNISSE DER PROFILREGION MOBILITÄTSSYSTEME KARLSRUHE

AUTOREN

Till Gnann, Patrick Plötz, Joachim Globisch, Uta Schneider,
Elisabeth Dütschke, Simon Funke, Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Patrick Jochem
*Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
(IIP) am KIT*

Michael Heilig und Martin Kagerbauer
Institut für Verkehrswesen (IfV) am KIT

Melanie Reuter-Oppermann
Karlsruhe Service Research Institute (KSRI) am KIT

PROFILREGION MOBILITÄTSSYSTEME KARLSRUHE

Die Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe ist ein Netzwerk der Karlsruher Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Mobilitätsforschung, die gemeinsam in einem Leistungszentrum effiziente, intelligente und integrierte Lösungen zu entwickeln. Den wissenschaftlichen Kern bilden die Gründungspartner Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die in Karlsruhe ansässigen Fraunhofer-Institute ICT, IOSB, ISI und IWM, die Fraunhofer-Projektgruppe Neue Antriebssysteme (NAS), die Hochschule Karlsruhe und das FZI Forschungszentrum Informatik. Weitere Informationen finden sich unter: ► www.profilregion-ka.de



PROFILREGION
MOBILITÄTSSYSTEME
KARLSRUHE

INHALT

- 5 EINLEITUNG UND MOTIVATION
- 6 ARTEN VON LADEINFRASTRUKTUR
- 8 AKZEPTANZ UND ZAHLUNGSBEREITSCHAFT
- 10 LANGSAMLADEN: BEDARF UND NUTZEN
- 12 SCHNELLADEN: BEDARF UND POSITIONIERUNG
- 14 BEDARF LADEINFRASTRUKTUR IN BADEN-WÜRTTEMBERG UND STUTTGART
- 16 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN
- 18 INFRASTRUKTUR FÜR ELEKTRISCHEN STRASSENGÜTERVERKEHR
- 21 FAZIT UND AUSBLICK
- 23 QUELLEN



1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Im Dezember 2015 wurde der Pariser Klimavertrag geschlossen, der eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 bis 2 °C gegenüber 1990 umfasst. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alle Industriesektoren die Treibhausgasemissionen reduzieren. Der Verkehrssektor muss gemäß einer Vielzahl von Studien bis 2050 quasi emissionsfrei sein (UBA 2013, BMUB 2015, BMWi 2014). Für Personenkraftwagen ist Elektromobilität die Lösung zur Erreichung dieser Ziele, die derzeit am vielversprechendsten erscheint. Sie würde auch zu weiteren Vorteilen wie weitgehender lokaler Emissionsfreiheit führen. Jedoch müssen einige Hürden für eine Transition hin zu Elektromobilität genommen werden: Analysen der Nutzerakzeptanz nennen auch heute noch die hohen Anschaffungsausgaben, die begrenzte Reichweite und die fehlende öffentliche Ladeinfrastruktur als wichtige Gründe, die gegen den Kauf eines Elektrofahrzeugs sprechen (Dütschke et al. 2011, BuW 2017). Der Preis und die Reichweite werden maßgeblich durch die Fahrzeugbatterie bestimmt. Allerdings kann die Reichweite auch durch zusätzliche Ladeinfrastruktur erhöht werden. Letzterem Punkt, insbesondere mit Fokus auf öffentliche Ladeinfrastruktur, widmet sich diese Broschüre. Der Infrastrukturaufbau für Elektro-Pkw steht dabei im Zentrum der Untersuchungen, aber auch der Infrastrukturaufbau für Oberleitungs-Lkw wird diskutiert, weil die Dekarbonisierung des Lkw-Sektors derzeit immer stärker in den Fokus der Verkehrs- und Klimapolitik rückt.

Folgende Forschungsfragen werden dabei untersucht:

- **Welche Arten von Infrastruktur gibt es und wie bewerten Nutzer öffentliche Ladeinfrastruktur?**
Diese Fragen widmen sich die Abschnitte 2 und 3.
- **Wie viel öffentliche Ladeinfrastruktur wird benötigt? Und wie viel sollten Unternehmen in Langsam- oder Schnellladesäulen investieren?**
Diese Fragen werden in den Abschnitten 4–6 für Deutschland und die Region Stuttgart untersucht.
- **Welche Auswirkungen und welchen Nutzen hat Ladeinfrastruktur für die Energiewirtschaft?**
Untersuchungen zu dieser Frage widmet sich Abschnitt 7.
- **Welche Lösungen und welche Infrastruktur braucht man im Straßengüterverkehr für Oberleitungs-Lkw als eine energieeffiziente Alternative?**
Dies wird abschließend in Abschnitt 8 untersucht.

Die Nutzung, energiewirtschaftliche und verkehrliche Wirkung sowie der psychologische Wert öffentlicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge wurden im Rahmen des Fraunhofer-Leistungszentrums „Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe“ untersucht. Zentrale Ergebnisse sind in dieser Broschüre zusammengefasst.

2. ARTEN VON LADEINFRASTRUKTUR

In dieser Broschüre werden Fahrzeuge (Pkw) im Individualverkehr, die ganz oder teilweise elektrisch angetrieben sind und über das Stromnetz geladen werden können, als Elektrofahrzeuge bezeichnet (TAB 2013). Im Folgenden werden verschiedene Arten von Ladeinfrastruktur vorgestellt und deren Nutzungsarten diskutiert.

Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge ist jegliche technische Einrichtung zum Laden von Elektrofahrzeugen, das heißt genauer „zur Leitung des Stroms vom Verteilnetz in das Fahrzeug“ (Hildebrandt 2016). Es werden verschiedene Arten von Ladeinfrastruktur und verschiedenen Nutzungen unterschieden. Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge besteht aus Ladesäulen, die einen oder mehrere Ladepunkte umfassen können. Je Ladepunkt kann ein Fahrzeug geladen werden.

Die Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge sind vielfältig und können hinsichtlich einer Vielzahl an Eigenschaften unterschieden werden. In dieser Broschüre wird Ladeinfrastruktur nach der Ladeleistung, nach deren Stellflächeneigentum und der Zugänglichkeit des Ladestandortes sowie ihrer Nutzungsart unterschieden. Im Folgenden stehen kabelgebundene Systeme im Vordergrund der Betrachtung, da induktive Systeme derzeit nur die Ausnahme bilden und unter anderem einen deutlichen Kostennachteil haben.

Differenziert nach der Ladeleistung werden Ladesäulen mit bis zu 22 kW Leistung als Langsamladesäulen und mit über 22 kW als Schnellladesäulen oder Schnellladeinfrastruktur bezeichnet (BMWi 2015). Wird mit Wechselstrom geladen, spricht man von AC-Ladesäulen und bei Gleichstrom von DC-Ladesäulen. Im

Gegensatz zum Laden mit Wechselstrom befindet sich beim Gleichstromladen der Wechselrichter in der Ladestation (und nicht im Fahrzeug), weshalb er größer dimensioniert werden kann und höhere Ladeleistungen erlaubt. Tesla beispielsweise stellt an seinen Schnellladesäulen (Supercharger) bis zu 135 kW Ladeleistung zur Verfügung, was ein Aufladen innerhalb von 30 Minuten für eine Reichweite von bis zu circa 270 Kilometern ermöglicht. Entsprechend würde ein Langsamladen mit maximal 22 kW unter denselben Bedingungen ein Aufladen für circa 45 Kilometern erlauben. Man sollte sich dabei vergegenwärtigen, dass der private Durchschnitts-Pkw zu über 95 Prozent seiner Zeit steht und in der Mehrzahl der Fälle deshalb ein Langsamladen vollkommen ausreichend ist.

Die Art des Zugangs zur Ladeinfrastruktur sowie der Besitz an der Grundfläche, auf dem die Ladeinfrastruktur steht, sind ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal für Ladeinfrastruktur. Dabei ist öffentliche Ladeinfrastruktur öffentlich zugänglich und befindet sich auf Boden, der in öffentlichem Besitz ist. Halböffentliche Ladeinfrastruktur ist öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur auf privatem Grund, während private Ladeinfrastruktur nicht öffentlich zugänglich ist und auf privatem Grund und Boden steht.¹ Abbildung 1 fasst diese Einteilung zusammen. Dabei ist zu beachten, dass „der überwiegende

.....
¹ Was „öffentlich zugänglich“ bedeutet, wird meist nicht näher spezifiziert. Nach der Ladesäulenverordnung ist ein Ladepunkt jedoch öffentlich zugänglich, „wenn er sich entweder im öffentlichen Straßenraum oder auf privatem Grund befindet, wenn dieser von einem unbestimmten oder nur nach allgemeinen Merkmalen bestimmbar Personenkreis tatsächlich betreten und genutzt werden kann“ (BMWi 2015). In dieser Broschüre und in der Übersicht wird dies jedoch in öffentlich (Grund und Zugang öffentlich) und halböffentlich (Grund privat, Zugang öffentlich) differenziert.

Zugang für Nutzer	Eigentum an der Fläche	
	öffentlich	privat
Offen	Öffentlich bewirtschaftetes Straßenland, auch Anwohnerparken in Wohngebieten	Zum Beispiel Bahnhofsvorplatz
Begrenzt offen, zeitlich begrenzt		Zum Beispiel Supermarkt, Tankstellen und andere
Beschränkt bestimmte Nutzergruppen	Zum Beispiel Parkplätze für Lieferanten, Behinderte, Polizei, Feuerwehr, Carsharing-Fahrzeuge etc.	Zum Beispiel Parkgaragen, Hotels
		Firmenparkplätze
Einzelzugang	Zum Beispiel an bestimmte Fahrzeuge / Kennzeichen gebundene Parkerlaubnis	Privater Stellplatz (zum Beispiel Garage, Carport)

öffentlich
 halböffentlich
 privat

Abbildung 1: Beispiele für öffentliche, halböffentliche und private Ladeinfrastruktur (BMVI 2014).

Anteil des Parkraums in öffentlichem Eigentum ist“ (Hildebrandt 2016).

Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge kann man verschiedenen Nutzergruppen und Anwendungsfällen zuordnen. Generell umfasst der deutsche Pkw-Markt drei Nutzergruppen: erstens Privatfahrzeuge, zweitens Flottenfahrzeuge, die nur gewerblich und oft von verschiedenen Personen genutzt werden, und drittens Dienstwagen, die in der Regel sowohl privat als auch dienstlich genutzt werden können, aber auf eine Organisation zugelassen sind. Diese drei Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Anteils an den Neuzulassungen von Fahrzeugen, der mittleren Fahrzeuggröße und ihrer Nutzungsmuster. So stehen Fahrzeuge von Privatnutzern² und Dienstwagennutzern die meiste Zeit zu Hause (50 Prozent der Standzeiten), sowie längere Zeit am Arbeitsplatz (29 Prozent), beim Einkaufen (7 Prozent) oder an anderen Standorten (14 Prozent). Gewerbliche Nutzer stellen ihr Fahrzeug zu 70 Prozent in der Nähe ihres Unternehmens und zu 30 Prozent an wechselnden Standorten ab. Folgende Nutzungsarten von Ladeinfrastruktur ergeben sich dadurch:

- **Laden über Nacht** für Flottenfahrzeuge auf dem Unternehmensparkplatz und für Privat- und Dienstwagennutzer entweder in der heimischen Garage oder in der Öffentlichkeit (so genannte Laternenparker). Hier eignen sich aufgrund der langen Verweildauern und geringeren Kosten Langsamlademöglichkeiten am besten.

- **Laden am Arbeitsplatz** für Privatfahrzeuge und Dienstwagen, was wegen der in der Regel langen Verweilzeit auch mit Langsamlademöglichkeiten zu bewerkstelligen ist.
- **Laden in der Öffentlichkeit**, wenn das Fahrzeug ohnehin in der Öffentlichkeit steht (zum Beispiel beim Einkaufen). Bei diesem Gelegenheitsladen kann sowohl Langsam- als auch Schnellladen zum Einsatz kommen.
- **Zwischenladen** bezeichnet die Unterbrechung eines bestehenden Fahrwegs, um das Fahrzeug unterwegs nachzuladen. Für diesen Nutzungszweck ist das Schnellladen mit sehr hohen Ladeleistungen (> 100 kW) naheliegend, um durch möglichst kurze Fahrtunterbrechung die Reichweite zu erhöhen.

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass Elektrofahrzeuge in den meisten Fällen regelmäßig und einfach über Nacht geladen werden können und das Laden an öffentlicher Ladeinfrastruktur insofern der seltenere Fall ist, der jedoch gerade bei langen Reisen besonders wichtig ist. Der nächste Abschnitt befasst sich mit der Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft für eben diese Lademöglichkeiten.

 Für Details siehe:

► **Hardman et al. (2017): Driving the market for plug-in vehicles – understanding financial purchase incentives**

² Zur besseren Lesbarkeit wird im Text das generische Maskulinum verwendet. Die Aussagen beziehen sich auf Personen beider Geschlechter.

3. AKZEPTANZ UND ZAHLUNGSBEREITSCHAFT

Um den Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur zu verstehen, ist die Perspektive der Nutzer von Elektrofahrzeugen von besonderer Bedeutung. Hierzu erfolgten Analysen zu zwei Teilaspekten: Der erste fokussiert auf Erfahrungen und Empfehlungen von Personen, die schon jetzt ein Elektrofahrzeug fahren, der zweite Teilaspekt beleuchtet die Anforderungen an ein Ladeinfrastruktursystem für Elektromobilität aus Sicht der durchschnittlichen deutschen Autofahrer.

In der ersten Teilstudie wurden Befragungsdaten von über 600 Fahrern von privaten und dienstlichen Elektrofahrzeugen aus den Jahren 2011 bis 2014 verwendet. Es zeigte sich, dass viele der Befragten ihr Elektrofahrzeug häufig am Arbeitsplatz laden, privat genutzte Fahrzeuge auch zu Hause. Knapp ein Drittel (Dienstwagen und private Fahrzeuge) bis knapp die Hälfte (Fahrzeuge in betrieblichen Flotten) nutzen nie öffentliche Lademöglichkeiten, ein Großteil nutzt diese nur selten. Über 80 Prozent der Befragten kennen allerdings mindestens eine öffentliche Ladestation im Umkreis. Sie wünschen sich auch, dass öffentliche Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht: Ein knappes Drittel fände es ideal, wenn eine bis fünf öffentliche Ladestationen innerhalb der Reichweite des Elektrofahrzeugs zur Verfügung stünden. 15 Prozent der Befragten fänden fünf bis zehn Stationen optimal und knapp ein Viertel sehen erst mehr als zehn Ladestationen als genügend an. 15 Prozent sagen jedoch, dass aus ihrer Sicht öffentliche Ladeinfrastruktur nicht notwendig ist. Führt man diese Antworten, also den Bedarf oder Wunsch nach Ladeinfrastruktur, mit der Kenntnis von Ladestationen in ihrer Nähe zusammen, so zeigt sich, dass 50 bis 60 Prozent der Befragten die vorhandene und ihnen bekannte Ladeinfrastruktur (noch) nicht als ausreichend empfinden. Weitere Auswer-

tungen weisen darauf hin, dass sich insbesondere diejenigen, die bisher schon häufiger öffentliche Ladeinfrastruktur nutzen, gerne mehr davon hätten. Gleichzeitig gibt es aber auch eine größere Teilgruppe an Elektrofahrzeugfahrern, die öffentliche Ladeinfrastruktur nutzen, aber (bisher) keinen Bedarf an mehr Lademöglichkeiten hat.

 Für Details siehe:

► **Schneider et al. (in Vorbereitung): Public charging infrastructure for electric vehicles – wishes and reality**

Die zweite im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Teilstudie zu öffentlicher Ladeinfrastruktur stellt die Zahlungsbereitschaft für das Vorhandensein öffentlicher Ladeinfrastruktur in den Mittelpunkt. Dazu erfolgte 2016 eine Befragung von 1.003 Personen, die in Deutschland leben und mindestens einmal pro Woche einen (konventionellen) Pkw nutzen, der zu ihrem Haushalt gehört.

Im Rahmen der Befragung wurden die Studienteilnehmer gebeten, sich vorzustellen, dass sie kürzlich ein Elektrofahrzeug erworben hätten und nun verschiedene Anbieter von öffentlichen Ladestationen miteinander vergleichen. Die Angebote unterschieden sich dabei hinsichtlich Dichte der Ladeinfrastruktur und Ladeleistung (Ladedauer für 100 Kilometer elektrische Reichweite) der Ladepunkte in Städten und entlang des Autobahnnetzes. Zudem variierte auch die Grundgebühr der Angebote. Jeder Befragte bewertete mehrere solcher Angebote



Abbildung 2: Trade-offs zwischen Ladeinfrastruktur und Zahlungsbereitschaft.

auf einer sechsstufigen Skala.³ In einem Einleitungstext wurden den Befragten zudem weitere allgemeine Informationen zu den Rahmenbedingungen der Entscheidungssituation gegeben. Dies umfasste Angaben zur Reichweite des fiktiven Elektrofahrzeugs, Ladekosten und Ladedauer an einer Haushaltssteckdose sowie die nutzungsabhängigen Ladekosten an öffentlichen Ladepunkten (in Euro pro 100 Kilometer elektrischer Reichweite). Die nutzungsabhängigen Ladekosten unterschieden sich nicht zwischen den verschiedenen Anbietern öffentlicher Ladeinfrastruktur.

Ein Beispieltarif mit einer Grundgebühr von zehn Euro pro Monat, einem durchschnittlichen Abstand zwischen Ladepunkten von circa 620 Metern (in der Stadt) bzw. 63 Kilometern (entlang der Autobahn) sowie einer Ladedauer von 55 Minuten für 100 Kilometer elektrische Reichweite wird im Schnitt mit 2,5 bewertet. Diese Bewertung spricht für eine insgesamt eher geringe Attraktivität dieses Beispieltarifs, da sie zwischen den Bewertungsstufen „überwiegend unattraktiv“ (= 2) und „eher unattraktiv“ (= 3) liegt. Hinsichtlich Änderungen dieser Tarifmerkmale lassen sich folgende Punkte festhalten: Insgesamt hat die Ladedauer (sowohl an der Autobahn als auch in Städten) den stärksten Einfluss auf die Bewertung der Angebote. Grundsätzlich gilt, dass eine geringere Grundgebühr zu einer besseren Bewertung der Tarife führt (0,033 Punkte pro Euro weniger Grundgebühr). Die Trade-offs zwischen Grundgebühr und den übrigen Angebotsmerkmalen sind in Abbildung 2 dargestellt.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass auch für einen Beispieltarif mit deutlich besseren Angebotskonditionen (zum Beispiel Ladepunkte alle 250 Meter / 25 Kilometer, zehn Minuten Ladedauer für 100 Kilometer elektrische Reichweite) bei einem durchschnittlichen Befragten keine Bereitschaft zur Zahlung einer Grundgebühr besteht. Jedoch gibt es Nutzergruppen, insbesondere elektromobilitätsaffine Personen, die die Tarifbeispiele besser bewerten als andere und entsprechend eine höhere Zahlungsbereitschaft haben.

Dies steht auch im Einklang mit den Befunden der ersten Teilstudie, dass ein Großteil der heutigen Nutzer von Elektrofahrzeugen sich weitere öffentliche Ladeinfrastruktur wünscht, obwohl diese bislang nicht häufig genutzt wird, wie im folgenden Abschnitt dargelegt wird.

Für Details siehe:

► **Globisch et al. (im Erscheinen): Consumer evaluation of public charging infrastructure for electric vehicles**

³ Bewertungsstufen: 1 = sehr unattraktiv, 2 = überwiegend unattraktiv, 3 = eher unattraktiv, 4 = eher attraktiv, 5 = überwiegend attraktiv, 6 = sehr attraktiv.

4. LANGSAMLADEN: BEDARF UND NUTZEN

Für öffentliche Langsamladeinfrastruktur bestehen zwei Nutzungszwecke: Das Laden über Nacht für sogenannte „Laternenparker“ und das Gelegenheitsladen an Standorten, die aus einem bestimmten Grund angefahren werden (zum Beispiel Einkaufsmöglichkeiten oder Sportverein) und an denen geladen wird, sofern eine freie Lademöglichkeit in der Nähe ist. Dies ist zu unterscheiden vom Zwischenladen zur Reichweitenverlängerung, bei dem lange Fahrten zum Laden unterbrochen werden und die Nutzer insofern eher nicht bereit sind, lange zu warten. Dies stellt den Bedarfsfall für Schnellladesäulen dar, der im anschließenden Kapitel diskutiert wird.

DER VIELZITIERTE LATERNENPARKER

Heutige private Käufer von Elektrofahrzeugen verfügen zumeist über eine einfache Möglichkeit zum regelmäßigen Nachtladen. Dies lässt sich aus der Verfügbarkeit von Garagen oder privaten Stellplätzen von Pkw-Nutzern ableiten (vergleiche Abbildung 3). Bei diesen steht entweder bereits eine Lademöglichkeit über das Stromnetz zur Verfügung oder sie kann zu geringen Kosten installiert werden. In Deutschland ist die Verfügbarkeit von dauerhaften Privatstellplätzen sehr hoch (siehe Abbildung 3). Die Hälfte aller privaten Fahrzeuge ist in kleineren bis mittleren Gemeinden zugelassen. Ihnen steht häufig ein fester Stellplatz zur Verfügung. Daher ergibt sich, dass heute und in den nächsten Jahren ausreichend Heimplatz für Privatnutzer vorhanden sind und sein werden. Ein Teil der Garagenstellplätze befindet sich jedoch in Mehrfamilienhäusern, was die Installation von privaten Ladepunkten erschwert, da zum Beispiel alle Eigentümer zustimmen müssten. In Großstädten hingegen sind

aufgrund der oftmals zu geringen jährlichen Fahrleistung und der vergleichsweise hohen Ladeinfrastrukturkosten weniger private Elektrofahrzeugnutzer zu erwarten. Elektrofahrzeuge sind heute und auch künftig teurer in der Anschaffung und günstiger während der Nutzung. Das bedeutet, dass hohe jährliche Fahrleistungen und günstige Lademöglichkeiten wichtige Kriterien für die wirtschaftliche Nutzung von Elektrofahrzeugen sind.

In Großstädten werden vermutlich eher neue Mobilitätsformen wie Carsharing mit Elektrofahrzeugen oder neue elektromobile Kleinstfahrzeuge einen Zugewinn verzeichnen können. Dies ist auch unter den Aspekten der oftmals großen Platzprobleme in deutschen Großstädten sinnvoll. Hier müssen neue Räume für Fahrradwege, den ÖPNV, Grünflächen und Wohnraum geschaffen werden. Deshalb hätte es einige Vorteile, die Anzahl konventioneller Fahrzeuge, die wenig genutzt werden, zu reduzieren. Weiterhin ist festzuhalten, dass in Städten mit über 100.000 Einwohnern sich nur 25 Prozent des deutschen Pkw-Bestandes befinden (Plötz et al. 2013, Trommer 2014).

Dementsprechend zeigen Simulationsrechnungen bis 2030, dass vornehmlich Nutzer mit Garagen in ländlichen und vorstädtischen Gebieten den Elektrofahrzeugbestand prägen werden (Gnann 2015), da sie häufig auch günstige Fahrprofile für Elektrofahrzeuge aufweisen (das heißt regelmäßige Fahrten unterhalb der elektrischen Fahrzeugreichweite).

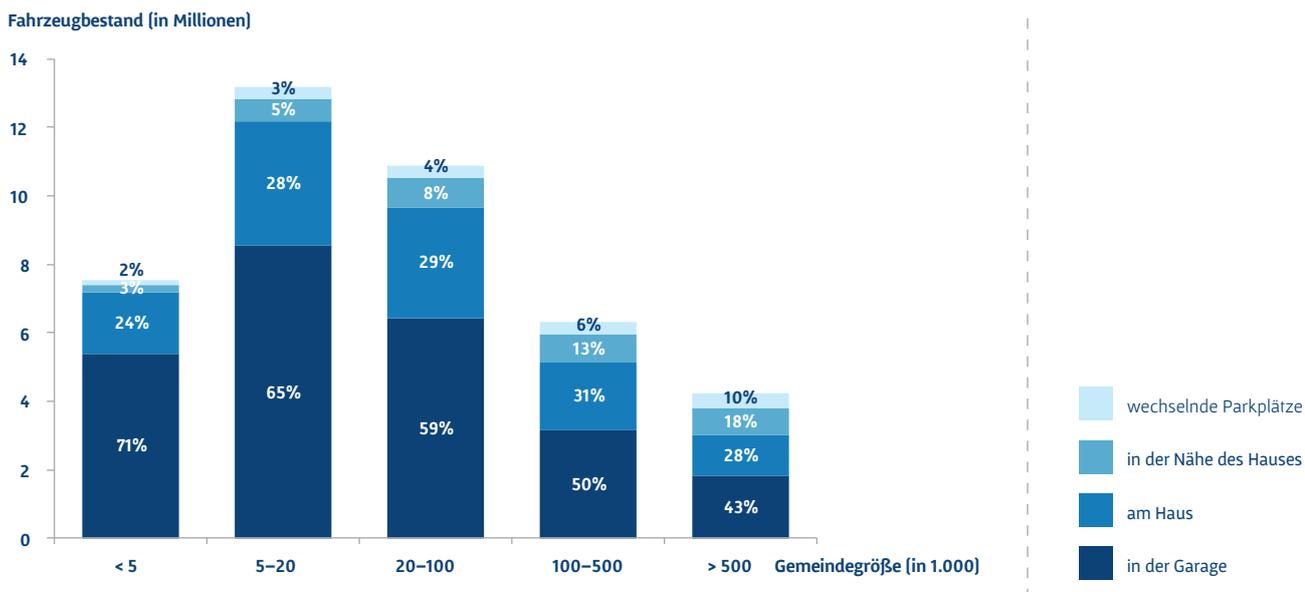


Abbildung 3: Fahrzeugbestand und Anteil der Stellplätze von Fahrzeugen über Nacht nach Gemeindegröße. Eigene Darstellung mit Daten aus MiD 2002. Die Kategorie "unbekannt / keine Angabe" ist aufgrund von Werten unter einem Prozent nicht dargestellt.

GELEGENHEITSLADEN

Simulationsergebnisse mit dem Markthochlauf-Modell ALADIN⁴ zeigen, dass öffentliche Langsamladeinfrastruktur aufgrund der geringen Standzeiten im öffentlichen Bereich und des Ladens an privaten Standorten auch in Zukunft (bis 2030) nur sehr selten genutzt wird. Daher lässt sich – bei einer techno-ökonomischen Betrachtung – kein nennenswerter positiver Effekt auf den Markthochlauf der Elektrofahrzeuge feststellen. Zudem wird es bis zum Jahr 2030 eher nicht möglich sein, diese gewinnbringend zu betreiben (Gnann 2015), es sei denn, es werden relative hohe Preise für das Laden realisiert, welche wiederum die Nutzungshäufigkeit reduzieren würden. Angebote zur kostenlosen oder sehr günstigen Ladung, beispielsweise am Supermarkt, könnten den Markthochlauf aber unterstützen. Diese Ergebnisse stimmen mit Erfahrungen aus Modellprojekten überein, in denen die vorher sowieso schon geringe Nutzung der öffentlichen Ladeinfrastruktur (< fünf Prozent der Ladevorgänge) noch weiter zurückgeht, sobald für sie bezahlt werden muss (Ecotality and INL 2013, Bruce et al. 2012).

KOMBINATION VON LANGSAM- UND SCHNELLADEN

Aufgrund der schwierigen Refinanzierung von Langsamladeinfrastruktur wird zudem die Kombination von Langsam- und Schnellladebedarfen an Schnellladestationen untersucht, die beispielsweise auf einem Autohof in der Nähe einer Autobahn

errichtet würden. Dadurch könnte sowohl Langsamladeinfrastruktur eingespart als auch die Wirtschaftlichkeit von Schnellladeinfrastruktur erhöht werden. Die Ergebnisse, die für vier potenzielle Standorte in der Region Stuttgart berechnet wurden, zeigen jedoch, dass die Kombination der verschiedenen Nachfragen zu einer Erhöhung der maximalen Belastung des Stromnetzes führen würde und die Auslastung nur bedingt besser wäre. Daher wäre nur für gering ausgelastete Schnellladesäulen eine Mitnutzung der Gelegenheitslader sinnvoll.

 Für Details siehe::

► **Gnann et al. (2017a): Combining the demand for interim and opportunity charging – a case study from Stuttgart**

Zusammenfassend gestaltet sich also die Wirtschaftlichkeit von Langsamladesäulen auch auf lange Sicht als schwierig, wenn keine zusätzlichen Grundgebühren (vergleiche Abschnitt 3) oder zusätzliche Geschäftsmodelle zum Einsatz kommen.

⁴ Für Details siehe: ► www.aladin-model.eu

5. SCHNELLADEN: BEDARF UND POSITIONIERUNG

Bei der Nutzung reiner Elektro-Pkw auf Strecken, die deren Reichweite übersteigen, erscheinen Schnellladesäulen derzeit die einzige Option, das Fahrziel in akzeptabler Zeit zu erreichen. Schnellladesäulen sind insofern für eine übliche Nutzung von Elektrofahrzeugen mit (seltenen) Fernfahrten unabdingbar und eine flächendeckende Abdeckung und eine hohe Zuverlässigkeit der Säulen wichtig. Die Bereitschaft für lange Wartezeiten oder die Verschiebung von Lasten zu einem späteren Zeitpunkt durch intelligentes Laden ist in der Regel nicht gegeben. Da diese Art der Fahrten insbesondere auf Autobahnen durchgeführt wird, erscheint eine Fokussierung auf das Autobahnnetz sinnvoll (Jochem et al. 2016).

Beim Auswählen der möglichen Standorte können zwei Perspektiven eingenommen werden. Einerseits erscheint es kundenfreundlich, wenn man an den bestehenden Rasthöfen den Ausbau vornimmt. Dies würde eine hervorragende Verbreitung und gut ausgebaute Infrastruktur in direkter Umgebung der Ladesäule für den Kunden bedeuten. Die circa 400 Rastanlagen in Deutschland würden somit eine nutzerfreundliche Ladeinfrastruktur darstellen. Dies wäre jedoch mit hohen Investitionen verbunden. Auch wenn pro Standort zum Teil nur wenige Ladesäulen notwendig wären, müssten mehr Ladesäulen errichtet werden, um längere Wartezeiten zu vermeiden. Dies würde zu einer geringeren Auslastung der Ladeorte führen. Dieser Gedankengang ist die Grundlage der zweiten Perspektive, welche eine optimale Allokation der Ladesäulen vorsieht, das heißt deutlich weniger Standorte ausbaut. Hierbei werden nur dort Ladesäulen aufgestellt, wo sie zur Abdeckung aller Verkehrsflüsse benötigt werden. Dies führt zu deutlich weniger Ladeorten und damit zu geringeren Wartungskosten sowie höheren Auslastungen.

Es kann jedoch bei Unregelmäßigkeiten auch zu Notsituationen der Elektrofahrzeugfahrer kommen, da die Abstände zwischen Ladeorten deutlich höher sind. Dennoch erscheint dieser Ansatz gut geeignet zu sein, beim Rollout der Ladesäulen zunächst bei wirtschaftlichen Standorten zu beginnen und auch für die Folgeperioden immer ein Benchmark zu haben, mit wie wenigen Ladeorten man das betrachtete Gebiet abdecken kann. So zeigen die durchgeführten Rechnungen beispielsweise, dass bei einer angenommenen Reichweite der E-Pkw von 300 Kilometern bereits 97 Ladeorte im deutschen Autobahnnetz ausreichen würden, um eine vollständige Berücksichtigung aller betrachteten nationalen Wege sicherzustellen (vergleiche Abbildung 4). Ein Nachteil dieses Ansatzes ist aber auch, dass der Stromnetzanschluss an den wenigen Standorten deutlich stärker belastet wird, als beim Ansatz der ersten Perspektive, da pro Standort mehr E-Pkw geladen werden müssen. Dies kann gegebenenfalls lokal zu einem gesteigerten Netzausbaubedarf und entsprechenden Kosten hierfür führen.

 Für Details siehe:

► **Reuter-Oppermann et al. (2017): How many fast charging stations do we need along the German highway network?**

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass ab einem ausreichenden Marktanteil von Elektrofahrzeugen die Auslastung der Schnellladesäulen (Fahrzeuge pro Tag) deutlich höher sein kann als bei Langsamladesäulen, bei denen die E-Pkw in der Regel mehrere Stunden verweilen. Ebenso ist zu erwarten, dass Kun-

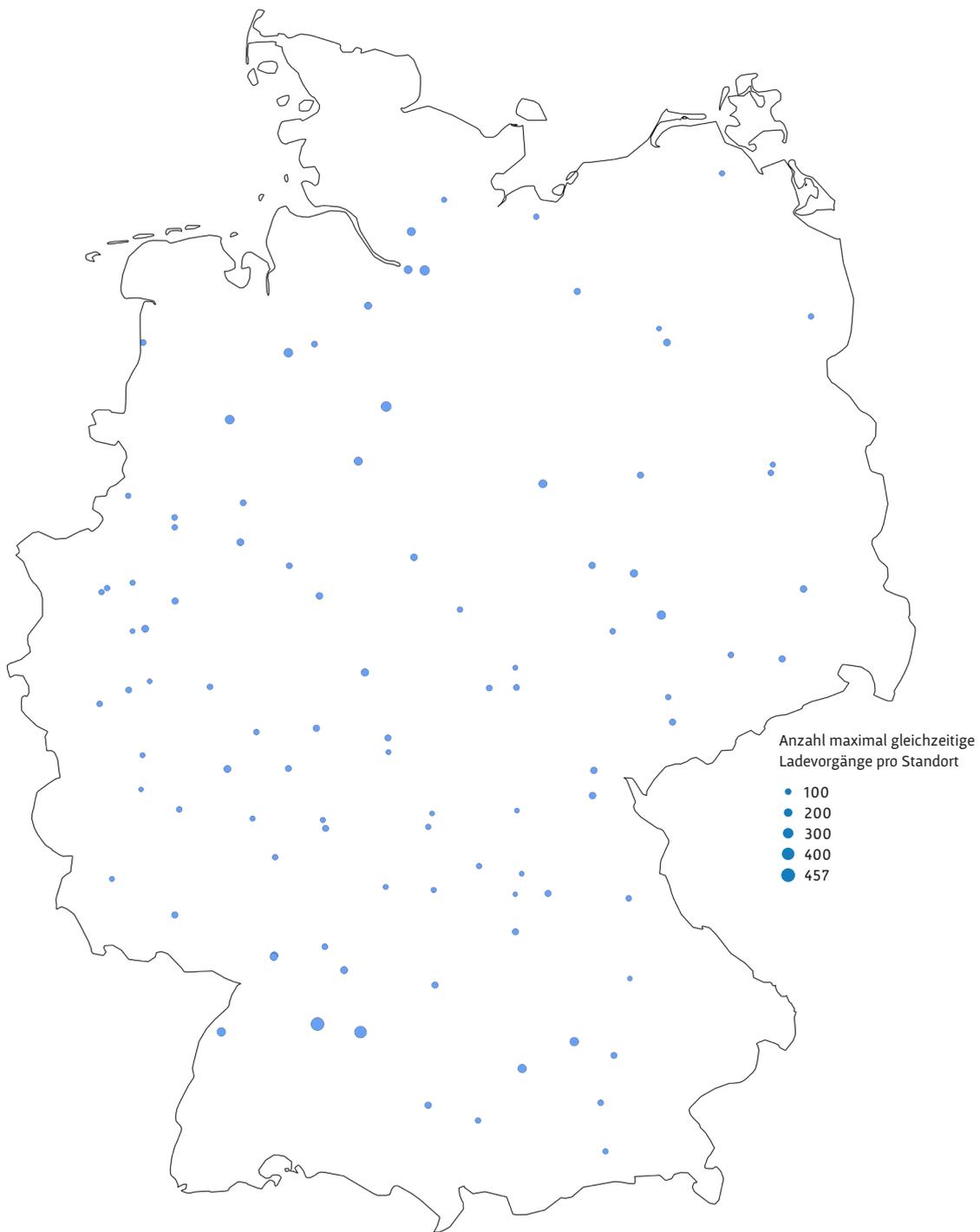


Abbildung 4: Optimale Ladeorte für Schnellladesäulen entlang deutscher Autobahnen für 2030 und einer Reichweite von 300 Kilometern [Reuter-Oppermann et al. 2017]. Die Größe der Kreise entspricht der Anzahl maximal gleichzeitiger Ladevorgänge pro Standort.

den bei Schnellladesäulen eine höhere Zahlungsbereitschaft haben, da kein Zeitverzug erwünscht ist und Alternativen knapp sind (vergleiche Kapitel 3). Daher erscheint die Wirtschaftlichkeit einer Schnellladesäule an der Autobahn deutlich höher zu sein als bei anderen Ladesäulen.

6. BEDARF LADEINFRASTRUKTUR IN BADEN-WÜRTTEMBERG UND STUTTGART

Die Erfahrungen aus den vorangegangenen Abschnitten wurden direkt weiterverwendet, und so wurden in zwei Projekten der Bedarf an Ladeinfrastruktur für das Land Baden-Württemberg (Fraunhofer ISI und KIT-IfV 2016) und die Region Stuttgart (Fraunhofer ISI und KIT-IfV 2017) betrachtet.

LANGSAMLADEINFRASTRUKTUR

Im Rahmen des Gutachtens „Öffentliche Ladeinfrastruktur in Baden-Württemberg“ wurde der Bedarf an Normalladeinfrastruktur für das Land Baden-Württemberg untersucht und abgeschätzt. Die Untersuchung wurde auf Ebene der Gemeinden in Baden-Württemberg durchgeführt. Im nachfrageorientierten wurden Unterschiede zwischen urbanen und ländlichen Bereichen ebenso berücksichtigt, wie die unterschiedlichen siedlungsstrukturellen Eigenschaften der Gemeinden.

Den Kern der Abschätzung des Ladebedarfs in Baden-Württemberg bildet ein Modell, das aus zwei Teilen besteht. Im ersten Teil wird der Ladebedarf aus Fernfahrten untersucht, die größer als die elektrische Fahrzeugreichweite sind. Im zweiten Teil des Modells erfolgt die Abschätzung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr. Zudem liefern Szenarien des E-Fahrzeugbestands und soziodemographischer und räumlicher Daten die für die Modellierung benötigten Inputparameter. Die empirische Grundlage der Nutzungsmuster bilden die Ergebnisse des deutschlandweiten Verkehrsnachfragemodells VALIDATE, welches Pkw-Belastungen für das gesamte deutsche Hauptstraßennetz liefert (PTV Group 2015).

Auf der Grundlage der durchgeführten Analysen erscheint für 200.000 Elektrofahrzeuge in Baden-Württemberg eine öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur sinnvoll, deren Größenordnung bei etwa 6.500 bis 7.000 Ladepunkten liegt. Von dieser Zahl können rund 1.000 halböffentliche Ladepunkte subtrahiert werden, die nicht von der öffentlichen Hand bereitgestellt werden (müssen). Zusätzlich dazu existieren bereits in Baden-Württemberg 1.200 Ladepunkte, sodass zum Stand Ende 2016 noch etwa 4.300 bis 4.800 Ladepunkte zu errichten sind.

SCHNELLLADEINFRASTRUKTUR

Das Projekt „Masterplan Schnellladeinfrastruktur Stuttgart“ im Auftrag des Verbands Region Stuttgart hatte zum Ziel, ein Bewertungstool zu entwickeln, mit dem der Bedarf an Schnellladeinfrastruktur für verschiedene Marktdurchdringungsszenarien abgeschätzt werden kann. Zweck des Bewertungstools ist es, die Anzahl der erforderlichen Ladepunkte je Ladestandort in Abhängigkeit von bestimmten Kriterien (Anzahl BEV, Anzahl Ladevorgänge, Wirtschaftlichkeit) und Strukturmerkmalen zu berechnen. Darüber hinaus bietet das Tool dem Nutzer die Möglichkeit, den Einfluss der einzelnen Kriterien und Strukturmerkmale zu gewichten und so ein individuelles Ranking zu erstellen. Grundlage dieses Masterplans ist eine möglichst gute räumliche Verteilung der Schnellladeinfrastruktur. Es soll sichergestellt sein, dass im Endzustand jeder Einwohner der Region mit dem gleichen Aufwand eine Schnelllademöglichkeit erreichen kann.

Die Bestimmung der potenziellen Standorte erfolgte zunächst unabhängig von wirtschaftlichen Kriterien mittels Erreichbar-

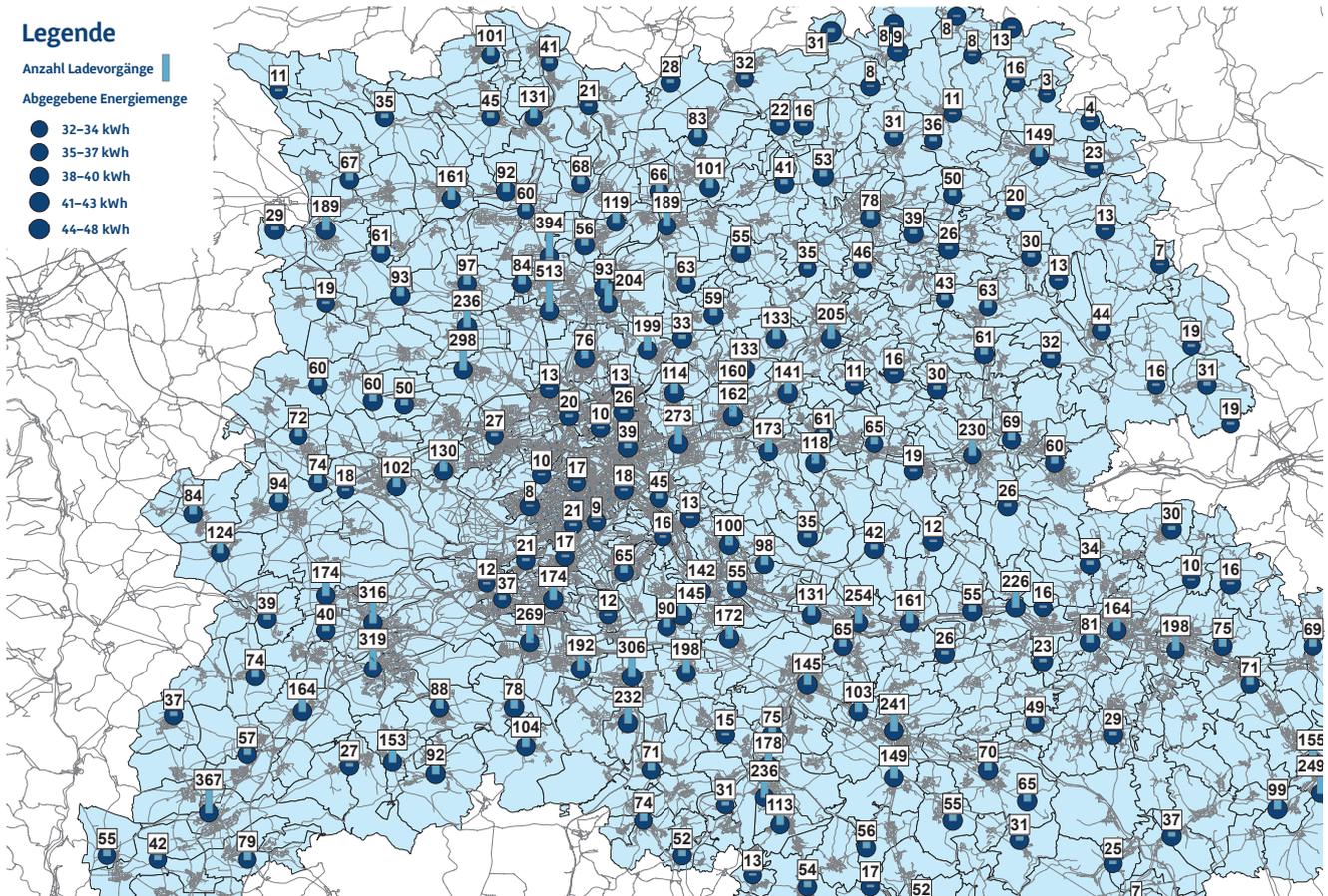


Abbildung 5: Anzahl Ladevorgänge je Standort und Tag in der Region Stuttgart – Szenario: 300.000 BEV – Erreichbarkeit von fünf Minuten.

keitsanalysen in einem GIS-Programm. Um die Erreichbarkeit der Schnellladeinfrastruktur innerhalb fünf Minuten zu gewährleisten, wären für jeden Einwohner 218 Standorte für Schnellladeinfrastruktur in der Region Stuttgart notwendig. Für die Erreichbarkeit innerhalb zehn Minuten wären 58 Schnellladestationen nötig. Gebiete, welche keine Bauaktivität erlauben (zum Beispiel Naturschutzgebiete, Trassen für Schienenverkehre etc.) wurden im Vorfeld bereits als Standorte ausgeschlossen.

Grundlage der Standortbewertung von Schnellladestationen ist die Simulation der Verkehrsnachfrage nach Elektrofahrzeugen in der Region Stuttgart. Es wurden für jedes Erreichbarkeitsszenario 15 Simulationen mit unterschiedlichen Marktdurchdringungsgraden von Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) durchgeführt. Die einzelnen getätigten Ladevorgänge wurden im Anschluss aus den Simulationsergebnissen extrahiert und auf deren Basis die lokale Nachfrage nach Schnellladeinfrastruktur an den definierten Ladeorten mittels Warteschlangenmodellen⁵ abgeleitet.

⁵ Ein Warteschlangensystem ist ein mathematisches Modell zur Analyse des Verhaltens eines Bediensystems, das hauptsächlich charakterisiert ist durch den Ankunftsprozess der Kunden sowie ihrer Bedienzeit (Bhat 2015). Auf Basis stochastischer Prozesse lassen sich Aussagen zu durchschnittlichen Wartezeiten der Kunden oder die Auslastung der Bedienschalter treffen.

Darüber hinaus wird die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Standorte für jedes Modellszenario berechnet. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung der Ein- und Verkaufspreise für Strom sowie geschätzter Baukosten, Netzanschlusskosten, Betriebskosten und einer festen Abschreibungsdauer. Die Ergebnisse dieser Berechnungen fließen ebenfalls in das Bewertungstool ein. Die Ein- und Verkaufspreise können im Bewertungstool verändert werden. Die Ergebnisse der Berechnung können in einer GIS-Umgebung geografisch visualisiert und analysiert werden (siehe Abbildung 5).

Es zeigt sich, dass für die gesamte Region Stuttgart mit ihren 2,7 Millionen Einwohnern 218 Standorte für Schnellladeinfrastruktur ausreichend sind, wenn im normalen Verkehrsfluss von einem beliebigen Ort der Region aus der nächste Schnellladeort in fünf Minuten Fahrzeit erreicht werden soll (siehe die markierten Orte in Abbildung 5). Erhöht die zulässige Fahrzeit auf zehn Minuten reichen sogar nur knapp 60 Ladeorte. Darüber hinaus zeigen die Simulationen, dass bis zu einem Bestand von 200.000 Batteriefahrzeugen in der Region vier Schnellladepunkte pro Standort ausreichen, um die mittlere Wartezeit auf maximal fünf Minuten zu begrenzen.

7. ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN

Aus energiewirtschaftlicher Sicht müssen insbesondere zwei Aspekte bei der Verbreitung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt werden: die Erhöhung der Energienachfrage insgesamt und die Veränderung des Lastgangs (also der Energienachfrage im Zeitverlauf). Die gesamte Energienachfrage für eine Million Elektrofahrzeuge liegt bei etwa zwei bis drei Terawattstunden (TWh) und für sechs Millionen Elektrofahrzeuge (Ziel der Bundesregierung für das Jahr 2030) bei rund 18 TWh (Bundesregierung 2007, Wietschel et al. 2011). Dies ist bei einer Gesamtstromnachfrage von derzeit etwa 550 TWh pro Jahr in Deutschland überschaubar. Die erhöhten Energienachfragen in einzelnen Stunden könnten jedoch die Spitzenlasten erhöhen – insbesondere, wenn sie gleichzeitig mit der Nachfrage anderer Verbraucher geschehen, was einen erheblichen Einfluss auf das Elektrizitätsnetz haben kann.

Im Rahmen der Profilregion Mobilitätssysteme wurde deshalb die mögliche Lastreduktion durch den Einsatz öffentlicher Ladeinfrastruktur untersucht. Dabei geht es sowohl um die Veränderung der Lastkurve mit zusätzlicher öffentlicher Ladeinfrastruktur, als auch um die potenzielle Lastverschiebung mittels intelligenter Ladeinfrastruktur („gesteuertes Laden“). Dabei wird das Laden des Elektrofahrzeugs verzögert oder vorgezogen und ermöglicht so auch die bessere Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeuger. Drei Szenarien zeigen die Unterschiede der Ladeinfrastrukturnutzung:

- Im Szenario S1 können die Nutzer nur Ladeinfrastruktur zuhause (oder gewerbliche Fahrzeuge am Firmenstandort) verwenden. Dort laden sie mit 3,7 kW.⁶
- Im Szenario S2 werden den Privatzutzern zusätzlich Lademöglichkeiten mit 3,7 kW bei der Arbeit zur Verfügung gestellt.
- Das dritte Szenario S3 umfasst außerdem die Möglichkeit, neben privater Ladeinfrastruktur und der am Arbeitsplatz, öffentliche Ladesäulen mit 3,7 kW zu verwenden.

In Abbildung 6 ist oben der Verlauf der unterschiedlichen Lastgänge ohne intelligente Ladung zu sehen, bei denen sich mehrere Dinge ablesen lassen. Zunächst sieht man, dass zwei Kurven in der Grafik für jedes Szenario dargestellt sind: die Privatfahrzeuge in hellblau und die gewerblichen Fahrzeuge in dunkelblau. Deutlich erkennbar ist, dass sich ihr Lastgang klar unterscheidet und eine große Bedeutung hat. Trotzdem werden gewerbliche Fahrzeuge in vielen Studien vernachlässigt, weil keine Daten vorliegen oder diese als nicht relevant erachtet werden.

Für Privatfahrzeuge sieht man im ersten Szenario aber einen hohen Energiebedarf in den Abendstunden, wenn die Nutzer nach Hause fahren. Dieser Lastgang verändert sich mit zusätzlicher Infrastruktur am Arbeitsplatz, wenn nun auch am Morgen geladen werden kann (S2). Keine Veränderung sieht man mit

.....
⁶ Eine Ladeleistung von 3,7 kW stellt die maximale Ladeleistung an (einphasigen) heimischen Anschlüssen dar. Diese Ladeleistung könnte zu einer Überlastung gebräuchlicher Haushaltssteckdosen führen.

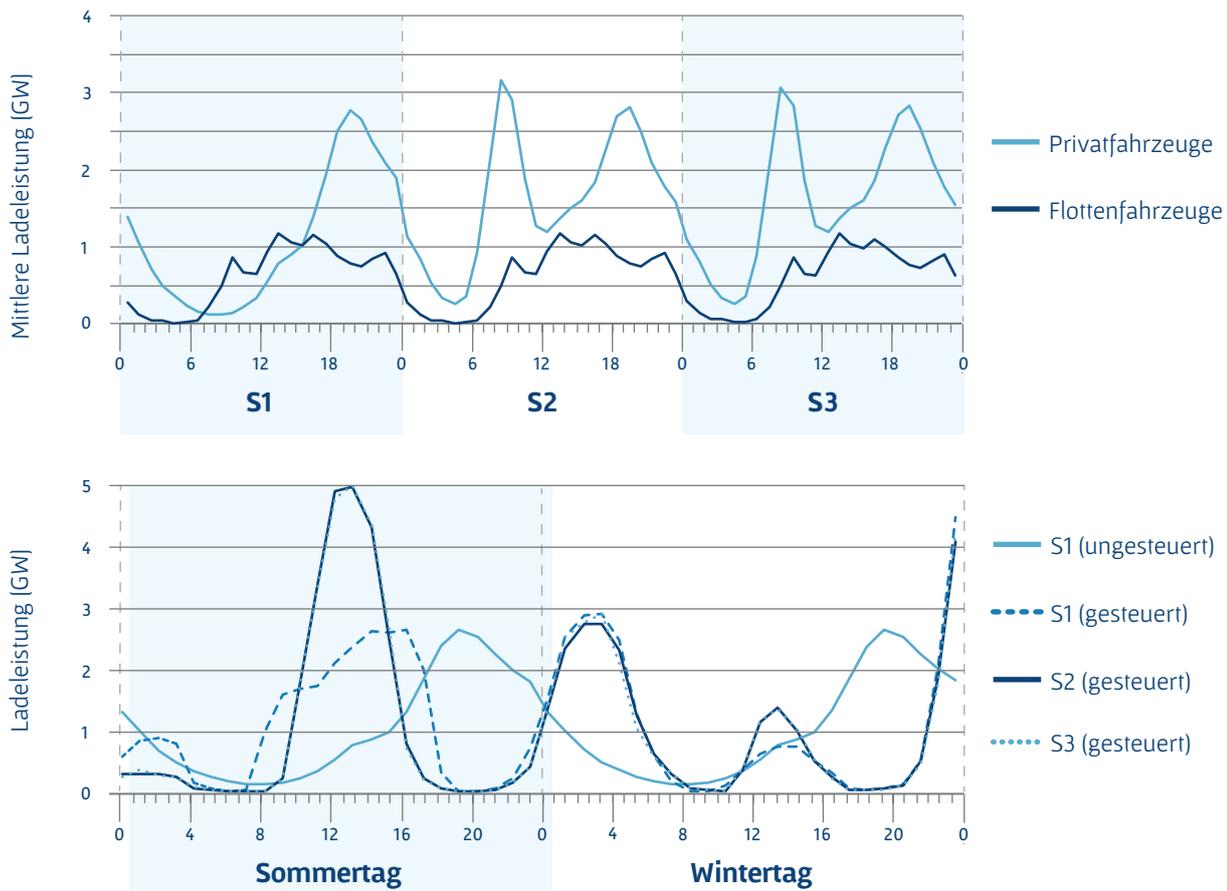


Abbildung 6: Strombedarf von Elektrofahrzeugen an einem Dienstag im Sommer und Winter bei ungesteuertem und gesteuertem Laden (Szenario-Definition im Text) (Michaelis et al. 2017).

zusätzlicher Langsamladeinfrastruktur im öffentlichen Bereich, Für Privatfahrzeuge sieht man im ersten Szenario aber einen hohen Energiebedarf in den Abendstunden, wenn die Nutzer nach Hause fahren. Dieser Lastgang verändert sich mit zusätzlicher Infrastruktur am Arbeitsplatz, wenn nun auch am Morgen geladen werden kann (S2).

Der untere Teil der Grafik zeigt zudem die Verschiebepotenziale bei gesteuertem Laden im Sommer und im Winter. Im Sommer können viele Lasten vom Abend in den solarstromreichen Tag verschoben werden, im Winter in die windreiche Nacht. Damit ist eine zusätzliche Einspeisung erneuerbarer Energien von 25 bis 30 Prozent möglich, jedoch primär durch die Nutzung von Ladeinfrastruktur zuhause und am Arbeitsplatz. Auch bei einer hohen Verfügbarkeit öffentlicher Langsamladeinfrastruktur zeigen die Ergebnisse keine verbesserte Verschiebung oder Einspeisung erneuerbarer Energien.

Die Laststeigerungen, die durch Elektrofahrzeuge verursacht werden, können in manchen Verteilnetzen bereits zu empfindlichen Ausfällen führen, da diese nicht für diese Lastspitzen ausgelegt sind. Auf höheren Spannungsebenen werden diese Lastspitzen durch die bestehende Nachfrage der Industrie eher

ausgeglichen, sodass der Einfluss von Heimladen und „Heim- und Arbeitsplatzladen“ deutlich geringer ist. Bei Schnellladesäulen, die teilweise an der 110 kV-Ebene (Hochspannung) angeschlossen sind, könnte es in ländlichen Netzen jedoch perspektivisch auch zu Engpässen kommen (Jochem et al. 2016).

 Für Details siehe::

► **Michaelis et al. (2017): How much charging infrastructure is needed and how does it affect the load shift potential of electric vehicles?**

8. INFRASTRUKTUR FÜR ELEKTRISCHEN STRASSEN-GÜTERVERKEHR

Trotz sinkender spezifischer Energieverbräuche ist der Gesamtenergieverbrauch im Verkehr aufgrund der deutlich wachsenden Verkehrsleistung in den vergangenen Jahren gestiegen. Eine besondere Herausforderung bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen stellt der schwere Straßengüterverkehr mit über zwölf Tonnen zulässigem Gesamtgewicht dar, dessen Verkehrsleistung bis 2030 noch um weitere 39 Prozent gegenüber 2010 zunehmen soll (EU 2017). Insbesondere in Bereichen mit sehr hohen Fahrleistungen müssen für den schweren Straßengüterverkehr Lösungen gefunden werden, wenn die Energie- und Klimaschutzziele erreicht werden sollen.

Neben der Vermeidung und Verlagerung des Verkehrs von der Straße werden verschiedene technische Optionen zur CO₂-Reduktion im schweren Straßengüterverkehr diskutiert. Hierzu zählen der elektrische Antrieb von Lkw mittels Stromzufuhr aus einer Oberleitung oder Speicherung in Form von Wasserstoff sowie synthetische Kraftstoffe in Form von Gas oder Flüssigkeiten, für deren Herstellung erneuerbare Energien genutzt werden.⁷ Insbesondere Wasserstoff und Oberleitungen sind Technologien, die einer neuen Infrastruktur bedürfen. Im Folgenden wird der Infrastrukturaufbau für Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw) weiter dargestellt.

Wenn Autobahnen oder wichtige Bundesstraßen mit Oberleitungen ausgerüstet werden, könnten Lkw über einen Stromabnehmer während der Fahrt unter der Oberleitung direkt Strom

für den Antrieb beziehen und mittels eines Elektromotors sehr effizient angetrieben werden (Wietschel et al. 2017). Für Strecken abseits der Oberleitung würden die Lkw eine Batterie oder einen zusätzlichen Verbrennungsmotor mitführen. Dieses Konzept wurde bereits mehrere Jahre technisch erprobt, und derzeit laufen Feldversuche für den Bau von Oberleitungen auf Bundesfernstraßen in Schleswig-Holstein, Hessen und Baden-Württemberg. Vorteil des Oberleitungssystems ist die sehr effiziente Nutzung der elektrischen Energie, sowohl im Transport zur Oberleitung über die Stromnetze als auch im Elektromotor zum Antrieb. Ein Nachteil ist der aufwendige Infrastrukturaufbau.

 Für Details siehe:

► [Gnann et al. \(2017b\): How to decarbonise heavy road transport?](#)

► [Gnann et al. \(2017c\): What is the best alternative drive train for heavy road transport?](#)

Verschiedene Studien haben untersucht, welcher Anteil der Güterverkehrsleistung mit welchem Ausbau von Oberleitungen an Autobahnen elektrifiziert werden könnte (Wietschel et al. 2017). Aufgrund der unterschiedlichen Belastung von Autobahnabschnitten zeigt es sich, dass mit einer Elektrifizierung von bereits 3.000 bis 4.000 Kilometern der insgesamt 13.000 Autobahnkilometer in Deutschland schon mehr als die Hälfte der Fahrleistung von schweren Lkw auf der Autobahn elektrisch durchgeführt werden könnte. Darüber hinaus erscheint eine Refinanzierung der Infrastruktur über die Kraftstoffkostensparnisse der Nutzer bei einem Ausbau bis 4.000 km möglich.

.....
⁷ Prinzipiell kämen auch Biokraftstoffe in Frage, aber die meisten Studien gehen davon aus, dass Biokraftstoffe für den Straßenverkehr nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen werden.

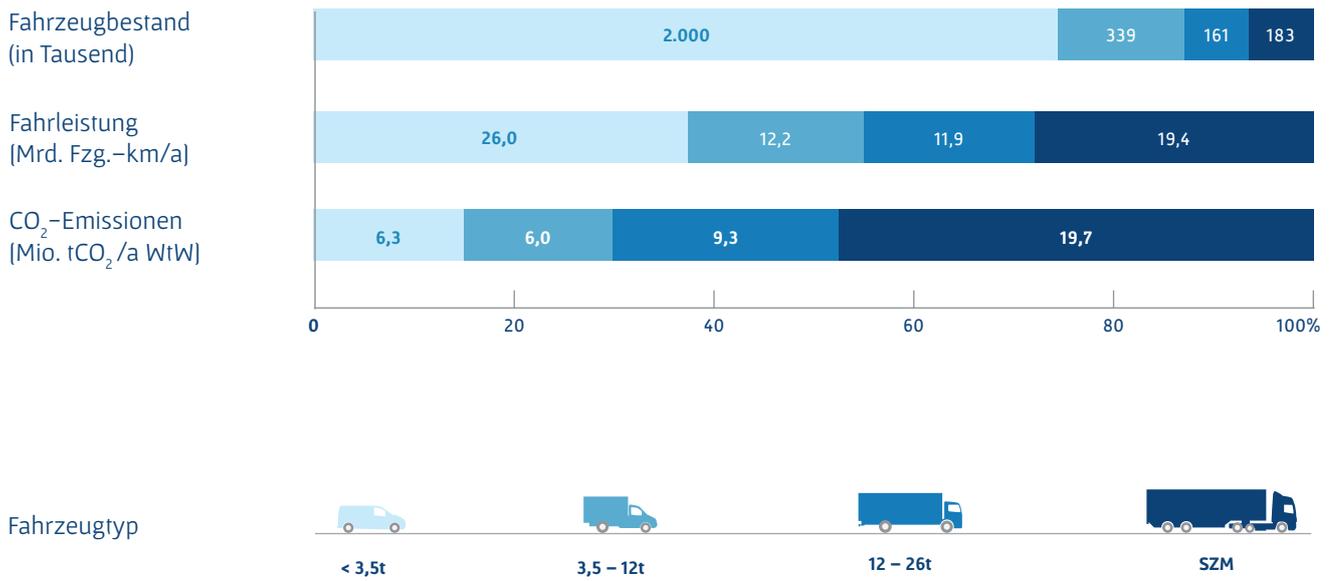


Abbildung 7: Fahrzeugbestand, Fahrleistung und CO₂-Emissionen der Nutzfahrzeuge in Deutschland nach zulässigem Gesamtgewicht (Wietschel et al. 2017).

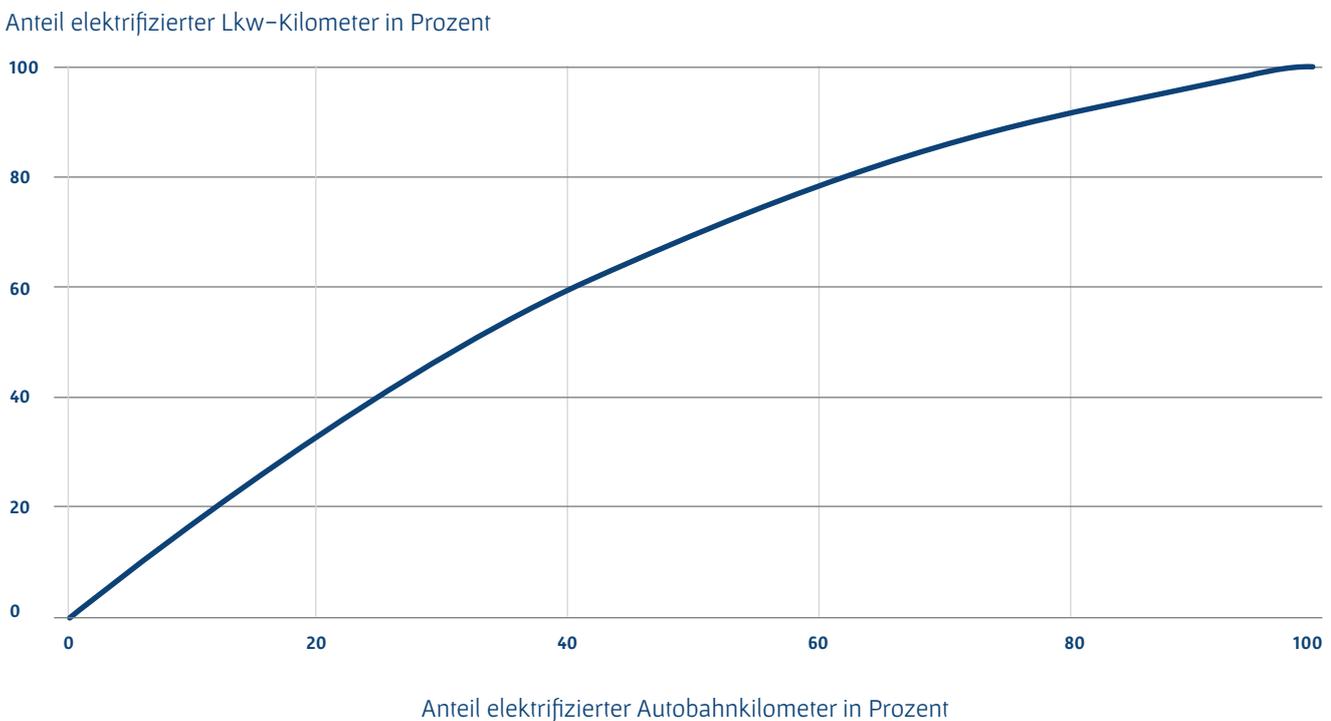


Abbildung 8: Wirkung eines Oberleitungsausbaus auf deutschen Autobahnen (Wietschel et al. 2017).

Dies führt zu einem Investitionsbedarf in die Infrastruktur von circa acht bis zehn Milliarden Euro (Wietschel et al. 2017).

Allerdings stehen einem Oberleitungssystem für Lkw auch einige Hindernisse entgegen. Zum einen wäre ein Ausbau aufgrund des hohen Transitverkehrs in Deutschland deutlich wirkungsvoller, wenn es ein europäisches Oberleitungssystem gäbe. Weiterhin müsste die Infrastruktur vorfinanziert und die Akzeptanz von Anwohnern, Nutzern und Betreibern bezüglich der Infrastruktur untersucht werden. Auch energiewirtschaftliche Fragen stellen sich.

Wie Berechnungen gezeigt haben, lässt sich die Infrastruktur in einem gut ausgelasteten Zustand über Nutzungsgebühren finanzieren. In einem solchen Zustand werden durch die Umlage der Hybrid-Oberleitungs-Infrastruktur auf die gefahrenen Lkw-Kilometer die Vollkosten des Fahrzeugs (englisch *Total Cost of Ownership*) im unteren einstelligen Prozentbereich erhöht. Allerdings zeigt sich für die Phase des Markthochlaufs, dass eine direkte Umlage der gesamten Infrastrukturkosten auf die Nutzer in dieser Phase für die Nutzer wirtschaftlich kaum darstellbar ist. Dies liegt in der Unterauslastung der kapitalintensiven Oberleitungsinfrastruktur begründet, was zu hohen Nutzungsgebühren führen würde.

Somit stellt sich die Frage, wie eine Hybrid-Oberleitungs-Infrastruktur vorfinanziert werden kann. Abhängig von der politischen Priorisierung, rechtlichen Grundlagen sowie der Frage, ob die Initiative vom Staat oder der Privatwirtschaft ausgeht, sind verschiedene Szenarien vorstellbar. Tritt der Staat selbst als Initiator auf, steht ihm grundsätzlich eine Finanzierung aus dem Haushalt (das heißt über Steuereinnahmen) oder über Nutzergebühren offen. Wahrscheinlicher ist die Finanzierung über Nutzergebühren, wobei hier über eine sog. Public-Private-Partnership (PPP) privates Kapital zur Vorfinanzierung eingebunden werden kann. Privatwirtschaftlich initiiert könnte ein Unternehmenskonsortium ähnlich „H2-Mobility“ (Unternehmenskonsortium, das eine flächendeckende Wasserstofftankstelleninfrastruktur erreichen möchte) die Bereitstellung und damit die Vorfinanzierung der Infrastruktur leisten. Der Staat könnte dabei über Fördergelder und der Übernahme von bestimmten Risiken unterstützend eingreifen. Bei der Entwicklung und Bewertung von Finanzierungsmodellen für die Oberleitungsinfrastruktur besteht weiterer Forschungsbedarf.

Weiterhin sind viele Fragen der Vor-Ort-Akzeptanz derzeit weitgehend offen. Ob sich Anwohner an Autobahnen durch eine zusätzliche Oberleitungsinfrastruktur beeinträchtigt fühlen oder die lokale Emissionsminderung von Lärm, Feinstaub, NO_x höher zu gewichten wäre, ist zu untersuchen. Wie darüber hinaus Nutzer von Autobahnen Oberleitungen als Sichtbeeinträchtigung

wahrnehmen oder Lkw-Fahrer das Fahren mit Hybrid-Oberleitungs-Lkw bewerten, zum Beispiel schnellere Beschleunigung und Lärmreduktion im Innenraum, ist wissenschaftlich ebenfalls noch nicht ausreichend beantwortet. Die jetzt in Deutschland anlaufenden Pilotvorhaben sollten deshalb genutzt werden, die Vor-Ort-Akzeptanzfragestellungen umfassend zu analysieren.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht können Hybrid-Oberleitungs-Lkw eine erhebliche Steigerung der Stromnachfrage bedeuten (bei 60.000 Hybrid-Oberleitungs-Lkw um circa +1,6 Prozent (circa +8 TWh/a) und bei 250.000 um circa +7 Prozent (circa +36 TWh/a)) (Wietschel et al. 2017). Die Nachfrage ist regional sehr unterschiedlich und die Last kann sich in einzelnen ländlichen Regionen mit Oberleitungsautobahn um bis zu 30 Prozent erhöhen. Insbesondere an vielbefahrenen Autobahnkreuzen im ländlichen Raum sind hohe zusätzliche Lasten zu erwarten. Da allerdings gerade in ländlichen Regionen der Ausbau von Erneuerbaren oftmals voranschreitet, können sich gegebenenfalls positive Effekte für die Systemintegration der Erneuerbaren ergeben.

Energiewirtschaftlich herausfordernd ist, dass die schweren Lkw eine weitgehend unflexible Nachfrage darstellen und zudem die Nachfrage eher tagsüber und an Werktagen anfällt. Somit erhöht sich die Höchstlast an Werktagen deutlich (+ 2 GW im Jahr 2030 bei 60.000 Hybrid-Oberleitungs-Lkw (Wietschel et al. 2017)). Dies führt dazu, dass an anderer Stelle des Energiesystems neue Flexibilitäten, beispielsweise durch Stromspeicher, Netzausbau oder Lastmanagement, bereitgestellt werden müssen. Bei der energiewirtschaftlichen Systemintegration stellt sich eine Reihe an weiteren Fragen, die zukünftig tiefergehend analysiert werden sollten. Dazu gehört auch autonomes Fahren bei Lkw, welches durch eine mögliche Verlagerung in die Nacht noch einen deutlicheren Einfluss auf den Lastgang und die energiewirtschaftlichen Folgen haben könnte.

Deutlich wird hier also, dass es noch erheblich größeren Forschungsbedarf bezüglich strombetriebener Oberleitungs-Lkw und ihrer Infrastruktur gibt, dem sich in Zukunft gewidmet werden muss.

9. FAZIT UND AUSBLICK

Für den Infrastrukturaufbau für privat genutzte Elektro-Pkw ist zuerst zu betonen, dass privat verfügbare Ladeinfrastruktur am wichtigsten und eine notwendige Bedingung für die großflächige Einführung von Elektro-Pkw ist. Dies gilt für eine Vielzahl von Fahrzeugen, insbesondere aufgrund der hohen Standzeiten an privaten Standorten. Das Laden mit einer geringen Ladeleistung, das auch kostengünstig zu realisieren ist, reicht dann in der Regel auch aus, um die Mobilitätsbedürfnisse abzudecken. Der Ladeort mit der zweithäufigsten Nutzung ist das Laden am Arbeitsplatz. Erst danach ist öffentliche Ladeinfrastruktur als dritthäufigster Stand- und Ladeort zu nennen. Fahrzeughalter ohne Garage oder eigenen Stellplatz sind zwar auf öffentliche Lademöglichkeiten angewiesen, doch diese sind eine Minderheit der Fahrzeugbesitzer. Da sie oftmals in großen Städten wohnen und viele der Nutzer dort eine geringe jährliche Fahrleistung aufweisen, rechnen sich Elektrofahrzeuge für diese Nutzergruppe derzeit und in absehbarer Zukunft auch nicht.

Betrachtet man die Ergebnisse nach zwei Jahren Forschung zum Thema öffentliche Ladeinfrastruktur detaillierter, so lassen sich folgende neue Forschungserkenntnisse zusammenfassen:

Obwohl öffentliche Ladeinfrastruktur aktuell nur gering ausgelastet ist, zeigen empirische Befragungsergebnisse, dass viele E-Fahrzeugnutzer sich weitere öffentliche Ladeinfrastruktur wünschen, insbesondere diese, die bereits regelmäßig öffentliche Ladeinfrastruktur nutzen. Hinsichtlich der Nutzerbewertung von Ladeinfrastrukturangeboten ergibt sich die Ladedauer (sowohl an der Autobahn als auch in Städten) als wichtigster Parameter im Vergleich zur Ladeinfrastrukturdichte und dem dafür zu bezahlenden Preis. Dem Nutzerwunsch nach weiterer

Ladeinfrastruktur steht allerdings gegenüber, dass die meisten Nutzer nur in geringem Umfang bereit sind, für die reine Verfügbarkeit von öffentlicher Ladeinfrastruktur (also ohne die nutzungsabhängige Bezahlung, zum Beispiel in Form einer Grundgebühr) zu bezahlen.

Weiter ist zwischen Langsamladesäulen zum Gelegenheitsladen und Schnellladesäulen zur Reichweitenverlängerung auf langen Strecken zu differenzieren. Basierend auf den dargelegten Forschungsergebnissen ist der Bedarf an öffentlicher Langsamladeinfrastruktur aus techno-ökonomischer Sicht gering und auch Geschäftsmodelle, die nur auf Preisauflagen zum Strompreis basieren, sind als schwer refinanzierbar zu betrachten. Gleichzeitig wünscht sich der Nutzer aber mehr öffentliche Lademöglichkeiten, weshalb deren Verfügbarkeit auch künftig ein zentrales Kriterium für Elektromobilität bleiben könnte. Möglichkeiten, aus diesem Dilemma herauszukommen, könnten deshalb die Generierung zusätzlicher Erlöse (zum Beispiel Werbung an der Ladesäule), der Aufbau von Ladeinfrastruktur an anderen Ladeorten (zu Hause, am Arbeitsplatz) oder eben die Errichtung von Schnellladesäulen sein.

Die genannten Herausforderungen beim Aufbau einer Langsamladeinfrastruktur stellen sich besonders in Großstädten für sogenannte Laternenparker ohne festen Stellplatz. Aufgrund der Parkplatzknappheit kommt hinzu, dass die Elektrofahrzeugnutzer nur geringe Eigenmotivation haben, ihr Fahrzeug nach dem Laden wieder zu entfernen. Wie oben ausgeführt, zählen Laternenparker nicht zu den zu präferierenden Kundengruppen für die Nutzung von Elektrofahrzeugen. In Großstädten sollte deshalb der Fokus darauf liegen, neue Formen der Elektromobilität

über Sharing-Modelle oder Mikroelektromobilität einzuführen. Wenn öffentliche Langsamladeinfrastruktur in Großstädten errichtet werden sollte, dann vermehrt dort, wo Pkw-Nutzer aus anderen Gründen nur eine überschaubare Standzeit haben, wie bei staatlichen Kultur- oder Freizeiteinrichtungen. Halböffentliche Langsamlademöglichkeiten von Privatanbietern wie an großen Einkaufszentren könnten das Angebot in den Städten künftig erweitern.

Bei Schnellladesäulen hingegen wird langfristig eine bessere Refinanzierung erwartet. Die Nutzung wäre bezüglich der Tankzeiten vergleichbar dem heutigen Tanken von konventionellen Fahrzeugen. Auch die Preisaufschläge auf den Strompreis zur Refinanzierung der Schnellladeinfrastruktur bei einer Auslastung von 20 Prozent liegen im geringen Bereich (0,06 bis 0,10 Euro/kWh bei zehn Jahren Amortisationszeit).

Welche Dichte an öffentlicher Schnellladeinfrastruktur sinnvoll wäre, hängt davon ab, ob man einen optimierten Ausbau anhand des Nutzerbedarfs oder einen flächendeckenden Ansatz verfolgt. Bereits heute zeigt sich eine hohe geografische Verfügbarkeit an öffentlicher Ladeinfrastruktur an Tank- und Rast-Stationen der Region Stuttgart, wie auch deutschlandweit (1.200 Ladepunkte in Baden-Württemberg Ende 2016 inklusive Langsamladepunkte). Dieser Ladeinfrastruktur steht eine vergleichsweise geringe Nachfrage gegenüber, weshalb die öffentlichen Ladepunkte mittel- bis langfristig bedarfsorientiert ausgebaut werden sollten. Entlang des deutschen Autobahnnetzes würden bereits 128 Ladeorte ausreichen, um alle betrachteten nationalen Wege mit E-Pkw (mit einer elektrischen Reichweite von 200 km) zu bewältigen. Aber auch bei einer hohen Erreichbarkeit im regionalen Raum ergeben sich vergleichsweise geringe Ladeinfrastrukturbedarfe. Dementsprechend sind beispielsweise für die gesamte Region Stuttgart (2,7 Millionen Einwohnern) bereits 218 Standorte ausreichend, wenn der nächste Schnellladeort in fünf Minuten Fahrzeit erreicht werden soll.

Da die Ladevorgänge im privaten Bereich und am Arbeitsplatz heute und wahrscheinlich auch künftig dominieren, lohnt es sich hierauf aus energiewirtschaftlicher Perspektive zu konzentrieren. Dort sind Möglichkeiten zum intelligenten Laden anzubieten, um die größten Lastverschiebepotenziale (bis zu 30 Prozent zusätzliche Integration erneuerbarer Energie im Jahr 2030 durch Lastverschiebung) zu generieren. Jedoch werden hier auf Verteilnetzebene in Wohngebieten auch die größten Netzengpässe zu erwarten sein, die lokal zu untersuchen sind. Bei öffentlichen Schnellladesäulen könnten Pufferbatterien für Nachfragespitzen, zum Beispiel freitagabends, eine sinnvolle Ergänzung sein. Eine Bewertung derartiger Gesamtkonzepte wird Teil zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Wenn zudem in den kommenden Jahren die Umstellung des Straßengüterverkehrs auf Oberleitungs-Lkw begonnen werden sollte, stehen eine Reihe an neue Fragestellungen hinsichtlich der Infrastruktur im Raum. Hier sind insbesondere Fragen der Vorfinanzierung der Infrastruktur sowie die Vor-Ort-Akzeptanz von Oberleitungen hervorzuheben. Aber auch Fragen, wie mit der neuen Stromnachfrage, die anders als die Stromnachfrage von Elektro-Pkw relativ wenig Potenzial für eine Lastverlagerung bietet, umgegangen werden soll, stehen an.

10. QUELLEN

- Bhat, U. N. (2015):** An introduction to queueing theory. Modeling and analysis in applications. Statistics for industry and technology. Birkhäuser, Boston, MA, USA.
- BMUB (2015):** Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. Bearbeitet vom Öko-Institut, Fraunhofer ISI, H.J. Ziesing. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (Hrsg.). (2014):** Öffentliche Ladeinfrastruktur für Städte, Kommunen und Versorger. Kompendium für den interoperablen und bedarfsgerechten Aufbau von Infrastruktur für Elektrofahrzeuge. Berlin: BMVI und Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW).
- BMWi (Auftraggeber) (2014):** Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos/EWI/GWS.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2015):** Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile (Ladesäulenverordnung – LSV). Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/verordnung-ladeeinrichtungen-elektromobile-kabinnettbeschluss.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 26.10.2017.
- Bruce, I.; Butcher, N.; Fell, C. (2012):** Lessons and Insights from Experience of Electric Vehicles in the Community. In: Proceedings of Electric Vehicle Symposium 26 (EVS 26), Los Angeles, US.
- Bundesregierung (2007):** Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung – Herausforderung und energie- und klimapolitische Zielsetzungen. Online verfügbar unter http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Archiv16/Artikel/2007/12/Anlagen/2007-12-05-zusammenfassung-energiepaket.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 13.02.2017.
- BuW (Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität) (2017):** Schaufenster-Programm Elektromobilität. Abschlussbericht der Begleit- und Wirkungsforschung 2017. Ergebnispapier der Begleit- und Wirkungsforschung Nr. 30. Verfasser: Harendt, B. (DDI); Schumann, D. (bIT); Wirth, M. (VDE). Frankfurt: Deutsches Dialog Institut GmbH.
- Dütschke, E.; Schneider, U.; Sauer, A.; Wietschel, M.; Hoffmann, J.; Domke, S. (2011):** Roadmap zur Kundenakzeptanz. Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen. Fraunhofer ISI, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- Ecotality and INL (2013):** The EV Project Q4 2013 Report. Ecotality Inc. and Idaho National Lab, US.

- EU (European Union) (2017):** 1. EU Reference Scenario 2016 – EU and EU country results. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/euodp/de/data/dataset/energy-modelling/resource/9c3eaead-81b8-4a3d-a23d-4dd4a13f-3c6e>, zuletzt geprüft am 03.08.2017.
- Fraunhofer ISI und KIT-IfV (2017):** Elektromobilität: Masterplan für Schnelllade-Tankstellen. KIT Presseinformation 110/2017. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Karlsruher Institut für Technologie.
- Fraunhofer ISI und KIT-IfV (2016):** Öffentliche Ladeinfrastruktur in Baden-Württemberg. Gutachten im Auftrag der e-mobil BW GmbH. Autoren: Plötz, P.; Kagerbauer, M.; Soyulu, T. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Karlsruher Institut für Technologie.
- Globisch, J.; Plötz, P.; Dütschke, E.; Wietschel, M. (im Erscheinen):** Consumer evaluation of public charging infrastructure for electric vehicles. *Journal of Energy Challenges and Mechanics*.
- Gnann, T. (2015):** Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter <http://publicircafraunhofer.de/documents/N-364342.html>, zuletzt geprüft am 26.10.2017.
- Gnann, T.; Jochem, P.; Reuter-Oppermann, M. (2017a):** Combining the demand for interim and opportunity charging – a case study from Stuttgart. *Proceedings of Electric Vehicle Symposium 30 (EVS30)*, Stuttgart, 09.–11.10.2017.
- Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Wietschel, M. (2017b):** How to decarbonise heavy road transport? In: *ECEEE Summer Study Proceedings 2017*, p. 901–909.
- Gnann, T.; Plötz, P.; Wietschel, M.; Kühn, A. (2017c):** What is the best alternative drive train for heavy road transport? Presented at EVS30, International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, Stuttgart, Germany, 09.–11.10.2017.
- Hardman, S.; Turrentine, T.; Axsen, J.; Garas, D.; Goldberg, S.; Jochem, P.; Karlsson, S.; Nicholas, M.; Plötz, P.; Pontes, J.; Rafa, N.; Sprei, F.; Tal, G. (2017):** Driving the market for plug-in vehicles – understanding financial purchase incentives. International EV Policy Council; Policy Guide. Online verfügbar unter <https://phev.ucdavis.edu/international-ev-policy-council-policy-briefs/>, zuletzt geprüft am 14.10.2017.
- Hildebrandt, J. (2016):** Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe. Dissertation, TU Berlin.
- Jochem, P.; Landes, P.; Reuter-Oppermann, M.; Fichtner, W. (2016):** Workload patterns of fast charging stations along the German Autobahn. *Proceedings of EVS29 Symposium*, 19.–22.06.2016. Montréal, Canada.
- Michaelis, J.; Gnann, T.; Klingler, A. (2017):** How much charging infrastructure is needed and how does it affect the load shift potential of electric vehicles? *Electric Vehicle Symposium 30 (EVS30)*, Stuttgart, 09.–11.10.2017.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; M. Wietschel, M. (2013):** Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Langfassung. Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- PTV Group (2015):** VALIDATE. Verkehrsmodell und Verkehrsdatenlieferant für Deutschland. Version: PTV Group. Online verfügbar unter <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/traffic-data/verkehrsmodelle>; zuletzt geprüft am 30.11.2017.
- Reuter-Oppermann, M.; Funke, S.; Jochem, P.; Graf, F. (2017):** How many fast charging stations do we need along the German highway network? *Proceedings of Electric Vehicle Symposium 30 (EVS30)*. Stuttgart, 09.–11.10.2017.
- Schneider, U.; Gnann, T.; Plötz, P.; Dütschke, E. (in Vorbereitung):** Public charging infrastructure for electric vehicles – wishes and reality.
- TAB (2013):** Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt, Innovationsreport. Berlin: TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag; Autoren: Peters, A.; Doll, C.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A.; Wietschel, M.; Zanker, C.; Kley, F.; Möckel, M.

Trommer S. (2014): Early Adopter der Elektromobilität – Motivation, Nutzungsverhalten und Anforderungen an zukünftige Fahrzeuge. 9. Dortmunder AutoTag, 16.09.2014. Online verfügbar unter http://elib.dlr.de/90774/1/DO_Autotag_Trommer.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2017.

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

Wietschel, M.; Dallinger, D.; Doll, C.; Gnann, T.; Held, M.; Kley, F.; Lerch, C.; Marscheider-Weidemann, F.; Mattes, K.; Peters, A.; Plötz, P.; Schröter, M. (2011): Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität. Studie im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

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

PROJEKTPARTNER

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer-Projektgruppe Neue Antriebssysteme NAS

FZI Forschungszentrum Informatik

Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft

KIT Karlsruher Institut für Technologie



PROFILREGION
MOBILITÄTSSYSTEME
KARLSRUHE



Diese Veröffentlichung ist entstanden im Rahmen der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe, gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst und des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg und als nationales Leistungszentrum aus Mitteln der Fraunhofer-Gesellschaft.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

IMPRESSUM

Herausgeber

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

Projektbetreuung und Kontakt

Dr. Till Gnann
Telefon: +49 721 6809-460
till.gnann@isi.fraunhofer.de

Autoren

Dr. Till Gnann
Dr. Patrick Plötz
Dr. Joachim Globisch
Dr. Uta Schneider
Dr. Elisabeth Dütschke
Simon Funke
Prof. Dr. Martin Wietschel
*Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI*

Priv.-Doz. Dr. Patrick Jochem
*Institut für Industriebetriebslehre und
Industrielle Produktion (IIP) am KIT*

Michael Heilig
Dr. Martin Kagerbauer
Institut für Verkehrswesen (IfV) am KIT

Melanie Reuter-Oppermann
Karlsruhe Service Research Institute (KSRI) am KIT

Lektorat

Bärbel Katz

Gestaltung und Realisation

Jeanette Braun
Sabine Wurst
Mitarbeit: Alice Rensland
*Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI*

Druck

Stober GmbH
Druck und Verlag, Eggenstein

Bestellung

Bärbel Katz
Telefon: +49 721 6809-167
baerbel.katz@isi.fraunhofer.de

Bildnachweise

Cover
Öffentliche Ladestation
shutterstock.com /DavidSch
S. 4
Laden eines Elektrofahrzeugs
shutterstock.com /gutetsk7

Karlsruhe, Dezember 2017

www.profilregion-ka.de

